



MARINHA DO BRASIL

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

CLIMATOLOGIA DE ONDAS DO ATLÂNTICO SUL: CONTRIBUIÇÕES PARA A  
METAREA V COM BASE NA REANÁLISE WAVEYRS

2º TEN. **LUIS FELIPE DA SILVA SOUZA**

Orientador: 1º TEN. (T) FELIPE **ROMÃO SOUSA CORREIA**

Niterói – RJ, Brasil

Outubro 2025

Luis Felipe da Silva Souza

**CLIMATOLOGIA DE ONDAS DO ATLÂNTICO SUL: CONTRIBUIÇÕES PARA A  
METAREA V COM BASE NA REANÁLISE WAVERYS**

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

Orientador: 1º TEN. (T) Fellipe Romão Sousa Correia

Niterói – RJ

Outubro, 2025

Souza, Luis Felipe da Silva

Climatologia de ondas do Atlântico Sul: contribuições para a METAREA V com base na reanálise *WAVERTYS* / Luis Felipe da Silva Souza. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2025.

xii, 78 f.: il. Color.; 29,7 cm.

Orientador: Fellipe Romão Sousa Correia.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 74-76.

1. Ondas. 2.Climatologia. 3. *WAVERTYS*.

I. Correia, Fellipe Romão Souza. II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Climatologia de ondas do Atlântico Sul: contribuições para a METAREA V com base na reanálise *WAVERTYS*.

**CLIMATOLOGIA DE ONDAS DO ATLÂNTICO SUL: CONTRIBUIÇÕES PARA A  
METAREA V COM BASE NA REANÁLISE WAVERYS**

Luis Felipe da Silva Souza

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

Examinada por:

---

1º TEN Fellipe Romão Souza Correia, M.Sc.

---

Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira, D.Sc.

---

CMG Daniel Peixoto de Carvalho, M.Sc.

---

1ºTEN Kaio Calmon Lacerda, M.Sc.

NITERÓI, RJ – BRASIL  
OUTUBRO DE 2025

## Resumo

Este trabalho apresenta a elaboração de uma climatologia mensal de ondas para a METAREA V (região do oceano Atlântico Sul adjacente ao litoral brasileiro), com base na reanálise WAVERYS. Foram produzidos 12 mapas médios mensais dos parâmetros altura significativa ( $H_s$ ), direção (Dir) e período de pico ( $T_p$ ), além de rosas de ondas para 12 localidades de interesse naval. Além disso, foram geradas séries temporais para Belém/PA, Recife/PE, Baía de Guanabara/RJ e Rio Grande/RS, com o objetivo de complementar as informações disponíveis no Atlas de Cartas Piloto e subsidiar a elaboração de BC pelo CHM. Os dados da reanálise possuem resolução aproximada de  $0,2^\circ$  ( $\sim 22$  km) e saídas a cada 3 horas, tendo sido pré-processados em ambiente *Python* utilizando bibliotecas específicas. Foram calculadas médias mensais em cada ponto de grade no período de 1980–2022, resultando em um atlas mensal de ondas. As rosas de ondas foram geradas a partir de frequências direcionais e por faixas de  $H_s$ . As séries temporais receberam suavização por média móvel de 30 dias. Os resultados evidenciam que a utilização do WAVERYS melhora substancialmente a representação costeira em comparação com a reanálise de menor resolução utilizada atualmente no BC (ERA-20C), preenchendo áreas sensíveis, que não possuíam informação climatológica de ondas anteriormente. Em termos sazonais, os trens de ondas que se propagam a partir dos ciclones extratropicais se revelam como o fator dominante, mantendo maiores valores de  $H_s$  no Norte-Nordeste durante o inverno boreal e no Sul-Sudeste durante o inverno austral. A intensidade e a migração sazonal dos ventos alísios provenientes da ASAS mantém um padrão zonal de ondas na costa leste do Brasil e áreas marítimas adjacentes, com maiores valores de  $H_s$  e  $T_p$  durante os meses de inverno no Hemisfério Sul. A variabilidade e os padrões sazonais de  $H_s$  e Dir se refletem nas séries temporais e nas rosas de ondas. Os produtos apresentados reforçam o potencial da utilização da reanálise WAVERYS como fonte de consulta da informação climatológica para aplicações navais.

Palavras-chave: climatologia, ondas, reanálise, WAVERYS, METAREA V.

## Abstract

This work presents the development of a monthly wave climatology for METAREA V (the South Atlantic Ocean region adjacent to the Brazilian coast), based on the WAVERYS reanalysis. Twelve monthly mean maps of the parameters significant height ( $H_s$ ), direction (Dir), and peak period ( $T_p$ ) were produced, as well as wave roses for 12 locations of naval interest. Furthermore, time series were generated for Belém/PA, Recife/PE, Guanabara Bay/RJ and Rio Grande/RS, to complement the information available in the Pilot Chart Atlas and support the development of BC by the CHM. The reanalysis data have an approximate resolution of  $0.2^\circ$  ( $\sim 22$  km) and are output every 3 hours. They were preprocessed in a Python environment using specific libraries. Monthly means were calculated at each grid point for the period 1980–2022, resulting in a monthly wave atlas. Wave roses were generated from directional frequencies and  $H_s$  bands. The time series were smoothed using a 30-day moving average. The results showed that the use of WAVERYS substantially improves coastal representation compared to the lower-resolution reanalysis currently used in BC (ERA-20C), filling sensitive areas that previously lacked climatological wave information. Seasonally, wave trains propagating from extratropical cyclones are the dominant factor, maintaining higher  $H_s$  values in the Northeast during the boreal winter and in the South-Southeast during the austral winter. The intensity and seasonal migration of the trade winds originating from the ASAS maintain a zonal wave pattern off the east coast of Brazil and adjacent maritime areas, with higher  $H_s$  and  $T_p$  values during the winter months in the Southern Hemisphere. The variability and seasonal patterns of  $H_s$  and Dir are reflected in the time series and wave roses. The products presented reinforce the potential of using the WAVERYS reanalysis as a source of climatological information for naval applications.

Keywords: climatology, waves, reanalysis, WAVERYS, METAREA V.

## Lista de Figuras

Figura 1- Direção média e altura significativa média de ondas (vagas e marulhos combinados) para o mês de janeiro.....	14
Figura 2 – Carta Piloto para o mês de janeiro.....	16
Figura 3 – Informações climatológicas do mês de janeiro para as proximidades do Porto do Rio de Janeiro/RJ.17	
Figura 4 - – Regiões de estudo para climatologia de ondas. Legenda: Sul (W1), Sudeste (W2), Central (W3), Leste (W4), Nordeste (W5) e Norte (W6).....	18
Figura 5– Pontos de interesse do Poder Marítimo.....	23
Figura 6 – Histograma de período de pico para o mês de janeiro.25	
Figura 7 - Climatologia da altura significativa e direção de ondas para o mês de janeiro utilizando os dados do (a) ERA 20-C e (b) <i>WAVERTYS</i> .....	27
Figura 8 – Climatologia de ondas para o mês de janeiro na região da METAREA V.....	29
Figura 9 – Climatologia de ondas para o mês de fevereiro na região da METAREA V. ....	31
Figura 10 – Climatologia de ondas para o mês de março na região da METAREA V.....	33
Figura 11 – Climatologia de ondas para o mês de abril na região da METAREA V.....	35
Figura 12 – Climatologia de ondas para o mês de maio na região da METAREA V.....	37
Figura 13 – Climatologia de ondas para o mês de junho na região da METAREA V.....	39
Figura 14 – Climatologia de ondas para o mês de julho na região da METAREA V.....	41
Figura 15 – Climatologia de ondas para o mês de agosto na região da METAREA V. ....	43
Figura 16 – Climatologia de ondas para o mês de setembro na região da METAREA V. ....	45
Figura 17 – Climatologia de ondas para o mês de outubro na região da METAREA V. ....	47
Figura 18 – Climatologia de ondas para o mês de novembro na região da METAREA V.....	49
Figura 19 – Climatologia de ondas para o mês de dezembro na região da METAREA V .....	51
Figura 20 – Rosa de ondas mensais em Belém-PA.....	54
Figura 21 – Rosa de ondas mensais em Recife-PE. ....	55
Figura 22 – Rosa de ondas mensais em Salvador-BA.....	57
Figura 23 – Rosa de ondas mensais em Abrolhos-BA.....	58
Figura 24 – Rosa de ondas mensais em Vitória-ES. ....	59
Figura 25 – Rosa de ondas mensais em Baía de Guanabara-RJ.....	60
Figura 26 – Rosa de ondas mensais em Sepetiba-RJ. ....	61

Figura 27 – Rosa de ondas mensais em São Sebastião-SP .....	62
Figura 28 – Rosa de ondas mensais em Santos-SP. ....	63
Figura 29 – Rosa de ondas mensais em Paranaguá-PR. ....	64
Figura 30 – Rosas de ondas mensais em Laguna-RS .....	65
Figura 31 – Rosa de ondas mensais em Rio Grande-RS. ....	66
Figura 32 – Série temporal de $H_s$ (metros) em (a) Belém-PA e (b) Recife-PE. ....	69
Figura 33 – Série temporal de $H_s$ de onda (metros) na (a) Baía de Guanabara-RJ e em (b) Rio Grande-RS. ....	70

Figura A.1 - Histogramas do Período de Pico77

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Altura das ondas por Região do Brasil. Legenda: Sul (W1), Sudeste (W2), Central (W3), Leste (W4).....	19
Tabela 2 – Pontos de interesse do Poder Marítimo para geração das rosas de ondas.23	

## Lista de Abreviaturas

ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BC	Boletim Climatológico
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CIAARA	Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
Dir	Direção das Ondas
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ERA-20C	<i>ECMWF Atmospheric Reanalysis of the 20th Century</i>
ERA5	<i>ECMWF Reanalysis v5</i>
HS	Altura Significativa de Onda (Significant Wave Height)
MB	Marinha do Brasil
METAREA V	Área Marítima de Responsabilidade Meteorológica V (Atlântico Sul ocidental)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Raiz do Erro Quadrático Médio)
Tp	Período de Pico ( <i>Peak Period</i> )
WAVERTYS	<i>Wave Reanalysis System (Reanálise global de ondas do Copernicus Marine Service)</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## **Sumário**

<b>1.</b>	<b>Introdução e Justificativa .....</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.</b>	<b>Atlas de Cartas Piloto .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.</b>	<b>Climatologia de ondas no oceano Atlântico Sul .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.</b>	<b>Utilização de reanálises para geração de climatologia de ondas .....</b>	<b>20</b>
<b>3.</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>22</b>
<b>4.</b>	<b>Dados e Metodologia .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Conjunto de dados .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Obtenção dos dados .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Pré-processamento dos dados.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Climatologias mensais .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Rosas de ondas .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Séries Temporais .....</b>	<b>26</b>
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Comparação da Resolução .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2</b>	<b>Climatologia mensal .....</b>	<b>27</b>
<b>5.3</b>	<b>Rosas de ondas .....</b>	<b>54</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise Temporal de <math>H_S</math> .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>71</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A – Histogramas do Período de Pico de janeiro a dezembro de 1980 a 2022...</b>	<b>77</b>

## 1. Introdução e Justificativa

O conhecimento dos fatores ambientais que influenciam a navegação é fundamental para o planejamento das atividades marítimas. As condições atmosféricas e oceânicas impactam todos os tipos de embarcações, sejam elas comerciais, de esporte e recreio ou militares, com destaque especial para aquelas pertencentes à Marinha do Brasil.

Dentre os fatores ambientais, pode-se destacar o vento, as ondas e as correntes marítimas como essenciais para a segurança dos navios e salvaguarda da vida humana no mar. Essas três variáveis moldam continuamente as condições do mar e influenciam de maneira direta a estrutura, manobrabilidade, velocidade e rota das embarcações.

O vento historicamente foi um dos principais motores da navegação, a exemplo dos veleiros. Mesmo com o avanço tecnológico, torna-se importante ainda hoje o conhecimento desta variável por conta do comprometimento da estabilidade dos navios. Compreender os regimes de ventos predominantes, suas intensidades e variações sazonais permite planejar trajetos mais rápidos e seguros, evitando áreas com vento extremo, para os navios, que podem comprometer a estrutura das embarcações.

As ondas, por sua vez, representam um desafio constante, pois afetam significativamente as cargas de navios, influenciando momentos de flexão, torção e esforços de impacto como *slamming*, que se traduz no impacto violento da proa contra a superfície da água, geralmente durante a navegação em mares agitados, ocasionando esforços bruscos sobre a estrutura, e água verde, quando o mar ultrapassa o convés da embarcação, aumentando o peso. Ondulações fortes podem afetar o conforto da tripulação, a integridade estrutural da embarcação e o consumo de combustível. Ter ciência dos padrões de formação e propagação das ondas possibilita ao navegante antecipar-se a mares adversos, minimizar riscos de abalroamentos e otimizar o desempenho do navio.

Já as correntes marítimas são como guias no oceano que podem impulsionar ou frear uma embarcação. Uma corrente favorável reduz o tempo de viagem e o consumo de combustível, enquanto uma corrente contrária ou de través pode impor atrasos e aumento dos custos operacionais. A plena ciência sobre o comportamento das correntes, tanto de superfície quanto de subsuperfície, é um fator estratégico para definir rotas mais econômicas e seguras.

O conhecimento dessas variáveis não se restringe só aos períodos quando os navios estão em alto-mar, utilizando-se das informações operacionais para garantia da segurança. Nas fases de planejamento, é importante fazer uso do conhecimento climatológico dos fatores ambientais, ou seja, o comportamento a longo prazo, do vento, das ondas e das correntes. O domínio dessa informação não é apenas uma habilidade desejável, mas um requisito vital para o navegante, pois permite ainda o correto emprego dos meios navais, considerando suas capacidades e suas limitações devido ao comportamento do mar e da atmosfera. Em última instância, possibilita também que sejam tomadas decisões mais inteligentes e que haja maior preservação da vida humana no mar, culminando em melhor eficiência logística e contribuindo assim para a proteção do meio ambiente marinho.

Para garantir a segurança e a eficiência das atividades marítimas, é fundamental que os navegantes disponham então de informações climatológicas confiáveis e atualizadas, essenciais para o planejamento de rotas e da prevenção de riscos.

No que tange a navegação na costa brasileira e na região do Atlântico Sul, um instrumento de grande valor é o Atlas de Cartas Piloto da Marinha do Brasil (MB). Produzido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), a publicação é gratuita e está disponível a todos os usuários. Ela compila diversas informações climatológicas (longo prazo) de parâmetros ambientais relevantes, organizadas em mapas e tabelas, para a região do oceano Atlântico Sul, com foco na METAREA V, que é área marítima brasileira para fins de divulgação de informações meteoceanográficas (NORMAM-701, 2023). Podem ser consultados, de forma sistematizada, padrões médios e sazonais de ventos, correntes, temperatura do ar e da superfície do mar, dentre outros. Contudo, a referida documentação não dispõe de informações do estado do mar, carecendo, portanto, das variáveis altura e direção de ondas.

No âmbito militar naval, o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) é a organização militar subordinada a DHN cuja missão é “Analisar, armazenar e intercambiar dados geoespaciais marinhos, a fim de contribuir para a produção e divulgação das informações de segurança da navegação e do ambiente marinho.”. De modo a cumprir seu propósito, podem ser elencadas duas tarefas, constantes na Carta de Serviços ao Usuário do CHM (2024):

- a) produzir informações ambientais que atualizem o cenário de fatores físicos, nas áreas de interesse da Marinha do Brasil (MB);

- b) preparar e divulgar as informações de interesse para as Operações Navais, Segurança da Navegação e Salvaguarda da Vida Humana no Mar, no que se referir à área de responsabilidade do País;

Assim, são elaborados produtos gráficos e de assistência técnico-operacional de modo a atender as demandas internas do Poder Naval. Dentro deste contexto, insere-se um dos objetivos da qualidade do CHM que é a elaboração de Boletins Climatológicos (BC). De acordo com a NAVEMARINST 10-11A (2021), um BC é um documento que contém informações ambientais médias esperadas para uma área e período definidos, com a finalidade de auxiliar o comando no planejamento de uma operação ou eventos de interesse da MB. No ano de 2024, foram solicitados 50 BC ao CHM, oriundos de comandantes de forças, meios navais e OM de superfície, que necessitavam de um maior detalhamento a respeito da região para a boa execução das operações.

Os dados utilizados para a elaboração de um BC atualmente provêm de diversas fontes, internas e externas à MB. Das externas, podem ser destacadas as reanálises atmosféricas e oceânicas. Já as fontes internas, tem-se o Atlas de Cartas Piloto e o Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). Em relação à variável ondas, que é um dos parâmetros constantes no BC, tem-se como fonte de dados para a geração da climatologia as reanálises oceânicas e o BNDO.

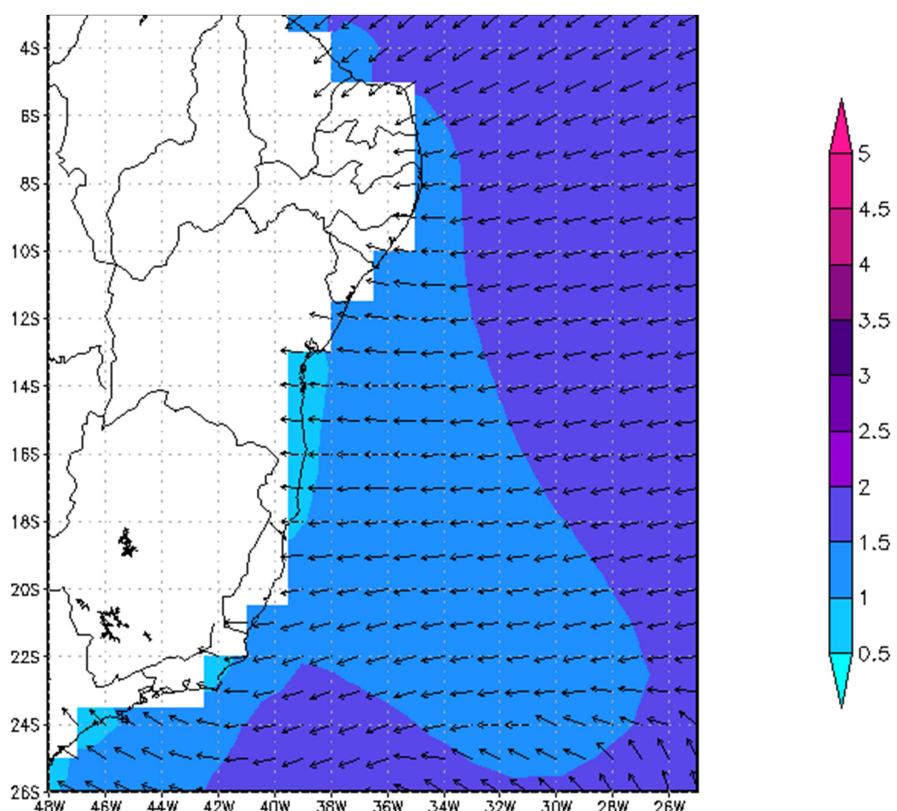
Em relação aos dados medidos *in situ*, aponta-se para o fato de que a observação contínua de ondas no oceano apresenta inúmeros desafios, principalmente devido à natureza dinâmica e hostil do ambiente marinho. O registro sistemático de parâmetros como altura significativa, período e direção das ondas depende da operação de boias meteoceanográficas, que demandam elevados custos de aquisição, manutenção e transmissão de dados. No oceano Atlântico Sul, a precariedade na quantidade e na distribuição dessas boias limita a disponibilidade de séries temporais extensas e de alta qualidade, dificultando a geração de climatologias confiáveis baseadas exclusivamente em dados observacionais. Pianca *et al.* (2010) afirmam que as informações sobre o regime de ondas no Brasil são escassas e baseadas em observações ocasionais de curto período.

Como consequência, grande parte do conhecimento climatológico da região depende da assimilação de dados esparsos combinados com modelos numéricos e reanálises, o que, embora necessário, introduz margens adicionais de incerteza nas informações utilizadas para a navegação

e estudos oceanográficos. Ainda assim, tem-se um ganho grande na cobertura espaço-temporal com a utilização das reanálises oceânicas.

