



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA - DEOLI  
CURSO DE OCEANOGRAFIA

DANIELE OLIVEIRA DE CARVALHO

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO NÍVEL DO MAR NO GOLFÃO  
MARANHENSE: CONTRIBUIÇÕES ASTRONÔMICAS E METEOROLÓGICAS**

São Luís - MA

2025

DANIELE OLIVEIRA DE CARVALHO

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO NÍVEL DO MAR NO GOLFÃO  
MARANHENSE: CONTRIBUIÇÕES ASTRONÔMICAS E METEOROLÓGICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para obtenção do grau de Bacharelado em Oceanografia.

**Orientadora:** Profa. Dra. Cláudia Klose Parise.

São Luís - MA

2025

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

Carvalho, Daniele Oliveira de.

Variação espaço-temporal do nível do mar no Golfão Maranhense: contribuições astronômicas e meteorológicas / Daniele Oliveira de Carvalho. - 2025.  
75 f.

Coorientador(a) 1: Heitor Perotto.

Orientador(a): Cláudia Klose Parise.

Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Maré Astronômica. 2. Maré Meteorológica. 3. Golfão Maranhense. I. Parise, Cláudia Klose. II. Perotto, Heitor. III. Título.

**VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO NÍVEL DO MAR NO GOLFÃO  
MARANHENSE: CONTRIBUIÇÕES ASTRONÔMICAS E METEOROLÓGICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para obtenção do grau de Bacharelado em Oceanografia.

APROVADO EM: 26/02/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.(a). Dr.(a). Cláudia Klose Parise (Orientadora)  
**Departamento de Oceanografia/UFMA**

---

Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho (Membro Interno)  
**Departamento de Oceanografia/UFMA**

---

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves de Lima (Membro Interno)  
**Departamento de Oceanografia/UFMA**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Helena, que sempre fez e continua fazendo tudo para que eu consiga realizar todos os meus sonhos. Agradeço também aos meus irmãos, Carlos Eduardo e Pedro Artur, que sempre me incentivaram e estão sempre à disposição para me ajudar em qualquer situação. Obrigada por serem meus exemplos, amo muito vocês.

Agradeço à minha orientadora, Cláudia Klose Parise, pela paciência, pela empatia e, acima de tudo, por sempre me incentivar e por todo o apoio durante a minha graduação. Fica aqui a minha admiração pela professora e pesquisadora brilhante que você é.

Ao meu coorientador, Heitor Perotto, muito obrigada pelo auxílio e suporte dentro do laboratório.

Aos meus amigos conquistados ao longo da graduação, agradeço pela amizade, pelas conversas, pelos almoços compartilhados, pelas horas de estudos e pelas idas ao bambu rs. Em especial ao Luís, à Manu, à Pétala, ao Raian e ao Cadmo que sempre estiveram ao meu lado desde o primeiro período.

Não poderia esquecer minhas amigas comedoras de mato, Esther, Gava e Maria Clara, que hoje estão, cada uma em um canto do Brasil, mas que sempre estarão no meu coração. Obrigada pela amizade e pelas comidas veganas compartilhadas.

Agradeço também aos colegas do Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (Laclima) – Barbara, Thainá, Bruno, Tayssa, Hugo e Janylle – pelo suporte e pela convivência no dia a dia do laboratório

Por fim, agradeço a oportunidade de estudar na Universidade Federal do Maranhão, uma universidade pública, gratuita e de qualidade.

“É justo que muito custe o que muito vale”

- Santa Teresa d’Ávila.

## RESUMO

O objetivo deste estudo é caracterizar a variação espaço-temporal da maré astronômica e da maré meteorológica no Golfão Maranhense - Brasil, visando dimensionar a contribuição dos efeitos dos fatores meteorológicos sobre o nível do mar na região. O presente trabalho utilizou a análise harmônica, baseada no programa *t-tide* do @Matlab, para identificar as principais componentes da maré astronômica e quantificar sua influência na altura do nível do mar. Após extraídas as componentes astronômicas das séries de dados, foram aplicados filtros nas janelas de 3 a 30 dias para a maré meteorológica e de 2 horas a 3 dias para a maré de vento. A partir dos resultados obtidos foi possível estimar a amplitude das marés astronômica e meteorológica em diferentes pontos do GM e de suas baías, a Baía de São Marcos (BSM) e a Baía de São José (BSJ) e em distintas estações do ano (estação seca *vs.* estação chuvosa). Os resultados mostraram que a dinâmica costeira da área de estudo é regida predominantemente pelos fatores astronômicos (98,8% na estação chuvosa e de 99% na estação seca), com menor contribuição dos efeitos atmosféricos (1,2% na estação chuvosa e de 1% na estação seca). As componentes que se mostraram mais relevantes em função de suas amplitudes foram as semidiurnas  $M_2$ ,  $S_2$  e  $N_2$ , sendo capazes de explicar quase a totalidade da altura da maré astronômica (94,28%). As maiores alturas de maré são encontradas na região mais interna do estuário, especificamente dentro da BSM, onde foi encontrada uma amplitude de maré de 4,02 m. A amplitude máxima da maré meteorológica encontrada na região foi de 0,41 m, durante a estação chuvosa. Para a maior série contínua de dados, foi encontrado um valor de 0,22 m e nas localidades onde foi possível comparar as estações seca e chuvosa entre o mesmo ponto, observou-se que a amplitude da maré meteorológica medida na região foi de 0,10 m no período seco e de 0,16 m no período chuvoso.

**Palavras-chave:** Maré Astronômica, Maré Meteorológica, Golfão Maranhense.

## ABSTRACT

The objective of this study is to characterize the spatiotemporal variation of the astronomical tide and the meteorological tide in the Maranhense Gulf (MG) - Brazil, aiming to assess the contribution of meteorological factors to sea level variation in the region. This study applied harmonic analysis, based on the t-tide program in @Matlab, to identify the main components of the astronomical tide and quantify their influence on sea level height. After extracting the astronomical components from the data series, filters were applied with windows ranging from 3 to 30 days for the meteorological tide and from 2 hours to 3 days for the wind tide. Based on the obtained results, it was possible to estimate the amplitude of both astronomical and meteorological tides at different points in the Maranhense Gulf (MG) and its bays, São Marcos Bay (BSM) and São José Bay (BSJ), as well as in different seasons (dry season vs. rainy season). The results showed that the coastal dynamics of the study area are predominantly governed by astronomical factors (98.8% in the rainy season and 99% in the dry season), with a smaller contribution from atmospheric effects (1.2% in the rainy season and 1% in the dry season). The most relevant tidal components in terms of amplitude were the semidiurnal  $M_2$ ,  $S_2$ , and  $N_2$ , which accounted for nearly the entire height of the astronomical tide (94.28%). The highest tide levels were found in the innermost region of the estuary, specifically within BSM, where a tidal amplitude of 4.02 m was recorded. The maximum amplitude of the meteorological tide in the region was 0.41 m during the rainy season. For the longest continuous data series, a value of 0.22 m was found. In locations where it was possible to compare the dry and rainy seasons at the same point, the meteorological tide amplitude was measured at 0.10 m in the dry season and 0.16 m in the rainy season.

**Keywords:** Astronomical Tide, Meteorological Tide, Maranhense Gulf.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
2.1. Objetivo Geral	4
2.2. Objetivos Específicos	4
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>5</b>
<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>8</b>
4.1. Área de estudo	8
4.2. Dados de nível do mar no Golfão Maranhense	10
4.3. Análise de dados	11
4.3.1 Processamento dos dados de nível do mar	11
4.3.2. Análise harmônica da maré astronômica	13
4.3.3. Análise sazonal do nível não-astronômico	15
4.3.4. Análise espectral do nível do mar	16
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>16</b>
5.1. Regime da maré astronômica no Golfão Maranhense	16
5.2. Nível não-astronômico e influência da maré meteorológica na área de estudo	34
5.3. Variabilidade espectral da altura do nível do mar no Golfão Maranhense	43
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A maré astronômica é uma das forçantes mais importantes na dinâmica costeira das regiões norte do Brasil (Soares, 2013) por gerar diversos processos oceanográficos, como mistura turbulenta, transporte de sedimentos em zonas costeiras e renovação das águas em sistemas estuarinos (Miyao; Harari, 1989). Na Margem Equatorial Brasileira há grande potencial para exploração de energia maremotriz (Fleming, 2012; Czizewski *et al.*, 2020), especialmente os estados do Maranhão, Pará e Amapá, onde se encontram as maiores amplitudes de marés do país (Beardsley *et al.*, 1995; Soares, 2013; Jansen, 2024).

As oscilações da maré astronômica podem ser traduzidas por constituintes harmônicos que compõem a onda de maré de forma determinística, cuja identificação é proposta por análise harmônica, onde cada constituinte contribui em amplitude, período e fase com a maré em um dado momento e região (Brown, 1989). O conhecimento desses constituintes em uma região costeira permite desenvolver estudos da variação do nível médio do mar (Muehe; Neves, 1995) e serve de base para que serviços hidrográficos no Brasil e no mundo proporcionem previsões na forma de tábuas e correntes de marés de forma online e gratuita (Raimundo, 2021). No Brasil, as previsões das marés são fornecidas por diversas instituições, como o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para o estado do Maranhão, além dessas, há também a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), por meio do Núcleo Geoambiental (NuGeo), que disponibiliza tábuas de marés para a região de São Luís.

O nível do mar também pode oscilar devido a efeitos induzidos por fatores e processos meteorológicos e climáticos, como ventos intensos e variações de pressão atmosférica em diferentes escalas, que atuam no oceano de forma aleatória, sendo de difícil previsão (Simó e Filho, 2004). Quando a variação do nível do mar sofre influência desses fatores, é denominado maré meteorológica (Pugh, 1987; Melo, 2017). Estas oscilações, quando simultâneas às marés de sizígia, podem acarretar eventos extremos de sobrelevação do nível do mar, acarretando em danos ambientais, sociais e econômicos. Segundo Melo (2017), a variação do nível do mar causada por efeitos meteorológicos e climáticos é denominada de nível não-astronômico (NnA), podendo ocorrer em diferentes escalas de tempo (de minutos a 1 ano) e geralmente está relacionada aos gradientes de pressão atmosférica em baixos níveis entre o continente e o oceano, que geram ventos constantes e paralelos à linha de costa e induzem maior transporte de Ekman transversal à praia (gerando marés meteorológicas positivas ou negativas) e as variações do ciclo diário dos ventos em superfície (gerando a

brisa marítima e continental). Logo, o NnA, ao contrário da maré astronômica, não é de fácil previsão.

Para calcular o NnA a partir de dados de nível do mar medidos por um marégrafo, é necessário subtrair a série temporal da maré prevista do nível real observado (Melo, 2017; Pugh, 1987). Isso gerará valores positivos (sobre-elevações) e negativos (rebaixamento), originados por forças não-astronômicas. Segundo Melo (2017), os períodos da banda do NnA variam de 2 horas a 1 ano, sendo dividido em 3 sub-bandas: a banda sazonal (com períodos menores que 1 ano e maiores que 30 dias), a banda da maré meteorológica (com períodos de 30 a 3 dias) e a banda da maré de vento (entre 3 dias e 2 horas). O estudo mostra que o nível do mar na costa brasileira, em escalas menores, é influenciado por diversos fatores, com destaque para o efeito das tempestades (ou *storm surges*) e dos ventos. A maré meteorológica é definida como a variação do nível do mar causada por fatores atmosféricos, como variações de pressão atmosférica e ventos constantes, além de efeitos de acumulação por ondas, ocasionando sobre-elevações e abaixamentos de nível (Melo, 2017). Já a maré de vento é formada por dois fenômenos principais: o empilhamento por vento (*wind set-up*) que ocorre quando o vento empurra a água em direção à costa, elevando o nível do mar e; o abaixamento por vento (*wind set-down*) que provoca um rebaixamento do nível do mar quando o vento sopra em direção oposta. Esses efeitos estão associados a variações de nível do mar em frequências de 0,33 a 12 cpd., equivalentes a períodos de 3 dias a 2 horas.

De acordo com Almeida et al. (2009), valores positivos de maré meteorológica (ou sobre-elevação do nível do mar) podem causar diversos prejuízos, como erosão costeira, inundação e destruição de estruturas de engenharias humanas, como estruturas portuárias. Já valores negativos de maré meteorológica (ou rebaixamento de nível do mar) também podem vir a causar problemas, como o encalhe de embarcações quando se navega em águas restritas. Ambos os problemas são passíveis de ocorrer no litoral maranhense. Logo, o conhecimento sobre o comportamento da maré astronômica e meteorológica neste ambiente costeiro é essencial para o seu correto gerenciamento, visando garantir a navegação segura em águas rasas, condicionar o acesso a canais e regiões portuárias, aprimorar a previsibilidade de eventos erosivos de inundações (Pugh, 1987; Simó e Filho, 2004; Bento et al., 2006) e/ou realizar obras de proteção costeira em praias oceânicas e estuarinas.

Com uma das maiores variações de marés astronômicas no mundo e a terceira maior do Brasil (Figura 1), a costa do Maranhão, com seu litoral de mais de 640 km de extensão, possui características que a tornam uma fonte promissora para exploração de energia oceânica

renovável. Com localidades no Golfão Maranhense apresentando variações médias de 6 m de altura, fica atrás apenas do Igarapé do Inferno, na Ilha de Maracá no Amapá, com variações de até 11 m (Vellozo e Alves, 2004). Somado a isso, apresenta uma das correntes de maré mais intensas do litoral brasileiro (da ordem de  $2,15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Czizeweski et al., 2020).

O Golfão Maranhense é uma feição geomorfológica que apresenta um grande e complexo sistema estuarino formado por duas baías principais: São Marcos e São José (El-Robrini *et al.*, 2006; Ab'Saber, 1960). Apesar da grande influência das marés na dinâmica costeira e na vida das comunidades tradicionais em áreas litorâneas, o litoral maranhense é particularmente carente de estudos acerca desse fenômeno quando comparado a outras regiões brasileiras (Jansen, 2024), a exemplo do litoral da região sudeste, onde as características dos principais componentes das marés e de sua propagação na plataforma já foram amplamente estudadas (Harari; Camargo, 1994).

Ao analisar a literatura disponível, entende-se que os estudos sobre a maré e outros fenômenos oceanográficos que ocorrem no Golfão Maranhense ficam limitados a regiões muito específicas, normalmente onde há dados existentes e publicamente disponíveis. No litoral do Maranhão, estudos sobre o comportamento da maré astronômica se concentram na Baía de São Marcos (BSM), possivelmente porque essa é a região com um maior número de fontes de dados disponíveis sobre o fenômeno (9 no total). Além da importância social, ambiental e econômica da BSM para a região, que possui uma diversidade de ecossistemas, como os manguezais, onde ocorre o extrativismo de camarão e caranguejo, áreas utilizadas para aquicultura e praias que fomentam o turismo (Andrade *et al.*, 2009). Conta também com um grande complexo portuário, essencial para as atividades portuárias e de navegação costeira. No entanto, há apenas alguns trabalhos focados na Baía de São José (BSJ), como o de Jansen (2024), que ao analisar a propagação da maré astronômica no Golfão Maranhense mostrou que há uma defasagem de fase da maré de 36 min, para a maré alta, entre a BSJ e a BSM. As distintas bases de dados de nível do mar disponíveis para a BSM apresentam séries de dados medidos em diferentes pontos, alguns mais *inshore* e outros mais *offshore*, e com coberturas temporais variáveis, cobrindo alguns meses e/ou vários anos. Jansen (2024), ao analisar o comportamento da maré astronômica para o Golfão Maranhense no período de maio de 2022, encontrou uma maré meteorológica de 0,0008 m para a BSM e de 0,075 m para a BSJ. O mês de maio integra a estação chuvosa da região (Março-Abril-Maio), quando os ventos alísios atuantes são menos intensos (Barreto et al., 2018).

A hipótese deste estudo é que, analisando-se todas as séries temporais de nível do mar existentes e disponíveis publicamente para a BSM, para diferentes locais e meses do ano, poder-se-á encontrar valores que comprovem uma maior atuação de fatores meteorológicos (brisas, ventos, gradientes de pressão atmosférica e ciclo sazonal) e oceanográficos na região, especialmente para o período de maior atuação dos ventos alísios na região (Setembro-Outubro-Novembro).

Entender o comportamento espacial da maré é fundamental para se prever com maior acurácia as variações no nível do mar, já que a propagação da onda de maré no Golfão Maranhense é profundamente influenciada pela geometria particular das BSM e BSJ (Czizewski *et al.*, 2020), caracterizadas por estreitos e rasos canais que alteram o comprimento de onda, a velocidade, a amplitude e o período das ondas que, conjuntamente com as condições meteorológicas e hidrodinâmicas do local, podem alterar a altura do nível do mar na região. Neste sentido, o presente estudo visa avaliar se há variações sazonais e espaciais no comportamento do nível do mar e das marés meteorológicas que se propagam no Golfão Maranhense, utilizando a totalidade dos dados observacionais (secundários) de nível do mar existentes e publicamente disponíveis atualmente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo é caracterizar a variação espaço-temporal da maré astronômica e da maré meteorológica no Golfão Maranhense, visando dimensionar a contribuição dos efeitos dos fatores meteorológicos sobre o nível do mar na região.

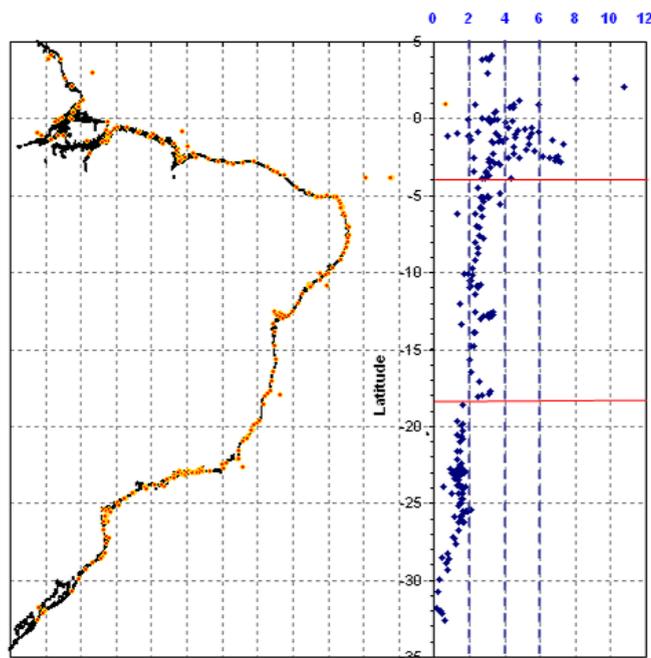
### **2.2. Objetivos Específicos**

- Analisar as variações nas amplitudes das componentes harmônicas da maré astronômica em distintos pontos do Golfão Maranhense, na Baía de São Marcos e na Baía de São José;
- Estimar a amplitude da maré meteorológica em diferentes pontos do Golfão Maranhense e sua variabilidade sazonal (estação seca *vs* estação chuvosa).

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

As marés são movimentos oscilatórios periódicos do nível do mar, previsíveis, gerados pela interação das forças gravitacionais entre a Lua-Terra e Sol-Terra e pelo efeito da rotação do sistema Terra-Lua (Franco, 2009). São geradas em mar profundo e propagam-se para águas rasas como ondas longas, fazendo com que o nível do mar suba e desça periodicamente ao longo da costa (NOAA, 2024). Segundo a Lei da Gravitação Universal de Newton, a força gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa. Esse fenômeno é gerado pelo movimento do sistema Terra-Lua em torno de um centro de massa comum, sendo constante tanto em direção quanto em intensidade. A força gravitacional entre a Terra-Lua varia conforme a posição relativa da Lua em relação a um ponto na superfície terrestre. Como a Lua está mais próxima da Terra, exerce a maior influência sobre as marés, seguida pelo Sol, que, embora esteja mais distante, tem grande impacto dada sua massa considerável (Miguens, 1996).

De acordo com Vellozo e Alves (2004), ao longo da costa brasileira, a amplitude da maré diminui à medida que a latitude aumenta, como ilustrado na Figura 1. Quanto à amplitude, as marés astronômicas variam entre o regime de: micromaré ( $< 2\text{m}$ ), mesomaré ( $2 < 4\text{m}$ ), macromaré ( $> 4\text{m}$ ) e hipermaré ( $> 6\text{m}$ ).



**Figura 1** - Amplitudes das marés na costa brasileira. As linhas verticais pontilhadas (azul) representam os limites de micro, meso e macromaré. As linhas horizontais (vermelhas) destacam as faixas de latitude onde ocorrem as principais mudanças. Fonte: extraído de Vellozo e Alves (2004).

Em relação aos estudos desenvolvidos a respeito desse fenômeno no Golfão Maranhense, na década de 70, Moraes (1977) realizou estudo sobre evolução sedimentar na área adjacente ao Porto de Itaqui, onde utilizou de informações de correntes e marés para descrever os processos sedimentológicos que atuam na praia do Boqueirão.

Mesquita e Harari (1989) realizaram uma revisão dos estudos de nível do mar no Brasil, observando que as medições do nível do mar na costa brasileira tiveram início em 1905 pelas autoridades do porto do Rio de Janeiro e foram sendo realizadas desde então por diversas outras instituições. Esse estudo foi revisado em Mesquita & Harari (2011) e foi constatado que existem poucas séries longas e de monitoramentos contínuos de maré, que são importantes para avaliação da variabilidade do nível médio do mar nas escalas diárias, mensais e de longo termo.

Nos anos 90, Pereira e Harari (1995) publicaram resultados de uma modelagem numérica tridimensional na Plataforma Continental do Maranhão, visando simular diferentes cenários de circulação induzida por efeitos astronômicos e por condições meteorológicas. Os resultados demonstraram que o componente dominante que rege a hidrodinâmica da Baía de São Marcos é a maré de origem astronômica, que atinge a máxima amplitude de 2,30 m, dentro da baía. Os efeitos meteorológicos na circulação geral são pequenos, os autores encontraram elevações máximas de 0,05 m no verão, enquanto no inverno os valores máximos foram de 0,03 m.

Garcia (2007) implementou um modelo hidrodinâmico para caracterizar a circulação de correntes de maré e do transporte de sedimentos na área portuária de São Luís - MA. A autora usou o banco de dados da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e dentre os pontos selecionados para a simulação, o maior valor de amplitude observado foi de 6,5 m na maré de sizígia.

No litoral do Maranhão, um tema que vem ganhando destaque é sobre a avaliação do potencial de extração de energia renovável das marés. Ferreira e Estefen (2009) analisaram o aproveitamento da energia das marés da barragem existente no Bacanga, para viabilizar a implantação de uma usina maremotriz, os autores encontraram uma maré de 6,5 m no terminal da Ponta da Madeira e apontaram o local como favorável para geração de energia.

Neto *et al.* (2012) também apresentam uma metodologia para estimar o potencial energético de uma usina maremotriz no estuário do Bacanga. Neste trabalho, os autores

analisam diferentes cenários geração de forma a maximizar a produção total de energia da usina. Através da modelagem das componentes da maré, os autores concluíram que, apesar de algumas restrições ao pleno aproveitamento do potencial energético do estuário, é viável um aproveitamento significativo, em parte devido à grande eficiência dos equipamentos eletromecânicos disponíveis no mercado e a proximidade a grandes centros de consumo, com destaque ao campus da Universidade Federal do Maranhão.

González-Gorbeña *et al.* (2015), usando da modelagem matemática e do mecanismo de conversão de energia hidrocínética, identificou áreas potenciais para geração de energia elétrica a partir das correntes de maré da Baía de São Marcos. Três zonas para exploração de energia das marés foram identificadas, sendo duas delas localizadas entre as ilhas do Cajual e do Medo, na proximidade do complexo portuário, enquanto a terceira está situada entre Alcântara e a Praia da Ponta da Areia.

Bittencourt (2015) fez uma descrição do comportamento de marés e perfil de correntes em um ponto do estuário do Rio Mearim, São Luís - MA, e suas inter-relações, contribuindo com informações para subsidiar o planejamento logístico da navegação de embarcações, aumentando segurança e eficiência às atividades marítimas. Os resultados indicaram contribuições parciais dos harmônicos M2, M4, M6 e M8 no padrão de correntes encontradas. O autor encontrou ainda um regime de maré predominantemente semidiurno, com altura de maré atingindo até 6,7 m.

Czizewski *et al.* (2020) aplicaram um modelo hidrodinâmico 3D para simular a circulação de maré no Golfão Maranhense, visando estimar o potencial energético associado ao fenômeno. Com base nas simulações, os autores classificaram o regime de maré da região como hipermaré, os resultados mostraram que dentro do Golfão Maranhense a amplitude da maré superou os 6 metros, constatando que devido às condições geográficas e hidrodinâmicas específicas, como a extensão do estuário e variações significativas de fase das ondas de marés, a região é propícia para a produção de energia renovável. A depender do local, a maré na região é considerada assimétrica, ou seja, as correntes de maré vazante são, em geral, mais intensas do que as de enchente (Pereira *et al.*, 2016).

Costa (2022) através da modelagem computacional e dados coletados *in situ*, avaliou o potencial das correntes de marés no Canal do Boqueirão, localizado na Baía de São Marcos, para estimar o potencial energético dessa região. O autor encontrou uma

amplitude máxima de 6,6 m na maré de sizígia e 2,6 m em quadratura, com médias na preamar de 5,6 m. Levando em conta a morfologia do estuário, os resultados mostraram que devido a grande variação do nível do mar e fortes correntes, essa região possui grande potencial maremotriz.

Paschoaleti (2023), ao caracterizar e simular as variáveis oceanográficas com importância para operações portuárias na Baía de São Marcos, haja vista às condições extremas que portos e terminais estão sujeitos, identificou que a amplitude da maré em sizígia, pode ser superior a 7 m. De acordo com o autor, a influência dos ventos e ondas influenciam muito pouco na hidrodinâmica da região. Apesar disso, o autor argumenta que, mesmo com pouca expressão, as forçantes atmosféricas desempenham um papel importante na indução de outros processos hidrodinâmicos, como as correntes de densidade.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Área de estudo**

A costa do Maranhão está dividida em litoral ocidental que corresponde ao segmento das reentrâncias maranhenses, o litoral central onde fica o Golfão Maranhense (GM), composto pela Baía de São Marcos (BSM) e Baía de São José (BSJ), e o litoral oriental caracterizado por uma linha de costa retilínea, recortando restingas, campos de dunas fixas e móveis intercaladas por lagoas de origem pluvial, manguezais, praias e sistemas deltaicos (El-Robrini *et al.*, 2006).

O GM abrange estuários, estreitos, enseadas, pequenos rios e muitas ilhas, além de grandes áreas de manguezais e altas amplitudes de marés (El-Robrini *et al.*, 2006). A BSJ está localizada ao norte/nordeste da Ilha do Maranhão, onde está o município de Raposa e onde deságua o Rio Paciência. Na sua porção mais ao sul/sudoeste localiza-se o Estreito dos Mosquitos, canal que liga a BSJ à BSM.

A localização das estações maregráficas existentes e utilizadas neste estudo são mostradas na figura 2.

A BSM, abriga vários portos da região: Porto de Itaqui, Terminal Ponta da Madeira, Terminal do Consórcio Alumínio do Maranhão e Terminal Ponta da Espera (Mílen *et al.*, 2006). A área portuária do Maranhão constitui-se como o segundo maior

complexo portuário da América Latina em termos de movimentação de carga (Amaral; Alfredini, 2010), gerando um grande interesse nacional em função da grande movimentação de embarcações e carga nos portos da região.

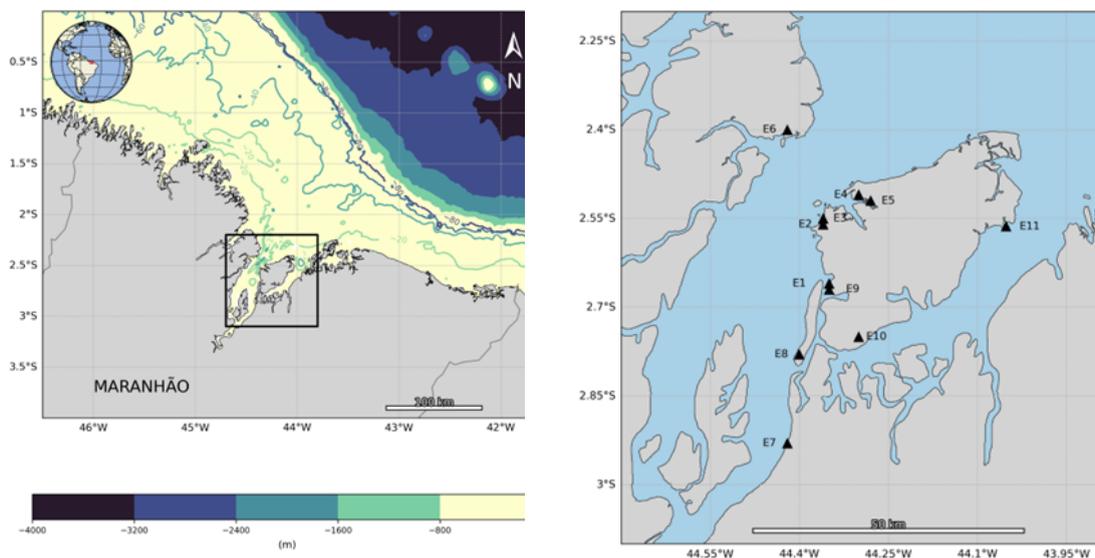
A Ilha do Maranhão está regida, de acordo com a classificação de Davies (1964), sob um regime de macromarés, com alturas entre 4 e 6 m. No entanto, estudo realizado por Czizewski *et al.* (2020) encontrou no Complexo Estuarino de São Marcos, uma maré com amplitude de mais de 6 m em alguns locais, classificando a região como hipermaré e de regime semidiurno, onde a componente harmônica M2 é a dominante e mais energética das constituintes de maré.

Os dados necessários para as análises foram coletados por estações maregráficas ao longo do GM cujas coordenadas e cobertura temporal estão presentes na tabela 1.

**Tabela 1** – Informações dos dados de nível do mar obtidos pelas estações maregráficas instaladas no Golfão Maranhense.

ESTAÇÃO	NOME	ID	LAT. (°)	LONG. (°)	PERÍODO ANALISADO
<b>Baía de São Marcos</b>					
E1	Terminal da Alumar	30114	02° 40' 07" S	044° 21' 08" W	06/07/1984 - 30/09/1984 07/12/2020 - 06/06/2021
E2	Porto do Itaqui	30110	02° 34' 06" S	044° 22' 02" W	06/06/1984 - 01/10/1984 01/01/1985 - 31/03/1985
E3	Terminal Marítimo Ponta da Madeira	30149	02° 33' 09" S	044° 22' 07" W	14/02/1988 - 08/06/1988 14/06/1988 - 31/12/1988 01/07/1991 - 31/12/2002 01/01/2015 - 31/12/2015
E4	São Luís	30120	02° 31' 06" S	044° 18' 07" W	25/05/1961 - 25/06/1961
E5	Rio Anil	30115	02° 31' 06" S	044° 17' 07" W	08/01/1983 - 08/02/1983
E6	Alcântara	30108	02° 24' 06" S	044° 25' 03" W	15/11/1982 - 16/12/1982
E7	Perizes	30155	02° 56' 05" S	044° 25' 05" W	25/10/2005 - 24/11/2005 09/04/2009 - 30/06/2009
E8	Tauá	30154	02° 47' 09" S	044° 24' 04" W	08/04/2009 - 23/05/2009
E9	Sismo-Hmalu mare	30156	02° 40' 06" S	044° 21' 07" W	20/10/2020 - 15/06/2021
<b>Baía De São José</b>					
E10	Quebra-Pote	30121	02° 45' 00" S	044° 18' 00" W	31/03/1982 - 09/05/1982
E11	SiMCosta	-	02° 33' 48" S	44° 03' 06" W	23/11/2023 - 07/04/2024

A figura 2 ilustra a localização geográfica dos 9 pontos das estações maregráficas localizadas na BSM e dos 2 pontos das estações maregráficas localizadas na BSJ.



**Figura 2** – Mapa de localização das estações maregráficas existentes e com dados disponíveis publicamente para o Golfão Maranhense (GM), destacando a Baía de São Marcos (BSM) à esquerda e a Baía de São José (BSJ) à direita. As estações são nomeadas como E1 (Terminal da Alumar), E2 (Porto do Itaqui), E3 (Terminal Marítimo Ponta da Madeira), E4 (São Luís), E5 (Rio Anil), E6 (Alcântara), E7 (Perizes), E8 (Tauá), E9 (Sismo-Hmalumare), E10 (Quebra-Pote) e E11 (SiMCosta) e suas coordenadas encontram-se na Tabela 1.

#### 4.2. Dados de nível do mar no Golfão Maranhense

Os dados observacionais de nível do mar utilizados neste estudo são provenientes de 11 estações maregráficas instaladas no GM (Figura 2), cujas coordenadas geográficas (latitude/longitude) e cobertura temporal são mostradas na Tabela 1, sendo 10 localizados na BSM (pontos E1 a E10) e 2 na BSJ (E10 e E11).

Os dados de nível do mar medidos na BSM têm frequência temporal de 1h e são oriundos do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da Marinha do Brasil, obtidos via e-mail ([chm.bndo@marinha.mil.br](mailto:chm.bndo@marinha.mil.br)), conforme instruções no site <https://www.marinha.mil.br/chm/bndo/ acesso>. Em cada ponto analisado na BSM há diferentes períodos de dados disponíveis, alguns cobrindo alguns meses de anos específicos, outros cobrindo vários anos consecutivos (Tabela 1).

Na BSJ, os dados foram adquiridos pela estação maregráfica do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta), único radar mareográfico instalado nesta baía. O SiMCosta é uma rede de monitoramento de parâmetros meteo-oceanográficos na zona costeira brasileira que visa estabelecer padrões, tendências e cenários climáticos causados por efeitos naturais e antrópicos em pontos específicos da costa brasileira. É uma iniciativa da sub-rede Zonas Costeiras da Rede Clima que envolve a participação de vários pesquisadores de diversas instituições nacionais. As estações do SiMCosta utilizam tecnologia de radar de micro-ondas, são autônomas e possuem capacidade telemétrica integrada a um conjunto de instrumentos meteo-oceanográficos (Portal SiMCosta; <https://simcosta.furg.br/home>). A mesma encontra-se operante na BSJ desde junho de 2018, porém a série temporal de nível do mar utilizada neste estudo cobre o período de 23 de novembro de 2023 a 07 de abril de 2024, o maior intervalo de dados contínuos disponível. A frequência temporal dos dados do SimCosta é a cada 1 min. A outra base de dados encontrada na referida baía é a estação maregráfica de Quebra-Pote, com frequência temporal de 1 h e oriunda da base de dados da Marinha do Brasil.

Para analisar de que forma o nível não-astronômico varia sazonalmente no GM foram utilizados pontos de referência para cada região e escolhida a série temporal mais longa disponível (Tabela 1), de forma a capturar a influência de agentes meteorológicos e climáticos de mais longo período sobre o nível do mar na região (Franco, 2009).

### **4.3. Análise de dados**

#### **4.3.1 Processamento dos dados de nível do mar**

Marégrafos são equipamentos com sensores capazes de registrar o nível da água em determinado local (Franco, 2009). Há basicamente três tipos principais de marégrafos: o sistema de boia e contrapeso, os sensores de pressão e o radar (Hidromares, 2022).

Os dados de nível do mar obtidos na BSM e da estação maregráfica de Quebra-Pote (BSJ) foram obtidos por um marégrafo analógico, dotado de um sistema bóia e contrapeso, com registro em papel. À medida que o nível da água sobe, a boia se eleva e o peso do outro lado cai, fazendo com que a polia gire para o lado do peso. Quando o nível da água desce, o contrário ocorre, fazendo com que a polia gire na direção da boia. O sensor calcula as variações no nível da água conforme a polia gira. Embora esse método seja mais antigo e mecânico, ou seja, requer maiores cuidados para sua correta utilização, além de

ser suscetível a problemas como incrustações, ele continua sendo uma referência valiosa (Hidromares, 2022).

Os dados de nível do mar do SiMCosta são obtidos por sensor do tipo radar ativo, o qual foi instalado fora d'água sobre uma estrutura de concreto no cais de São José de Ribamar, e que transmite pulsos acústicos que são refletidos pela superfície da água. Como a velocidade de transmissão do pulso sonoro é conhecida, basta medir o tempo de retorno ao transdutor do sinal emitido para se obter a distância da linha d'água até o sensor, ou seja, o nível. Conforme o nível da água sobe com o aumento da maré, essa distância diminui, e vice-versa. Apesar de sensores do tipo radar serem mais confiáveis do que o registro manual da maré, ainda podem apresentar falhas relacionadas à instalação, nivelamento e calibração, mas também à comunicação e transferência de dados. Assim, o controle da qualidade dos dados iniciou-se com uma análise visual da série temporal para detectar lacunas (*gaps*) originadas pelo funcionamento anormal do mareógrafo, como erros de leitura, falhas de comunicação com a central de recebimento (FURG) e/ou dados faltantes. Os dados brutos do SiMcosta foram obtidos na frequência de 1 min. Para que esses dados ficassem na mesma frequência temporal que os dados das estações mareográficas da Marinha do Brasil, foi feita a interpolação linear dos dados brutos através da função *interp1.m* (@Matlab) de modo a transformar os dados para a frequência horária.

Neste estudo, a análise dos efeitos meteorológicos e climáticos sobre o nível do mar na costa do Maranhão, para os pontos onde há mais de uma série de dados, as mesmas foram separadas em período seco (de julho a dezembro) e período chuvoso (de janeiro a junho). Nas demais estações mareográficas, foi identificada a qual período cada uma pertencia, e a análise foi realizada de forma convencional (Tabela 2).

**Tabela 2** – Identificação dos períodos de análise entre seco e chuvoso em cada uma das estações mareográficas analisadas.

Estações	Período Chuvoso	Período Seco
E1	07/12/2020 a 06/06/2021	06/07/1984 a 30/09/1984
E2	01/01/1985 a 31/03/1985	06/06/1984 a 01/10/1984
E3	01/01/2015 a 30/06/2015	01/07/2015 a 31/12/2015
E4	25/05/1961 a 25/06/1961	-

E5	08/01/1983 a 08/02/1983	-
E6	-	15/11/1982 a 16/12/1982
E7	09/04/2009 a 30/06/2009	25/10/2005 a 24/11/2005
E8	08/04/2009 a 23/05/2009	-
E9	20/10/2020 a 15/06/2021	-
E10	31/03/1982 a 09/05/1982	-
E11	23/11/2023 a 07/04/2024	-
<b>Maior Série Temporal (E3)</b>		
01/07/1991-31/12/2002		

#### 4.3.2. Análise harmônica da maré astronômica

A análise harmônica é um método que decompõe um sinal periódico em uma soma de funções senoidais (harmônicos), cada uma caracterizada por um período, amplitude e fase específicos. Através da análise harmônica decompos a onda de maré nas suas componentes (Pugh, 1987). É um método matemático baseado nas diferentes variações das fases das componentes e nas diferenças de suas frequências angulares. Quanto maior for a diferença entre as frequências específicas verificadas, mais fácil é separar as componentes harmônicas de um sinal (Franco, 2009). Essa é uma das principais análises utilizadas quando se quer obter previsões de maré astronômica e entender a hidrodinâmica local de uma região costeira.

O presente trabalho utilizou o pacote de ferramentas *t\_tide* do programa *Matlab@* (Licença acadêmica: 40981746), através da rotina de análise harmônica, o qual baseia-se no método matemático dos mínimos quadrados para a determinação das constantes harmônicas, suas amplitudes e atraso de fase de cada constituinte, baseado nas diferenças de fase e frequências angulares (Franco, 2009). O *t\_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002) é um pacote de rotinas capaz de realizar uma análise harmônica clássica, com correções nodais, inferência, previsões e uma análise completa a partir de dados brutos. Encontra-se acessível gratuitamente na internet.

A série temporal do nível do mar é fornecida como entrada ao programa, que gera como saída uma tabela com as constantes harmônicas da maré para o mesmo período dos dados fornecidos. O *t\_tide* funciona mesmo quando os dados de entrada apresentam

pequenas lacunas. A aplicação da análise harmônica pelo *t\_tide* é capaz de identificar até 45 constituintes entre diurnos e semi-diurnos e 101 de águas rasas, fornecendo as amplitudes e fases de cada harmônico. A partir desses constituintes podem ser feitas previsões de maré para os diferentes setores. As constantes harmônicas das marés nas Baías de São Marcos e de São José foram determinadas através dessa análise, de forma a obter os componentes mais relevantes para a região em termos de amplitude e fase. De acordo com a utilização padrão do programa, apenas as constantes harmônicas com relação sinal/ruído maior que 2 são consideradas (Pawlowicz *et al.*, 2002).

Neste estudo, foi calculada a amplitude máxima da maré e o número de forma (F) no GM. A maré de sizígia é estimada pela soma das quatro principais constituintes (M2 + S2) + (O1 + K1), enquanto que na quadratura é estimado pela soma da diferença entre a primeira e a segunda constituinte semidiurna e a diferença entre a primeira e a segunda constituinte diurna (M2 - S2) + (O1 - K1), relação proposta por Defant (1961). Em estações com mais de uma série de dados (E, E2, E3, E7 e E8), foi escolhida a maior série temporal disponível. Nas demais estações maregráficas (E4, E5, E6, E8, E9, E10 e E11), foi usada a série disponível conforme a tabela 1. O parâmetro F, proposto por Pugh (1987), é definido como a razão entre a soma das amplitudes dos principais constituintes diurnos (O1, K1) e a soma das amplitudes dos principais constituintes semidiurnos (M2, S2), conforme Equação 1:

$$F = \frac{(O1 + K1)}{(M2 + S2)}$$

Equação 1

Assim, dependendo do valor de F poderemos classificar a maré conforme seu período (sem-diurna, diurna com desigualdade diurna, mista ou diurna; Tabela 3) nos diferentes pontos distribuídos no GM.

**Tabela 3** – Identificação dos tipos de maré de acordo com o Número de Forma (F) proposto por Pugh (1987). Fonte: extraído de Pugh (1987).