Para a climatologia de ondas, os BC mais recentes disponibilizados para consulta ostensiva pelo CHM fazem uso da reanálise ERA 20-C (Poli *et al.*, 2013), um conjunto de dados com resolução horizontal de 125 km. A Figura 1 apresenta a direção média e altura significativa média de ondas (vagas e marulhos combinados) para o mês de janeiro em trechos litorâneos das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil e áreas marítimas adjacentes. É possível notar que há uma degradação da informação junto à costa, justamente uma zona de grande movimentação de embarcações, comerciais ou militares. Constatase assim que tais regiões, principalmente as portuárias e estuarinas, carecem de informação climatológica de ondas, devido à baixa resolução dos dados do ERA 20-C.

Figura 1- Direção média e altura significativa média de ondas (vagas e marulhos combinados) para o mês de janeiro.



Fonte: Cortesia da Seção de Informações Meteoceanográficas do CHM.

Conclui-se que há uma lacuna a ser preenchida no fornecimento das informações contidas no BC, de modo a aumentar a resolução da variável ondas para atendimento as demandas de planejamento do Poder Naval. Em acréscimo a esta necessidade, tem-se a ausência de informações sobre o estado do mar no Atlas de Cartas Piloto da DHN, fazendo assim com que a MB não possua ainda uma fonte própria de consulta para avaliar esta variável no oceano Atlântico Sul.

De modo a solucionar essa questão, podem ser utilizadas reanálises oceânicas de melhor resolução, já disponíveis ao público, que possam servir de fonte de consulta e geração de mapas climatológicos de altura, direção e período de ondas para o oceano Atlântico Sul. Cita-se, como exemplo, dois conjuntos de dados: *WAVERYS* e *ERA5* (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis version 5*) cujas resoluções horizontais são, respectivamente,  $0,2^\circ$  ( $\sim 22$  km) e  $0,5^\circ$  ( $\sim 55$  km). Por conseguinte, a elevada resolução espacial desses produtos é fundamental para gerar uma climatologia de ondas mais representativas, especialmente em regiões litorâneas.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Atlas de Cartas Piloto

Em acordo com o estabelecido pela Organização Marítima Internacional (IMO) na Resolução A.8391, as embarcações devem ter atenção aos aspectos listados a seguir:

- **Avaliação:** Coleta de todas as informações pertinentes à viagem planejada;
- **Planejamento:** Elaboração de um plano abrangente da viagem, desde a partida até a chegada, incluindo áreas que requerem a presença de um Prático;
- **Execução:** Implementação do plano conforme o previsto; e
- **Monitoramento:** Acompanhamento contínuo do progresso da embarcação durante a execução do plano.

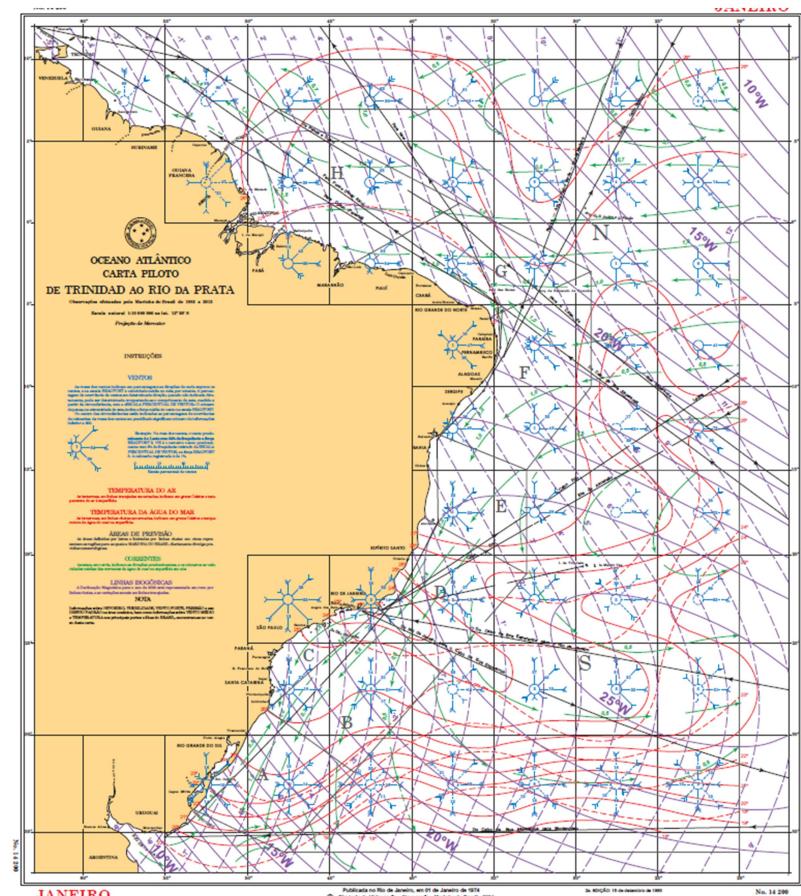
Neste escopo, os dados climatológicos são essenciais na fase do Planejamento de um navio, viabilizando ao comando definir melhor período e rota de navegação. Para consultar tais informações no oceano Atlântico Sul, pode-se fazer uso do Atlas de Cartas Piloto.

O Atlas de Cartas Piloto é uma publicação naval confeccionada pela DHN composta por 12 mapas, correspondentes a cada mês do ano, na Projeção de Mercator, em escala 1:10.000.000.

Seu uso tem grande aplicabilidade na navegação marítima, uma vez que reúne informações climatológicas de diversos parâmetros ambientais, tais como: ventos, correntes marítimas, temperatura do ar e da água do mar para o oceano Atlântico Sul, com foco na METAREA V. Além disso, o documento contém informações sobre a declinação magnética, com linhas isogônicas e outras que indicam a variação anual dessa declinação. Para a construção dos mapas climatológicos, foram compilados dados observados pelos navios da MB e estrangeiros, entre 1985 e 2013.

A Figura 2 mostra, como exemplo, a climatologia mensal para o mês de janeiro dos parâmetros supracitados. Com as informações dispostas no mapa, é possível obter um panorama da região, com as variáveis sendo representadas por isolinhas. Em regiões pontuais, é possível também avaliar o comportamento do vento.

Figura 2 – Carta Piloto para o mês de janeiro.



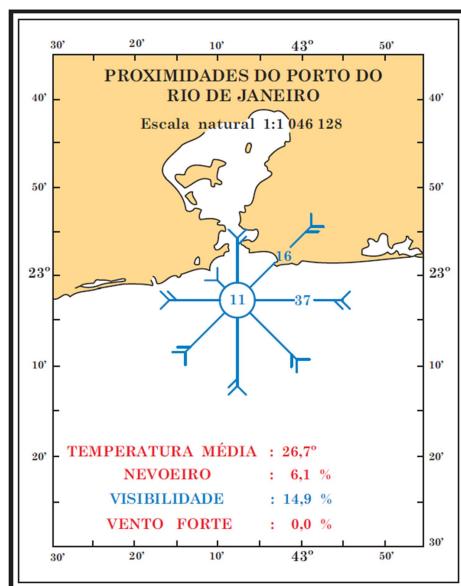
Fonte: Atlas de Cartas Piloto (DHN).

No verso das cartas, encontram-se ainda registros sobre nevoeiros, visibilidade,

temperatura, vento médio e a frequência de ventos fortes em alguns portos e ilhas do Brasil: Porto de Manaus/AM, Porto de Belém/PA, Arquipélago de Fernando de Noronha/RN, Porto de Recife/PE, Porto de Salvador/BA, Arquipélago de Abrolhos/BA, Ilha da Trindade/ES, Porto do Rio de Janeiro/RJ, interior da Baía de Guanabara/RJ, Porto de Santos/SP, Cabo de Santa Marta Grande/SC, proximidades de Rio Grande/RS e Chuí/RS.

A Figura 3 traz a localidade da Baía de Guanabara como exemplo para ilustrar a climatologia da região no mês de janeiro. A rosa dos ventos indica a frequência do vento nas respectivas intensidade e direção, e há também a temperatura média local, e porcentagem de ocorrência de nevoeiros, vento forte e visibilidade inferior a 2,5 milhas.

Figura 3 – Informações climatológicas do mês de janeiro para as proximidades do Porto do Rio de Janeiro/RJ.



Fonte: Atlas de Cartas Piloto (DHN).

## 2.2. Climatologia de ondas no oceano Atlântico Sul

As ondas no mar são geradas pela interação de uma fonte geradora com a superfície do oceano. Como exemplos de fontes geradoras, pode-se citar vento, terremotos, correntes marítimas ou mudanças significativas na pressão atmosférica. O vento é a principal fonte de ondas no oceano (Komen *et al.*, 1994; Holthuijsen, 2007). A classificação das ondas com relação a posição da fonte geradora divide-se em duas: vagas, quando próximas da fonte geradora, possuindo períodos de ondas menores que 10 s; e marulhos, quando estão mais afastadas da fonte geradora,

longe de sua influência, com períodos de ondas maiores que 10 s (Miguens, 2000).

De acordo com Pond e Pickard (1983) a altura e a direção das ondas variam de acordo com a estação do ano. Observa-se que ondas maiores são mais frequentes no outono e inverno do que no período de verão e primavera, isto se deve a maior frequência de sistemas de escala sinótica, como ciclones extratropicais e sistemas frontais, oriundos de latitudes médias e polares. Os ventos intensos associados à ocorrência desses fenômenos transferem energia para os oceanos e dá origem a sistemas de ondas que se propagam de alto-mar em direção à costa e latitudes menores.

Pianca *et al.* (2010), definiu regiões de estudo no oceano Atlântico para avaliar a sazonalidade da direção e da altura das ondas, conforme exemplificado na Figura 4. As regiões W1, W2 e W3 correspondem aos setores Sul, Sudeste e Central, respectivamente, portanto mais sensíveis à passagem de sistemas frontais. Já as regiões W4, W5 e W6 são os setores Leste, Nordeste e Norte, com maior influência dos ventos alísios e de sistemas frontais do Hemisfério Norte.

Figura 4 - – Regiões de estudo para climatologia de ondas. Legenda: Sul (W1), Sudeste (W2), Central (W3), Leste (W4), Nordeste (W5) e Norte (W6).



Fonte: Pianca et al. (2010).

Os dados contidos na Tabela 1 evidenciam a sazonalidade da altura das ondas nas regiões

da Figura 4. As estações do outono e inverno apresentam as maiores alturas máximas e médias de ondas, com valores superiores a 2,0 metros do que no verão e primavera, especialmente nas regiões W1, W2 e W3, correspondentes aos setores mais afetados pela passagem de sistemas da escala sinótica. As regiões W4, W5 e W6 apresentam valores mais homogêneos ao longo do ano, sendo o regime de ondas com maior influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e propagação de marulhos associados aos anticiclones migratórios que surgem após a passagem de frentes frias no Hemisfério Norte.

Tabela 1 - Altura das ondas por Região do Brasil. Legenda: Sul (W1), Sudeste (W2), Central (W3), Leste (W4).

Season	Hmin	Hmax	range	mean	std	var
W1-Fall	0.6	7.4	6.8	2.4	1.1	1.0
W2-Fall	0.5	6.4	5.8	2.0	0.9	0.7
W3-Fall	0.7	4.4	3.7	2.0	0.7	0.4
W4-Fall	1.1	4.0	2.9	2.0	0.5	0.2
W5-Fall	0.9	2.8	1.9	1.8	0.4	0.1
W6-Fall	0.9	3.0	2.1	1.7	0.4	0.1
W1-Winter	0.7	7.0	6.3	2.6	1.0	0.8
W2-Winter	0.5	5.8	5.3	2.2	0.8	0.6
W3-Winter	0.5	5.0	4.4	2.2	0.6	0.3
W4-Winter	0.9	4.3	3.4	2.2	0.5	0.2
W5-Winter	0.9	3.4	2.5	2.1	0.4	0.1
W6-Winter	0.7	2.6	1.9	1.6	0.3	0.1
W1-Spring	0.7	5.9	5.2	2.2	0.8	0.6
W2-Spring	0.6	4.5	3.9	1.9	0.6	0.4
W3-Spring	0.7	4.0	3.3	1.7	0.5	0.2
W4-Spring	0.9	3.8	2.9	1.8	0.4	0.1
W5-Spring	0.8	3.2	2.4	2.0	0.4	0.1
W6-Spring	0.8	3.4	2.6	1.8	0.4	0.1
W1-Summer	0.5	5.9	5.4	2.0	0.8	0.5
W2-Summer	0.7	4.0	3.4	1.7	0.7	0.3
W3-Summer	0.7	4.3	3.6	1.6	0.6	0.2
W4-Summer	1.0	2.7	1.7	1.7	0.5	0.1
W5-Summer	0.9	3.2	2.2	1.9	0.6	0.1
W6-Summer	0.7	3.9	3.2	2.2	0.7	0.2

Fonte: Pianca *et al.* (2010).

Ainda de acordo com Pianca *et al.* (2010), outro aspecto que se percebe é a variação sazonal na direção das ondas: a direção predominante das ondas é fortemente dependente dos sistemas atmosféricos regionais. Ondas de direção SW/S dominam as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Já nas porções centro e norte, dominam ondas de SE, E e NE, controladas pelos ventos alísios de SE do Hemisfério Sul e de NE do Hemisfério Norte, com variações espaciais sazonais associadas à migração meridional da ZCIT.

### 2.3. Utilização de reanálises para geração de climatologia de ondas

A reanálise é uma técnica amplamente utilizada em Meteorologia, Climatologia e Oceanografia para combinar dados observacionais (como medições de estações meteorológicas, dados de boias meteoceanográficas, estimativas de sensores de satélites, radiossondas etc.) com modelos numéricos de previsão do tempo, a fim de produzir um conjunto de dados consistentes e contínuos no espaço e no tempo (Kalnay *et al.*, 1996; Saha *et al.*, 2010; Saha *et al.*, 2014). O termo “reanálise” faz alusão ao procedimento de analisar-se novamente a atmosfera e os oceanos, tomando como base uma maior quantidade de informações disponíveis do que no momento que a observação foi feita. Essa técnica corrige lacunas e inconsistências dos dados históricos ao assimilá-los em modelos físicos que reproduzem as leis da dinâmica e da termodinâmica.

Na ausência de observações contínuas e suficientemente distribuídas de ondas no Atlântico Sul, produtos de reanálise têm se consolidado como fontes alternativas e confiáveis para a geração de climatologias oceânicas. Entre os principais produtos utilizados, destacam-se a reanálise ERA5, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), e a reanálise WAVEYRS, desenvolvida pelo *Mercator Ocean International*.

O ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020) oferece uma resolução horizontal de aproximadamente 62 km ( $0,5^\circ$ ) e resolução temporal horária, proporcionando um detalhamento robusto das condições oceânicas e atmosféricas ao longo do tempo. Sua metodologia inclui a assimilação de dados de satélites, boias e modelos numéricos, resultando em estimativas consistentes para parâmetros de ondas, como altura significativa, período e direção.

Já WAVEYRS (Law-Chune *et al.*, 2021), desenvolvida pelo *Copernicus Marine Service*, é um produto global de reanálise de ondas que apresenta uma resolução horizontal de aproximadamente  $0,2^\circ$  (22 km), sendo atualmente uma das reanálises de maior resolução espacial disponíveis para o estudo de ondas. Sua série temporal, também com saídas horárias, permite uma representação refinada de fenômenos de escala regional e local, sendo especialmente útil para áreas costeiras e de interesse estratégico, como a região do Atlântico Sul.

A utilização do método da reanálise foi amplamente difundida para a construção climatológica oceânica do Atlântico Sul (Pianca *et al.*, 2010; Cotrim *et al.*, 2022).

Pianca *et al.* (2010) mostraram que o método de reanálise pelo modelo NWW3 provê uma ferramenta eficaz para definir o clima de ondas ao longo do litoral brasileiro, oferecendo uma

base confiável para análises regionais, apesar das limitações associadas à resolução espacial, devido a fonte de dados, e à leve sobre estimação da energia de ondas significativas.

Mais recentemente, o estudo de Cotrim *et al.* (2022), que utilizou dados da reanálise ERA-5 para desenvolver a climatologia, se mostrou eficaz, apresentando as seguintes evidências:

- A avaliação da qualidade do ERA-5 foi feita por comparação direta com observações *in situ* em pontos-chave da costa brasileira, utilizando parâmetros estatísticos como RMSE (*Root Mean Square Error*) e outras métricas de desempenho. Os resultados mostraram boa correspondência entre os dados do *hindcast* e as observações reais;
- A metodologia aplicada preocupou-se em verificar tanto a média anual quanto a variabilidade mensal e eventos extremos, demonstrando capacidade do ERA-5 em capturar a sazonalidade e os padrões espaciais do clima de ondas no Brasil; e
- O uso combinado da reanálise ERA-5 com alta resolução proporcionou melhor representação dos sistemas atmosféricos locais, incluindo efeitos costeiros e influência de padrões climáticos regionais, resultando em uma descrição robusta das características das ondas.

Por esses motivos, esse estudo foi capaz de detalhar o clima atual das ondas ao longo de toda a costa brasileira com um banco de dados consistente e de alta resolução, o que denota a eficácia do uso da reanálise ERA-5 para esse tipo de análise.

Recentemente Silva (2024) realiza uma comparação entre os dados de ondas do modelo *WAVERTYS* e as medições de boias estrategicamente posicionadas nas regiões de Vitória/ES, Santos/SP e Rio Grande/RS. Essa comparação envolve o uso de métricas estatísticas específicas para validar a confiabilidade do modelo. As métricas utilizadas para essa validação são o BIAS, RMSE e o Correlação de Pearson (*r*). O BIAS mede a tendência do modelo em superestimar ou subestimar as alturas das ondas em relação às medições das boias, enquanto o RMSE fornece a magnitude do erro médio na mesma unidade da variável, facilitando a interpretação. A correlação de Pearson avalia a força da relação linear entre os valores do *WAVERTYS* e as medições. Na análise os resultados mostram que:

- Os valores de RMSE variaram de 0,18 m a 0,28 m, indicando uma boa concordância entre o modelo e as medições das boias. Isso sugere que o *WAVERTYS* consegue estimar as alturas das ondas com precisão relativamente alta;
- Os valores de BIAS foram próximos de zero, confirmando que o sistema não apresenta

tendência significativa de superestimar ou subestimar; e

- Os valores de “r” estão entre 0,93 e 0,97, demonstrando forte relação linear entre os dados *WAVERTYS* e as medições reais, reforçando a confiabilidade do modelo.

Assim, os dados do *WAVERTYS* mostram-se válidos para realização de uma climatologia, podendo servir de base de dados para compor as cartas de ondas no Atlas de Cartas Piloto da DHN, bem como os produtos de auxílio à decisão e os BC.

### **3. Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo elaborar mapas de climatologias de altura significativa, direção e período de ondas no Atlântico Sul, com ênfase na METAREA V, a partir dos dados da reanálise oceânica *WAVERTYS*. Para atingir esse propósito estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

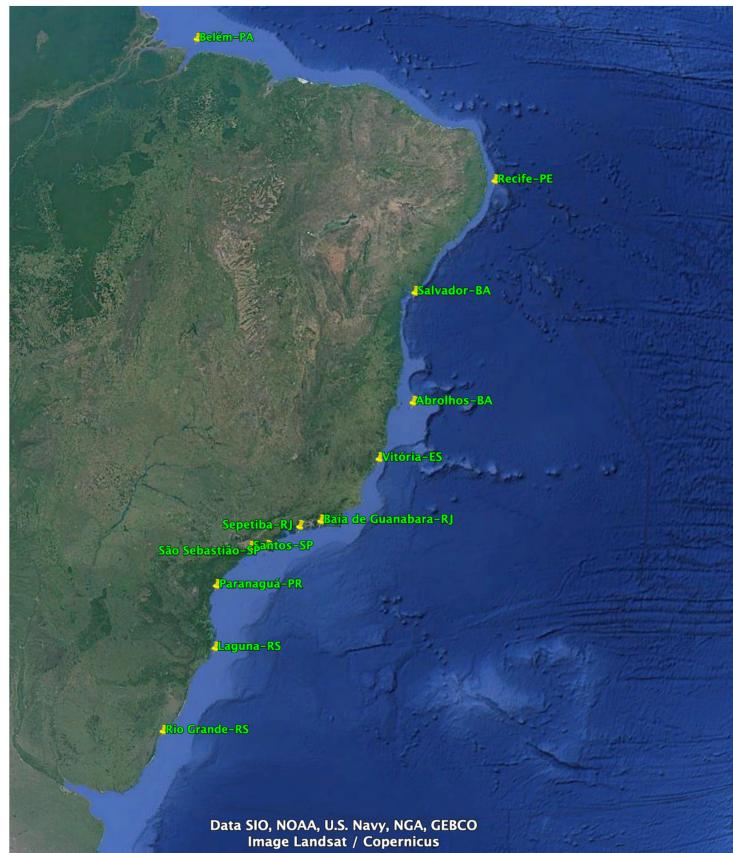
- Produzir 12 mapas climatológicos mensais, representando os parâmetros altura significativa (HS), direção (Dir) e período de pico (TP), relacionando a variabilidade espacial e temporal observada com os principais sistemas atmosféricos atuantes em cada mês, tais como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), frentes frias e ciclones extratropicais;
- Gerar rosas de ondas para as localidades de interesse do Poder Marítimo, de acordo com a Tabela 2 e visualizável na Figura 5, identificando os padrões direcionais e de altura predominantes e sua dependência dos sistemas sinóticos regionais que modulam o campo de ventos sobre o Atlântico Sul;
- Gerar séries temporais para as localidades de Belém/PA, Recife/PE, Baía de Guanabara/RJ e Rio Grande/RS, com foco na análise da variação sazonal dos sistemas sinóticos predominantes em cada região e na identificação da variação latitudinal dos padrões de ondas ao longo da METAREA V, evidenciando as diferenças entre os setores Norte, Nordeste, Sudeste e Sul em função da atuação dos diferentes mecanismos atmosféricos.