Intervalo de F	Tipo de Maré
$0 < F < 0,25$	Semidiurna
$0,25 < F < 1,5$	Semidiurna com desigualdade diurna

$1,5 < F < 3,0$	Mista
$F > 3,0$	Diurna

#### 4.3.3. Análise sazonal do nível não-astronômico

Após a obtenção da maré astronômica, foi aplicada a metodologia descrita por Melo (2017) para a calcular o nível não-astronômico (NnA). Segundo o autor, para obter o NnA de uma série temporal é necessário filtrar a maré astronômica da maré bruta observada.

Já para decompor o NnA na banda da maré meteorológica e da maré de vento, de acordo com a banda definida por Melo (Tabela 4), foi utilizado um filtro passa-banda de *Butterworth* que decompõe os dados no domínio da frequência. Este filtro permite que sejam mantidas apenas as frequências que estão dentro de um determinado intervalo, assim, a frequência de corte foi ajustada para corresponder a frequência de interesse. As frequências de corte corresponderam aos períodos de 72 horas (3 dias) e 720 h (30 dias) para a maré meteorológica e de 2 h a 72 h (3 dias) para a maré de vento. A aplicação deste filtro permitiu que não houvesse deslocamento de fase no sinal (função *filtfilt* do MATLAB). Neste estudo, esses passos foram aplicados sobre os dados obtidos pelos 11 marégrafos distribuídos ao longo do GM, para os quais foi possível avaliar a sazonalidade (período seco vs chuvoso), assim como nas estações onde havia somente uma série de dados disponíveis. Os pontos analisados podem ser visualizados na tabela 2.

**Tabela 4** – Identificação das bandas de frequência nas quais o nível não-astronômico foi decomposto. Fonte: Extraído de Melo (2017).

Identificação da Banda	Faixa de Períodos Cobertos	Banda de Frequências Correspondente
Sazonal	30 dias a 1 ano	0,0027 a 0,033 cpd.
Maré Meteorológica	3 a 30 dias	0,033 a 0,33 cpd.
Maré de Vento, que inclui o “wind set-up/set-down” e o “storm surge”	2 horas a 3 dias	0,33 a 12 cpd.

#### 4.3.4. Análise espectral do nível do mar

A análise espectral foi feita com base na série temporal mais longa dos dados brutos de nível do mar da estação do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (E3), o período analisado foi de julho de 1991 a dezembro de 2002. A análise espectral de uma série temporal corresponde a variações sobre um espectro contínuo de frequências, e é composta por duas partes: uma determinística (previsível) e outra aleatória (não previsível). A parte previsível é determinada pela soma de ondas senoidais (senos e cossenos) de diferentes frequências e amplitudes. Enquanto a parte não previsível obedece algum modelo de probabilidade (Menezes, 2005).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Regime da maré astronômica no Golfão Maranhense

Para a caracterização geral das componentes harmônicas no GM, o programa *t-tide* foi aplicado às séries temporais obtidas pelos marégrafos das estações E1 a E11. Através da análise harmônica, foi possível identificar os principais componentes que influenciam a maré astronômica no GM, considerando um intervalo de confiança de 95%. Encontrou-se um total de 26 (E1), 19 (E2), 56 (E3), 28 (E4), 17 (E5), 23 (E6), 23 (E7), 21 (E8), 45 (E9), 25 (E10) e 15 (E11) constituintes harmônicos estatisticamente significativos para as estações analisadas, respectivamente. A análise das contribuições de cada componente da maré astronômica para a altura do nível do mar na região, entretanto, foi feita considerando apenas os 6 componentes principais, a saber: M2, S2, N2, O1, K1 e Q1 (Tabela 5). No apêndice deste trabalho estão as tabelas das demais componentes encontradas para a série temporal mais longa em cada estação.

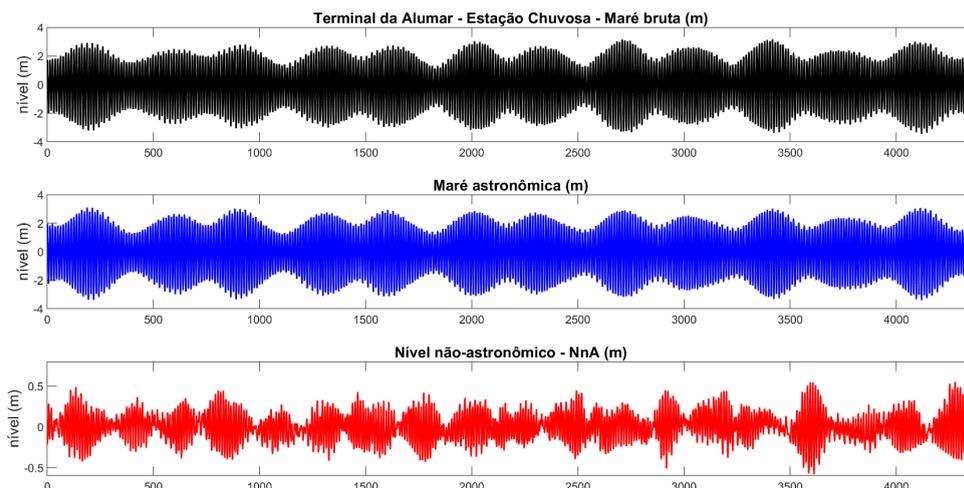
**Tabela 5** – Amplitude (m) de cada componente da maré astronômica para a altura do nível do mar nas 11 estações mareográficas distribuídas no Golfão Maranhense.

Estação	M2 (m)	S2 (m)	N2 (m)	O1 (m)	K1 (m)	Q1 (m)
E1	2,2004	0,6210	0,4205	0,0987	0,0964	0,0186
E2	2,1679	0,5470	0,4119	0,1128	0,1103	0,0235

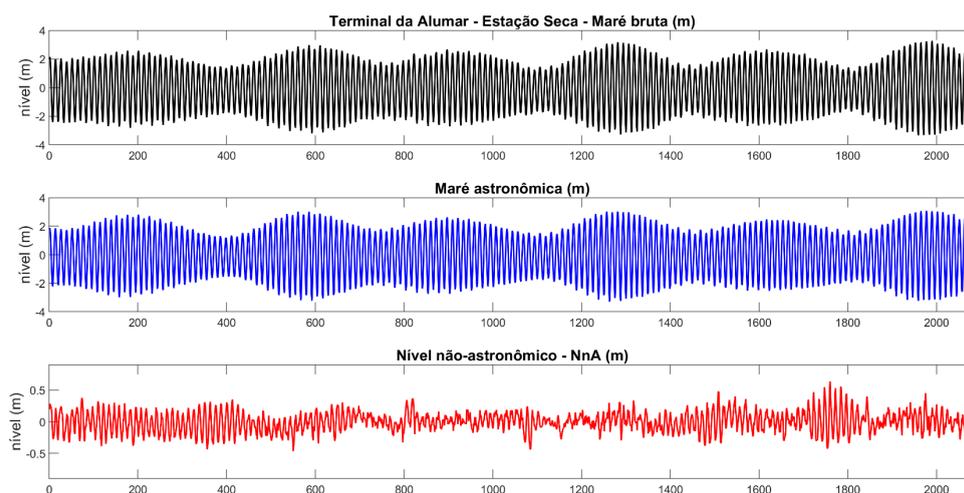
<b>E3</b>	2,0558	0,5728	0,3763	0,1033	0,1069	0,0204
<b>E4</b>	2,1563	0,4554	0,3558	0,0991	0,1263	0,0279
<b>E5</b>	1,3172	0,4923	0,3454	0,0856	0,0495	-
<b>E6</b>	1,9753	0,5402	0,4006	0,0878	0,1008	0,0216
<b>E7</b>	2,7492	0,5441	0,5006	0,0988	0,1166	0,0129
<b>E8</b>	2,5585	0,6484	0,4267	0,0987	0,1069	0,0151
<b>E9</b>	2,1854	0,6219	0,4156	0,0987	0,0998	0,0987
<b>E10</b>	2,2376	0,7739	0,4123	0,1031	0,0764	0,0171
<b>E11</b>	1,9437	0,5613	0,3700	0,0962	0,1030	0,0263

Após a determinação da maré astronômica, esta foi subtraída da maré bruta do registro de maré, possibilitando a obtenção do nível não-astronômico (NnA) em cada um dos pontos analisados. Os dados brutos de nível do mar, a maré astronômica obtida pela análise harmônica e o nível não-astronômico (NnA) para cada estação são mostrados nas figuras 3 a 19.

As figuras 3 e 4 apresentam os resultados para a estação Terminal da Alumar. Os dados abrangem o período chuvoso, entre dezembro de 2020 e junho de 2021, e o período seco, entre julho e setembro de 1984. A altura do nível do mar (“maré bruta”) na região observada neste local foi de 3,16 m na estação chuvosa (Figura 3a) e de 3,27 m na estação seca (Figura 4a). Em relação ao NnA, observa-se que, durante o período seco, a amplitude atinge 0,63 m (Figura 3c), sendo maior do que no período chuvoso, que registrou um valor máximo de 0,55 m (Figura 4c).

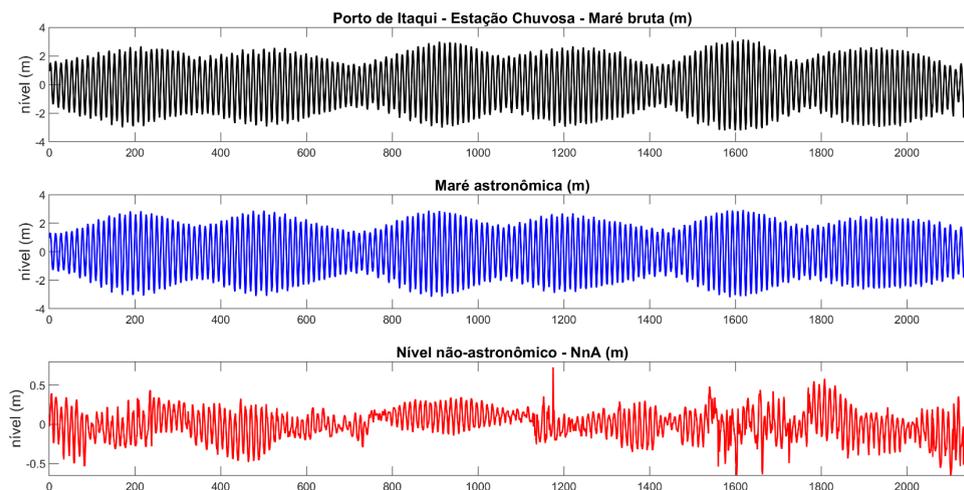


**Figura 3** – Séries temporais de nível do mar no Terminal da Alumar (E1) para o período de 07/12/2020 a 06/06/2021, período chuvoso na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

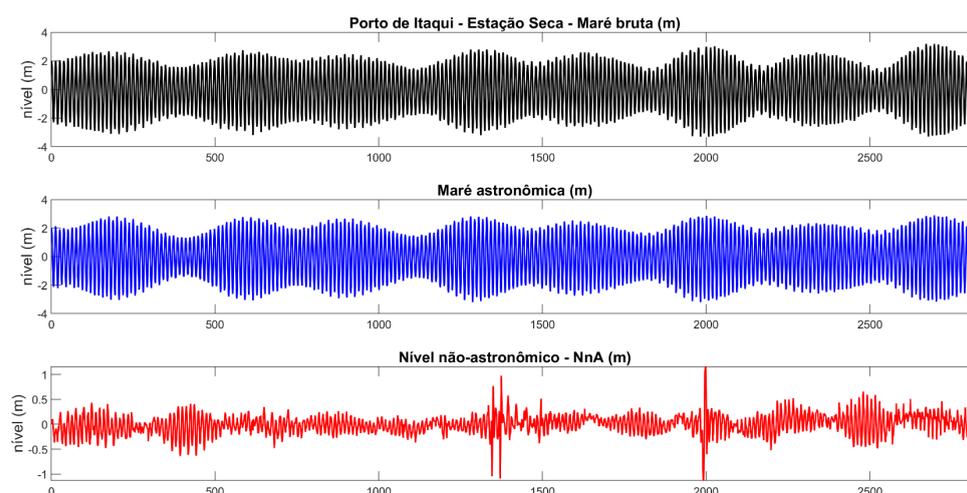


**Figura 4** – Séries temporais de nível do mar no Terminal da Alumar (E1) para os meses de 06/07/1984 a 30/09/1984, período seco na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

As figuras 5 e 6 mostram os resultados da estação do Porto de Itaqui. Os dados abrangem o período chuvoso, entre janeiro e março de 1985, e o período seco, entre junho e outubro de 1984. No período chuvoso, a altura do nível do mar (“maré bruta”) na região neste local foi de 3,16 m (Figura 5a) e de 3,19 m no período seco (Figura 6a). Durante o período seco, o NnA apresentou uma amplitude máxima de 1,1 m, superior à do período chuvoso, que foi de 0,72 m (Figuras 5c e 6c).



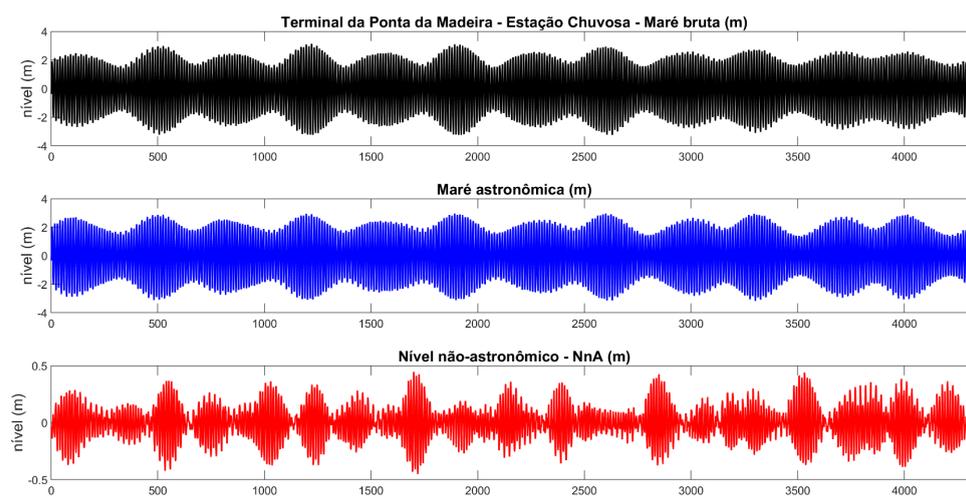
**Figura 5** – Séries temporais de nível do mar obtidas no Porto de Itaqui (E2) para os meses de 01/01/1985 a 31/03/1985, período chuvoso na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.



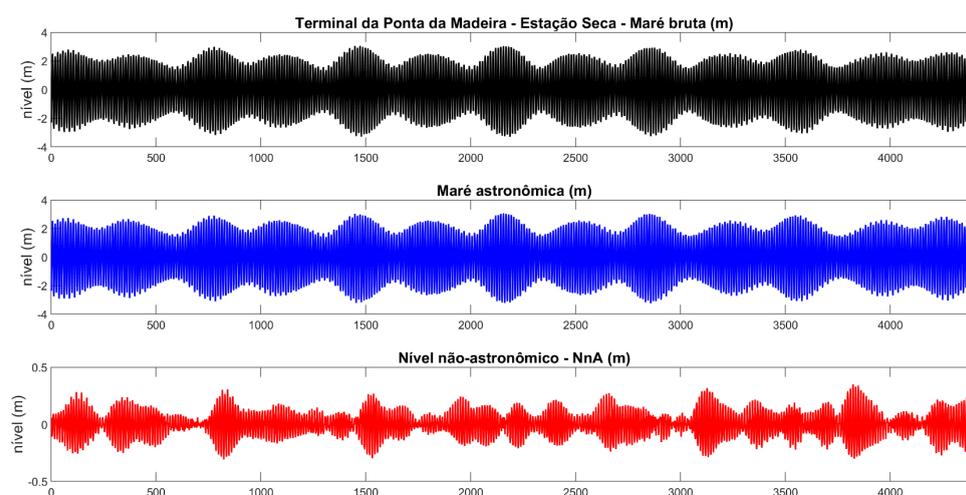
**Figura 6** – Séries temporais de nível do mar obtidas no Porto de Itaqui (E2) para os meses de 06/06/1984 a 01/10/1984, período seco na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

As figuras 7 e 8 apresentam os resultados do Terminal da Ponta da Madeira. Os dados abrangem o período chuvoso, entre janeiro e junho de 2015, e o período seco, entre julho e dezembro de 2015. A altura do nível do mar (“maré bruta”) na região neste local foi de 3,13 m na estação chuvosa (Figura 7a) e de 3,06 m na estação seca (Figura 8a). Em relação ao Nna, verificou-se que a amplitude foi de 0,45 m durante o período chuvoso

(Figura 7c), e de 0,35 m no período seco (Figura 8c). Nesse ponto, o nível não-astronômico foi menor durante a estação seca, o que pode parecer controverso, dados os maiores efeitos dos ventos alísios durante os meses de Setembro-Outubro-Novembro na região. Porém, em 2015 ocorreu o evento de El Niño mais intenso registrado nos últimos 75 anos (NOAA, 2025), gerando uma grande escassez de chuvas na região no período chuvoso e um enfraquecimento dos ventos alísios.

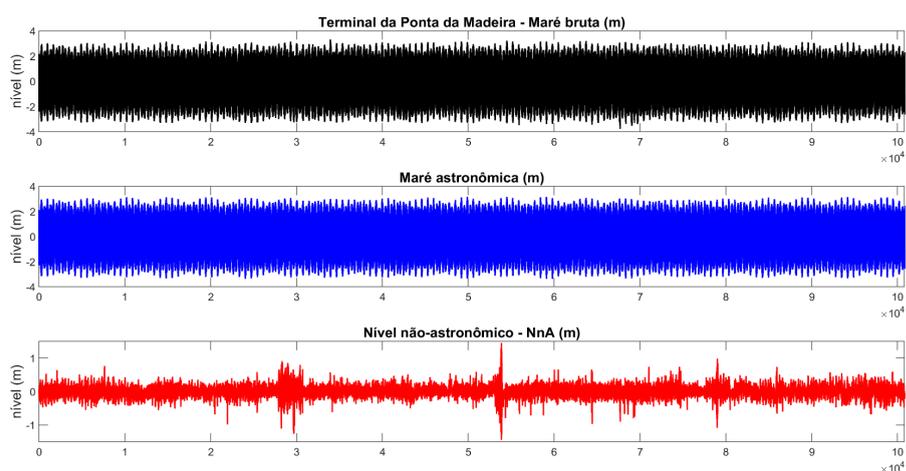


**Figura 7** – Séries temporais de nível do mar no Terminal da Ponta da Madeira (E3) de 01/01/2015 a 30/06/2015, período chuvoso na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

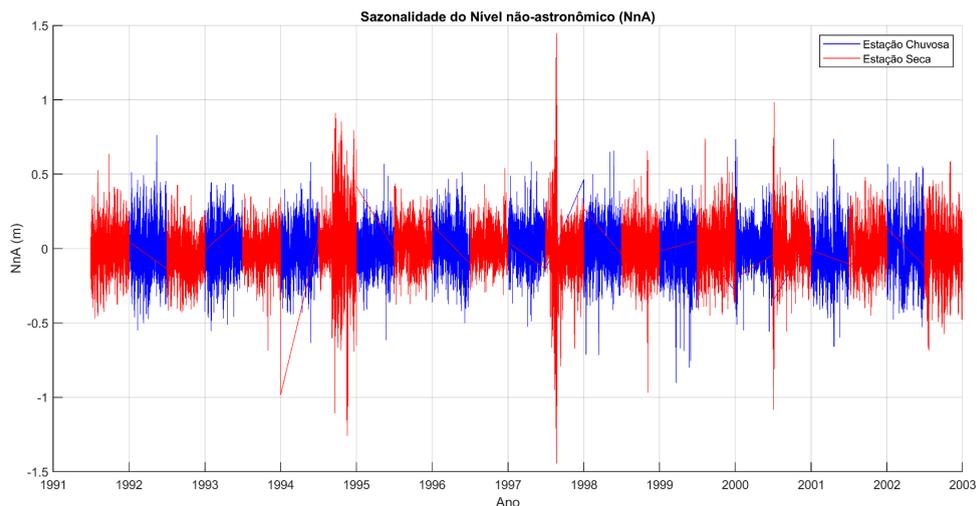


**Figura 8** – Séries temporais de nível do mar no Terminal da Ponta da Madeira (E3) de 01/07/2015 a 31/12/2015, período seco na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

A figura 9 corresponde a maior série temporal de dados contínuos deste trabalho e apresenta os resultados do Terminal da Ponta da Madeira. Os dados abrangem o período de julho de 1991 a dezembro de 2002 (11 anos e 6 meses). Considerando a série completa, a altura do nível do mar (“maré bruta”) na região foi de 3,31 m (Figura 9a) e o NnA de 1,4 m (Figura 9c). Este valor de 1,4 m de nível não-astronômico chama a atenção por ocorrer no período de maior atuação dos ventos na região. A figura 10 destaca o NnA conforme a sua sazonalidade, onde o período seco é mostrado em vermelho e período chuvoso em azul. Observa-se que é durante a estação seca que a amplitude do NnA é mais pronunciada. O maior NnA ocorreu no período seco do ano de 1997. Neste período ocorreu o segundo evento de El Niño mais intenso registrado nos últimos 75 anos (NOAA, 2025).