Tabela 2 – Pontos de interesse do Poder Marítimo para geração das rosas de ondas.

Localidade	Coordenada	Localidade	Coordenada
Belém-PA	00,2°S 048°W	Sepetiba-RJ	23,2°S 044°W
Recife-PE	08°S 034,6°W	São Sebastião-SP	24°S 045,6° W
Salvador-BA	13,2°S 038,4°W	Santos-SP	24°S 046,4° W
Abrolhos-BA	18°S 038,6°W	Paranaguá-PR	25,6°S 048,2° W
Vitória-ES	20,4°S 040,2°W	Laguna-RS	28,4°S 048,6° W
Baía de Guanabara-RJ	23°S 043°W	Rio Grande-RS	32,2°S 052° W

Fonte: o autor.

Figura 5– Pontos de interesse do Poder Marítimo.



Fonte: Google Earth Pro (2025).

Desta forma, buscou complementar as informações disponibilizadas no Atlas de Cartas Piloto da DHN, oferecendo produtos com maior resolução espacial para áreas adjacentes à costa brasileira, em apoio também à elaboração de BC pelo CHM.

## 4. Dados e Metodologia

### 4.1 Conjunto de dados

Foram utilizados como fonte principal os dados da reanálise global de ondas *WAVERTYS* (*Wave Reanalysis System*), disponibilizada pelo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), sob o identificador de produto GLOBAL\_REANALYSIS\_WAV\_001\_032. Essa reanálise é baseada na assimilação de observações altimétricas e é forçada pelas condições atmosféricas oriundas da reanálise ERA5, fornecendo uma série temporal contínua e de alta qualidade de parâmetros de onda a partir de janeiro de 1980 até dezembro de 2022. Os dados têm resolução horizontal de aproximadamente 0,2° (~22 km) e resolução temporal de 3 horas, abrangendo os seguintes parâmetros de onda:

- **Altura significativa de onda (H<sub>S</sub>);**
- **Direção média de propagação (Dir); e**
- **Período de pico (T<sub>P</sub>).**

A área de estudo corresponde a um setor do oceano Atlântico Sul, similar ao disposto na Figura 2, com enfoque na METAREA V, que abrange a zona oceânica adjacente à costa brasileira, entre aproximadamente os paralelos de 10°N e 45°S de latitude e os meridianos de 017°W até 055°W.

### 4.2 Metodologia

A metodologia adotada para a elaboração de mapas de climatologias mensais, de rosas de ondas para as localidades da Tabela 2 e de séries temporais para Belém/PA e Baía de Guanabara/RJ, sendo construída nas seguintes etapas:

#### 4.2.1 Obtenção dos dados

- Realizou-se o *Download* dos dados diários de 1º de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2022, com resolução temporal de 3 horas, no domínio digital do *Copernicus*.

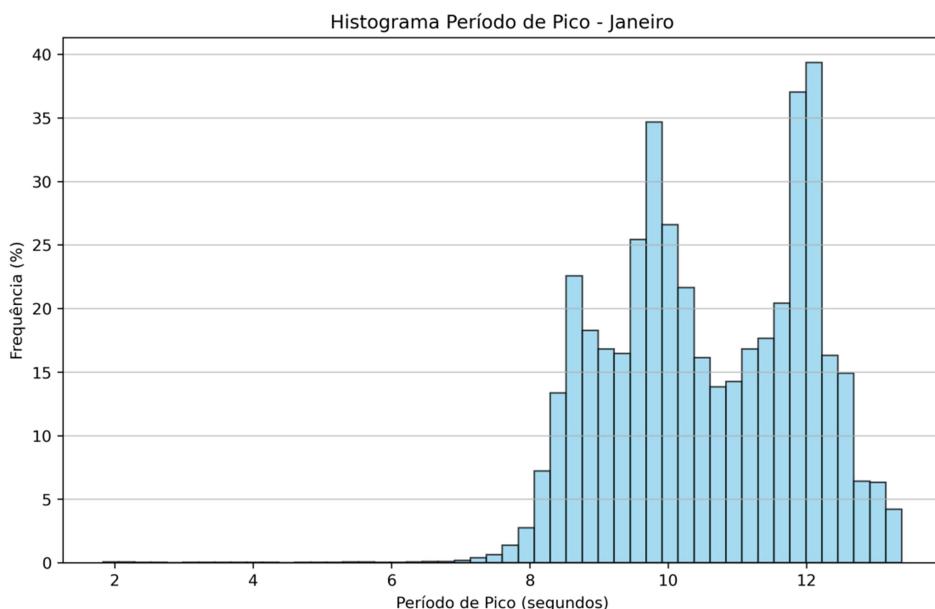
#### 4.2.2 Pré-processamento dos dados

- Foram convertidos os arquivos de 42 anos de cada variável no formato netCDF para arquivos de mesma extensão com 42 anos separados por mês. Desta forma, foi utilizado uma estrutura manipulável em ambiente *Python*, utilizando as bibliotecas *xarray*, *numpy*, *cartopy*, *os*, *matplotlib*, *pandas* e *windrose*.
- Foram extraídos os dados dos parâmetros de interesse ( $H_S$ , Dir e  $T_P$ ) dentro do recorte espacial definido no item 4.1.

#### 4.2.3 Climatologias mensais

- Foram calculados os valores médios em cada ponto de grade para cada mês do ano (de janeiro a dezembro) dos parâmetros  $H_S$ , Dir e  $T_P$ , com base no conjunto de dados de 1980 a 2022, perfazendo 42 anos e também um histograma para cada mês com a variável  $T_P$  para toda região oceânica brasileira, a fim de adequar corretamente a escala de cores às classes dominantes. Desse modo, notou-se que, a varável  $T_P$  possuía variação entre 6 e 13 segundos nota-se pelo histograma (Figura 6) abaixo para o mês de janeiro.

Figura 6 – Histograma de período de pico para o mês de janeiro.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTS*

Assim foi definido para a escala de período de pico o intervalo de 6 a 13 segundos, os histogramas dos outros meses encontram-se no apêndice A. A fim de fornecer um produto capaz de compor o Atlas de Cartas Piloto foi plotado nas figuras a METAREA V, com suas áreas de ALFA a FOXTROT e oceânicas plotadas em todos os meses na cor branca assim como suas linhas.

- Foram gerados os 12 mapas de ondas, um para cada mês do ano, para os parâmetros de interesse supracitados, utilizando-se a biblioteca *matplotlib*.

#### **4.2.4 Rosas de ondas**

- Foram elaboradas as rosas de frequência direcional e de altura de ondas utilizando-se a biblioteca *windrose* para as 12 localidades da Tabela 2. Para essas localidades, as séries temporais dos dados de direção e altura de ondas foram convertidas em frequências mensais por categorias, utilizando-se para  $H_s$  intervalos de 0,5 metro e para Dir os pontos cardeais (N, S, W e E), colaterais (NE, SE, SW e NW) e subcolaterais (NN, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW e NNW).

#### **4.2.5 Séries Temporais**

- Os dados de  $H_s$  para as localidades de Belém/PA, Recife/PE, Baía de Guanabara/RJ e Rio Grande/RS foram dispostos graficamente em formato de série temporal. Foram calculadas médias móveis mensais de 30 dias para ambas as séries temporais.

Desse modo, serão analisadas as normais climatológicas de onda associadas aos eventos meteorológicos que influenciam a interação do oceano com a atmosfera na região oceânica brasileira, evidenciando regimes distintos entre os setores norte e sul da METAREA V.

## **5. Resultados**

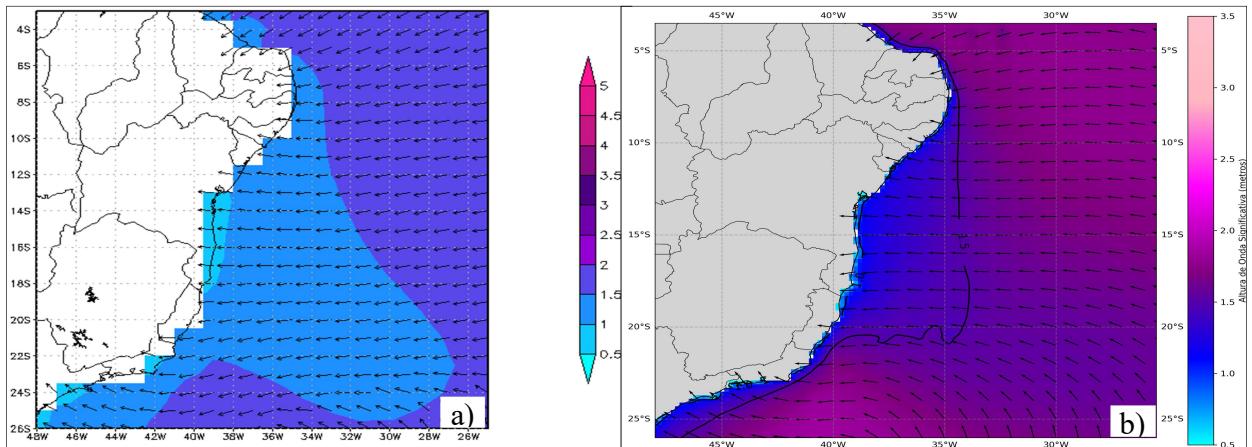
### **5.1 Comparação da Resolução**

De modo a visualizar a diferença da resolução dos dados e seu impacto na análise do comportamento das ondas, optou-se inicialmente por gerar uma comparação entre a imagem utilizada na confecção dos BC e uma versão atualizada com os dados do *WAVERTYS*.

A Figura 7 abaixo exibe a climatologia da altura significativa e direção de onda para o mês de janeiro, gerada com os dados de (a) ERA 20-C, com resolução de 125 km, e (b) *WAVERTYS*, com resolução de 22 km. Ambas apresentam uma visão integrada da dinâmica

oceânica superficial durante esse período específico, na região que abrange o litoral das regiões Sudeste e Nordeste do Brasil e áreas marítimas adjacentes.

Figura 7 - Climatologia da altura significativa e direção de ondas para o mês de janeiro utilizando os dados do (a) ERA 20-C e (b) WAVERYS



Fonte: a) CHM e b) Elaboração própria a partir de dados do *WAVERYS*

A comparação entre a Figura 7(a) e a Figura 7(b) permite notar o impacto da maior resolução no ganho de informações, principalmente em regiões junto à costa. Quanto à altura das ondas, nota-se que o conjunto de dados utilizado na Figura 7(b) permite preencher lacunas onde na Figura 5(a) não havia informações ou estavam extrapoladas, por exemplo, a região do litoral sul do estado do Rio de Janeiro e Baía de Guanabara. Ademais, na Figura 7(b) é possível verificar que tanto a isolinha de 1,5 metro quanto a de 1,0 metro de altura significativa de onda encontram-se mais a oeste, próximas ao litoral, indicando uma região de ondas ligeiramente menores do que indicado na Figura 7(a). Quanto a direção da onda, há grande similaridade entre ambas as figuras, a exemplo do padrão zonal observado ao norte do paralelo de 22°S, caracterizado por ondas de E, que se manteve em ambos os conjuntos de dados.

Com base nessa comparativo pontual, fica evidente que o uso de um conjunto de dados com maior resolução revela aspectos climatológicos mais detalhados do ambiente marinho, de suma importância para o planejamento naval.

## 5.2 Climatologia mensal

A fim de fornecer um produto para o navegante, foram elaboradas 12 cartas climatológicas do litoral brasileiro (Figuras 8 a 19), cada uma correspondente à média mensal no período entre 1980 e 2022. Em cada mapa foram representadas as variáveis: altura significativa de ondas (isolinhas), direção das ondas (vetores) e o período de pico (sombreado). Este foi dividido em duas faixas: de 6 a 10 segundos em tons de azul, para evidenciar vagas, e de 10 a 13 segundos, nas cores laranja à vermelho, denotando os marulhos.

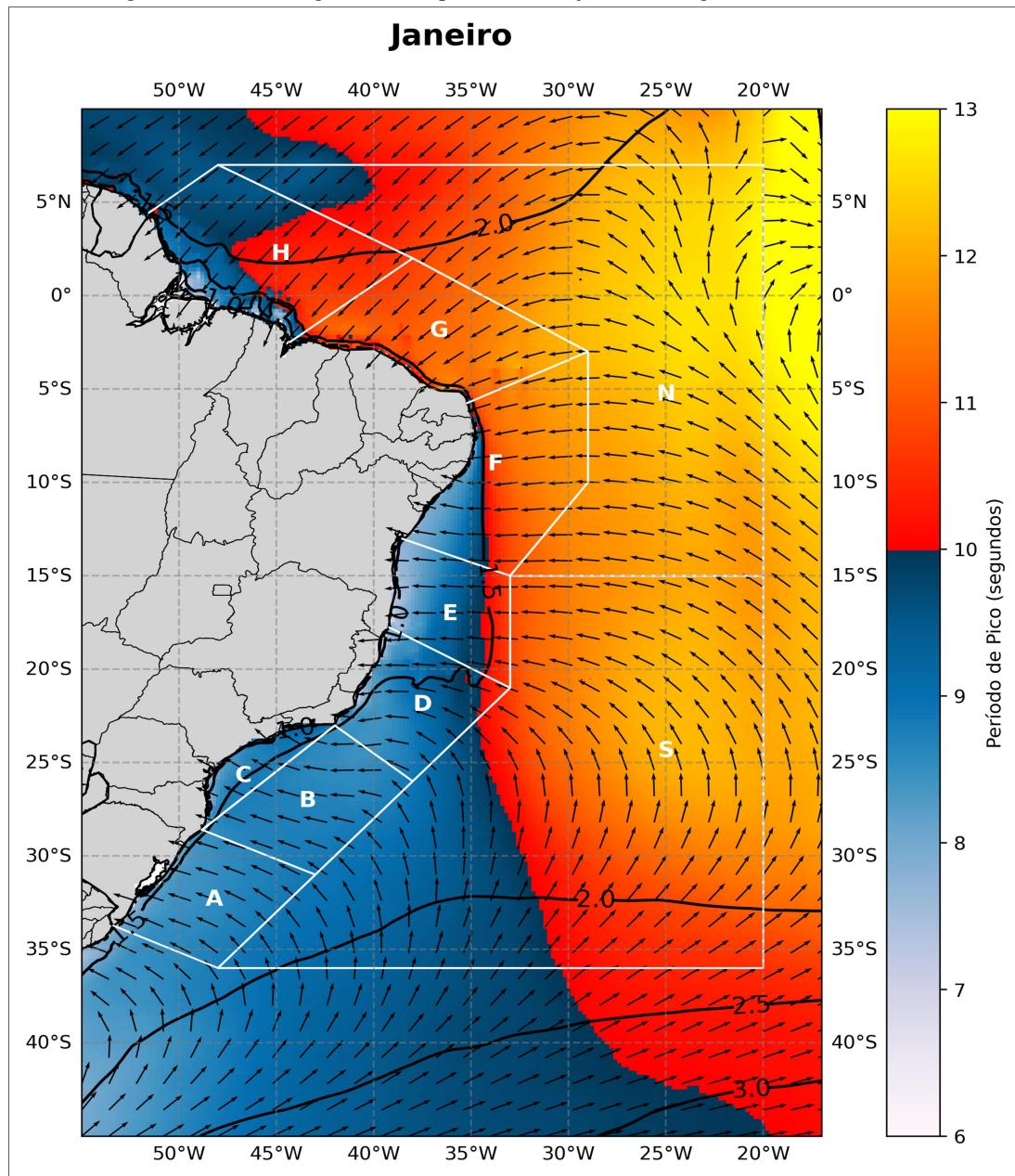
Analizando a climatologia do mês de janeiro (Figura 8), nas regiões Norte e Nordeste, a proximidade da ZCIT desempenha papel fundamental, favorecendo a predominância de ventos de E que, em conjunto com a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), promovem a geração e a propagação de ondas de E em direção à costa do Nordeste e nas áreas FOXTROT, GOLF, HOTEL, ECHO e NORTE OCEÂNICA. Nessa faixa litorânea e nas áreas da METAREA V, observa-se altura significativa média entre 1,5 e 2,0 metros, com períodos de pico variando entre 9 e 11 segundos no litoral e períodos de 11 a 12 nas áreas, evidenciando a presença de ondas mais energéticas provenientes da faixa tropical do oceano Atlântico. Mesmo durante o verão austral, sistemas frontais oriundos do Hemisfério Norte exercem influência indireta sobre essa região, intensificando a variabilidade do campo de ventos e modulando a propagação de ondas que alcançam a costa setentrional brasileira.

Já na região Sudeste, a predominância do ASAS, que mantém ventos de SE/E, resultando em ondas com alturas próximas de 1,5 metro e períodos de pico médios entre 8 e 9 segundos, assim como nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, que tem a predominância da direção SE/E com altura significativa entre 1,5 e 2 metros e período de pico que varia de 9 a 12 segundos. Nesse setor, a menor frequência de frentes frias durante o verão reduz a penetração de marulhos oriundos de latitudes mais altas, favorecendo um regime de ondas de menor energia.

Próximo a região Sul e ALFA, embora a passagem de frentes seja menos recorrente nesta estação, esses sistemas ainda contribuem para a formação de ondulações provenientes de S/SE, enquanto na porção sul da SUL OCEÂNICA há uma clara variação da direção das ondas no sentido zonal, as quais passam a vir de S/SW. As ondas que atingem essas regiões apresentam alturas médias em torno de 2,0 metros e períodos mais curtos, entre 7 e 8 segundos, refletindo a influência de mecanismos locais e transientes.

Em síntese, durante o verão austral, a energia das ondas é mais expressiva no Atlântico tropical, sustentada pela atuação da ZCIT e dos ventos alísios, enquanto o Sudeste é caracterizado por um regime de menor energia sob domínio do ASAS que durante o verão tende ser mais larga e a ter um movimento meridional e mais próximo da porção central do Atlântico Sul e mais a leste (Sun *et al.*, 2017). Já no Sul apresenta uma condição intermediária, influenciada tanto por ventos de leste quanto por sistemas frontais de origem extratropical e polar.

Figura 8 – Climatologia de ondas para o mês de janeiro na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVEYRS.

Para o mês de fevereiro (Figura 9), a configuração das ondas ao longo da costa e METAREA brasileira permanece fortemente influenciada pelos sistemas tropicais e subtropicais, apresentando características semelhantes às de janeiro, com apenas algumas alterações sutis. Nas regiões Norte e Nordeste, FOXTROT, GOLF, HOTEL, ECHO e NORTE OCEÂNICA a ZCIT mantém-se próxima ao equador, reforçando a predominância de ventos de leste em associação à ASAS. Essa configuração favorece, no litoral, a propagação de ondas provenientes de E, com alturas significativas médias variando entre 1,0 e 1,5 metro e períodos de pico na faixa de 9 a 11 segundos, enquanto nas áreas da METAREA V, há uma clara variação meridional da direção com ondas provenientes de SE/E podendo chegar a S no extremo da área oceânica. Há também nas áreas oceânicas períodos que variam de 10 a 12 segundos e altura entre 1,5 e 2,0 metros, evidenciando a presença de marulho proveniente do oceano Atlântico Tropical, que transporta maior energia em direção à costa setentrional. Além disso, os sistemas frontais que atuam no Hemisfério Norte, ainda que indiretamente, modulam o campo de ventos e contribuem para o reforço das ondas de E que atingem o litoral norte brasileiro.

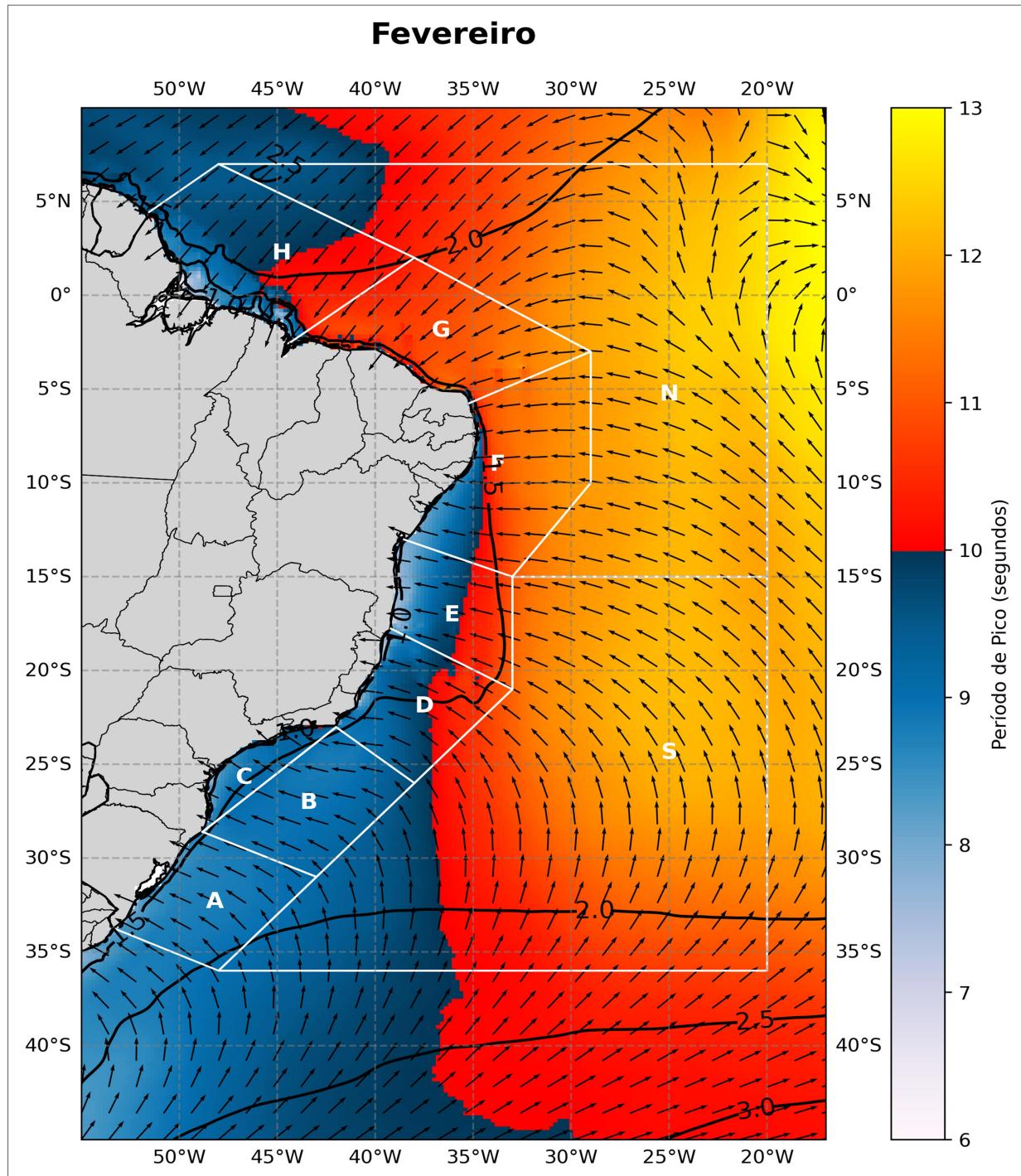
Na região Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA persiste o padrão de ventos de SE/E sob domínio da ASAS, resultando, no litoral, em ondas de alturas próximas a 1,5 metro e períodos de pico médios de 8 a 9 segundos, e na região oceânica em alturas maiores que 1,5 metro e uma clara influência da ASAS na direção das ondas provenientes de SUL, causando uma variação zonal na SUL OCEÂNICA de S para SE/E, ainda na área oceânica nota-se uma distribuição bem uniforme de períodos que variam de 8 a 12 segundos.

Já na região Sul, área ALFA e sul da SUL OCEÂNICA, embora a frequência de passagem de frentes frias continue baixa no verão, tais sistemas ainda geram, no litoral e área ALFA, ondulações provenientes do quadrante S/SE, com alturas médias em torno de 1,5 a 2,0 metros e períodos entre 7 e 8 segundos, enquanto ao sul da SUL OCEÂNICA há uma variação de ondas provenientes de SW/S com períodos de pico distribuídos de 8 a 12 segundos e com alturas que chegam a passar de 2,0 metros, caracterizando um padrão predominantemente local e de curta duração.

Assim, observa-se que, em fevereiro, as ondas mais energéticas permanecem concentradas no setor tropical do oceano Atlântico, sustentadas pela atuação conjunta da ZCIT e dos ventos alísios; o Sudeste apresenta um regime de menor energia dominado pela ASAS; enquanto o Sul

mantém uma condição intermediária, marcada por eventos episódicos de marulho associados à passagens de frentes frias e direção das ondas fortemente afetada pela presença da ASAS.

Figura 9 – Climatologia de ondas para o mês de fevereiro na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTYS.

Para o mês de março (Figura 10), a configuração de ondas ao longo da costa brasileira reflete a transição gradual do verão para o outono, marcada por uma leve intensificação da atuação de sistemas extratropicais no Hemisfério Sul, embora a influência tropical ainda predomine nas regiões mais ao norte. No Norte e Nordeste, FOXTROT, GOLF, HOTEL, ECHO

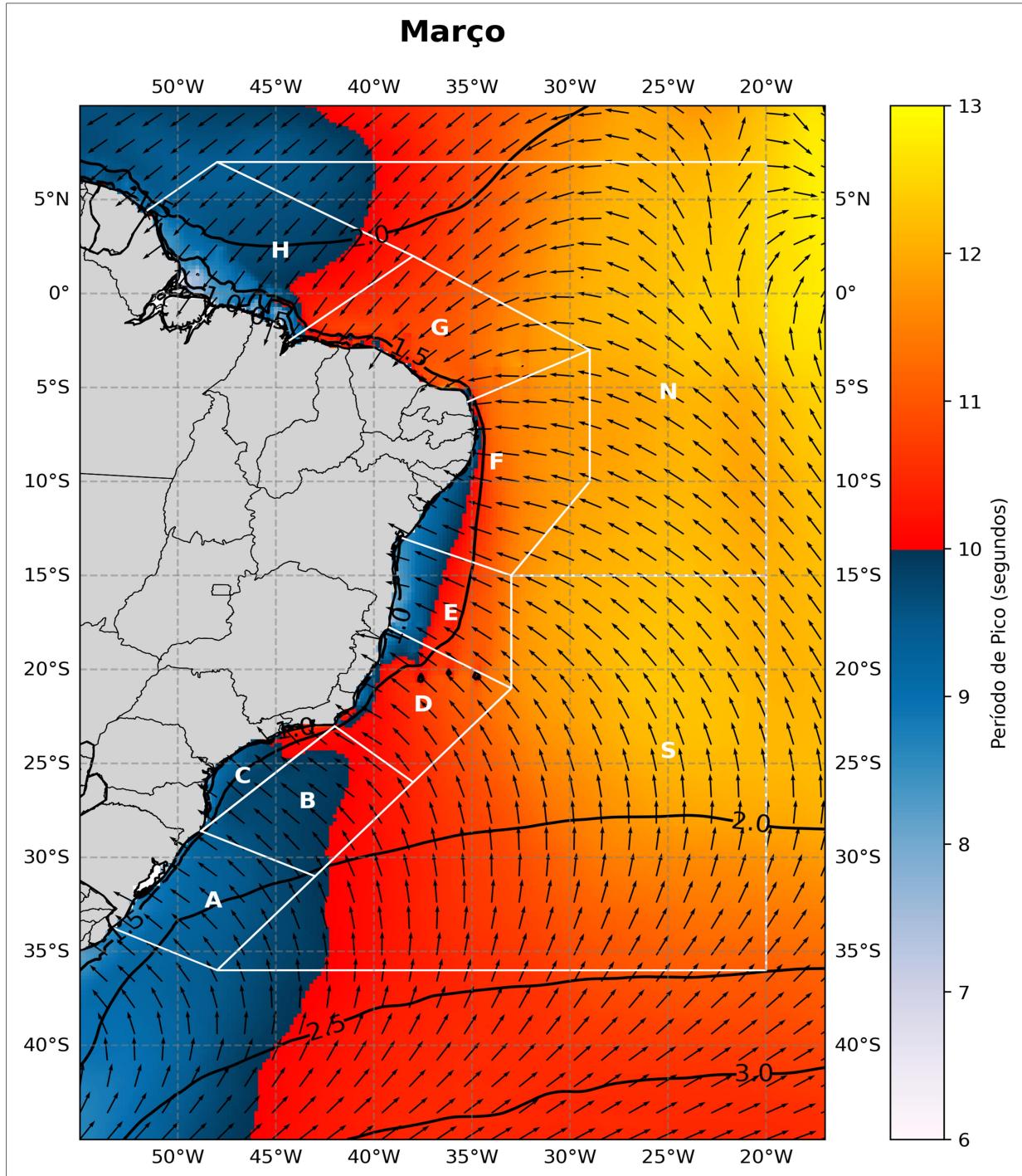
e NORTE OCEÂNICA a ZCIT mantém-se atuante próxima ao equador, reforçando os ventos de leste em associação à ASAS, que mantém sua semi permanência no sentido meridional característica do verão (Sun *et al.*, 2017). Este padrão favorece a predominância, no litoral, de ondas de leste, com alturas significativas médias entre 1,5 e 2,0 metros e períodos de pico variando de 9 a 11 segundos, já região oceânica há uma clara variação da direção, porém há uma predominância de E, evidenciando a persistência de marulho proveniente do Atlântico tropical que transporta maior energia para a faixa costeira setentrional e nordestina.

No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, observa-se a manutenção do regime de ventos de SE/E, ainda sob o domínio da ASAS, no litoral com ondas apresentando alturas em torno de 1,5 metro e períodos de pico médios entre 8 e 9 segundos, enquanto na região oceânica as ondas são provenientes de S/E, com altura significativa que vão de 1,5 metro a 2,0 metros e período de pico entre 10 e 12 segundos.

Já no Sul, área ALFA e sul da SUL OCEÂNICA o final do verão e a aproximação do outono favorecem o aumento da frequência de frentes frias, que passam a contribuir de forma mais efetiva para a formação de ondulações provenientes do quadrante S/SE no litoral. Nessa região, as ondas seguem com alturas entre 1,5 e 2,0 metros e períodos de 7 a 8 segundos. Já na região oceânica há um desenvolvimento maior das ondas, que chegam a ter um período de pico de 12 segundos e altura significativa que varia de 2,0 a 2,5 metros.

De modo geral verifica-se que, em março, as ondas mais energéticas continuam concentradas, mas começam a se distribuir pelo Brasil, no litoral Norte e Nordeste sustentadas pela ZCIT e pelos ventos alísios. Já no litoral Sudeste, ondas são sustentadas pela ASAS e com chegada de vagas e marulhos provenientes da passagem de frentes ao sul. No Sul passa a apresentar sinais iniciais de transição para um padrão mais ativo, marcado pela maior contribuição de sistemas extratropicais. Há um leve deslocamento da ASAS em direção a oeste e ao equador devido a chegada do outono e inverno, assim como um do seu tamanho (Sun *et al.*, 2017).

Figura 10 – Climatologia de ondas para o mês de março na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

Avaliando o mês de abril (Figura 11), a configuração de ondas ao longo da costa brasileira reflete uma fase de transição mais consolidada do verão para o outono, com intensificação progressiva da atuação de sistemas extratropicais no Hemisfério Sul, início do recuo sazonal da

ZCIT para o Hemisfério Norte e como constatado por Sun *et al.*, (2017) há o deslocamento da ASAS em direção ao oeste e equador devido a maior proximidade do inverno.

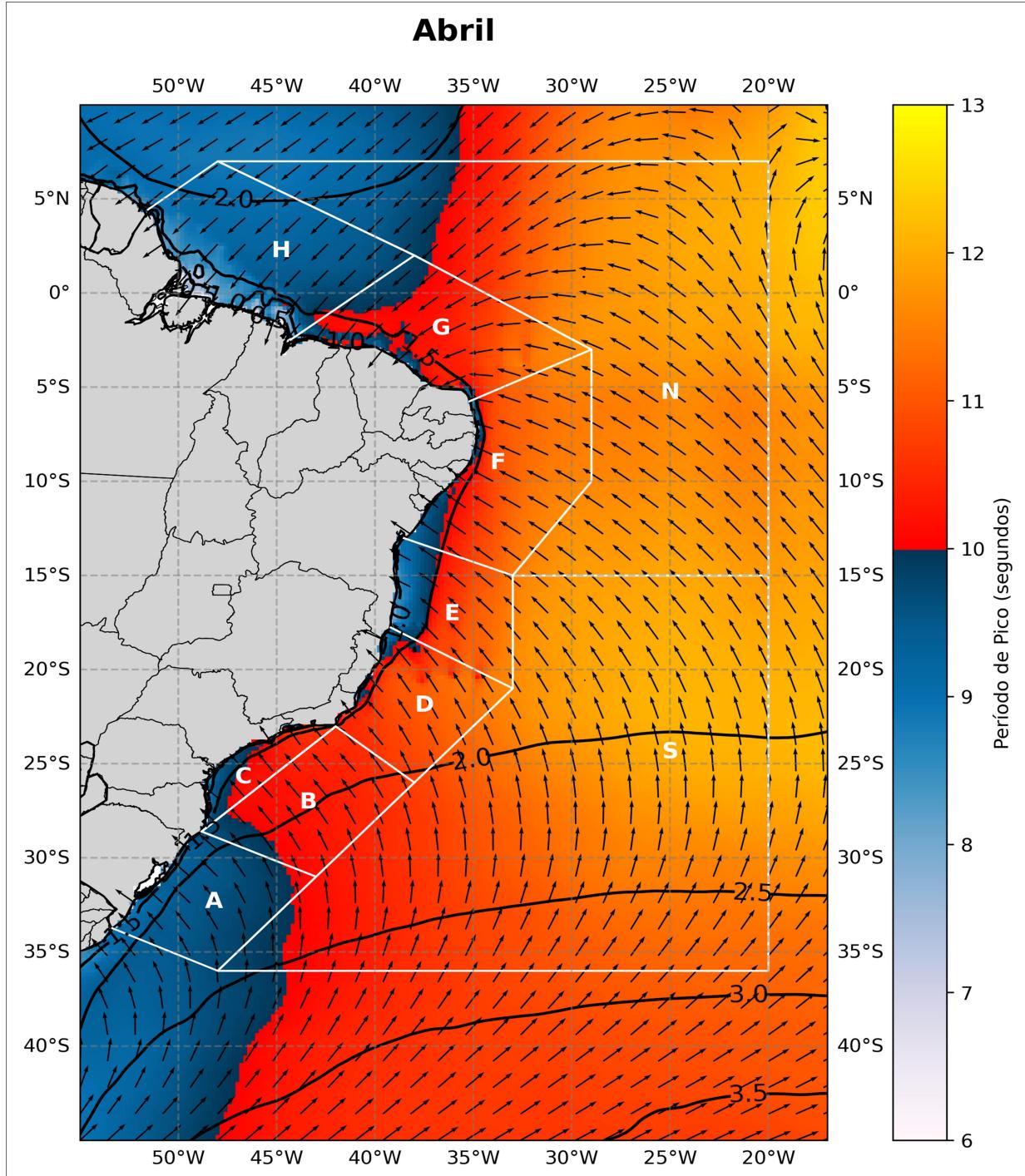
Nas regiões Norte, Nordeste, FOXTROT, GOLF, HOTEL, ECHO e NORTE OCEÂNICA observa-se uma redução da influência direta da ZCIT sobre o campo de ventos costeiros, embora os ventos de E ainda predominem, sustentados pela ASAS, que agora se aproxima do equador e da costa brasileira. No litoral, as alturas significativas médias permanecem entre 1,5 e 2,0 metros, porém com períodos de pico levemente menores, situando-se em torno de 9 a 10 segundos. Na região oceânica a ASAS impacta na variação da direção no sentido meridional de SE a NE, com altura significativa entre 1,5 e 2,0 metros e período de pico entre 10 e 13 segundos. o que indica um afastamento gradual do marulho mais energético do Atlântico tropical para áreas mais oceânicas, reduzindo o aporte energético que atinge a faixa litorânea setentrional e nordestina e mantendo o aporte de energia da região oceânica.

No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, observa-se o domínio do centro e sul da ASAS começa a apresentar maior modulação por sistemas frontais de latitudes médias. Permitindo, no litoral, a penetração de ondas com maior período de pico, próximas de 9 segundos, e alturas médias ao redor de 1,5 metro, já na região oceânica há uma manutenção do aporte energético e um aumento considerável da altura significativa variando de 1,5 metro a 2,5 metros. Essa condição evidencia um ligeiro aumento da energia de ondas de origem mais distante e a interação do marulho vindo sul com o aporte energético dos ventos provenientes da ASAS, quando comparado aos meses anteriores.

Enquanto no Sul, área ALFA e sul da SUL OCEÂNICA a intensificação da passagem de frentes frias no outono favorece a geração e a propagação de marulho proveniente de S/SE. No litoral, as ondas alcançam alturas médias entre 1,5 e 2,0 metros e apresentam períodos entre 8 e 9 segundos, já na área oceânica há uma forte variação da altura significativa com valores que podem chegar a 3 metros, as ondas são provenientes de SW/S e períodos de pico de 10 a 12 segundos, refletindo tanto a atuação de ventos locais quanto a chegada de ondulações mais longas e energéticas.

Assim, abril marca uma redistribuição gradual da energia das ondas, com redução do transporte proveniente do Atlântico tropical e maior participação de sistemas extratropicais, que passam a influenciar progressivamente o Sudeste e o Sul do país e a permanência da atuação da ASAS no aporte energético do litoral de Norte a Sudeste.

Figura 11 – Climatologia de ondas para o mês de abril na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERYS*.

Durante o mês de maio, o Hemisfério Sul encontra-se no meio do outono e, com isso, ocorre a intensificação dos sistemas frontais no Sul e permanece a atuação da ASAS no litoral. A

climatologia de ondas para este mês (Figura 12) mostra que no Norte, Nordeste, FOXTROT, GOLF, HOTEL, ECHO e NORTE OCEÂNICA a atuação da ZCIT, que neste período migra em direção ao Hemisfério Norte mantém os ventos alísios predominantes de direção E/NE.