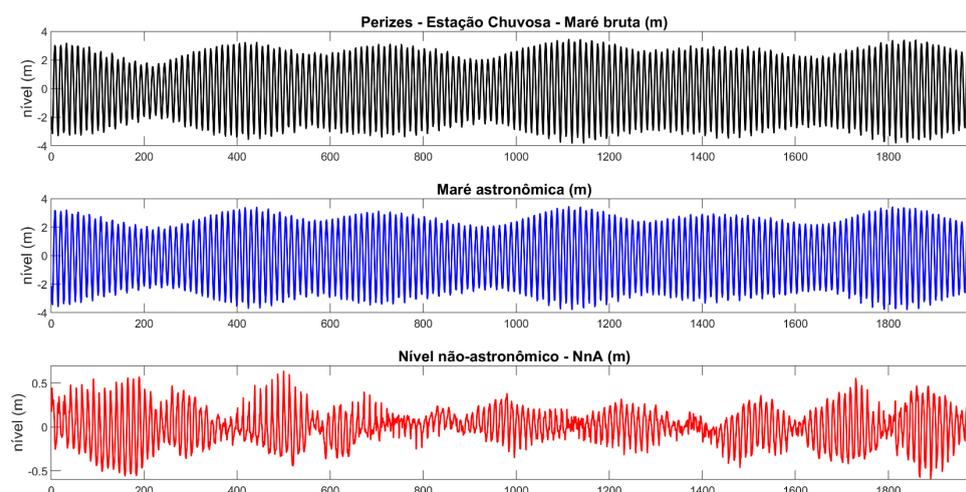


**Figura 9** – Séries temporais de nível do mar no Terminal da Ponta da Madeira (E3) de 01/07/1991 a 31/12/2002, período seco na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

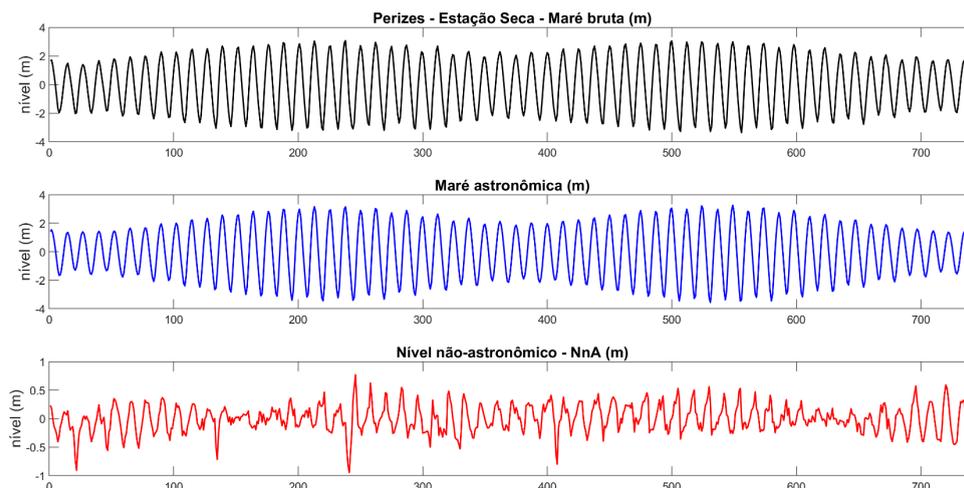


**Figura 10** – Sazonalidade do nível não-astronômico no Terminal da Ponta da Madeira (E3) de 01/07/1991 a 31/12/2002, período seco x período chuvoso na região.

As figuras 11 e 12 apresentam os resultados da estação Perizes. Os dados referem-se ao período chuvoso, de abril a junho de 2009, e ao período seco, de outubro e novembro de 2005. Durante o período chuvoso, a altura do nível do mar (“maré bruta”) na região foi de 3,43 m (Figura 11a), enquanto no período seco atingiu 3,07 m (Figura 12a). Em relação ao NnA, observou-se que ele foi maior na estação seca, a amplitude foi de 0,6 m no período chuvoso (Figura 10c) e de 0,7 m no período seco (Figura 11c).

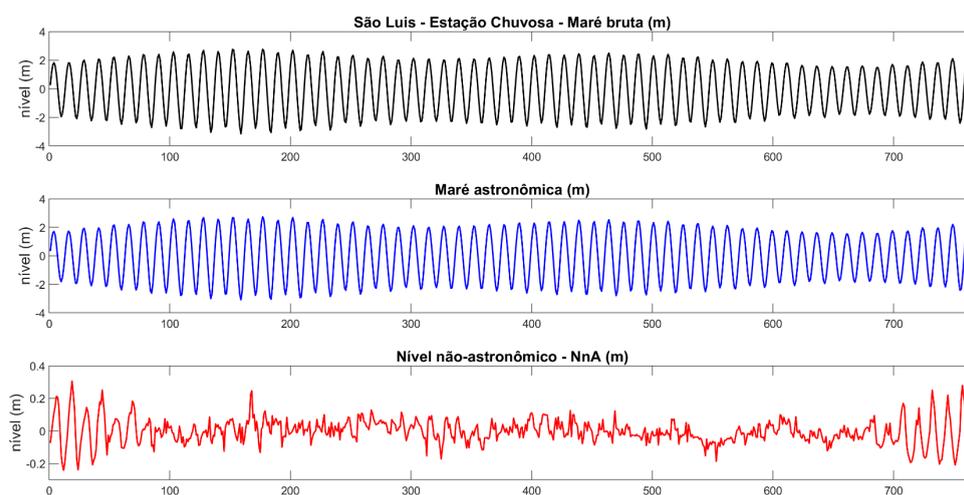


**Figura 11** – Séries temporais de nível do mar na estação Perizes (E7) de 09/04/2009 a 30/06/2009, período chuvoso na região. **Painel superior:** dados brutos; **Painel central:** maré astronômica; **Painel inferior:** nível não-astronômico.



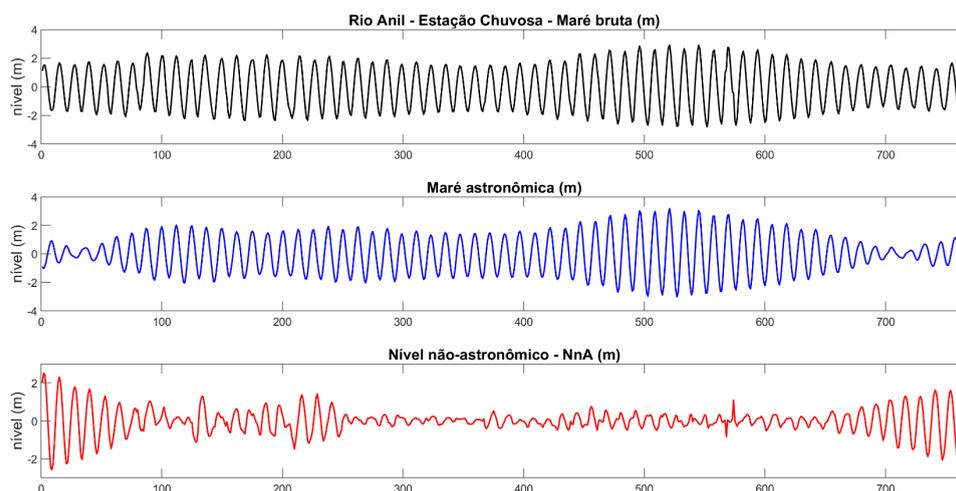
**Figura 12** – Séries temporais de nível do mar obtidas na estação Perizes (E7) para os meses de 25/10/2005 a 24/11/2005, período seco na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

A figura 13 apresenta os resultados da estação São Luís. Os dados abrangem o período chuvoso, referentes aos meses de maio e junho de 1961. A amplitude máxima da altura do nível do mar (“maré bruta”) na região e do Nna registrado para o período foi de 2,76 m (Figura 12a) e de 0,3 m (Figura 12c), respectivamente.



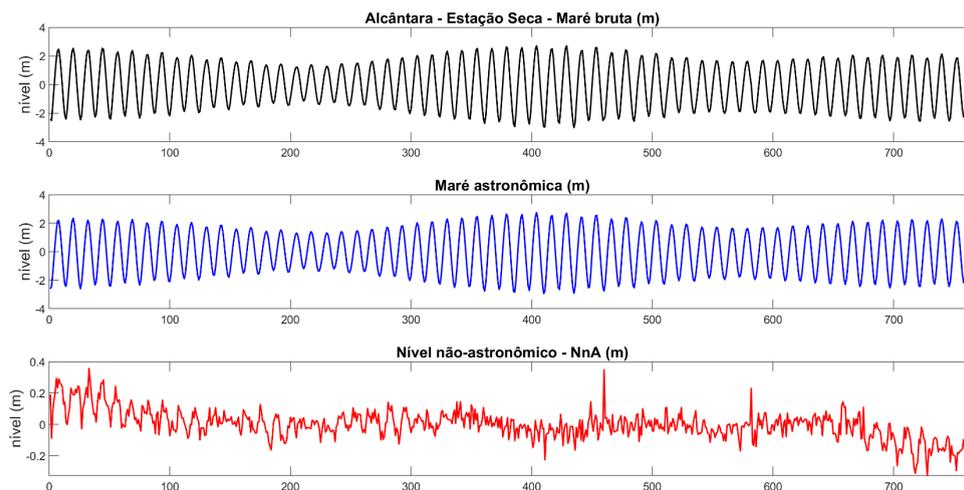
**Figura 13** – Séries temporais de nível do mar obtidas na estação São Luís (E4) para os meses de 25/05/1961 a 25/06/1961, estação chuvosa na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

A figura 14 apresenta os resultados da estação Rio Anil. Os dados abrangem o período chuvoso, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 1983. A altura do nível do mar (“maré bruta”) e do Nna registrado para o período foi de 2,91 m (Figura 13a) e de 2,5 m (Figura 13c), respectivamente.



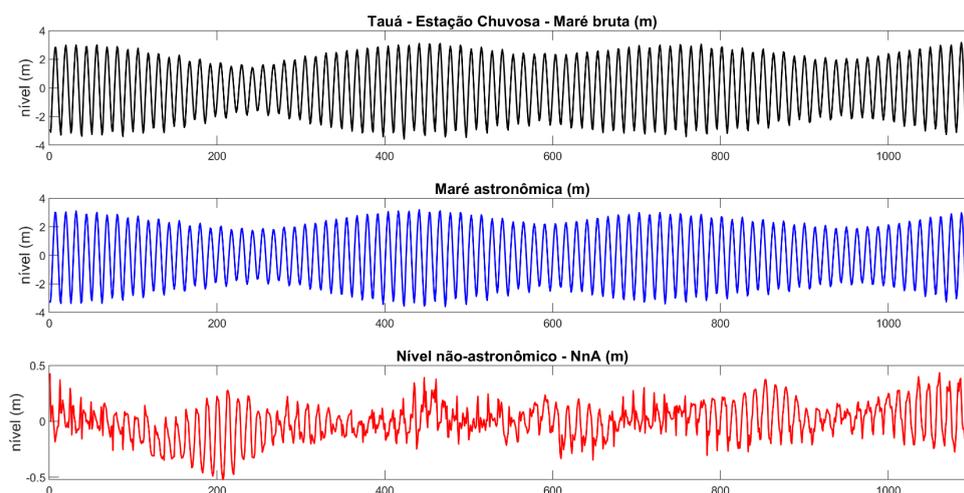
**Figura 14** – Séries temporais de nível do mar obtidas na estação Rio Anil (E5) para os meses de 08/01/1983 a 08/02/1983. **Painel superior:** dados brutos; **Painel central:** maré astronômica; **Painel inferior:** nível não-astronômico.

A figura 15 mostra os resultados da estação Alcântara, com dados referentes ao período de estiagem, especificamente nos meses de novembro e dezembro de 1982. A altura do nível do mar (“maré bruta”) da região foi de 2,71 m (Figura 14a), enquanto a amplitude do NnA registrada para o mesmo período foi de 0,35 m (Figura 14c).



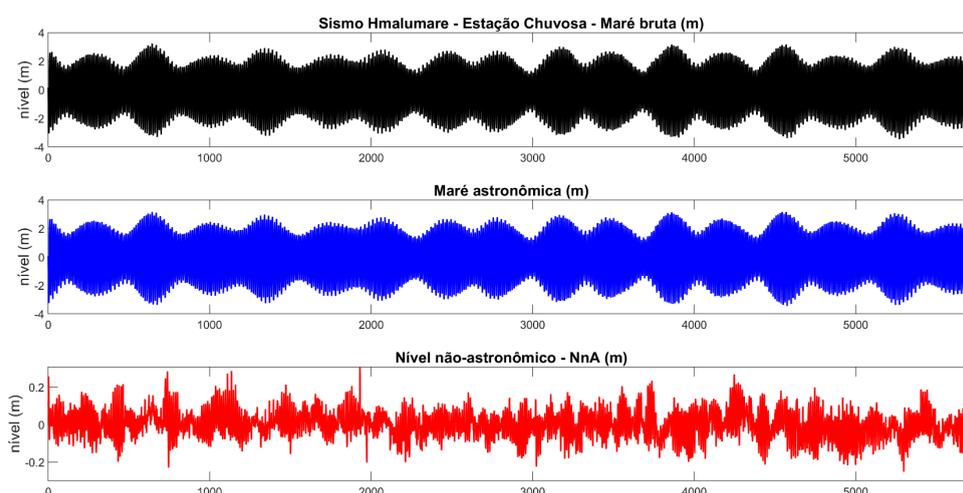
**Figura 15** – Séries temporais de nível do mar obtidas na estação Alcântara (E6) para os meses de 15/11/1982 a 16/12/1982. **Painel superior:** dados brutos; **Painel central:** maré astronômica; **Painel inferior:** nível não-astronômico.

A Figura 16 apresenta os resultados para a estação de Tauá, com dados referentes ao período chuvoso, especificamente nos meses de abril e maio de 2009. Na referida estação, a amplitude máxima da altura do nível do mar (“maré bruta”) da região foi de 3,17 m (Figura 16a), enquanto a amplitude registrada para o NnA no mesmo intervalo de tempo foi de 0,4 m (Figura 16c).



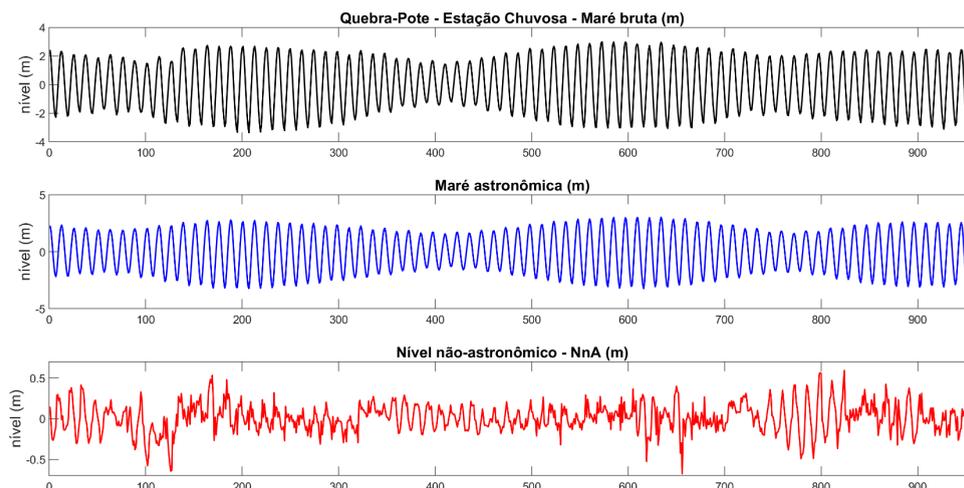
**Figura 16** – Séries temporais de nível do mar obtidas na estação Tauá (E8) para os meses de 08/04/2009 a 23/05/2009, período chuvoso na região. **Painel superior:** dados brutos; **Painel central:** maré astronômica; **Painel inferior:** nível não-astronômico.

A Figura 17 apresenta os resultados da estação Sismo-Hmalumare, a maior parte dos dados corresponde ao período chuvoso na região, especificamente os meses de outubro de 2020 a junho de 2021. Na referida estação, a amplitude máxima da altura do nível do mar (“maré bruta”) da região foi de 3,22 m (Figura 17a), enquanto a amplitude registrada para o NnA foi de 0,3 m (Figura 17c).



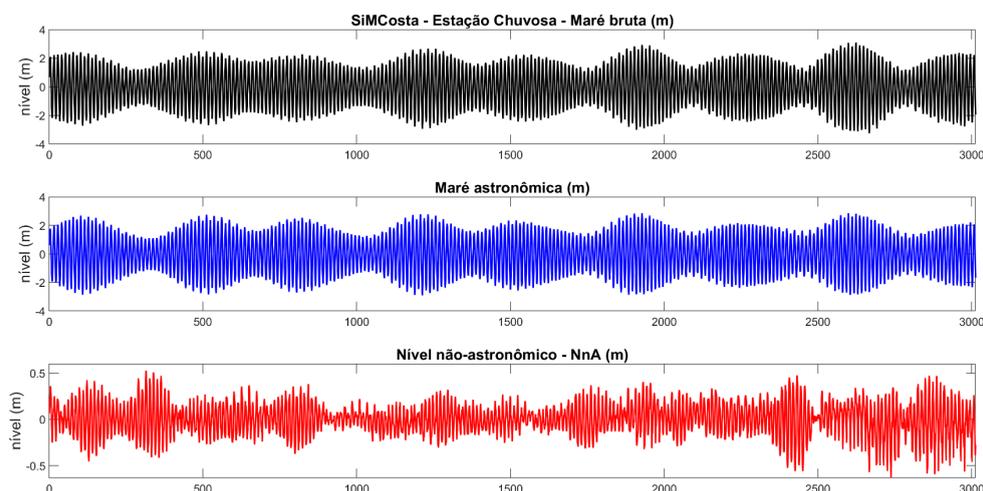
**Figura 17** – Séries temporais de nível do mar na estação Sismo Hmalumare (E9) de 20/10/2020 a 15/06/2021, período chuvoso na região. **Painel superior:** dados brutos; **Painel central:** maré astronômica; **Painel inferior:** nível não-astronômico.

A figura 18 mostra os resultados da estação Quebra-Pote, com dados referentes ao período chuvoso, entre março e maio de 1982. A altura do nível do mar (“maré bruta”) da região foi de 2,99 m (Figura 17a), enquanto a amplitude do NnA registrada para o mesmo período foi de 0,6 m (Figura 17c).



**Figura 18** – Séries temporais de nível do mar na estação Quebra-Pote (E10) de 31/03/1982 a 09/05/1982, período chuvoso na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

A Figura 19 apresenta os resultados da estação do SiMCosta, onde os dados correspondem ao período chuvoso, entre novembro de 2023 a abril de 2024. Na referida estação, a altura do nível do mar (“maré bruta”) foi de 3,10 m (Figura 18a). Em relação ao NaA, a amplitude registrada foi de 0,5 m (Figura 18c).



**Figura 19** – Séries temporais de nível do mar no SiMCosta (E11) de 23/11/2023 a 07/04/2024, período chuvoso na região. **Painel superior**: dados brutos; **Painel central**: maré astronômica; **Painel inferior**: nível não-astronômico.

Nas figuras acima é possível observar que mesmo subtraindo a maré astronômica encontrada do nível do mar medido, ainda existem outros processos que influenciam o nível do mar da região. Nota-se que a maré astronômica encontrada possui uma oscilação típica da maré astronômica semidiurna, com periodicidade bastante regular, com duas preamares e duas baixamares ao longo do dia, com a modulação referentes às marés de sizígia e quadratura.

Na BSM, considerando os resultados das maiores séries temporais analisadas, a máxima altura do nível do mar (“maré bruta”) encontrado entre as estações maregráficas foi observada na estação Perizes (E7), no período chuvoso, onde o nível do mar medido chegou a uma amplitude de 3,43 m, enquanto o mínimo observado foi na estação Alcântara (E6), referente ao período seco, em que a máxima altura do nível do mar foi de 2,71 m.

Quanto à máxima amplitude do nível não-astronômico, este foi maior na estação chuvosa, o valor encontrado foi de 2,5 m em Rio Anil (E5) e a amplitude mínima encontrada foi de 0,3 m na estação São Luís (E4). Já na BSJ, o nível não-astronômico foi maior na estação Quebra-Pote (E10), enquanto a altura do nível do mar foi maior na estação SiMCosta (E11). Nessas, ambos os períodos analisados encontram-se na estação chuvosa, com a E10 situada mais para dentro do estuário. Santos (2018) ao analisar as características oceanográficas do Complexo Estuarino Arraial-São José encontrou o resultado de que durante a estação chuvosa, observa-se um aumento no fluxo fluvial e uma diminuição no período seco na região.

Nas localidades onde foi possível comparar a estação seca e chuvosa (E1, E2, E3 e E7), observou-se que a amplitude do nível não-astronômico (NnA) foi maior durante a estação seca. A máxima amplitude encontrada foi de 1,1 m na estação Porto de Itaqui (E2). A exceção ocorreu na estação do Terminal da Ponta da Madeira (E3) onde o NnA encontrado foi maior no período chuvoso. Quando se olha para a maior série contínua deste trabalho (E3), percebe-se que nessa localidade o valor do NnA também é alto, apresentando a segunda maior amplitude (1,4 m) e, ao contrário da E5, os dados dessa série foi melhor representado pela análise harmônica. Cabe considerar que o nível não-astronômico se caracteriza por ser uma oscilações de natureza mais aleatória que a da maré astronômica, o que inclui a maré meteorológica mas não se restringe a ela, podendo outros fenômenos de mais alta frequência contribuírem para o aumento ou diminuição do nível do mar (Melo, 2017).