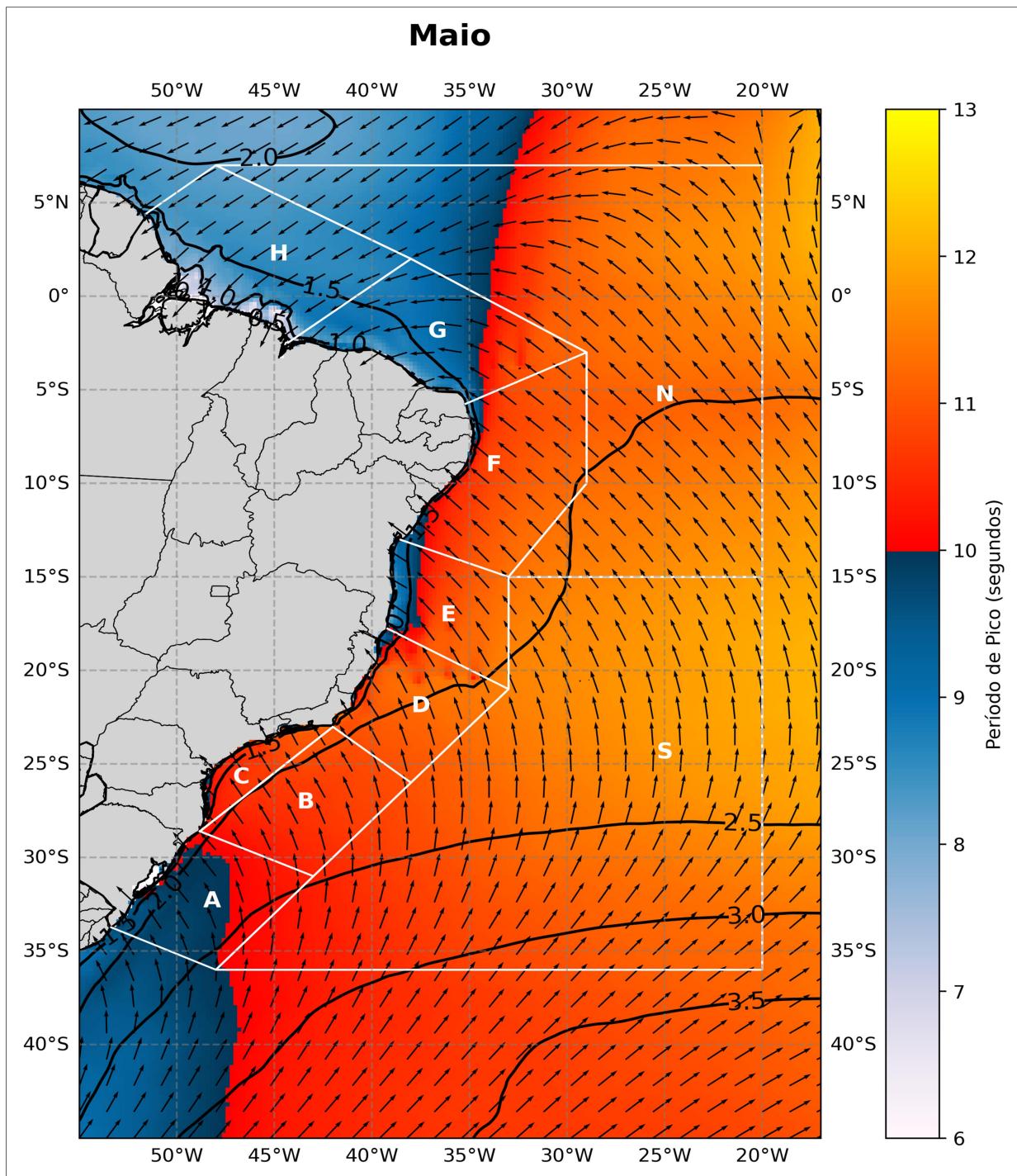
No norte resulta em ondas de menor período, entre 7 e 8 segundos, sem evidências de marulhos de longo período alcançando a faixa costeira. Já no Nordeste, prevalecem as ondas de SE/E, geradas pelos ventos alísios, com períodos médios entre 9 e 10 segundos junto à costa. As faixas de período de pico superiores a 10 segundos permanecem posicionadas mais para leste, afastadas do litoral, sugerindo que a energia de marulhos de maior período ainda não impacta de forma significativa a região. Na região oceânica há uma leve diminuição do aporte energético, de forma que o período de pico agora varia de 8 a 11 segundos, a altura significativa das ondas fica entre 1,5 e 2,0 metros, mais próximo da costa a direção é de NE, enquanto mais a leste é predominante vindo de SE.

No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, a influência das frentes é mais expressiva, embora com menor intensidade que no Sul. No litoral, as ondas de S/SE continuam frequentes, e as faixas de período de pico entre 10 e 11 segundos avançam para o continente. Na região oceânica há uma dominância de ondas mais energéticas que conseguem chegar ao litoral, com período de pico variando de 10 a 13 segundos, direção das ondas de S/SE e altura significativa de 2,0 a 2,5 metros. Esse comportamento indica a propagação de marulhos de longa distância.

Na região Sul, área ALFA predominam as ondas provenientes das direções S/SE, refletindo a maior frequência de frentes frias e ciclones extratropicais que geram marulhos de longo período. Observa-se a presença de faixas de período de pico acima de 10 segundos avançando em direção à costa, especialmente ao sul de 30°S, acompanhadas por ondas mais elevadas próximas do litoral, o que indica maior aporte de energia associado a esses eventos. Ao sul da SUL OCEÂNICA há a manutenção do aporte energético com maior altura significativa de 2,5 metros podendo chegar a 3,5 metros, a direção das ondas é persistente de SW e o período de pico varia de 10 a 13 segundos.

Assim, o mês de maio revela ondas de mais energia nas regiões Sul e Sudeste devido à proximidade dos marulhos (período maior que 10 s) associados à passagem de frentes e ciclones extratropicais, enquanto o Nordeste e o Norte permanecem sob domínio do vagas geradas pelos alísios e pela atuação da ASAS, com energia mais moderada e menor influência de ondas remotas.

Figura 12 – Climatologia de ondas para o mês de maio na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERYS*.

Para o mês de junho (Figura 13), a climatologia de ondas no Atlântico brasileiro evidencia o início do inverno austral, com maior atuação dos sistemas frontais no Hemisfério Sul e um fortalecimento da energia de ondas em latitudes médias e altas.

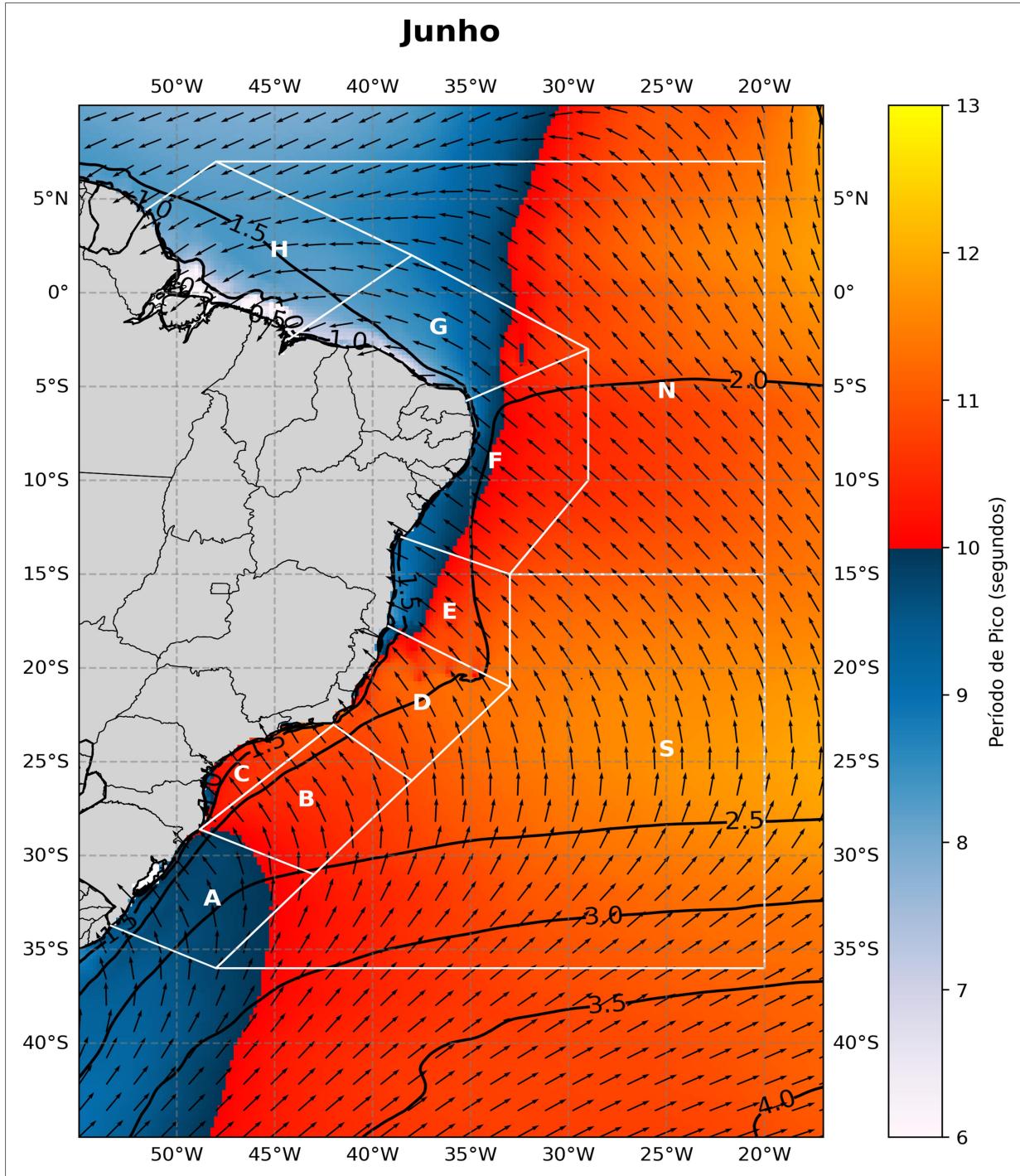
Na região Norte, GOLF, HOTEL, ao sul da NORTE OCEÂNICA a influência da ZCIT é menos expressiva neste período, que já se encontra deslocada mais ao norte, enquanto os ventos alísios de E/NE da ASAS persistem e resultam, no litoral, em ondas de menor período, entre 7 e 8 segundos com altura significativa que não passam de 1,5 metro. Na região oceânica observa-se uma variação da energia no sentido zonal, com período de pico entre 8 e 13 segundos, ondas de NE/SE. No Nordeste e áreas FOXTROT, ECHO, as ondas mantêm-se de direção SE/E, forçadas pelos ventos alísios, com período de pico predominante de 9 a 10 segundos próximo à costa, enquanto as faixas de maior período permanecem mais afastadas ao sul da NORTE OCEÂNICA, situando-se entre 05°W e 030°W, o que indica que a energia do marulho não está atuante na região. No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, o padrão é semelhante, embora com ondas de menor altura do que no extremo sul. No litoral, observa-se a predominância direcional de S/SE e a presença consistente de período de pico em torno de 10 a 11 segundos, alcançando o continente e, em diversos episódios, tocando a faixa costeira entre São Paulo e Espírito Santo. Na região oceânica há uma predominância de ondas vindas de S/SE e permanência do alto aporte energético com período de pico entre 10 e 13 segundos e altura significativa entre 2,0 e 2,5 metros. Este comportamento está relacionado tanto às passagens frontais recorrentes quanto à propagação dos marulhos típicos do inverno.

No Sul e na área ALFA a predominância de ondas provenientes de S/SE é marcante, com período de pico superior a 10 segundos se estendendo até a proximidade da costa, especialmente entre 30°S e 35°S, enquanto ao sul da SUL OCEÂNICA há uma clara predominância de ondas de SW com grande aporte energético com período de pico entre 10 e 12 segundos e altura significativa entre 2,5 metros e pouco mais de 3,0 metros, indicando a chegada frequente de marulhos gerados por frentes frias e ciclones extratropicais. São também observadas ondas mais elevadas nessa porção do litoral, associado a eventos de maior período.

Em síntese, o Sul e Sudeste são as regiões mais impactadas por marulhos devido a maior frequência e intensidade de frentes frias e ciclones, enquanto o Nordeste continua sob predominância de vagas dos alísios devido a presença da ASAS que se aproxima do Equador e do litoral brasileiro como confirmado por Sun *et al.* (2017), e o Norte mantém um regime mais

estável e de menor energia. Esse padrão reflete a consolidação do inverno austral e o fortalecimento dos processos sinóticos geradores de ondas de maior energia no Atlântico Sul.

Figura 13 – Climatologia de ondas para o mês de junho na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

Durante o mês de julho (Figura 14), a climatologia de ondas no Atlântico brasileiro mantém as características típicas do inverno austral, em um padrão similar ao que foi observado em junho (Figura 13). No Norte e nas áreas GOLF, HOTEL e ao norte da NORTE OCEÂNICA, a influência da ZCIT permanece reduzida nesta época do ano, mantendo a influência da ASAS como principal forçante, o que gera ondas de menor energia e períodos de pico inferiores a 8 segundos no litoral com altura significativa de no máximo 1,5 metros, na região oceânica a direção predominante é de NE com período variando na direção zonal entre 8 e 13 segundos.

No Nordeste e áreas FOXTROT, ECHO, o padrão segue dominado pela ASAS de SE, com ondas de menor período de pico, em torno de 8 a 9 segundos, mais próximas à costa, e a presença de faixas de períodos de pico ligeiramente mais altos (9 a 10 segundos) na porção leste das áreas FOXTROT e ECHO, já na região oceânica há maiores períodos de pico entre 10 e 11 segundos e altura significativa de 2,0 metros, evidenciando a predominância do vagas sobre os marulhos próximo a costa e manutenção do aporte energético e maiores alturas na região oceânica.

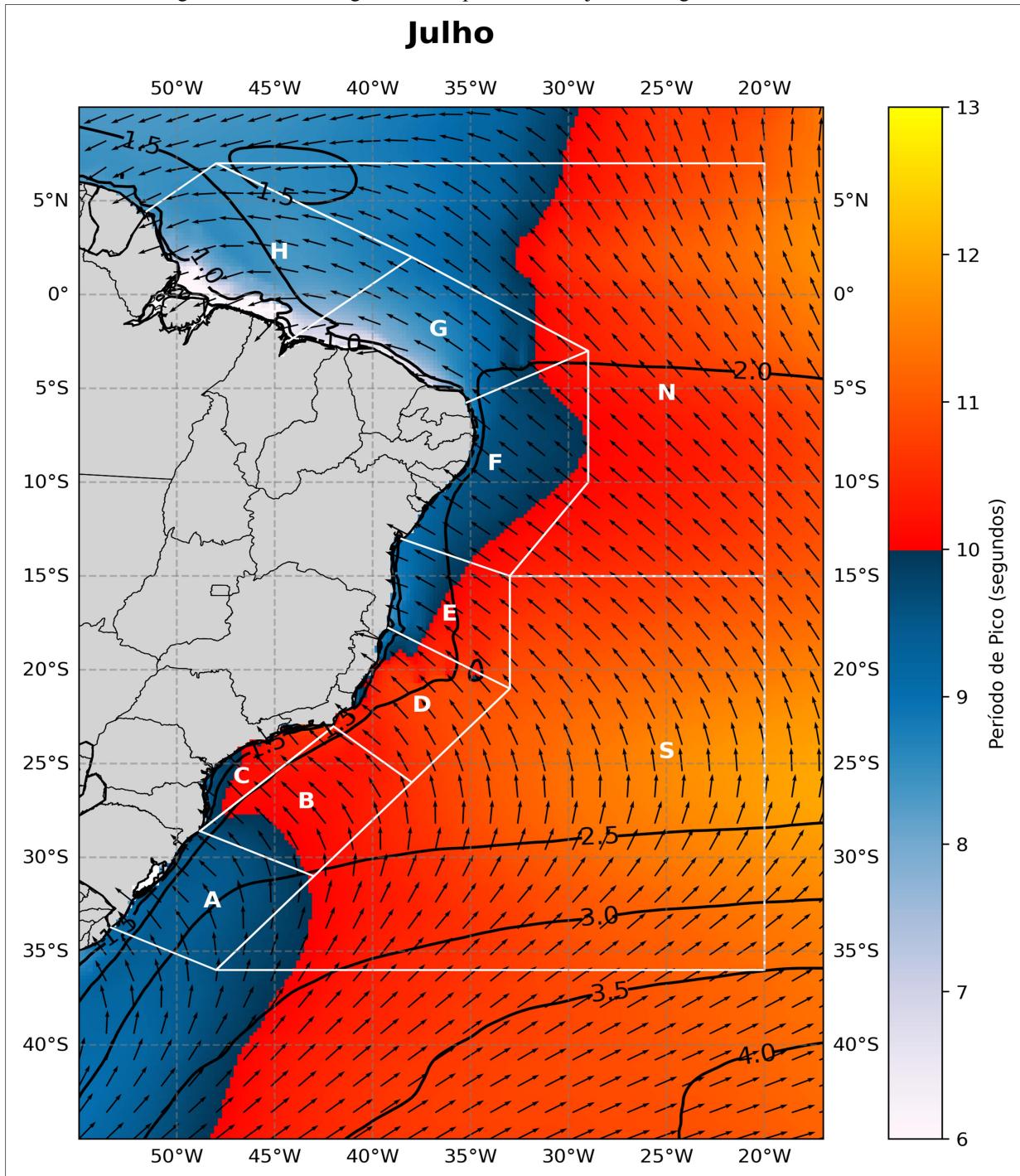
No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA, a influência dos sistemas frontais continua marcante, mas observa-se uma tendência de suavização no regime de ondas, devido a permanência da isolinha de 2,0 metros a 5 °S, com direção de S/SE e períodos de pico variando entre 9 e 10 segundos, sendo as maiores energias situadas entre 25°S e 30°S. Essa configuração ainda é fortemente modulada pela passagem de frentes frias, mas com ondas menos energéticas do que no início do inverno, principalmente no litoral.

Na região Sul e na área ALFA persistem as ondas de S/SE, com períodos de pico ainda elevados, na faixa de 10 a 11 segundos e altura significativa de 2,0 a 2,5 metros, associados à atuação frequente de frentes frias e ciclones extratropicais. Ao sul da SUL OCEÂNICA há uma perceptível influência do deslocamento das frentes para leste resultando em ondas de SW com período de pico entre 10 e 12 segundos, alturas significativas que chegam a 3,0 metros.

Assim, julho representa a continuidade do regime de inverno, mas com uma leve atenuação na energia das ondas, aparente na permanência das isolinhas em relação ao mês anterior, sobretudo no Sudeste. Enquanto o Nordeste e o Norte mantêm seu comportamento sazonal característico, com predominância do vagas associadas à ASAS e menor influência de marulhos. As regiões oceânicas ainda permanecem com capacidade energética alta ao avaliar o período de pico, com alturas que variam de 2,0 a 3,5 metros, a energia proveniente da passagem

de frente é capaz de se ultrapassar a região sudeste, no período de inverno, mostrando que a energia das passagens das frentes é capaz de influenciar até o nordeste do Brasil.

Figura 14 – Climatologia de ondas para o mês de julho na região da METAREA V



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTYS.

No mês de agosto (Figura 15), o litoral brasileiro apresenta um contraste entre as porções mais ao norte e as mais ao sul, oriundas da atuação distintas de sistemas sinóticos. No Norte e áreas FOXTROT e ECHO observam-se ondas com período de bico reduzido junto à costa e alturas entre 1,0 a 1,5 metro. Essas ondas são geradas apenas pela ASAS que neste período está mais larga como visto por Sun *et al.* (2015), uma vez que a ZCIT se encontra próximo de suas posições mais setentrionais.

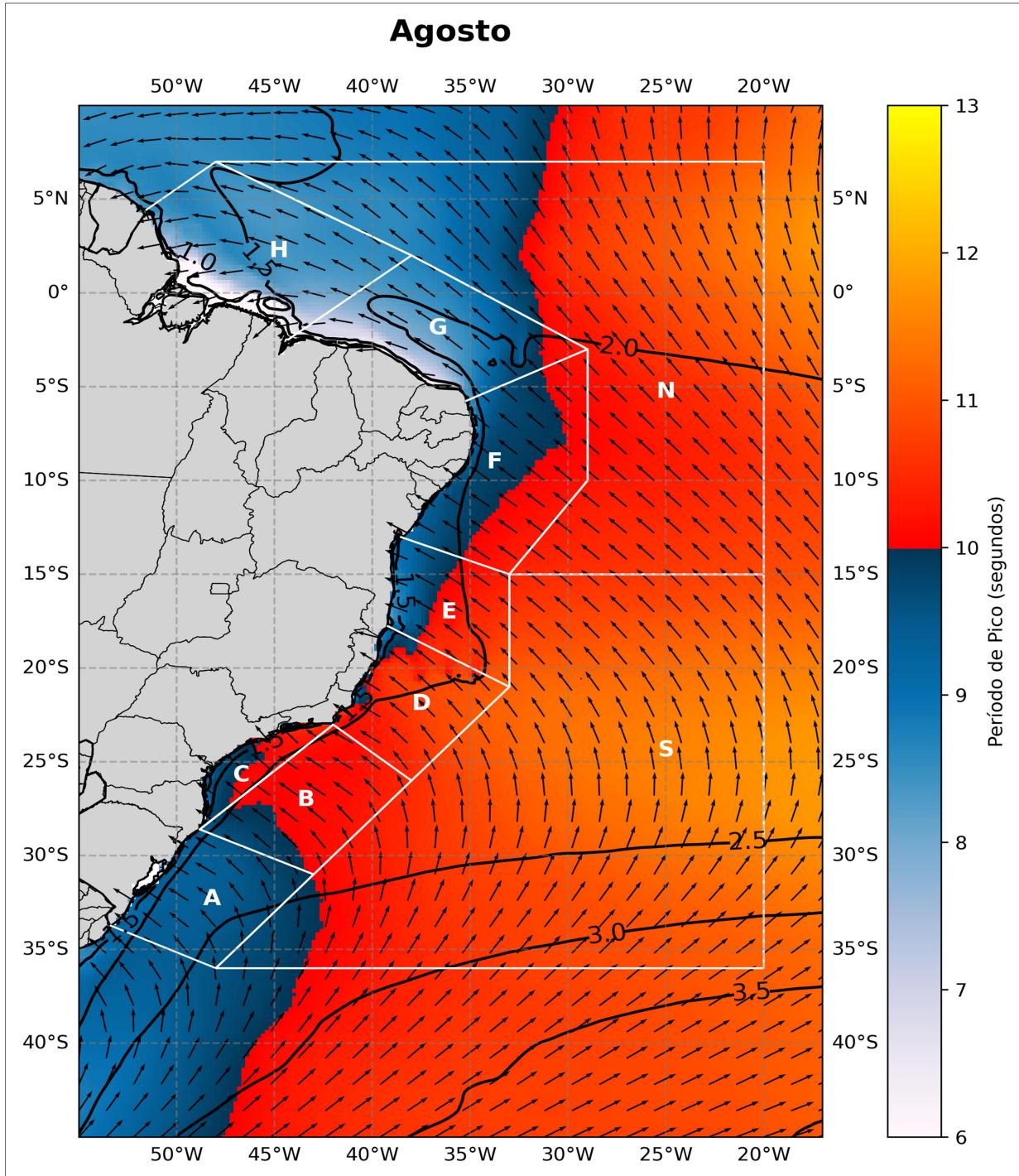
No Nordeste e áreas FOXTROT e ECHO as ondas são de SE, com período de pico entre 8 e 11 segundos com altura significativa de 1,0 a 2,0 metros, refletindo o padrão de ventos alísios que seguem intensificados pela ASAS, a maior aproximação da isolinha de 2,0 metros mostra a capacidade energética neste período quando comparado com o mês de julho. Na região NORTE OCEÂNICA apresenta seu menor aporte energético em relação ao período de pico, quando comparado com outros meses, com valores de 8 a 11 segundos.

Já no Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE, DELTA e ao norte da SUL OCEÂNICA nota-se ainda a influência de marulhos por conta da passagem dos anticlones migratórios. No litoral há ondas de SE e com alta energia, com período de pico de 11 segundos e altura significativa entre 1,5 e 2,0 metros. Tais características são típicas ainda do inverno austral, quando frentes frias e ciclones extratropicais definem condições de alto aporte energético ao sistema costeiro, impactando também o Sudeste e, de maneira mais atenuada, o Nordeste e Norte.

Na região Sul e na área ALFA persistem as ondas de S/SE com período de pico entre 8 e 10 segundos, altura significativa de 2,0 a 2,5 metros, já ao sul da SUL OCEÂNICA as ondas variam de SW/S com período de pico entre 10 e 12 segundos e altura significativa entre 2,0 e 3,0 metros, mantendo o aporte energético na região em relação ao seu período de pico e com as isolinhas de 2,0 a 3,0 metros começando a recuar para sul.

Assim, o mês de agosto apresenta um contraste latitudinal evidente: enquanto o Norte e Nordeste permanecem dominados por vagas local, com menor período e energia, o Sudeste e o Sul estão sob influência dos marulhos, com períodos de pico acima de 10 s e alturas significativamente maiores. Nota-se cada vez mais a contribuição de sistemas sinóticos oriundos de altas e médias latitudes para o padrão de ondas observado nas porções mais ao sul da METAREA V. E peculiarmente há um avanço da isolinha de 2,0 metros que provavelmente deve-se a interação dos sistemas transitentes com a ASAS, aumentando o aporte energético na região.

Figura 15 – Climatologia de ondas para o mês de agosto na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

No mês de setembro (Figura 16), a climatologia das ondas evidencia a continuidade do gradiente zonal observado em agosto (Figura 15), em consonância com as condições sinóticas

típicas da transição entre o inverno e a primavera austral. No Norte e nas áreas GOLF, HOTEL e ao norte da NORTE OCEÂNICA, a ZCIT encontra-se no extremo norte e os ventos alísios de SE oriundos da ASAS predominam em toda porção norte da METAREA V, ocasionando, no litoral, as ondas de SE/E, de 1,0 a 2,0 metros, enquanto a ASAS já começa seu deslocamento característico para a condição de verão mais a leste indo ao sul do Atlântico Sul e a ZCIT começa a retornar em direção ao sul. O aporte energético ao norte da NORTE OCEÂNICA volta a aumentar em relação ao seu período de pico, com o início da diminuição das vagas, mantendo ondas de E/SE e a isolinha de 2,0 metros inicia o seu retorno para sul.

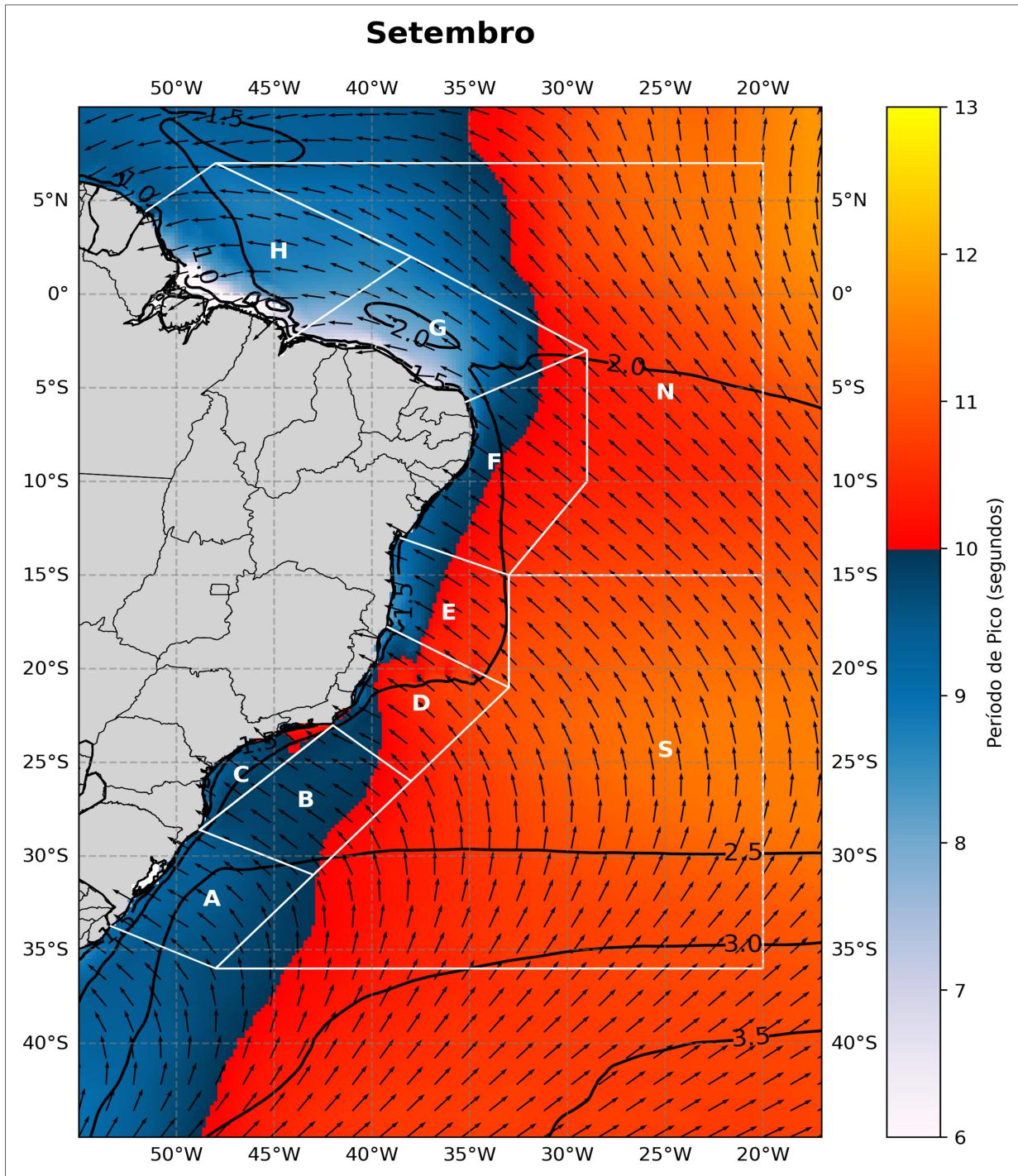
No Nordeste e áreas FOXTROT e ECHO as ondas são de SE, com período de pico entre 8 e 11 segundos com altura significativa de 1,5 a 2,0 metros, refletindo o padrão de ventos alísios que seguem intensificados pela ASAS, há também o recuo da isolinha de 2,0 metro, mostrando a redução da passagem de frente ao sul que não interagem mais com a ASAS para aumentar o aporte energético. Na região NORTE OCEÂNICA apresenta o início do aumento de aporte energético em relação ao período de pico, em relação ao mês de agosto, pela redução da área de atuação das ondas de período de pico entre 8 e 10 segundos.

Já no Sudeste, é ainda possível notar a presença de marulhos na área BRAVO, CHARLIE e DELTA, em decorrência da atuação das baixas migratórias. As ondas ainda estão elevadas, variando entre 2,0 a 3,0 metros na média e começam o recuo das isolinhas de 2,5 e 3,0 metros. Ao norte da SUL OCEÂNICA há um aporte energético característico de 10 a 12 segundos retornando.

No Sul e na área ALFA há predomínio de vagas com período de pico típico entre 8 e 10 segundos e altura significativa entre 2,0 e 2,5 metros vindas de SE, evidenciando agitação marítima local por conta dos sistemas frontais. Ao sul da SUL OCEÂNICA há o recuo das isolinhas para sul e as ondas começam a rondar de SE a S em relação ao mês anterior, com o período de pico ligeiramente menor, entre 10 e 12 segundos.

Em síntese, setembro mantém o contraste latitudinal: o litoral das regiões Norte e Nordeste continuam dominados por vagas com baixa energia (períodos de pico inferiores a 10 segundos), enquanto as regiões Sudeste e Sul ainda está sob influência de marulho com maior energia (períodos de pico superiores a 10 segundos), especialmente no Sudeste e Sul na área SUL OCEÂNICA.

Figura 16 – Climatologia de ondas para o mês de setembro na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

O mês de outubro (Figura 17) mostra um padrão que reflete a transição climática entre o inverno e a primavera austral, também marcado por contrastes regionais, assim como a

aproximação da ASAS para sul. No Norte e nas áreas GOLF, HOTEL e ao norte da NORTE OCEÂNICA, a ZCIT já começa o seu deslocamento para sul e os ventos alísios de E oriundos da ASAS predominam em toda porção norte da METAREA V, ocasionando, no litoral, as ondas de E, de 1,0 a 1,5 metro e mantendo vagas na região. O aporte energético ao norte da NORTE OCEÂNICA aumentar, em relação ao seu período de pico, com maior diminuição das vagas, mantendo ondas de E/SE e a isolinha de 2,0 metros se afasta 5º para sudeste.

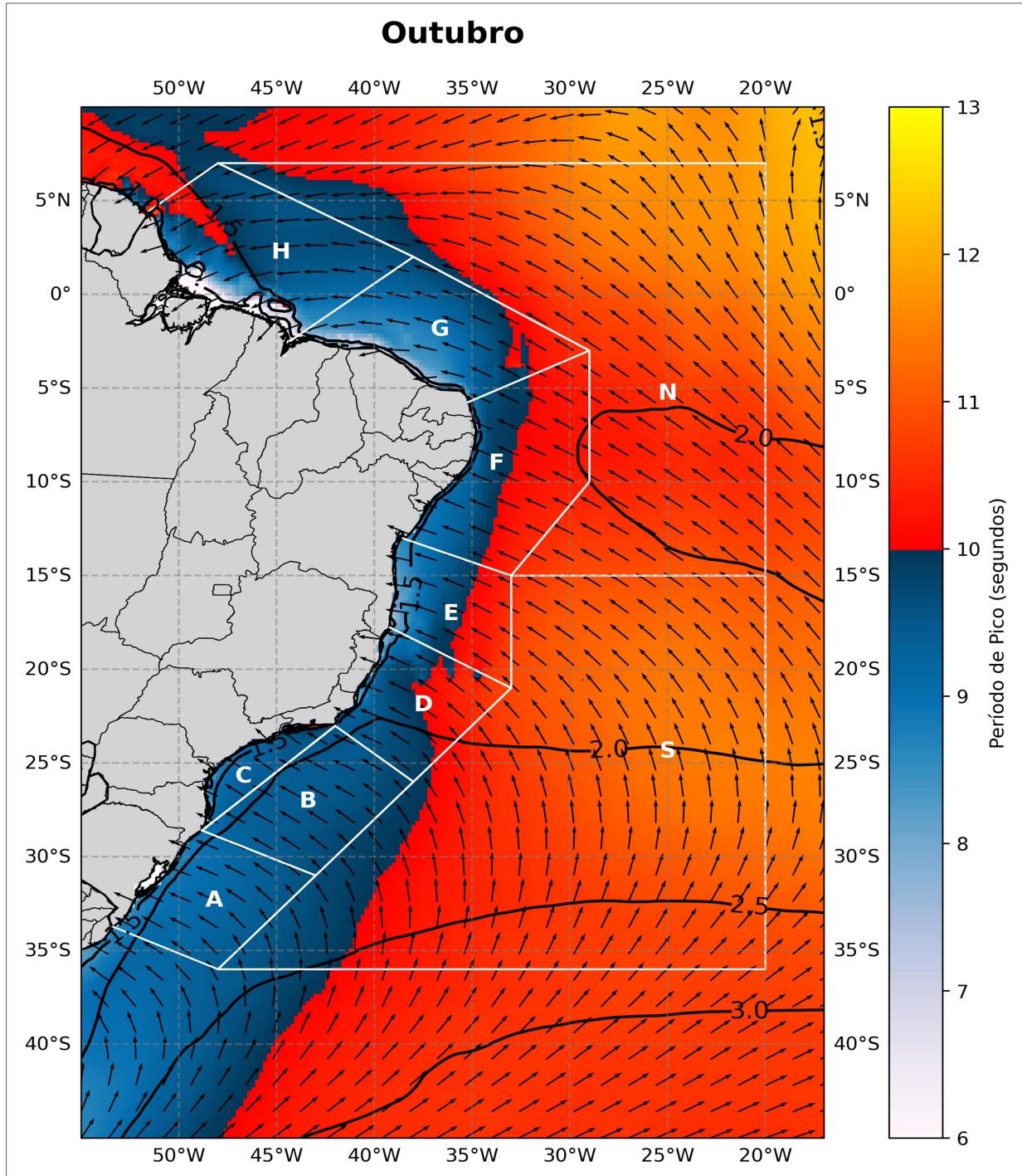
No Nordeste e áreas FOXTROT e ECHO as ondas são de SE, com período de pico entre 8 e 11 segundos com altura significativa de 1,0 a 1,5 metro, refletindo o padrão de ventos alísios que seguem intensificados pela ASAS, há também o recuo da isolinha de 2,0 metros, mostrando a redução da passagem de frente ao sul que não interagem mais com a ASAS para aumentar o aporte energético.

Já no Sudeste, não é mais possível notar a presença de marulhos nas áreas BRAVO, CHARLIE e DELTA, em decorrência da redução das baixas migratórias. As ondas apresentam um ligeiro recuo na área oceânica, variando entre 2,0 a 2,5 metros agora. Ao norte da SUL OCEÂNICA há um aporte energético característico de 10 a 12 segundos se firmando.

No Sul e na área ALFA há predomínio de vagas com período de pico típico entre 8 e 10 segundos e altura significativa entre 1,5 e 2,0 metros vindas de SE, evidenciando agitação marítima local por conta dos sistemas frontais, estas vagas se estendem em direção leste. Ao sul da SUL OCEÂNICA há o recuo expressivo das isolinhas para sul e as ondas começam se manter de S, comparado ao mês anterior, com o período de pico ligeiramente menor entre 10 e 12 segundos.

Em resumo, outubro mantém o contraste zonal: o litoral das regiões Norte e Nordeste continuam dominados por vagas com baixa energia (períodos de pico inferiores a 10 segundos), enquanto a região oceânica volta a aumentar o aporte energético com o seu período de pico aumentando, com marulhos entre 10 e 12 segundos, enquanto as regiões Sudeste e Sul demonstram uma forte diminuição dos marulhos (períodos de pico superiores a 10 segundos), passando a região sul para uma forte influência de vagas. A diminuição das passagens das frentes começa a afetar a disponibilidade de energia para a altura das ondas.

Figura 17 – Climatologia de ondas para o mês de outubro na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

Em novembro (Figura 18), revela-se um padrão de ondas mais próximo do verão, com diminuição gradual da influência das frentes frias e persistência da atuação dos ventos alísios no

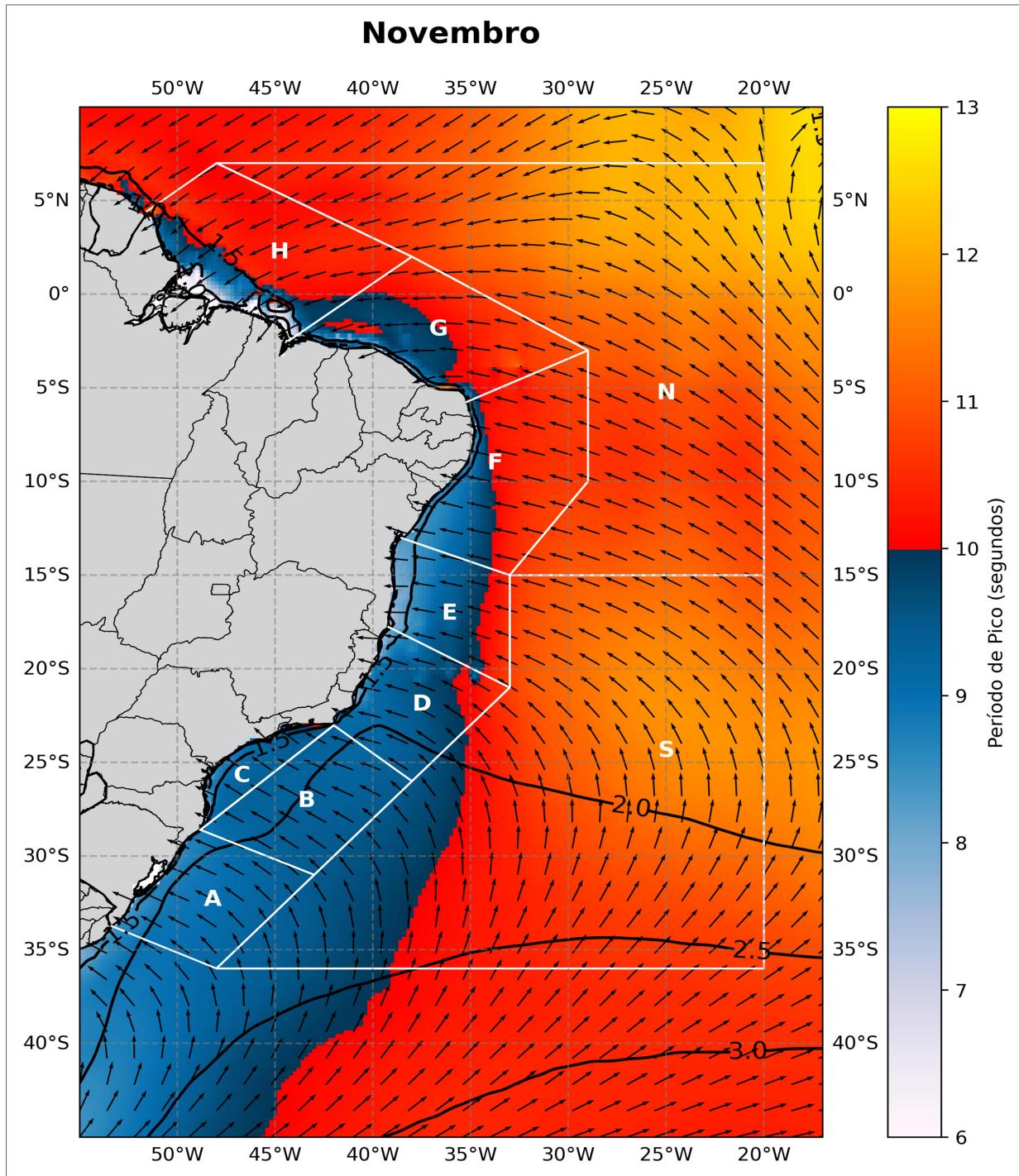
litoral do Norte. O deslocamento da ASAS, para sul, junto com a ZCIT aumenta o período de pico das ondas que chegam no litoral Norte e nas áreas GOLF e HOTEL, com altura significativa das ondas variando de 8 a 11 segundos. Toda região NORTE OCEÂNICA está sob influência da ZCIT e da ASAS, com esta confluência corroborando para a variação zonal da direção vindo de E a SE, agora a isolinha de 2,0 metros recua mais evidente.