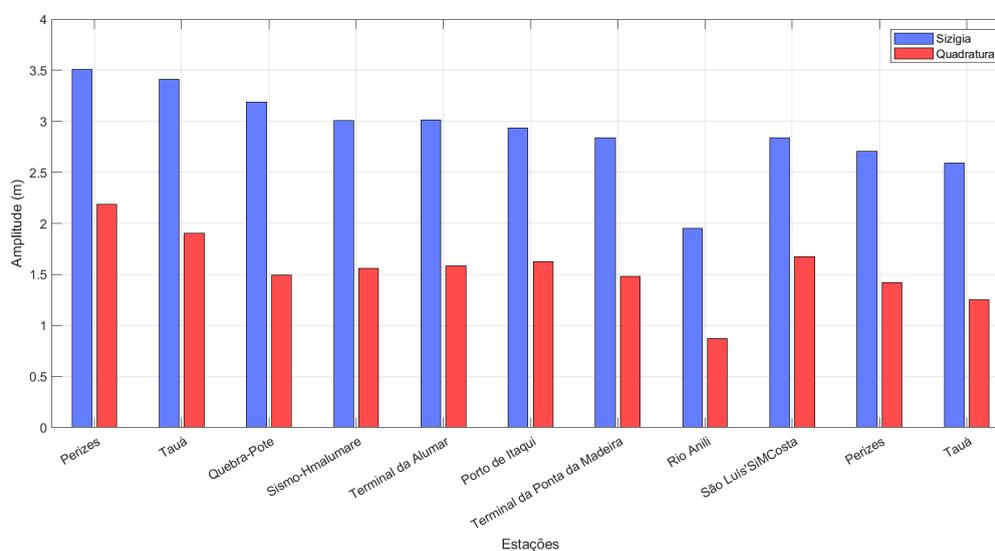
De acordo com o percentual de variância, os resultados da análise harmônica indicam que a variação percentual prevista da maré astronômica em relação à variação original dos dados foi de 98,8% na estação maregráfica E1 durante o período chuvoso e de 99% no período seco. Na estação E2, os valores foram de 98,7% e 98,5%, respectivamente. Para a E3, a variação foi de 99,2% no período chuvoso, 99,6% no período seco e 99,0% na maior série contínua. Na estação E7, os valores foram de 99% no período chuvoso e 98,2% no seco. A estação E4 apresentou uma variação de 99,8% no período chuvoso, enquanto a E5 registrou 80,1% no mesmo período. Para a estação E6, a variação foi de 99,5% no período seco. Na estação E8 observou-se um valor de 99,2% no período chuvoso, enquanto a estação E9 registrou 99,8% nesse mesmo período. A estação E10 registrou um valor de 98,8% no período chuvoso e a E11 apresentou uma variação de 96,7%. O que explica a dominância dos fatores astronômicos na maré da região em relação ao nível não-astronômico.

É importante ressaltar que a análise conseguiu explicar a variância total da grande maioria dos dados, porém, na estação de Rio Anil (E5) uma parte da série não foi representada de maneira eficaz, o que pode explicar a grande amplitude do NnA na E5, os dados de maré da estação cobrem um período muito pequeno (1 mês) onde algumas componentes podem ser mal estimadas, prejudicando a reconstrução da série. O valor previsto foi de 80,1%, indicando que apenas 80,1% da variância da série foi explicada pelas componentes harmônicas, o ruído residual (19,9) indica que o modelo harmônico não conseguiu capturar bem as variações da série (Pawlowicz *et al.*, 2002).

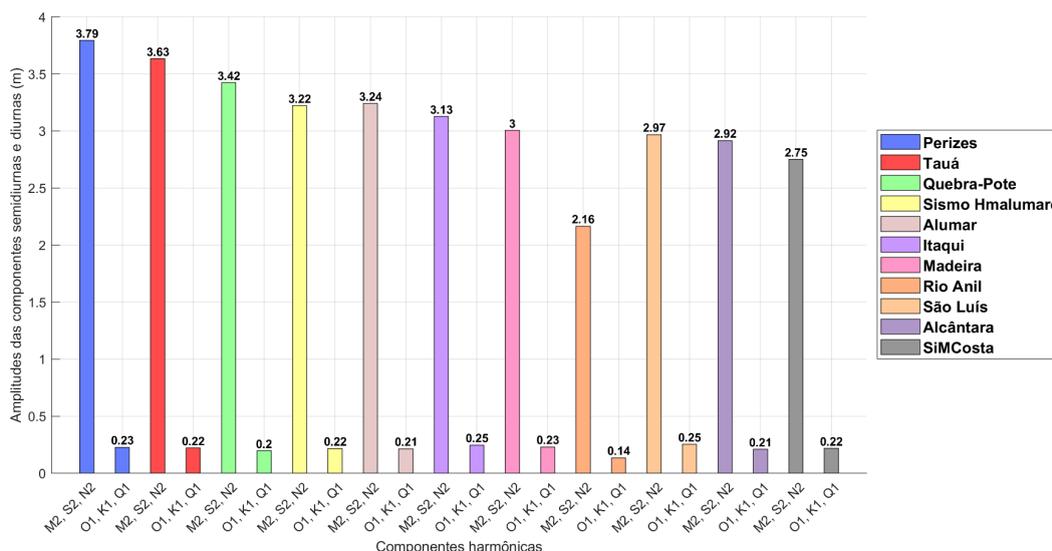
Neste estudo, foram calculadas as amplitudes máximas de maré de sizígia e de quadratura a partir das componentes harmônicas principais (Figura 20). Nota-se que os valores de amplitude encontrados para a maré de sizígia nas estações localizadas dentro da BSM são superiores a 2,5 m. A exemplo, a maré de sizígia no Terminal Ponta da Madeira foi de 2,83 m e a de quadratura de 1,47m. Valores parecidos foram encontrados por Soares (2013) no mesmo terminal, que obteve para vários anos uma maré de sizígia acima de 2,80 m, já em relação a maré de quadratura foram encontrados valores entre 2,4 a 2,6 m. Percebe-se também uma amplificação acima de 3 m da maré nas estações de Perizes e Tauá, visto que essas regiões encontram-se na região mais interna do estuário, recebendo maior influência da geomorfologia da região e da maior descarga dos rios da região, principalmente no período de chuvas, processos que colaboram para modificar o nível do mar local.

Já para a BSJ, a amplitude da maré máxima para o período analisado apresentou uma amplitude em sizígia de 3,19 m na estação Quebra-Pote e de 2,59 m na estação do SiMCosta. No período de quadratura, as referidas estações apresentaram, respectivamente, uma amplitude de 1,49 m e de 1,25 m, demonstrando uma influência marcante nas marés máximas. Este resultado mostra que, assim como acontece para a BSM, há uma amplificação das marés na BSJ em 18% no período de Sizígia e de 16% no período de quadratura, à medida que a onda se aproxima de águas mais rasas.

A figura 21 mostra a contribuição das componentes semi-diurnas e diurnas no nível do mar, separadamente, a partir das 11 estações analisadas. A influência das componentes semidiurnas em cada uma das estações analisadas foi de 94,28% em Perizes; 94,29% em Tauá; 94,48% em Quebra-Pote; 93,60% em Sismo Hmalumare; 93,91% em Alumar; 92,60% em Itaqui; 92,88% em Madeira; 93,91% em Rio Anil; 92,24% em São Luís; 93,29% em Alcântara e 92,59% em SiMCosta. Já as componentes diurnas da maré contribuíram com 5,72%, 5,71%, 5,72%, 6,40%, 6,09%, 7,40%, 7,12%, 6,09%, 7,76%, 6,71% e 7,41%, respectivamente.



**Figura 20** - Variação das amplitudes máximas da maré em situação de sizígia e quadratura.



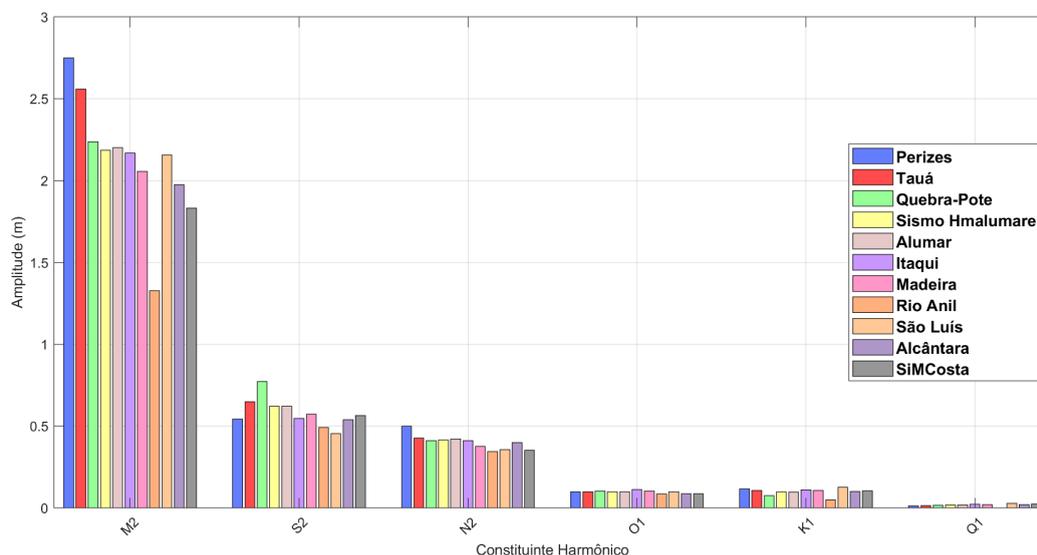
**Figura 21** – Variação das amplitudes máximas das componentes semi-diurnas e diurnas da maré.

Com base em estudos prévios que reconhecem a relevância dos principais componentes semidiurnas (M2, S2 e N2) e diurnas (O1, K1 e Q1) na região do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira na BSM (Dalbone, 2014; Caroli, 2017; Czizewski *et al.*, 2020; Paschoaleti, 2023), esta análise se detém nesses parâmetros, portanto, não estão incluídas as demais componentes que foram consideradas como significativas pela análise harmônica.

A figura 22 ilustra a variação espacial das componentes harmônicas da maré em relação aos diferentes pontos analisados. A estação maregráfica Alcântara (E6), situada mais ao largo, possui a componente principal lunar, M2, com 1,98 m. Pode-se observar a amplificação dessa componente na medida em que a onda percorre o caminho a montante do estuário, como pode ser notado na estação Perizes (E7) onde a M2 alcança 2,75 m. Nota-se também o aumento da componente S2 (principal solar), que é responsável pela definição dos períodos de quadratura e sizígia, em direção à estação Quebra-Pote (E10), que fica localizada na BSJ, chegando a 0,77 m. Outra componente que foi analisada e tem importância na região é a N2, que também aumenta em direção ao interior do estuário e possui 0,50 m na estação Perizes.

Além disso, observa-se que, em ambas as baías, os constituintes semidiurnos M2 (Principal Lunar), S2 (Principal Solar) e N2 (Lunar Elíptica Maior) apresentaram as maiores amplitudes. O que já era esperado, uma vez que esses componentes são geralmente os mais influentes na energia das marés na região (Baías do Brasil, 2018).

Resultados parecido foram obtidos por Caroli (2017), a autora encontrou marés semidiurnas predominantes no Terminal Marítimo Ponta da Madeira, localizado na BSM, em que obteve as seguintes amplitudes para M2, S2 e N2: 2,12 m, 0,6 m e 0,3 m, respectivamente.



**Figura 22** – Análise espacial das marés, mostrando as diferenças nas amplitudes (m) dos componentes harmônicos do nível do mar nas estações E1 a E11 (Figura 1), com a maior série temporal.

A Tabela 6 apresenta os resultados do Número de Forma (F), que é adimensional, obtido para cada uma das estações maregráficas avaliadas. Para o cálculo das estações que possuíam mais de uma série, foi considerada a maior série temporal de dados disponíveis. Os resultados mostram que o F, razão entre as amplitudes diurnas e as semidiurnas, obtido para cada uma das 11 estações deste trabalho, condiz com o intervalo de F da tabela 3. Deste modo, a maré na BSM e na BSJ é classificada como predominantemente semidiurna, ou seja, com ocorrência de duas preamares (aproximadamente iguais) e duas baixa-mares em um dia.

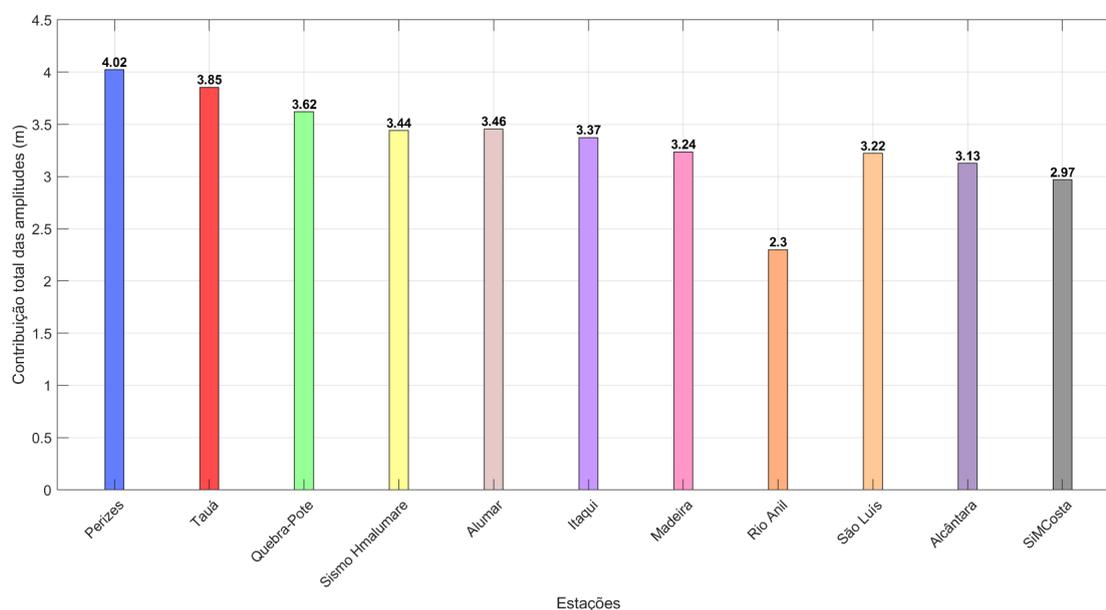
**Tabela 6** – Número de forma (F) de cada estação maregráfica analisada neste estudo (E1 a E11), caracterizando o período da maré astronômica na região como semidiurno.

Estações										
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
F										
0,07	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08

Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os descritos por Czizewski *et al.* (2020) realizado para o GM, que encontraram na região uma maré semidiurna dominante, com o estudo de Soares (2013) para o Terminal Marítimo Ponta da Madeira, na BSM e com os descritos por Vellozo e Alves (2004) que analisaram o panorama geral das marés ao longo da costa brasileira, havendo um predomínio de oscilações semidiurnas amplificadas na região norte do Brasil.

A contribuição total da amplitude dos componentes M2, S2, N2, O1, K1 e Q1 no nível do mar nos pontos analisados está mostrada na figura 23. Nota-se que a medida que se adentra no interior do estuário, a amplitude da maré aumenta. Neste trabalho, as maiores alturas de maré são encontradas na região mais interna do estuário, especificamente dentro da BSM, onde foi encontrada uma amplitude de maré de 4,02 m, ou seja, uma altura de 8 metros na estação de Perizes.

Na BSJ, a maior amplitude encontrada também está situada na região mais interna da baía, especificamente na estação de Quebra-Pote, com uma amplitude total de 3,62 m. Em contraste, na estação SiMCosta, situada na faixa mais externa da baía, recebendo menos influência do aporte fluvial, a amplitude registrada foi de 2,97 m.

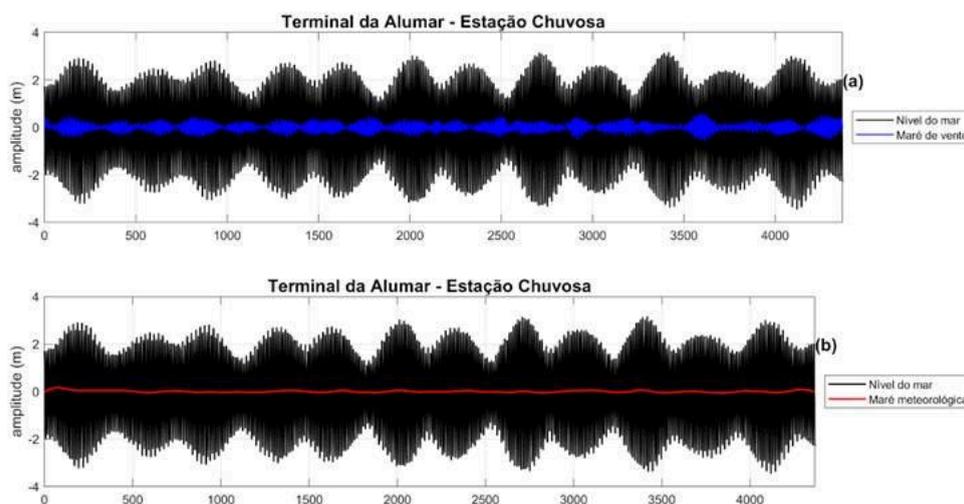


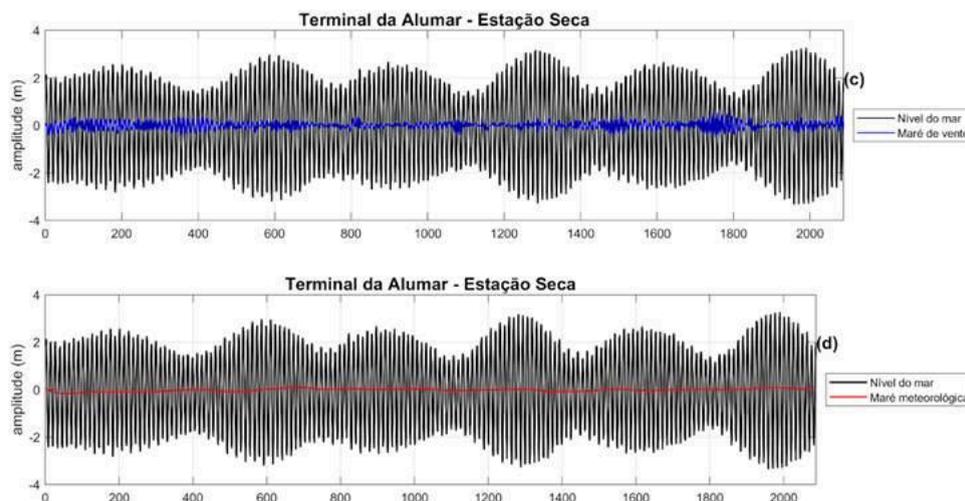
**Figura 23** – Contribuição total das componentes harmônicas para o nível do mar nas estações E1 a E11, de acordo com a maior série temporal em cada ponto analisado.

## 5.2. Nível não-astronômico e influência da maré meteorológica na área de estudo

Estudos como o de Soares (2013), mostram que a amplitude da maré astronômica aumenta em direção ao Norte/Nordeste da costa brasileira, o que inclui o Maranhão. Embora a energia das marés na região de estudo seja predominantemente de origem astronômica, o nível do mar pode sofrer oscilações adicionais causadas por fatores meteorológicos, como vento e pressão atmosférica, especialmente durante o período de estiagem (Agosto-Setembro-Outubro), quando os ventos são mais intensos e com direção predominantemente de nordeste-leste ( $\sim 70^\circ$ ) na região.

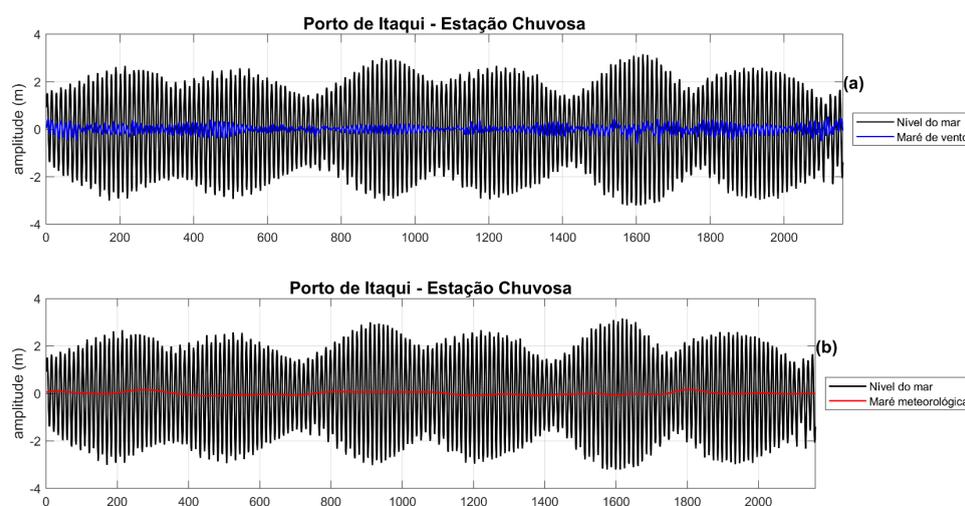
As figuras 24a-b correspondem ao período chuvoso e a figura 24c-d ao período seco da série temporal do Terminal da Alumar (E1). Na referida estação, a MM e a maré de vento obtida apresentaram valores mais elevados (0,16 m e 0,56 m) durante a estação chuvosa, respectivamente. Enquanto na estação seca, os valores máximos registrados de MM e maré de vento foram de 0,09 m e 0,54 m, respectivamente.

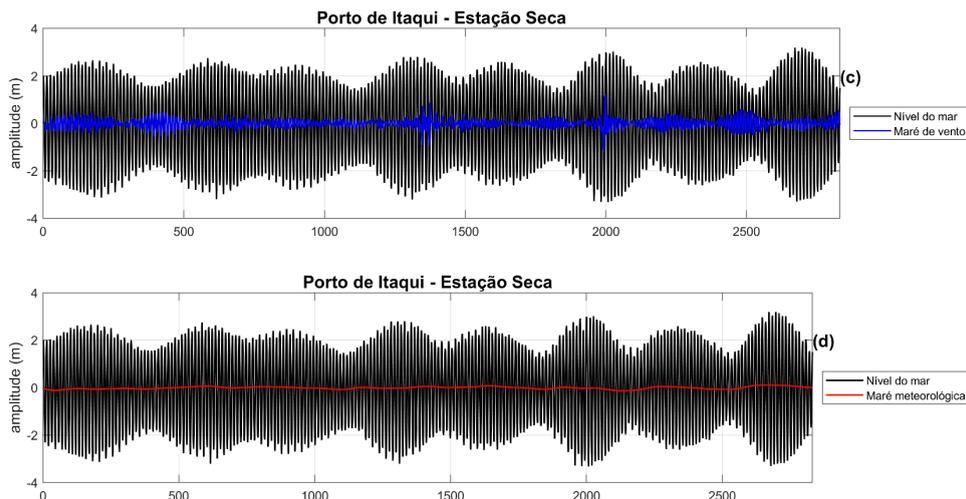




**Figura 24** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) no Terminal da Alumar para o período de dezembro a junho de 2021 (a) e (b) e de julho a setembro de 1984 (c) e (d).

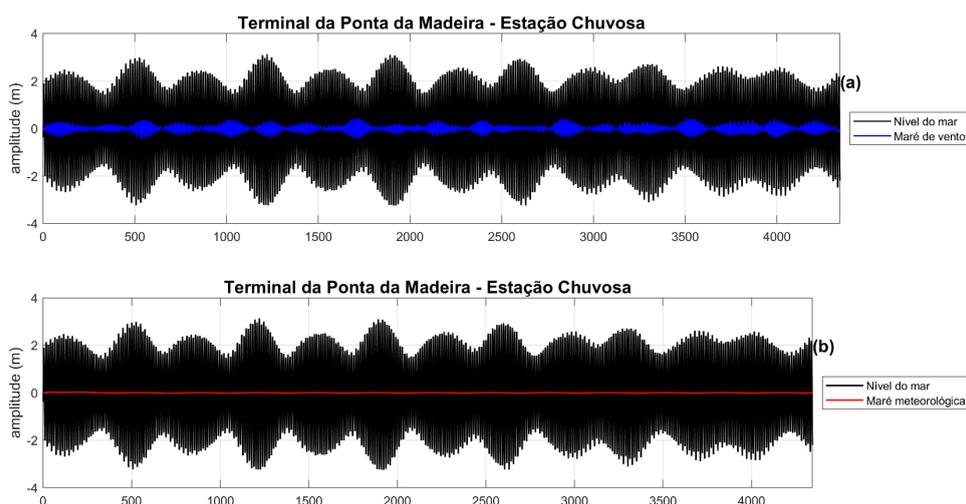
A figura 25a e 25b corresponde ao período chuvoso e a figura 25c e 25d ao período seco da série temporal do Porto de Itaqui (E2). Assim como na E1, nessa localidade o nível não-astronômico também foi maior durante o período seco, porém a maré meteorológica encontrada foi maior durante a estação chuvosa, onde a amplitude máxima alcançada foi de 0,16 m e de 0,10m para o período seco. A maré de vento foi maior na estação seca, com 1,18 m enquanto no período chuvoso foi de 0,52 m.

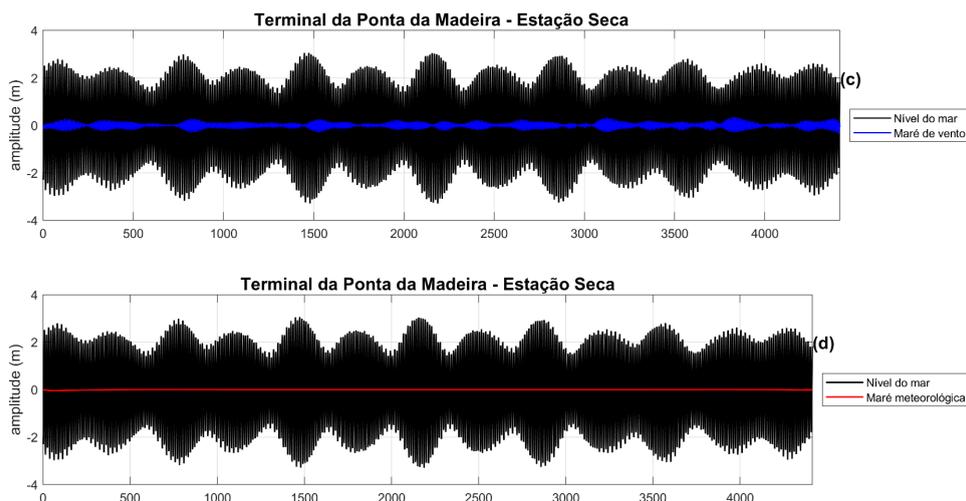




**Figura 25** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) no Porto de Itaqui para o período de janeiro a março de 1985 (a) e (b) e junho a outubro de 1984 (c) e (d).

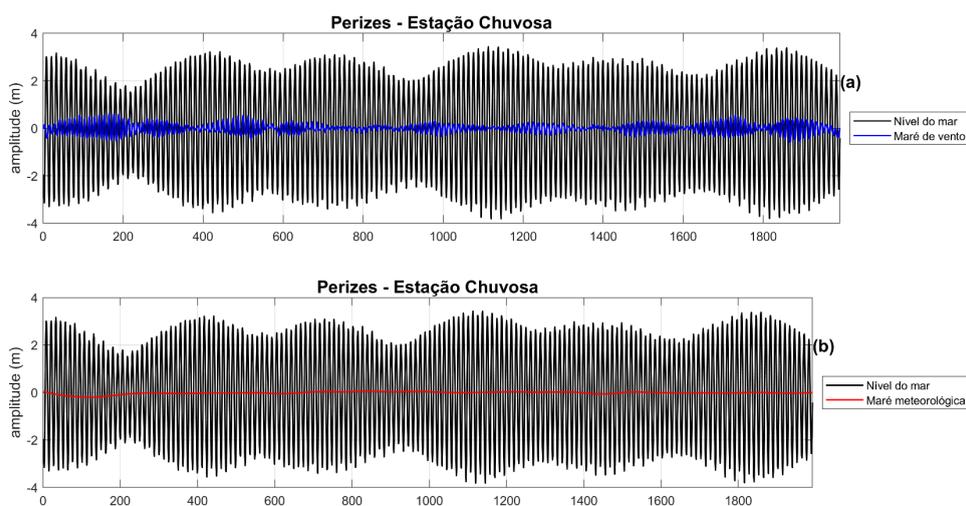
A figura 26a e 26b corresponde ao período chuvoso e a figura 26c e 26d ao período seco da série temporal do Terminal da Ponta da Madeira (E3). Nessa estação verifica-se que tanto o NnA, a MM e a maré de vento apresentaram valores mais elevados durante a estação chuvosa, onde a amplitude máxima da maré meteorológica foi de 0,03 m e a maré de vento 0,44 m, enquanto na estação seca, o valor máximo registrado nas referidas bandas foi de 0,004 m e 0,35 m, respectivamente.

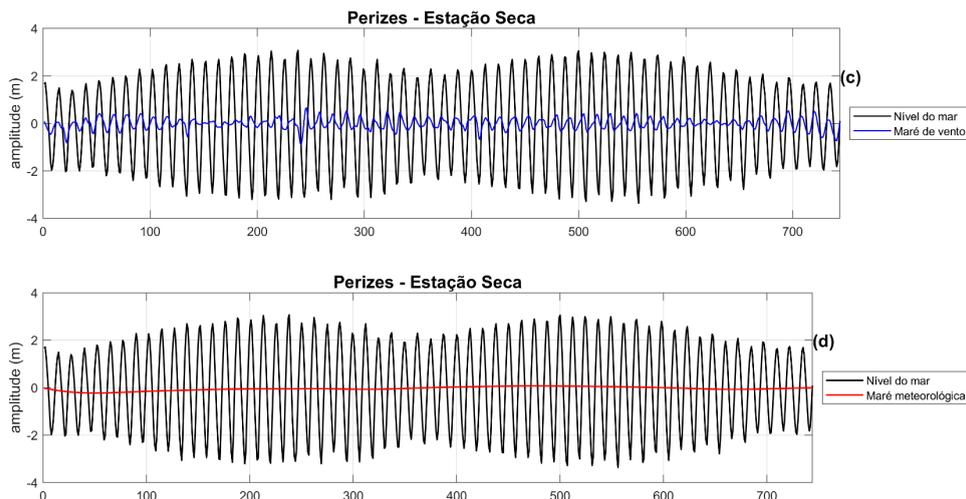




**Figura 26** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) no Terminal da Ponta da Madeira para o período de janeiro a junho (a) e (b) e de julho a dezembro de 2015 (c) e (d).

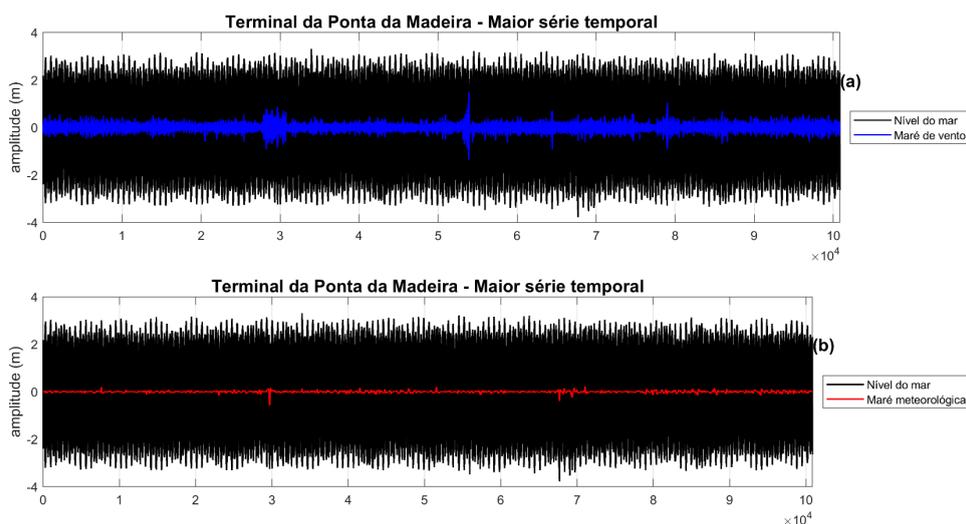
A figura 27a e 27b corresponde ao período chuvoso e a figura 27c e 27d ao período seco da série temporal de Perizes (E7). Nessa localidade, a maré meteorológica apresentou valores mais elevados durante a estação seca. A amplitude máxima alcançada foi de 0,07 m, enquanto na estação chuvosa, o valor máximo registrado foi de 0,06 m. A maré de vento também foi maior na estação seca, com uma amplitude de 0,62 m referente ao primeiro semestre do ano e de 0,65 m referente ao segundo.





**Figura 27** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Perizes para o período de abril a junho de 2009 (a) e (b) e de outubro e novembro de 2005 (c) e (d).

A figura 28 corresponde a série do Terminal da Ponta da Madeira (E3), é a maior série temporal contínua deste trabalho, com 11 anos e 6 meses de dados de elevação do nível do mar. A máxima amplitude da maré de vento foi de 1,48 m (Figura 28a) e a amplitude da maré meteorológica encontrada para esse período foi 0,22 m (Figura 28b).



**Figura 28** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) no Terminal da Ponta da Madeira para o período de julho de 1991 a dezembro de 2002.

As figuras 29 a 35 correspondem ao período chuvoso das estações São Luís (E4), Rio Anil (E5), Tauá (E8), Sismo Hmalumare (E9), Quebra-Pote (E10) e SiMCosta (E11). A figura 34 representa o período seco na estação Alcântara (E6).

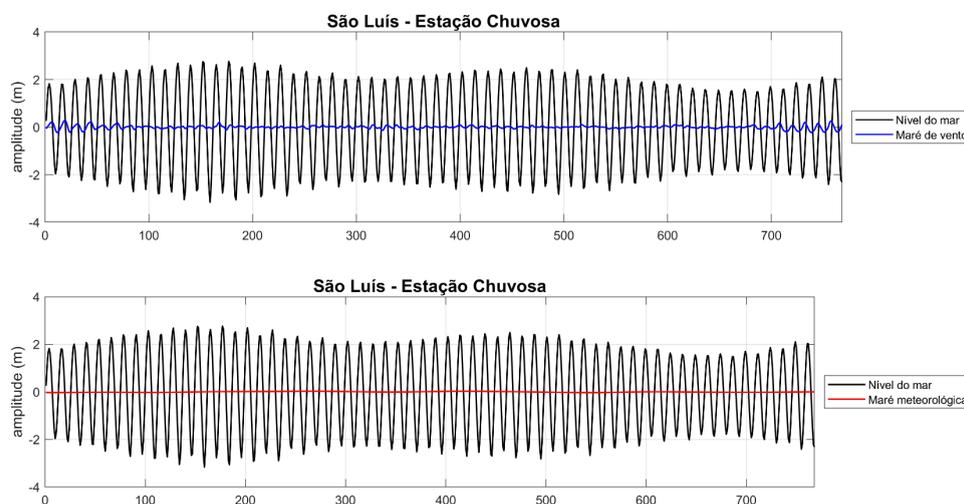
Os resultados mostram que quando comparada aos valores da maré astronômica, vistos na seção anterior, a amplitude da maré meteorológica é relativamente pequena na grande maioria das estações analisadas na região da BSM, registrando valores de: 0,02 m (E4); 0,06 m (E9); 0,09 m (E6) e 0,11 m (E8). Com exceção da E5, em que a amplitude da MM chamou atenção, essa localidade apresentou um valor de 0,41 m. Como explicado na seção anterior ao tratar do nível-não astronômico, essa foi a única série em que os dados não foram bem representados pela análise harmônica. O que poderia explicar esse valor tão alto. A maré meteorológica registrada para a BSJ na estação Quebra-Pote (E10) apresentou uma amplitude de 0,08 m (8 cm), enquanto na estação SiMCosta, a amplitude foi de 0,05 m (5 cm).

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a maré de vento foi a banda dominante da energia contida no nível não-astronômico, em todos os pontos analisados. Os valores encontrados para a maré de vento na BSM foi de: 0,28 m (E4); 0,25 m (E9); 0,18 m (E6); 0,41 m (E8) e 1,56 m (E5). Já na BSJ, a amplitude da maré de vento foi de: 0,51 m (E11) e 0,56 m (E10). Os padrões observados nas duas bandas que compõem o NnA (maré meteorológica e maré de vento), indicam que os efeitos meteorológicos (como ventos e pressão atmosférica) tendem a ser secundários, mas ainda influenciam o nível do mar da região em menor grau. Melo (2017), ao avaliar como a energia se distribui no NnA entre as componentes sazonal, da maré meteorológica e da maré de vento em diferentes regiões ao longo da costa brasileira, observou que a maré de vento é a banda dominante em Fortaleza, na região Nordeste do Brasil. Já na costa S/SE brasileira, grande parte da energia de origem não-astronômica do nível do mar concentrou-se na banda da MM .

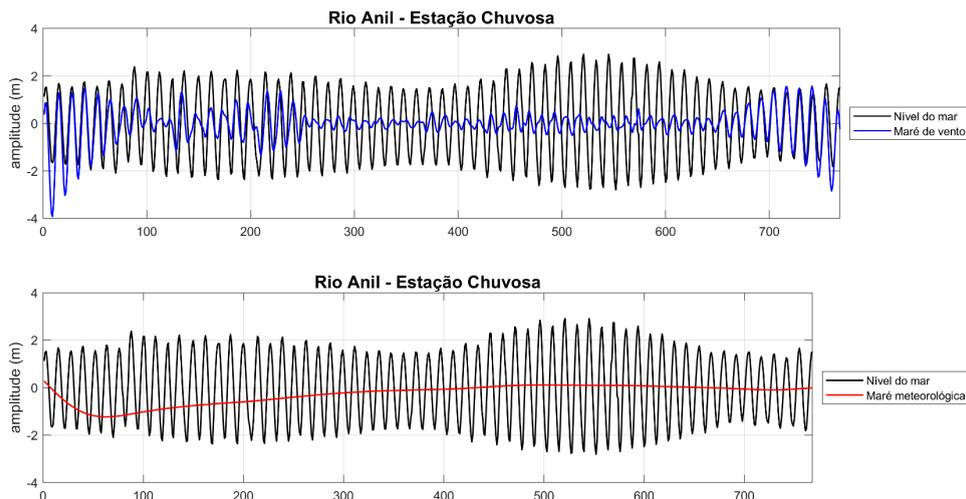
O comportamento observado nos períodos de seca e chuva para a maré meteorológica estão de acordo com o estudo de Pereira e Harari (1995), no qual os autores indicam que os principais componentes meteorológicos que afetam a plataforma adjacente à BSM têm impacto reduzido na hidrodinâmica da baía, sendo responsáveis por elevações de 0,05 m no nível do mar durante o verão e de 0,03 m no inverno. No presente trabalho, a maré meteorológica encontrada apresentou os valores máximos no período chuvoso, quando os ventos alísios atuantes são menos intensos (Barreto et al., 2018).

Os valores encontrados neste trabalho também estão bem próximos ao encontrado por Jansen (2024), ao analisar o comportamento da maré astronômica para o GM no período de maio de 2022, a autora encontrou uma maré meteorológica de 0,0008 m para a BSM e de 0,075 m para a BSJ.

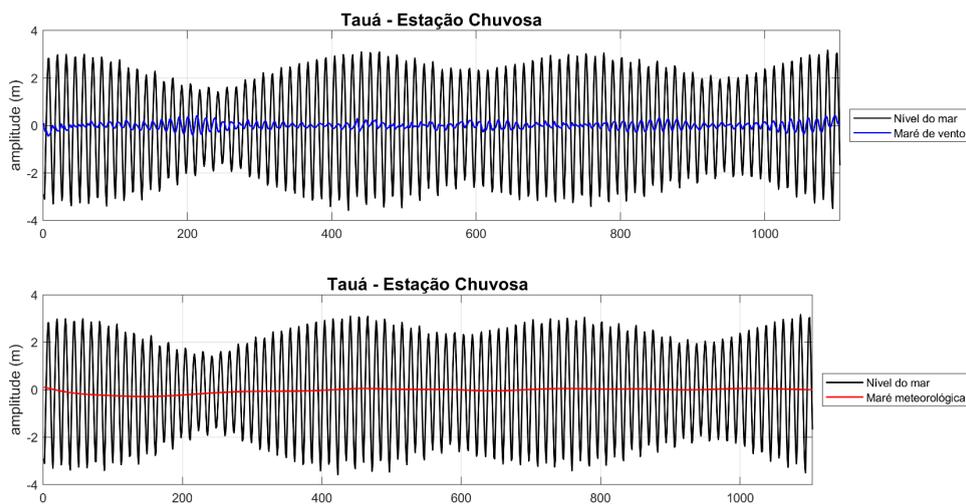
Considerando os resultados obtidos, quando comparados aos valores da maré astronômica, observa-se que a influência da componente meteorológica na elevação do nível do mar é relativamente pequena. Apesar disso, Paschoaleti (2023) argumenta que, mesmo com pouca expressão, as forçantes atmosféricas desempenham um papel importante na indução de outros processos hidrodinâmicos na região, como as correntes de densidade.