A região Nordeste e áreas FOXTROT e ECHO tem um leve aumento do período de pico das suas ondas, ainda que haja uma diminuição da altura significativa que atinge o seu litoral variando de 1,0 a 1,5 metro, o período de pico das ondas aumenta entre 2 e 3 segundos na porção mais amarada das áreas FOXTROT e ECHO, a direção vinda de E persiste, mostrando a influência da ASAS com os alísios.

No Sudeste, vagas voltam a predominar nas áreas BRAVO, CHARLIE e DELTA. As ondas diminuem muito seu aporte energético com a chegada do verão, variando entre 1,5 a 2,0 metros agora, a direção das ondas é muito influenciada pela menor frequência da passagem das frentes e pela ASAS. Ao norte da SUL OCEÂNICA há um aporte energético característico de 10 a 12 segundos mais evidente com a aproximação do verão. No Sul já se encontram sob domínio de vagas, com ondas de menor período, reflexo do declínio da atuação de ciclones extratropicais com as vagas avançando sobre a SUL OCEÂNICA e a altura significativa das ondas diminuindo muito, a direção das ondas segue sendo modulada pela ASAS e pelas baixas subtropicais transientes.

Em síntese, a configuração de novembro mantém o contraste característico, com o Norte e o Nordeste retornando a serem influenciados pelos marulhos do Atlântico Norte, mostrando o aumento energético no período de pico que aumenta progressivamente agora, mês a mês, com o máximo no pico do verão, enquanto o Sudeste e Sul com ondas mais baixas e de menor período que novamente voltam a aumentar também seu período de pico característico do verão. A descida da ASAS para S e E, como percebido por Sun *et al.* (2017), ocasiona o aumento da interação mar atmosfera por volta de 20 °S, assim a ASAS volta a influenciar fortemente as áreas NORTE e SUL OCEÂNICA no seu período de pico.

Figura 18 – Climatologia de ondas para o mês de novembro na região da METAREA V.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

Em dezembro (Figura 19), a climatologia das ondas ao longo do litoral brasileiro reflete o início do verão austral e apresenta uma combinação de padrões regionais bem definidos,

influenciados pelo reposicionamento da ASAS e pela atividade dos ventos alísios com a ZCIT mais ao sul. Essa transição resulta em condições distintas entre as regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul.

Na região Norte e nas áreas GOLF, HOTEL os ventos alísios de E/NE permanecem dominantes. Destaca-se também a maior frequência de passagem de frentes no Hemisfério Norte, que está no inverno, gerando marulhos que aportam eventualmente no litoral norte brasileiro. As alturas significativas variam entre 1,5 e 2,0 metros, e os períodos de pico permanecem elevados, evidenciando a atuação dos marulhos e a influência remota de sistemas sinóticos. Na área NORTE OCEÂNICA há um evidente aumento do aporte energético na altura significativa e no período de pico, devido a maior proximidade da isolinha de 2,0 metros e o aumento do período de pico dos marulhos podendo atingir 13 segundos.

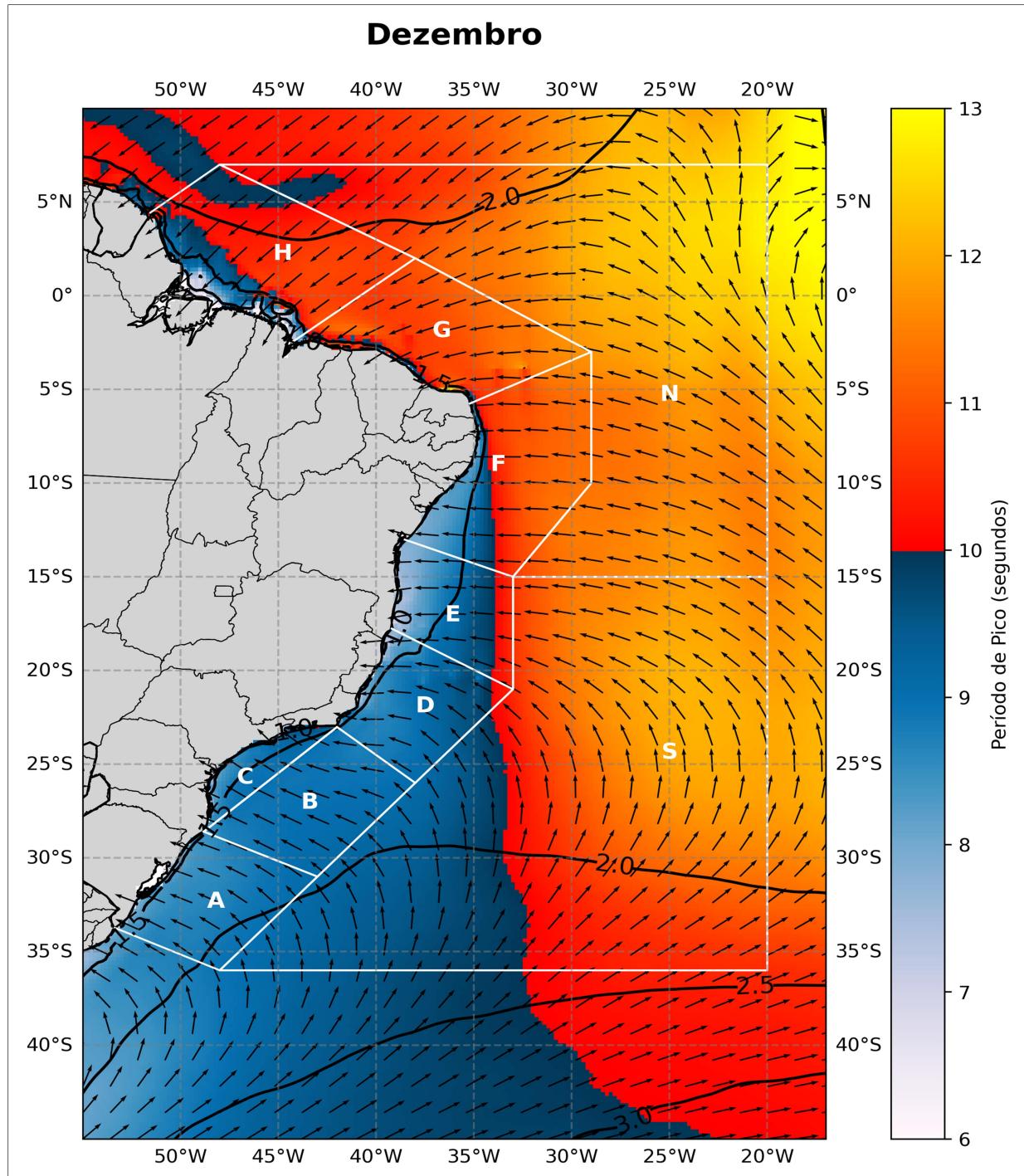
No Nordeste e áreas FOXTROT e ECHO os ventos alísios de SE forçam as ondas de direção SE/E, com alturas entre 1,0 e 2,0 metros e períodos de pico elevados. A interação da porção setentrional da ASAS com a ZCIT gera uma confluência neste período que sustenta o alto aporte energético na região. Percebe-se também a diminuição das vagas e à forte influência das ondas de E.

No Sudeste e nas áreas BRAVO, CHARLIE e DELTA as ondas possuem direção de S/SE e alturas entre 1,0 a 1,5 metro e períodos de pico entre 8 e 9 segundos, refletindo menor influência dos ciclones extratropicais e a aproximação maior da ASAS em relação ao litoral Brasileiro. Na área SUL OCEÂNICA há uma nítida interação da ASAS com baixas transientes, modulando a direção das ondas variando fortemente na direção zonal de SW a E, com um alto período de pico e o forte recuo das isolinhas maiores que 2,0 metros.

Em síntese, o cenário de dezembro reforça o gradiente latitudinal típico: Norte e Nordeste seguem sob influência dos marulhos oriundos das altas migratórias do Atlântico Norte, da posição da ZCIT e da sua interação com a ASAS, ao passo que o Sudeste e Sul observam vagas em decorrência da formação de instabilidades atmosféricas, através de tempestades e centros de baixas pressões locais. Este padrão está em consonância com o comportamento sazonal dos sistemas sinóticos e a influência combinada da ASAS e das instabilidades atmosféricas regionais.

A análise dos 12 mapas climatológicos de ondas (figuras 6 a 17) permitiu identificar a atuação sazonal de sistemas atmosféricos, bem como um regime diferenciado entre as porções norte e sul da METAREA V.

Figura 19 – Climatologia de ondas para o mês de dezembro na região da METAREA V



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

A influência dos sistemas de alta pressão migratórios, que ocorrem após a passagem dos sistemas frontais, favorece a ocorrência de marulhos, ondas com maior  $H_S$  e  $T_P$ . Tal fato pode ser ilustrado tanto no verão austral (figuras 8, 9 e 19), quando se observa a maior presença de vagas e ondas de menor  $H_S$  no litoral das regiões Sul e Sudeste, bem como áreas marítimas adjacentes, mas há o predomínio de marulhos no litoral norte brasileiro, em decorrência dos sistemas transientes das latitudes médias no Atlântico Norte. Por outro lado, no inverno do Hemisfério Sul (figuras 13, 14 e 15), onde há maior ocorrência de ciclones extratropicais e, por conseguinte, dos sistemas de alta pressão pós-frontal, observam-se marulhos e os maiores valores de  $H_S$  nos setores mais ao sul da METAREA V.

A ASAS contribui para as ondas de SW/SE que são observadas na área SUL OCEÂNICA, refletindo o giro anticiclônico. Oriundos da ASAS, os ventos alísios geram ondas de SE/E, presentes na costa leste ao longo de todo ano. A migração meridional sazonal da ZCIT impacta os regimes de ondas também nas regiões Norte e Nordeste e áreas marítimas no entorno. Nestas regiões, em setembro (Figura 16), as ondas são de SE/E por conta do predomínio dos ventos alísios de SE, que tem o efeito de posicionar a ZCIT mais ao norte. Por outro lado, em março (Figura 8), as ondas são de E, quando a ZCIT está mais ao sul, movimentadas pela maior intensificação dos ventos alísios de NE do Hemisfério Norte.

Percebe-se uma forte influência da ASAS no comportamento espectral das ondas em toda METAREA V. Enquanto no inverno sua posição está mais ao norte e ela se encontra mais larga e forte, Sun *et al.* (2017), ela exerce grande impacto com a interação com as passagens de frentes ao sul do Brasil e mantém o aporte energético com relação ao período de pico das ondas, mantendo a formação de marulhos nas áreas oceânicas. Assim a ASAS exerce um papel fundamental para a energia das ondas no Atlântico Sul. Nota-se que devido a sua presença o período de pico das ondas permanece o mesmo, sua intensificação ocorre durante o verão, enquanto a altura das ondas diminui. Já no inverno há um grande aumento do aporte energético das ondas, com período de pico maiores que 10 segundos chegando no litoral Sul e Sudeste.

Os estudos como o de Pianca *et al.* (2010) confirmam esse gradiente meridional e sazonal, mostrando que os setores mais ao sul são controlados por frentes frias e os mais ao norte, pela oscilação da ZCIT. A variabilidade sazonal fortalece esse gradiente: o inverno austral (junho–agosto) representa o período de maior energia ondulatória no Sul e Sudeste, com marulhos de  $H_S$ ,  $Dir$  e  $T_P$  elevados de SW/S. Já no Norte e Nordeste, o verão (dezembro–fevereiro) é a estação

com ondas de maior energia devido as tempestades convectivas locais associadas a ZCIT e ao aporte de marulhos do Hemisfério Norte, embora em menor intensidade comparados ao Sul (Pianca *et al.*, 2010). Essa distinção cria um ciclo anual bem definido: energias máximas no Sul no inverno, e pico de vagas no Nordeste no verão.

Além da ZCIT e frentes frias que passam ao norte, no hemisfério norte, e ao sul outro sistema que exerce papel fundamental na modulação das ondas na METAREA V é a ASAS, mantendo sempre o aporte energético de toda área litorânea e oceânica. Ao interagir tanto com sistemas ao norte e ao sul do país a ASAS mantém as características das porções oceânicas com marulhos predominantes, assim como uma direção predominante para o litoral brasileiro de leste. Ainda que sua influência seja constante, apenas sua interação com outros sistemas é incapaz de gerar energia para ondas maiores que 2,0 metros, essas acontecem no período do inverno, quando há uma interação maior entre as frentes frias que se direcionam para leste e a ASAS. No verão há maior intervalo e menor alcance das frentes frias nas regiões centrais do país, quando a ASAS aumenta o período de pico das ondas ao passo que não há aumento da altura significativa das ondas.

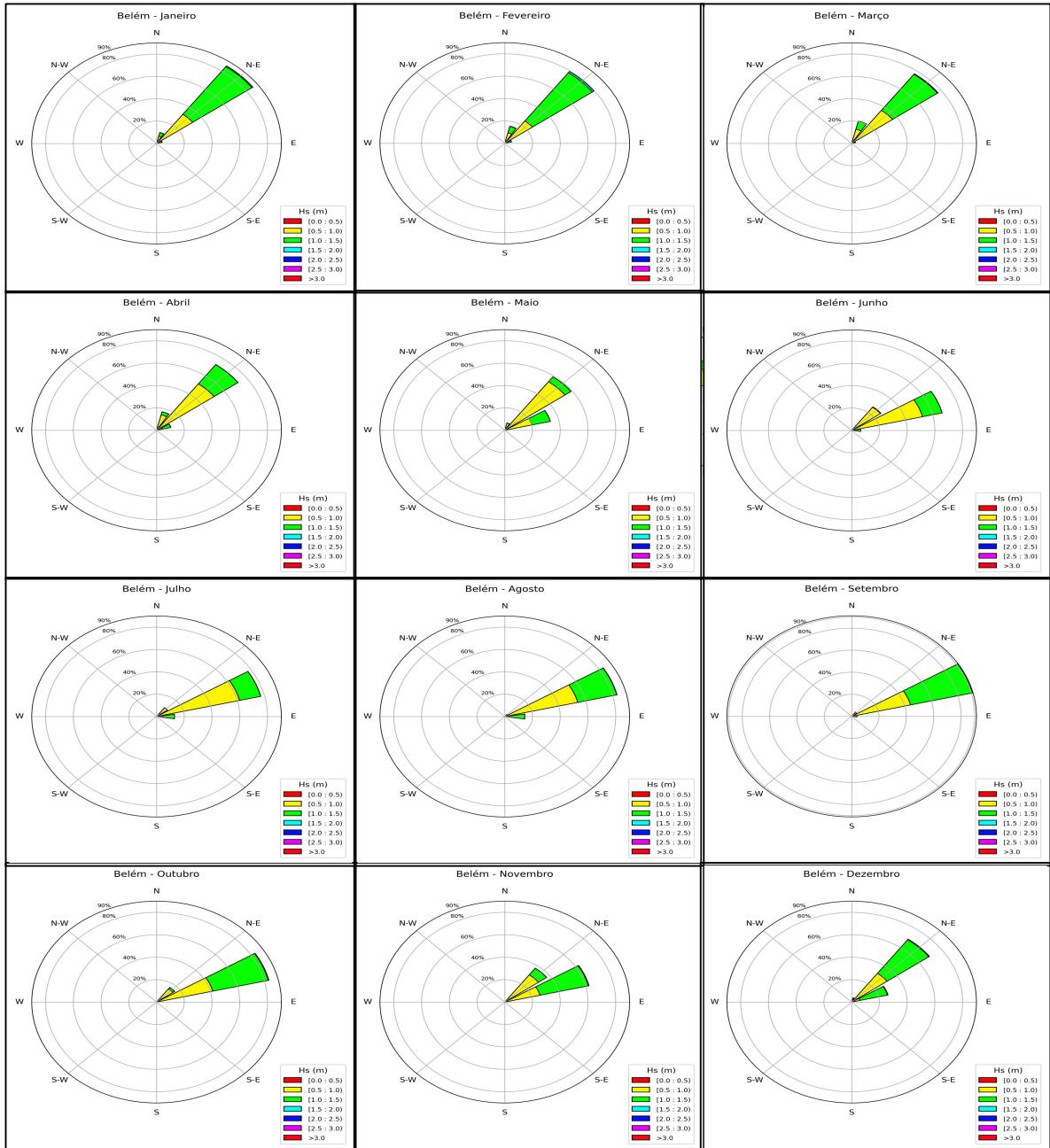
### **5.3 Rosas de ondas**

A análise das rosas de ondas mensais (figuras 20 a 31) permite compreender como as condições de agitação marítima variam espacial e temporalmente, fornecendo subsídios tanto para a segurança da navegação quanto para o planejamento operacional em atividades costeiras e *offshore*. Além disso, a interpretação das rosas de ondas é fundamental para a tomada de decisão, já que permite identificar as probabilidades associadas a diferentes condições de mar, aspectos essenciais para a redução de riscos nas operações marítimas.

Em Belém/PA, a circulação atmosférica é fortemente modulada pelos ventos alísios associados à ZCIT, conforme evidenciado nos estudos prévios Pimenta *et al.* (2023). A climatologia das ondas (Figura 20) mostra que, ao longo do ano, há o predomínio da direção ENE. É possível também identificar que ocorrem ondas mais altas, chegando a 1,5 metro, no período de setembro a março, o que corresponde aos meses do ano que estão sob maior influência dos marulhos do Hemisfério Norte. Já nos meses de abril a agosto, as ondas estão relativamente

menores, chegando a 1,0 metro, período esse no qual a ZCIT encontra-se também mais afastada da região e a ASAS mantém a direção das ondas na região.

Figura 20 – Rosa de ondas mensais em Belém-PA.