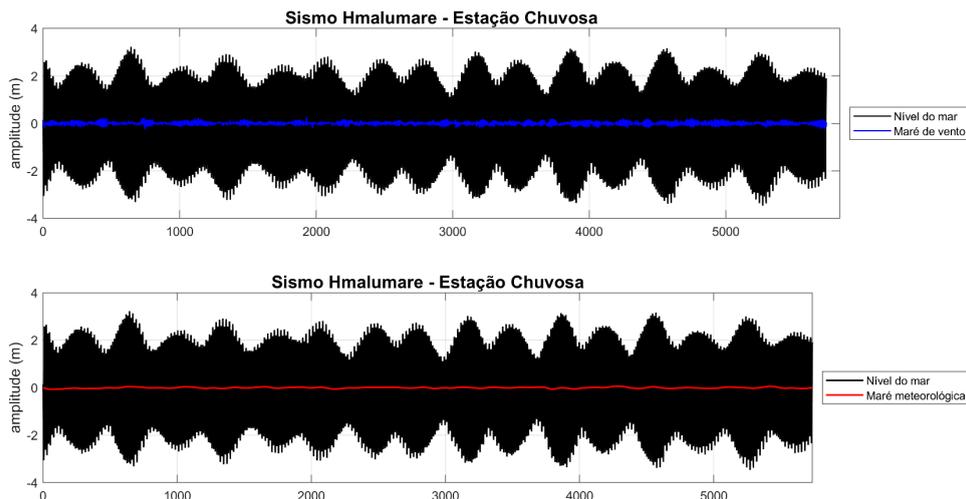
**Figura 29** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação São Luís para o período de maio e junho de 1961.



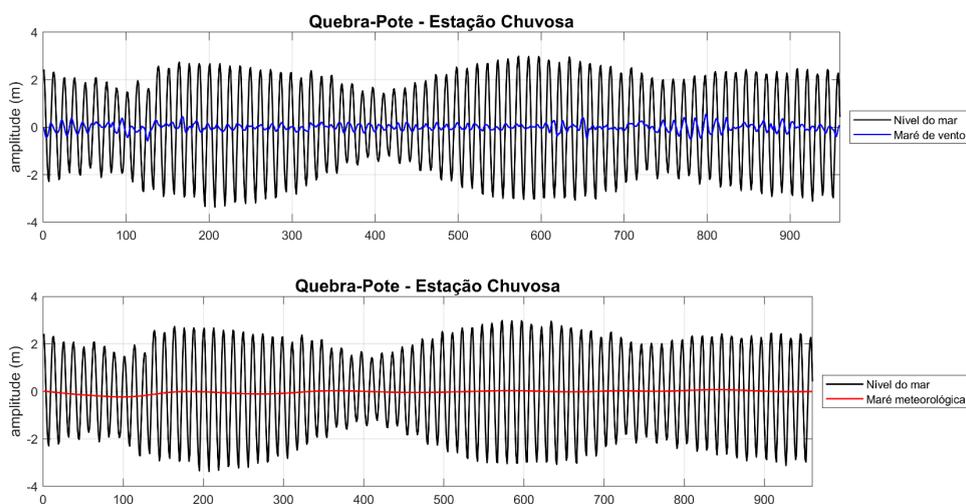
**Figura 30** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Rio Anil para o período de janeiro e fevereiro de 1983.



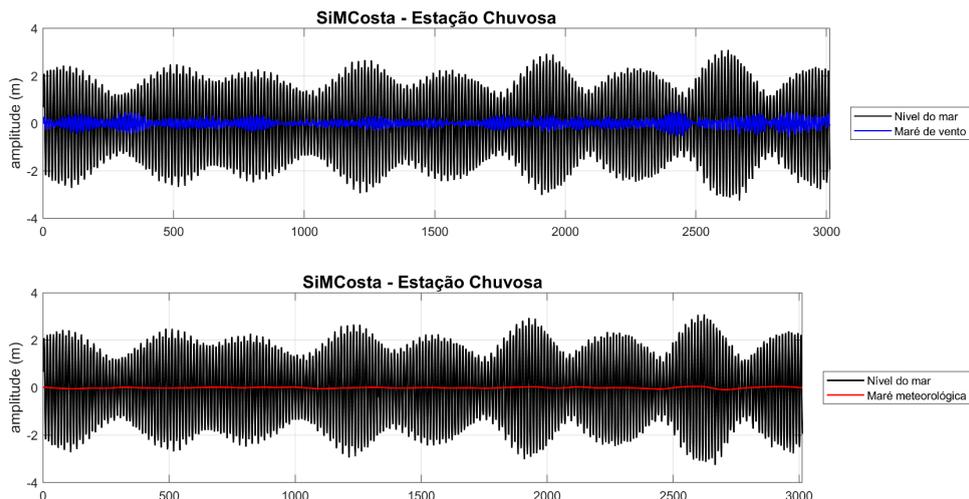
**Figura 31** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Tauá para o período de abril e maio de 2009.



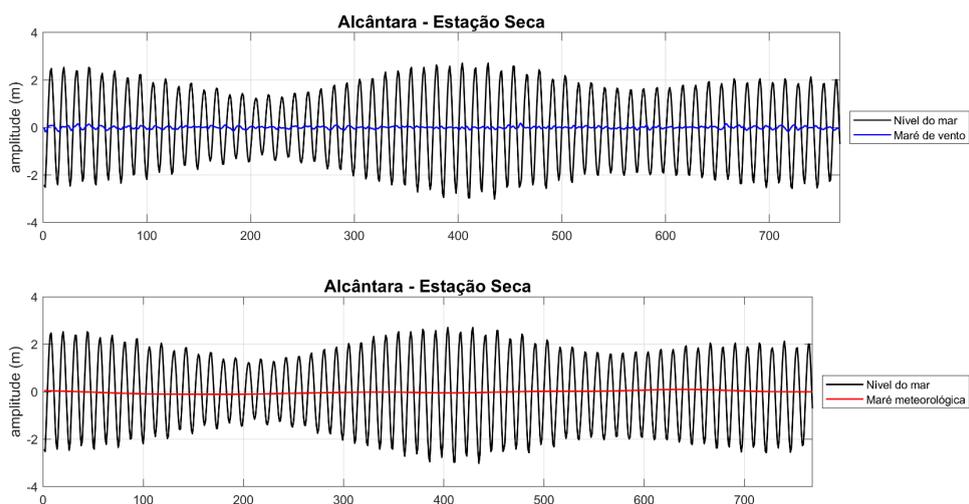
**Figura 32** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Sismo-Hmalumare para o período de outubro a junho de 2021.



**Figura 33** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Quebra-Pote para o período de março a maio de 1982.



**Figura 34** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação SiMCosta para o período de novembro a abril de 2023.



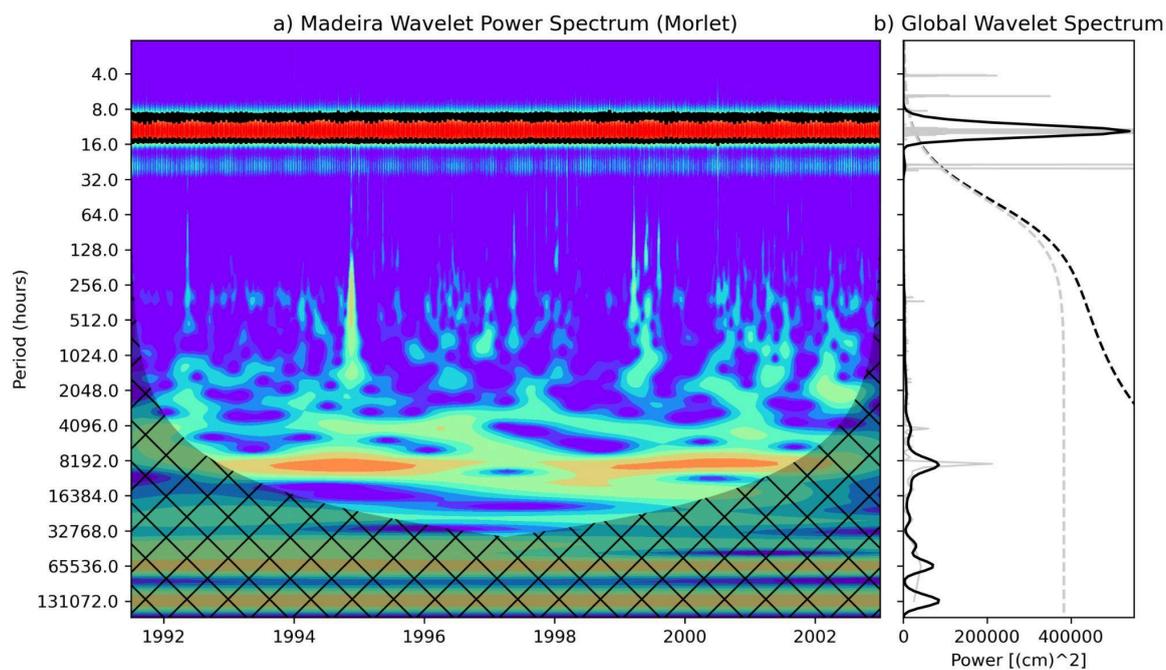
**Figura 35** - Séries temporais do nível do mar bruto (linha preta) e decomposição do nível não-astronômico na banda da maré meteorológica (linha vermelha) e na maré de vento (linha azul) na estação Alcântara para o período de novembro e dezembro de 1982.

### 5.3. Variabilidade espectral da altura do nível do mar no Golfão Maranhense

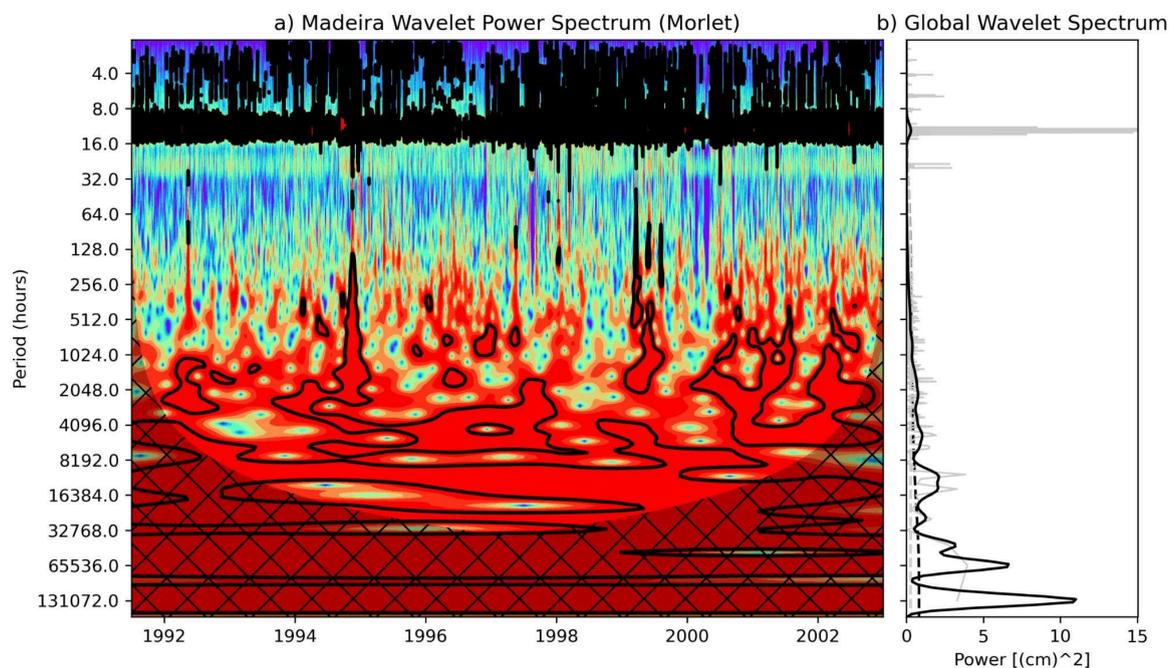
O espectro de energia dos dados brutos de nível do mar distribuídos no Golfão Maranhense, analisado para o período de julho de 1991 a dezembro de 2002 (11 anos e 6 meses), é avaliado na figura 36. Ao se considerar os dados brutos, observa-se que a maior quantidade de variância dos dados encontra-se associada a agentes físicos com periodicidade variando de 8 a 16 horas, conforme mostra o pico de energia do espectro

global. Essa janela representa as oscilações das componentes da maré semi-diurnas (12,42 h), bem como ondas de menor e maior período associadas. Considerando a cor e intensidade do sinal energético, nota-se uma alta energia associada a oscilações de maior períodos, como ocorre próximo ao período de 8000 a 9000 horas (no caso, equivalente a 11-12,5 meses), representando as variações do ciclo anual. Este sinal é mais intenso e significativo entre 1993 a final de 1996 e entre 1998 e 2002, separados por um período de menor variação. Outro sinal espectral é observado nas escalas de 2000 a 130 horas (no caso, equivalente a 2,7 meses - 2,7 dias), com forte assinatura espectral no ano de 1997 e 1999. Esta análise mostra que o sinal climático (ciclo anual) e meteorológico (na escala de 3 dias a 3 meses) são mais intensos e por isso influenciam mais o nível do mar no Golfão Maranhense do que as componentes de maré diurnas.

O espectro de energia do NnA, avaliado para o mesmo intervalo da série de dados, é mostrado na figura 37. Esses resultados mostram que a análise harmônica executada através das análises do pacote *t-tide* não retirou todo o espectro energético das componentes astronômicas que atuam na região, restando um forte sinal espectral periódico na mesma janela anteriormente descrita (isto é, de 8 a 16 h) da maré astronômica. Além disso, um forte sinal espectral aparece nas escalas de 2 (podendo ser ainda menor) a 8 h. Ademais, os sinais de mais longo período, i.e. o ciclo que corre do diário (3 dias) ao intrasazonal (3 meses); e o ciclo anual (12 meses) se intensificam na série do NnA, aparecendo com muito mais potência espectral associada, inclusive para o ano de 1997, com as oscilações de mais longo período (8 a 80 dias) ficando mais frequentes e intensas desde o ano de 1999.



**Figura 36 - a)** Espectro de potência *wavelet* e **b)** Espectro *wavelet* global da altura do nível do mar (**dados brutos**) na estação E3 (Terminal Marítimo Ponta da Madeira) para o período de julho de 1991 a dezembro de 2002. Espectro teórico de Fourier (linha cinza pontilhada) e Potência da Transformada de Fourier (linha cinza contínua).



**Figura 37 - a)** Espectro de potência *wavelet* e **b)** Espectro *wavelet* global da altura do nível do mar (**nível não-astronômico**) na estação E3 (Terminal Marítimo Ponta da Madeira) para o período de julho de 1991 a dezembro de 2002. Espectro teórico de Fourier (linha cinza pontilhada) e Potência da Transformada de Fourier (linha cinza contínua).

## 6. CONCLUSÕES

A maré na região do Maranhão foi caracterizada como semidiurna, com duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar ao longo do Golfão Maranhense (GM). As componentes que se mostraram mais importantes foram as semidiurnas M2, S2 e N2, sendo capazes de explicar a quase totalidade da maré astronômica. A influência das componentes semidiurnas em cada uma das estações analisadas foi de 94,28% em Perizes; 94,29% em Tauá; 94,48% em Quebra-Pote; 93,60% em Sismo Hmalumare; 93,91% em Alumar; 92,60% em Itaqui; 92,88% em Madeira; 93,91% em Rio Anil; 92,24% em São Luís; 93,29% em Alcântara e 92,59% em SiMCosta. Já as componentes diurnas da maré contribuíram com 5,72%, 5,71%, 5,72%, 6,40%, 6,09%, 7,40%, 7,12%, 6,09%, 7,76%, 6,71% e 7,41%, respectivamente.

Nas estações onde foi possível comparar a estação seca à chuvosa entre o mesmo ponto (E1, E2, E3 e E7), observou-se que a amplitude da maré astronômica e da maré meteorológica foram maiores durante a estação chuvosa, exceto a banda da maré meteorológica em Perizes. Nesta estação a MM foi maior durante o período seco (amplitude de 0,07 m) e menor no período chuvoso (0,06 m). Observa-se que o NnA foi maior durante o período seco. A exceção ocorreu na estação do Terminal da Ponta da Madeira, onde a amplitude da maré astronômica foi maior durante a estação seca e o nível não-astronômico menor durante a estação seca. Enquanto a maré de vento variou em relação aos períodos secos e chuvosos, no Porto de Itaqui e em Perizes a maré de vento foi maior na estação seca, com 1,18 m e 0,65 m, respectivamente. Quanto ao período chuvoso a maré de vento foi maior no Terminal da Alumar e no Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com valores de 0,56 m e 0,44 m.

Neste trabalho, considerando os resultados das maiores séries temporais analisadas para o GM, as máximas alturas de maré foram encontradas em regiões *inshore* ao estuário, especificamente no interior da BSM, onde foi encontrada uma amplitude de maré de 4,02 m na estação de Perizes. A partir da análise dos dados da altura do nível do mar para a região do GM, foi possível concluir que a maré astronômica ocorreu de forma mais intensa durante a estação chuvosa. Com base na análise dos dados do nível não-astronômico para a região do GM, foi possível concluir que o fenômeno da maré meteorológica e da maré de vento ocorreu em ambas as estações do ano (seco x chuvoso) e em todas as estações dentro do Golfão Maranhense (E1 a E11). Observa-se que tanto o

NnA quanto a MM foi maior durante o período chuvoso na estação Rio Anil (amplitude de 2,5 m e de 0,41 m.). No entanto, é importante ressaltar que a análise harmônica conseguiu explicar a variância total da grande maioria dos dados, porém, na estação de Rio Anil (E5) uma parte da série não foi representada de maneira eficaz, o que pode explicar esses valores tão altos quando comparados aos demais valores encontrados no GM.

Considerando a maior série contínua de dados, na estação do Terminal da Ponta da Madeira, a altura do nível do mar (“maré bruta”) foi de 3,31 m e o NnA de 1,4 m. Este valor de 1,4 m de nível não-astronômico chama a atenção por ocorrer no período de maior atuação dos ventos na região. A segunda maior amplitude de maré meteorológica encontrada neste estudo foi na referida estação, o valor encontrado foi de 0,22 m (período seco do ano de 1997).

A análise espectral realizada neste estudo mostrou que agentes físicos com periodicidade variando de 8 a 16 h continuam a interferir no nível do mar de forma periódica, o que indica a atuação de componentes astronômicos residuais, mas que potencializam as variações do nível do mar e confundem a análise espectral ora baseada nas forçantes meteorológicas, oceanográficas e climáticas.

Ainda assim, percebe-se que os sinais espectrais na escala climática (ciclo anual, ou de 12 meses) e meteorológica (ciclo diário ao sazonal, ou de 3 dias a 3 meses) são mais intensos do que as próprias componentes de maré diurna na região, e por isso influenciam mais o nível do mar no GM. Além disso, um forte sinal espectral aparece nas escalas de 2 a 8 h, quando as principais componentes semi-diurnas são extraídas da série temporal.

Este trabalho, embora utilizando séries temporais de diferentes tamanhos e anos, permitiu ter uma compreensão geral da variação temporal das marés astronômica e meteorológica, além das variações de mais alta frequência que atuam sobre a região no Golfão Maranhense. A dificuldade em se analisar dados de maré na região é que, apesar de existir várias estações com dados no GM (a grande maioria delas na BSM) as séries temporais em geral são pequenas e antigas, não sendo fácil o acesso a dados atualizados e séries longas para uma análise de longo termo da maré.

O estudo do fenômeno das marés é de grande importância para regiões costeiras, especialmente para a área de estudo, que é regida predominantemente pelos efeitos astronômicos, pois permite avaliar as mudanças causadas pelas marés astronômicas e pelas

marés de origem mais aleatória, causada por efeitos atmosféricos, visto que podem indicar alterações no nível do mar, informações essenciais que podem contribuir para a mitigação e adaptação às mudanças do clima, gestão costeira, proteção ambiental, segurança da navegação e o planejamento das atividades econômicas e urbanísticas na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ab'Saber, A. N. Contribuição à geomorfologia do estado do Maranhão. *Notícia Geomorfologia*. Campinas, v. 3, n. 5, p. 3545, abr. 1960.

Almeida, A.; Taveira-Pinto, F.; Veloso-Gomes, F.; Paredes, G. M. Análise das Marés Meteorológicas em Leixões. 6ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, n. Outubro, 2009

Amaral, R. F. e Alfredini, P. Modelação hidrossedimentológica no canal de acesso do complexo portuário do Maranhão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, p. 5-14, 2010.

Andrade M. M. N; de Souza-Filho P. W. M; Szlafsztein C. F. Imagens de Alta Resolução para Re conhecimento da Susceptibilidade dos Recursos Socioeconômicos à Ameaça de Derrame de Petróleo no Complexo Portuário Itaqui-Bacanga, Maranhão, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management* 2009;9(2):127–133.

Barreto, H. N. ; Parise, C. K. ; Almeida JR, E. B. . The Cocais Forest Landscape. In: André Augusto Rodrigues Salgado; Leonardo José Cordeiro dos Santos; Júlio César Paisani. (Org.). *The Physical Geography of Brazil*. 1 ed.Switzerland: Springer, 2018, v. 1, p. 1-17.

Beardsley, R. C.; Candela, J.; Limeburner, R.; Geyer, W. R.; Lentz, S. J.; Castro, B. M.; Cacchione, D.; Carneiro, N. The M2 tide on the Amazon Shelf. *J. Geophys. Res.*, v. 100(C2), p. 2283–2319, 1995.

Bento, C.; Roso, R.; Arentz, M. Aplicação dos dados de maré nas atividades da hidrografia e da navegação. *Anais Hidrográficos*. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXIII, 2006.

Bittencourt, D. M. Descrição Pontual de maré, perfil de correntes e suas inter-relações em um ponto do estuário do rio Mearim, São Luís - MA. 2015. 54p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Brown, J. Tides. In: OPEN UNIVERSITY. ARTS FOUNDATION COURSE TEAM. *Waves, tides and shallow - water processes*. Oxford: Pergamon Press. cap. 2, p. 43-66, 1989.

Caroli, A. de; Pereira, A. F.; Paschoal, G. A.; Delpupo, D. Sistema de Informações Meteo-Oceanográficas em tempo real (SISMO®) Porto de Ponta da Madeira. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 21, n. 41, p. 15-29, 2017.

Coelho, C. J. C. e Damázio, E. Aspectos da Disponibilidade e dos Usos da Água na bacia do Bacanga/Ilha do Maranhão (Ilha de São Luís) - MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, 19:73-84, 2006.

Costa, A. M. S. Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão São Luís - MA. 2022. 70 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

Czizewski, A., Pimenta, F. M., Saavedra, O. R. Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. *Ocean Dynamics* 70, 667–682 2020.

Dalbone, R, C. Análise das Correntes de Maré ao Longo do Canal de Acesso Portuário da Baía de São Marcos: Um Estuário de Macromarés. 2014. 91p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica/COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Davies, J. L. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeit. Geomorphologie*, v. 8, p. 27 – 42, 1964.

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

Egbert, G. D. e Erofeeva S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J Atmos Ocean Technol* 19(2):183–204.

El-Robrini, M., Marques, V. J., Silva, M.A.M.A., El-Robrini, M. H. S., Feitosa A.C, Tarouco, J.E.F., Santos, J. H. S. e Viana, J. R. Maranhão. In: MUEHE, D. (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 87-130, 2006.

Ferreira, R.; Estefen, S. F. Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions. *Renewable Energy*, v. 34, n. 4, p. 1151-1157, 2009.

Fleming, F. P. Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2012.

Franco, A. S. *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2º ed. 344 p. Niterói, Rio de Janeiro, 2009.

Garcia, P. D. Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à área portuária do Maranhão. 2007. 258 p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

González-Gorbeña, E.; Rosman, P. C. C.; Qassim, R. Y. Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, v. 1, p. 421-433, 2015.

Harari, J.; Camargo, R. de. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 42, n. 1-2, p. 35-54, 1994.

Hidromares. Tipos de marégrafos. *Hidromares Soluções para Monitoramento Ambiental e Oceanográfico*. 03/02/2022. Disponível em: <https://hidromares.com.br/blog/tipos-maregrafos/>. Acesso em: 28/01/2024.

Jansen, T. R. S. Propagação das Marés no Golfão Maranhense e Cenários de Inundação na Orla Oceânica da Ilha do Maranhão – Brasil. 2024. 78p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

Melo Fo., E. Maré Meteorológica na Costa Brasileira, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, 2017. Disponível em: Maré meteorológica na costa brasileira

Mesquita, A. R.; Harari, J. Marés e nível médio do mar nas costas brasileiras e no Atlântico Sul. *Boletim IG-USP, Publicação especial*, São Paulo, n. 6, fev. 1989.

Mesquita, A. R.; Harari, J. Early and Recent Sea Level Measurements in the Brazilian Coast. *IUGG XXV Assembly*, v. 8, n. 1, 2011.

Menezes, R. H. N. Relação entre a precipitação no Nordeste do Brasil e as anomalias de temperatura da superfície do mar dos oceanos atlântico e pacífico tropicais. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 120 f, 1995.

Milen, A. F.; Costa, A. DE S; Melo, A. V. L. D. DE; Aroucha, F. R.; Dias, L. J. B. DA S. Complexo portuário da baía de São Marcos: contribuições às análises geoambientais. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2006.

Miguens, A. P. Marés e correntes de maré; correntes oceânicas. In: *Navegação: a ciência e a arte – navegação costeira, estimada e em águas restritas*. DHN, Marinha do Brasil. Volume I, cap. 10, p. 227-274. Niterói, 1996.

Miyao, S.; Harari, J. Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia (25S-48W). *Boletim do Instituto Oceanográfico*, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 107-123, 1989.

Morais, J. O. Evolução Sedimentar da Área Adjacente ao Porto de Itaqui, Estado do Maranhão, Brasil. *Arquivo Ciências do Mar*, vol. 17, n. 2, p. 143-151, 1977.

Muehe, D.; Neves, C. F. The implication of sea level rise on the Brazilian coast: a preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 14, pp. 54-78, 1995.

Neto, P. B. L.; Saavedra, O. R.; Ribeiro, L. A. S. Modelagem e Análise de Geração Maremotriz no Estuário do Bacanga. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, CBA, 2012.

Nicolite, M.; Truccolo, E. C.; Schettini, C. A. F.; Carvalho, C. E. V. de. Oscilação do nível da água e a co-oscilação da maré astronômica no baixo estuário do rio Paraíba do Sul, RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, n. 2, p. 225-239, 2009.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). What are tides? National Ocean Service website, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/tides.html>, 06/16/24.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Cold & Warm Episodes by Season. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 20 fev. 2025.

Paschoaleti, D. M. Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias: estudo de caso da Baía de São Marcos (MA). 2023. 144p. Dissertação (Programa de Oceanografia) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Park, D. (ed). *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. Reino Unido, The Open University, 1989. 227 p

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

Pereira L.C.C., Trindade W.N., da Silva I.R., Vila-Concejo A. e Short A.D. Maranhão beach systems, including the human impact on São Luís Beaches. In: *Brazilian Beach Systems* Springer; p. 125–152, 2016.

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

Pugh, D. *Changing sea levels - Effects of tides weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press., 265 p, 2004.

Pugh, D.T. *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley & Son Ltd, 486 pp, 1987.

Raimundo, I. C. Análise e Previsão de Marés e Correntes de Maré Desenvolvimento da Ferramenta e Aplicação Prática. 2021. 326 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais) - Escola Naval, Alfeite, 2021

Romualdo, L. C. dos S.; Vieira, M. A. da C., Góes, C. E.; Schiabel, H. Utilização do filtro passa banda Butterworth no domínio da frequência para realce de microcalcificações em

imagens mamográficas digitais. 2008, Anais. Bauru: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

Santos, V. H. M. dos. Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré: complexo estuarino Arraial-São José (MA). 2018. 140 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

Soares, J. L. Análise da variabilidade espaço-temporal de dados de nível ao longo do litoral brasileiro. 2013. 78 f. TCC (Graduação em Oceanografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

Simó, D. H.; Horn Filho, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. Gravel, 2:93-103 ISSN 1678-5975, 2004.

Vellozo, T. G. e Alves, A. R. Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXI, 2004.

## APÊNDICE

Tabelas das componentes harmônicas significativas para os pontos estudados.

Valores foram gerados pela rotina de análise harmônica T\_TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002) para @Matlab.

Frequência (ciclos/dia)

Amplitude (m)

Fase (graus relativos à Greenwich, com correções nodais aplicadas à amplitude e à fase em relação ao tempo central.)

SNR > 2

**Tabela 1** - Componentes principais do Terminal da Alumar (E1) para o período de 07/12/2020 a 06/06/2021.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,001512	0,0222	11,35
MSF	0,002822	0,0216	21,29
Q1	0,037219	0,0186	186,79
O1	0,038731	0,0987	211,77
NO1	0,040269	0,0098	275,32
K1	0,041781	0,0964	240,38
MU2	0,07769	0,1012	298,17
N2	0,078999	0,4205	187,46
M2	0,080511	2,2004	196,37
L2	0,082024	0,1281	171,04
S2	0,083333	0,621	233,5
MO3	0,119242	0,0095	300,44
M3	0,120767	0,0174	306,11
MK3	0,122292	0,009	4,57
SK3	0,125114	0,0051	340,45
MN4	0,159511	0,0339	205,88
M4	0,161023	0,0945	217,08
SN4	0,162333	0,0089	298,91
MS4	0,163845	0,0511	269,44
2MK5	0,202804	0,0052	346,56
2MN6	0,240022	0,0248	273,28
M6	0,241534	0,0436	285,69
2MS6	0,244356	0,0389	322,14
2SM6	0,247178	0,0099	8,74
3MK7	0,283315	0,0006	54,96
M8	0,322046	0,0011	277,23

**Tabela 2** - Componentes principais do Porto de Itaquí (E2) para o período de 06/06/1984 a 01/10/1984.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
Q1	0,037219	0,0235	208,17
O1	0,038731	0,1128	219,43
K1	0,041781	0,1103	262,17
EPS2	0,076177	0,0429	300,92
MU2	0,07769	0,0961	298,29
N2	0,078999	0,4119	197,32
M2	0,080511	2,1679	204,49
L2	0,082024	0,171	191,3
S2	0,083333	0,547	247,62
M3	0,120767	0,028	311,06
MK3	0,122292	0,0395	343,85
MN4	0,159511	0,022	222,23
M4	0,161023	0,0692	220,63
MS4	0,163845	0,0456	268,98
2MN6	0,240022	0,0207	264,22
M6	0,241534	0,0346	270,79
2MS6	0,244356	0,0281	309,23
2SM6	0,247178	0,0115	22,15
M8	0,3220456	0,0085	337,34

**Tabela 3** - Componentes principais do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (E3) para o período de 01/07/1991 a 31/12/2002.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
SA	0,000114	0,0332	236,22
SSA	0,000228	0,0168	22,61
MM	0,001512	0,0067	331,28
MSF	0,002822	0,016	213,35
MF	0,00305	0,0128	351,09
2Q1	0,035706	0,0024	210,2
SIG1	0,035909	0,0062	254,38
Q1	0,037219	0,0204	197,74
RHO1	0,037421	0,0045	203,18
O1	0,038731	0,1033	215,48
TAU1	0,038959	0,0037	298,1
BET1	0,04004	0,0023	173,54
NO1	0,040269	0,004	210,29
P1	0,041553	0,0316	240,09
S1	0,041667	0,0173	21,52
K1	0,041781	0,1069	241,17
THE1	0,043091	0,0022	242,02
J1	0,043293	0,0049	264,68
SO1	0,044603	0,004	9,64
EPS2	0,076177	0,0252	282,94
2N2	0,077487	0,0501	187,92
MU2	0,07769	0,0932	297,93
N2	0,078999	0,3763	188
NU2	0,079202	0,0987	178,91
ALP2	0,080397	0,0405	262,76
M2	0,080511	2,0558	200,6
BET2	0,080626	0,0195	34,05
MKS2	0,08074	0,0177	344,9

LDA2	0,081821	0,0489	181,86
L2	0,082024	0,1379	204,5
T2	0,083219	0,0418	224,7
S2	0,083333	0,5728	234,94
K2	0,083562	0,183	230,64
MSN2	0,084846	0,0235	32,63
ETA2	0,085074	0,0079	299,29
MO3	0,119242	0,0128	334,3
M3	0,120767	0,0163	318,47
SO3	0,122064	0,0059	28,1
MK3	0,122292	0,0105	15,84
SK3	0,125114	0,0071	346,32
MN4	0,159511	0,0162	188,25
M4	0,161023	0,049	201,02
SN4	0,162333	0,0066	313,1
MS4	0,163845	0,0261	263,3
MK4	0,164073	0,0055	263,2
S4	0,166667	0,0037	2,44
SK4	0,166895	0,0022	19,08
2MK5	0,202804	0,0036	341,63
2MN6	0,240022	0,0179	272,58
M6	0,241534	0,0319	288,69
2MS6	0,244356	0,0302	317,53
2MK6	0,244584	0,0085	312,97
2SM6	0,247178	0,0072	351,18
MSK6	0,247406	0,0042	345,48
3MK7	0,283315	0,0005	127,16
M8	0,322046	0,0046	274,31

**Tabela 4-** Componentes principais da estação São Luís (E4) para o período de 25/05/1961 a 25/06/1961.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MSF	0,0028219	0,0376	353,1
ALP1	0,0343966	0,0098	84,45
2Q1	0,0357064	0,007	125,57
Q1	0,0372185	0,0279	197,23
O1	0,0387307	0,0991	214,41
K1	0,0417807	0,1263	227,77
OO1	0,0448308	0,0146	213,26
UPS1	0,046343	0,0125	71,28
EPS2	0,0761773	0,0386	356,9
MU2	0,0776895	0,0833	339,73
N2	0,0789992	0,3558	191,19
M2	0,0805114	2,1563	196,03
L2	0,0820236	0,0931	196,26
S2	0,0833333	0,4554	224,78
ETA2	0,0850736	0,0277	231,84
MO3	0,1192421	0,0091	343,61
M3	0,1207671	0,0143	348,79
MK3	0,1222921	0,0252	318,93
MN4	0,1595106	0,0328	236,57
M4	0,1610228	0,0921	224,26
SN4	0,1623326	0,0113	112,25
MS4	0,1638447	0,0417	260,85
2MK5	0,2028035	0,0079	352,01
2MN6	0,2400221	0,0205	250,7
M6	0,2415342	0,028	258,19
2MS6	0,2443561	0,0213	281,73
2SM6	0,2471781	0,0064	329,56
M8	0,3220456	0,0107	235,43

**Tabela 5** - Componentes principais da estação Rio Anil (E5) para o período de 08/01/1983 a 08/02/1983.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,0015122	0,0645	235,36
MSF	0,0028219	0,0431	308,01
O1	0,0387307	0,0856	1,56
K1	0,0417807	0,0495	64,26
J1	0,0432929	0,0338	275,38
OO1	0,0448308	0,0535	183,89
MU2	0,0776895	0,4372	235,49
N2	0,0789992	0,3454	221,79
M2	0,0805114	1,3272	150,5
L2	0,0820236	0,967	105,01
S2	0,0833333	0,4923	134,57
ETA2	0,0850736	0,4867	251,62
MK3	0,1222921	0,0358	126,01
S4	0,1666667	0,0471	122,23
2MS6	0,2443561	0,0354	56,28
2SM6	0,2471781	0,0288	77,67
M8	0,3220456	0,0089	181,16

**Tabela 6** - Componentes principais da estação Alcântara (E6) para o período de 15/11/1982 a 16/12/1982.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,0015122	0,0658	243,21
MSF	0,0028219	0,0477	82,35
2Q1	0,0357064	0,0086	311,37
Q1	0,0372185	0,0216	188,81
O1	0,0387307	0,0878	186,75
NO1	0,0402686	0,0444	49,49
K1	0,0417807	0,1008	228,37
OO1	0,0448308	0,0144	241,08
MU2	0,0776895	0,0646	8,05
N2	0,0789992	0,4006	188,99
M2	0,0805114	1,9753	193,22
L2	0,0820236	0,0835	191,62
S2	0,0833333	0,5402	208,33
ETA2	0,0850736	0,0431	174,59
MO3	0,1192421	0,0266	344,04
M3	0,1207671	0,014	325,37
MK3	0,1222921	0,0394	66,74
MN4	0,1595106	0,0192	186,45
M4	0,1610228	0,0585	192,51
MS4	0,1638447	0,0423	235,92
2MN6	0,2400221	0,0238	249,03
M6	0,2415342	0,0407	251,76
2MS6	0,2443561	0,0337	272,62

**Tabela 7** - Componentes principais da estação Perizes (E7) para o período de 09/04/2009 a 30/06/2009.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,0015122	0,0426	358,75
MSF	0,0028219	0,0574	13,25
Q1	0,0372185	0,0129	219,89
O1	0,0387307	0,0988	220,05
NO1	0,0402686	0,0233	300,61
K1	0,0417807	0,1166	236,97
MU2	0,0776895	0,1292	13,94
N2	0,0789992	0,5006	222,95
M2	0,0805114	2,7492	222,63
L2	0,0820236	0,1686	218,46
S2	0,0833333	0,5441	247,31
MO3	0,1192421	0,0235	359,17
M3	0,1207671	0,0254	359,66
MK3	0,1222921	0,0229	16,46
MN4	0,1595106	0,0714	315,96
M4	0,1610228	0,1792	312,96
MS4	0,1638447	0,0812	348,61
2MK5	0,2028035	0,0067	35,25
2MN6	0,2400221	0,0444	1,29
M6	0,2415342	0,0691	357,5
2MS6	0,2443561	0,0454	36,06
3MK7	0,2833149	0,0055	111,97
M8	0,3220456	0,0227	91,12

**Tabela 8** - Componentes principais da estação Tauá (E8) para o período de 08/04/2009 a 23/05/2009.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
Q1	0,0372185	0,0151	206,67
O1	0,0387307	0,0987	210,81
NO1	0,0402686	0,0227	271,34
K1	0,0417807	0,1069	221,02
MU2	0,0776895	0,1733	4,02
N2	0,0789992	0,4267	210,94
M2	0,0805114	2,5585	210,28
L2	0,0820236	0,1381	219,17
S2	0,0833333	0,6484	229,15
MO3	0,1192421	0,015	331,45
M3	0,1207671	0,0214	330,18
MK3	0,1222921	0,014	331,4
MN4	0,1595106	0,041	267,84
M4	0,1610228	0,1028	260,83
MS4	0,1638447	0,0683	296,14
2MK5	0,2028035	0,0079	304,36
2MN6	0,2400221	0,0506	311,57
M6	0,2415342	0,0815	297,66
2MS6	0,2443561	0,0658	330,04
3MK7	0,2833149	0,0051	14,62
M8	0,3220456	0,0157	20,42

**Tabela 9** - Componentes principais da estação Sismo-Hmalumare (E9) para o período de 20/10/2020 a 15/06/2021.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
SSA	0,0002282	0,0137	67,41
MM	0,0015122	0,0264	16,52
MSF	0,0028219	0,0226	27,78
MF	0,0030501	0,0279	35,73
SIG1	0,0359087	0,0039	278,52
Q1	0,0372185	0,0186	185,82
RHO1	0,0374209	0,0045	143,36
O1	0,0387307	0,0987	212,65
TAU1	0,0389588	0,0104	342,15
NO1	0,0402686	0,0096	280,04
P1	0,0415526	0,0406	245,51
K1	0,0417807	0,0998	241,45
J1	0,0432929	0,0037	289,99
SO1	0,0446027	0,0052	5,53
EPS2	0,0761773	0,0282	301,94
2N2	0,0774871	0,0332	106,25
MU2	0,0776895	0,1058	293,71
N2	0,0789992	0,4156	186,06
NU2	0,0792016	0,1082	174,68
M2	0,0805114	2,1854	196,22
MKS2	0,0807396	0,025	311,9
LDA2	0,0818212	0,0497	179,41
L2	0,0820236	0,1376	168,42
S2	0,0833333	0,6219	232,38
K2	0,0835615	0,1704	226,82
MSN2	0,0848455	0,0259	31,89
MO3	0,1192421	0,0093	305,76

M3	0,1207671	0,0167	304,36
SO3	0,122064	0,0095	10,06
MK3	0,1222921	0,0097	3,42
SK3	0,1251141	0,0057	326,55
MN4	0,1595106	0,0345	201,13
M4	0,1610228	0,0921	216,72
SN4	0,1623326	0,0115	301,46
MS4	0,1638447	0,0511	266,64
MK4	0,1640729	0,0167	262,37
2MK5	0,2028035	0,0055	332,5
2MN6	0,2400221	0,0246	268,59
M6	0,2415342	0,043	285,12
2MS6	0,2443561	0,0382	318,67
2MK6	0,2445843	0,0106	317,92
2SM6	0,2471781	0,0094	360
MSK6	0,2474062	0,0055	351,58
3MK7	0,2833149	0,0006	38,25
M8	0,3220456	0,001	279,61

**Tabela 10** - Componentes principais da estação Quebra-Pote (E10) para o período de 31/03/1982 a 09/05/1982.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,0015122	0,0967	303,91
MSF	0,0028219	0,0597	203,32
2Q1	0,0357064	0,0157	44,08
Q1	0,0372185	0,0171	183,58
O1	0,0387307	0,1031	220,06
NO1	0,0402686	0,0394	145,75
K1	0,0417807	0,0764	247,69
J1	0,0432929	0,0137	81,11
OO1	0,0448308	0,0212	331,4
MU2	0,0776895	0,1372	336,34
N2	0,0789992	0,4123	219,4
M2	0,0805114	2,2376	209,05
L2	0,0820236	0,1256	172,87
S2	0,0833333	0,7739	242,46
ETA2	0,0850736	0,083	32,58
MO3	0,1192421	0,0299	12,14
M3	0,1207671	0,0287	9,01
MK3	0,1222921	0,0193	17,9
MN4	0,1595106	0,0223	217,73
M4	0,1610228	0,0574	266,99
MS4	0,1638447	0,0367	292,5
2MN6	0,2400221	0,0217	357,67
M6	0,2415342	0,0365	339,64
2MS6	0,2443561	0,0484	26,57
M8	0,3220456	0,0161	10,16

**Tabela 11** - Componentes principais da estação SiMCosta (E11) para o período de 23/11/2023 a 07/04/2024.

Componente	Freq	Amp (m)	Fase (°)
MM	0,0015122	0,0307	337,47
Q1	0,0372185	0,0263	256,63
O1	0,0387307	0,0962	258,13
K1	0,0417807	0,1030	287,45
MU2	0,0776895	0,0783	337,62
N2	0,0789992	0,37	268,85
M2	0,0805114	1,9437	275,38
L2	0,0820236	0,1404	265,36
S2	0,0833333	0,5613	320,79
M3	0,1207671	0,0227	96,41
M4	0,1610228	0,0365	356,69
MS4	0,1638447	0,0313	47,21
2MN6	0,2400221	0,0252	106,02
M6	0,2415342	0,0466	122,29
2MS6	0,2443561	0,0455	181,28