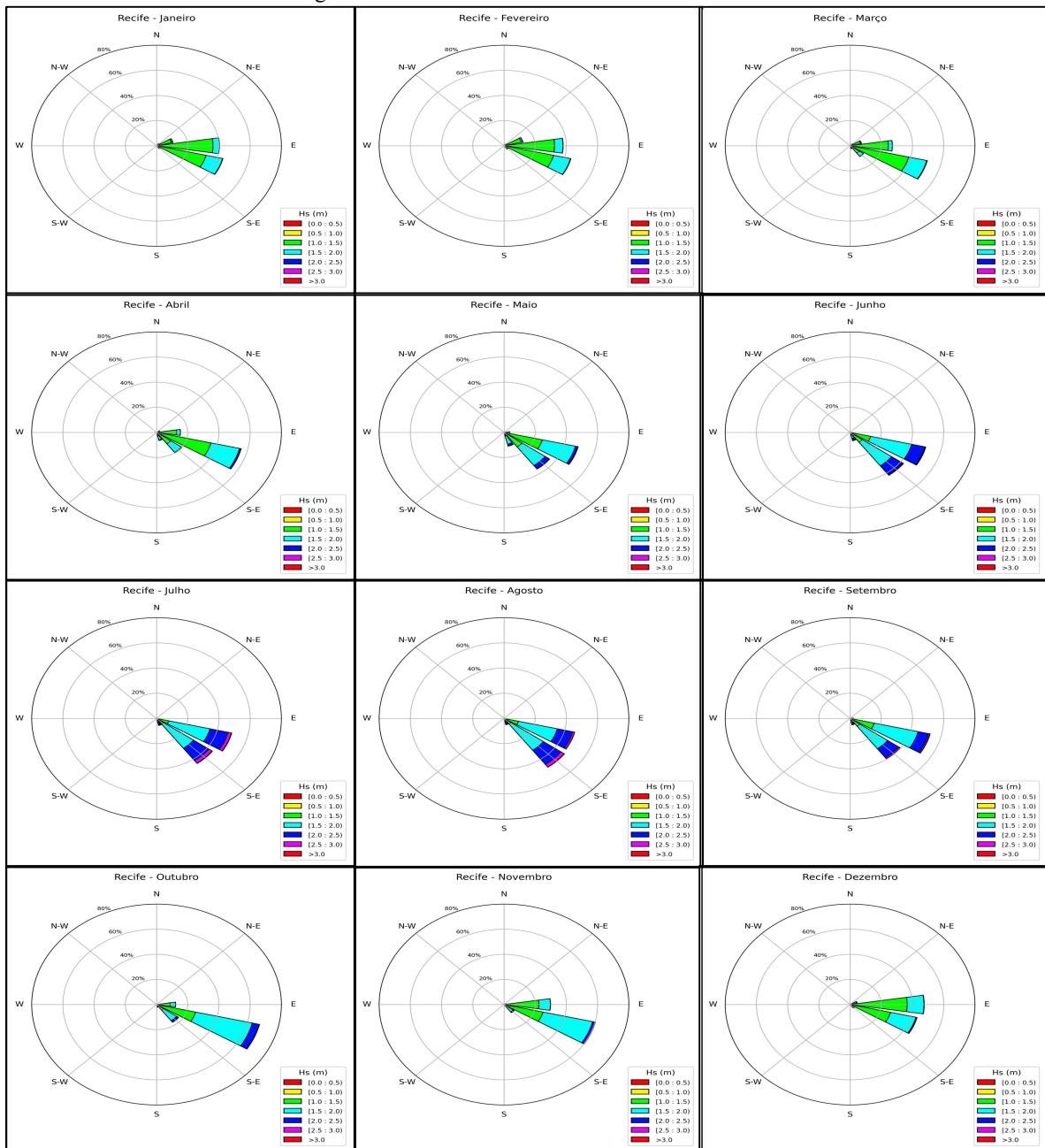


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTYS*.

Em Recife-PE (Figura 21), as rosas de ondas evidenciam predomínio de ondas de SE/E ao longo de todo o ano. Durante o verão (dezembro a março), a frequência de ondas de E é maior,

com alturas significativas predominando entre 1,5 e 2,0 metros. Contudo, é no inverno e no início da primavera (maio a setembro), quando há maior intensificação da ASAS e, por conseguinte, dos ventos alísios de SE, que se notam as ondas mais elevadas nesta localidade, atingindo na média até 2,5 metros de altura.

Figura 21 – Rosa de ondas mensais em Recife-PE.

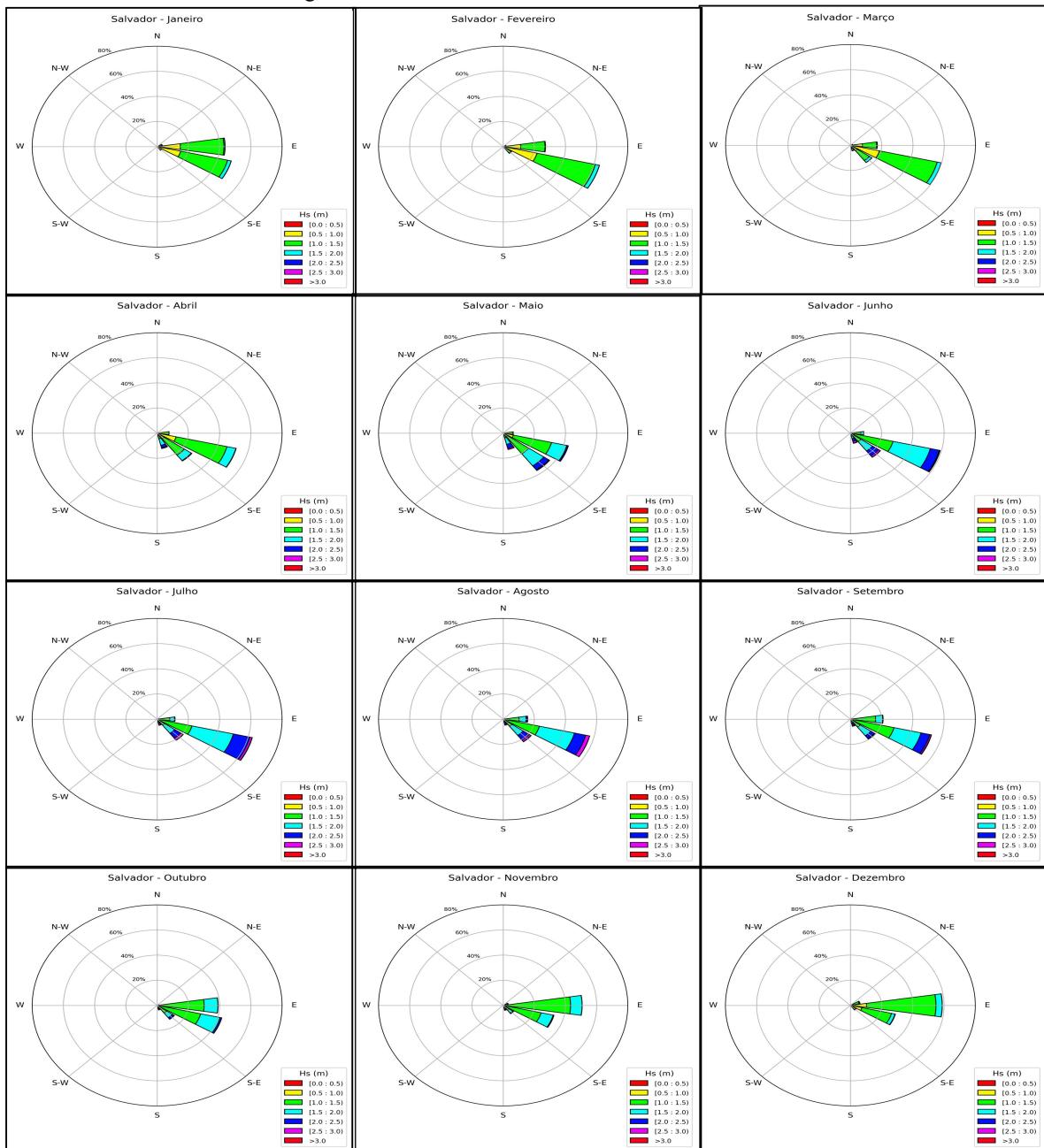


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTYS*.

Em Salvador-BA (Figura 22) e em Abrolhos-BA (Figura 23), uma vez que ambas as localidades se encontram sob influência do mesmo regime sinótico. Portanto, nota-se que ao longo do ano as ondas são de SE/E, com as maiores alturas sendo mais frequentes em agosto. É no final do outono e o início da primavera que as ondas estão mais elevadas devido a maior intensificação da ASAS e dos ventos alísios de SE que geram as ondas de SE com valores de até 2,5 metros de altura. Ao passo que entre outubro e fevereiro, as ondas apresentam-se de E, com menores alturas na média, chegando até 2,0 metros.

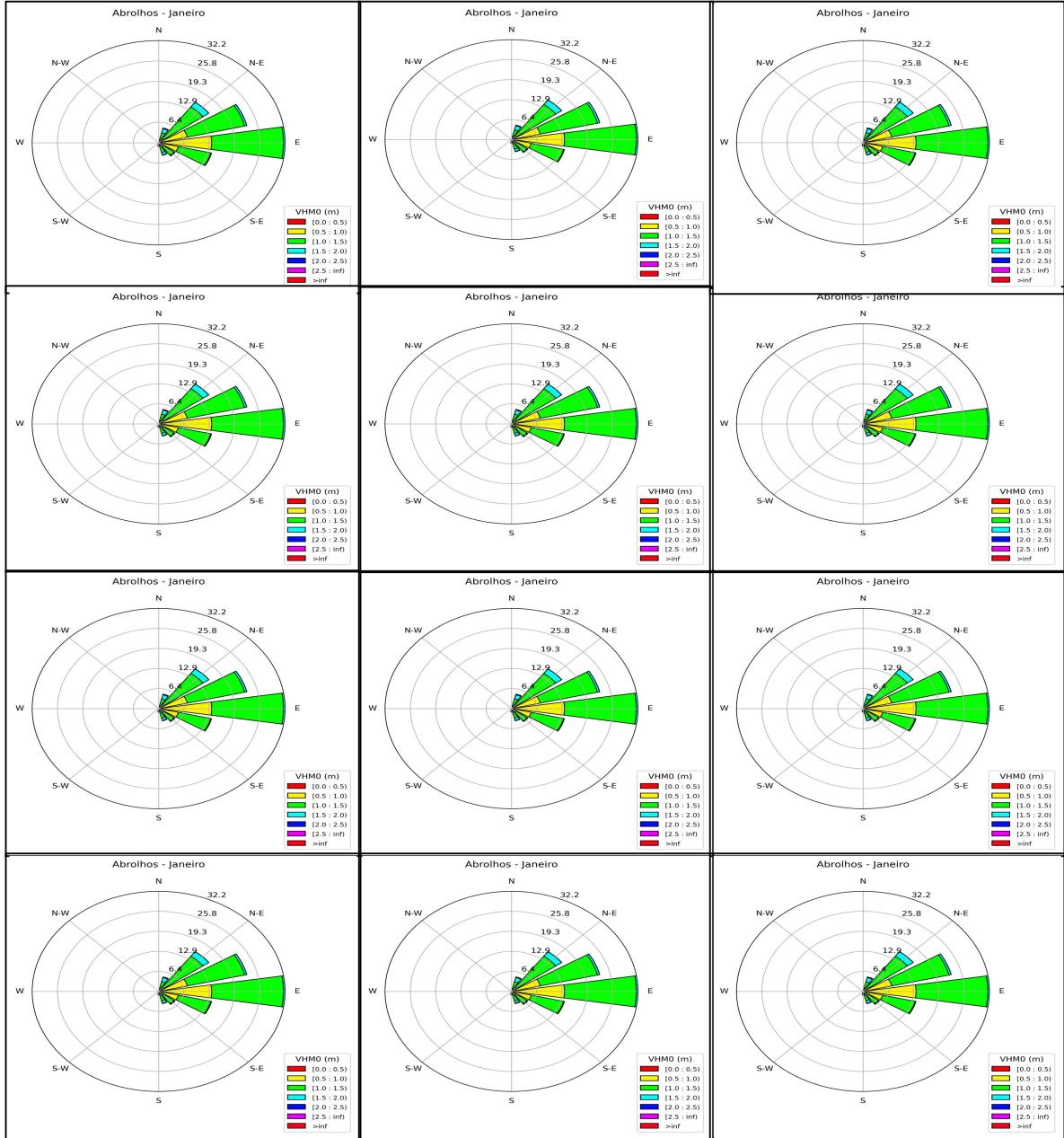
Mais ao sul, no arquipélago de Abrolhos-BA (Figura 23), as rosas de ondas mostram maior variabilidade direcional ao longo do ano, ou seja, ondas de mais direções do que as localidades já mencionadas. De modo geral, há o predomínio de ondas de quadrante E. No período de abril a agosto, as ondas estão mais elevadas e são provenientes da direção SE/E, chegando até 2,5 metros. Tal fato se justifica também pela maior intensidade da ASAS já comentado anteriormente. Entretanto, parte dessa contribuição pode também ser atribuída a chegada de frentes frias mais ao norte e consequente avanço dos marulhos pós-frontais. Já de outubro a janeiro, as ondas passam a ser de E/NE e com menores alturas, chegando até 2,0 metros. A direção E/NE se justifica pelo posicionamento mais ao sul do flanco setentrional da ASAS.

Figura 22 – Rosa de ondas mensais em Salvador-BA



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTYS.

Figura 23 – Rosa de ondas mensais em Abrolhos-BA.

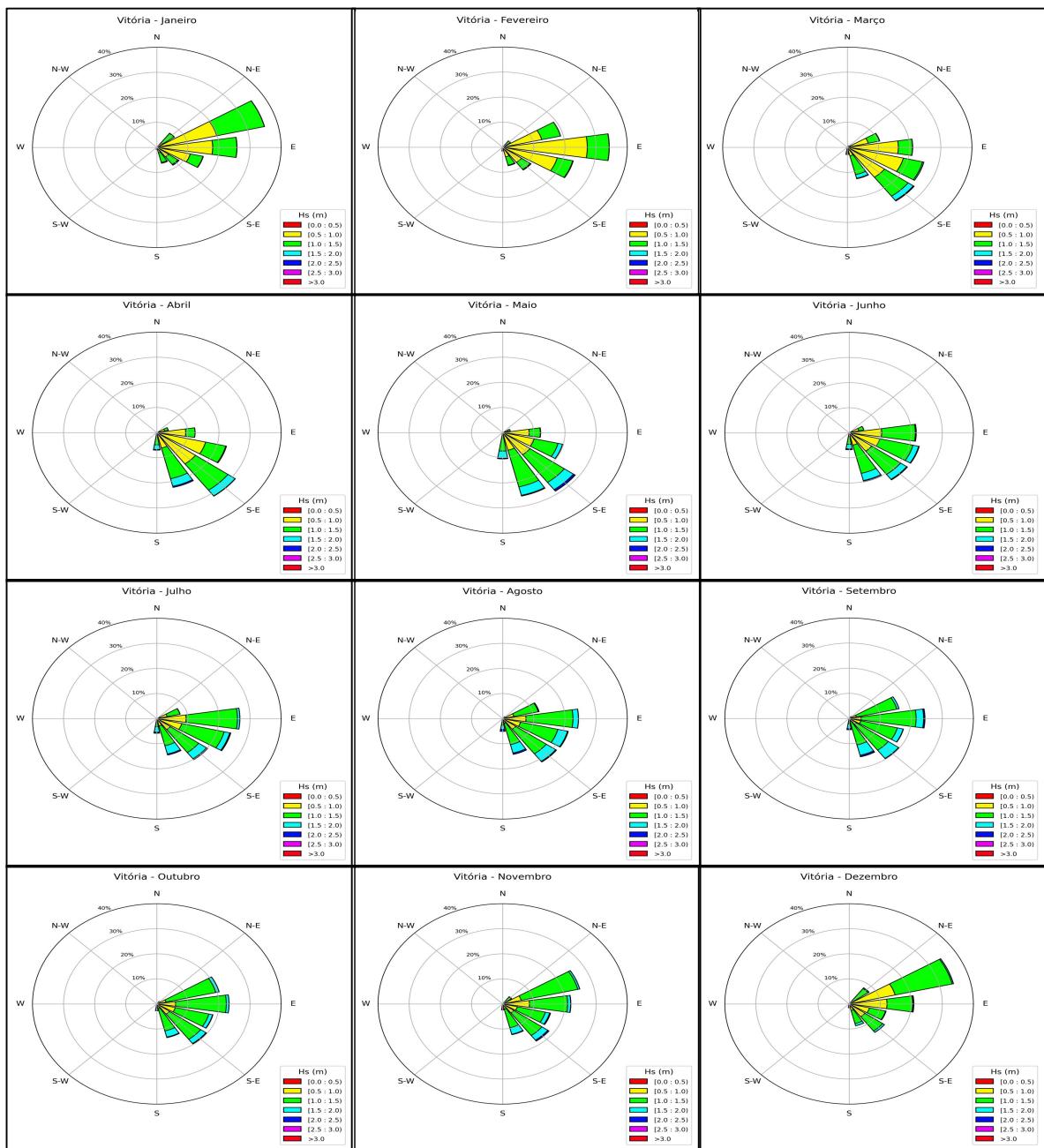


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTS*.

Em Vitória-ES (Figura 24) há uma forte predominância de ondas de NE durante o verão e primavera pela presença da ASAS próximo de  $30^{\circ}$  S, há também menor incidência de SE devido a passagens menos frequente de frentes ao sul neste período com ondas de 1,0 a 1,5 metro predominantes. No outono e inverno, ondas de SE predominam, devido a alta frequência de

frentes frias ao sul, se sobrepondo a ASAS, que está mais ao norte neste período, mantém-se a altura mais frequente do verão com maior incidência de ondas com 1,5 a 2,0 metros.

Figura 24 – Rosa de ondas mensais em Vitória-ES.

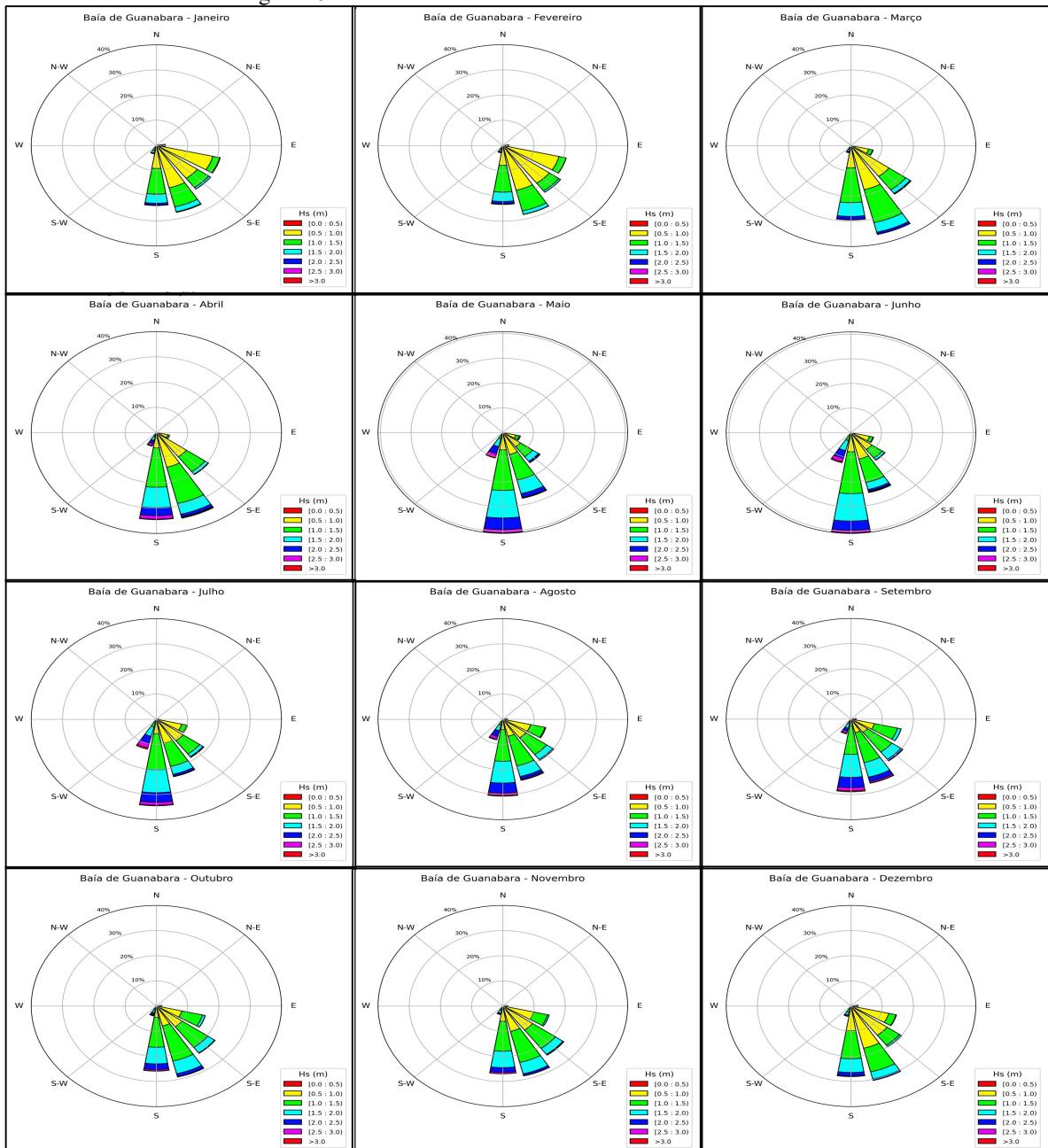


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTYS.

Na Baía de Guanabara-RJ (Figura 25), durante primavera e verão há predominância de ondas de S e SE devido ao flanco sul da ASAS e a passagem de frentes ao sul, que interagem.

Começa ser visto no litoral brasileiro a presença de alturas significativa de 2,0 a 2,5 metros. No outono e no inverno a alta incidência de frentes frias aumenta a altura das ondas chegando a 2,5 e 3,0 metros com direção das ondas de quadrante S.

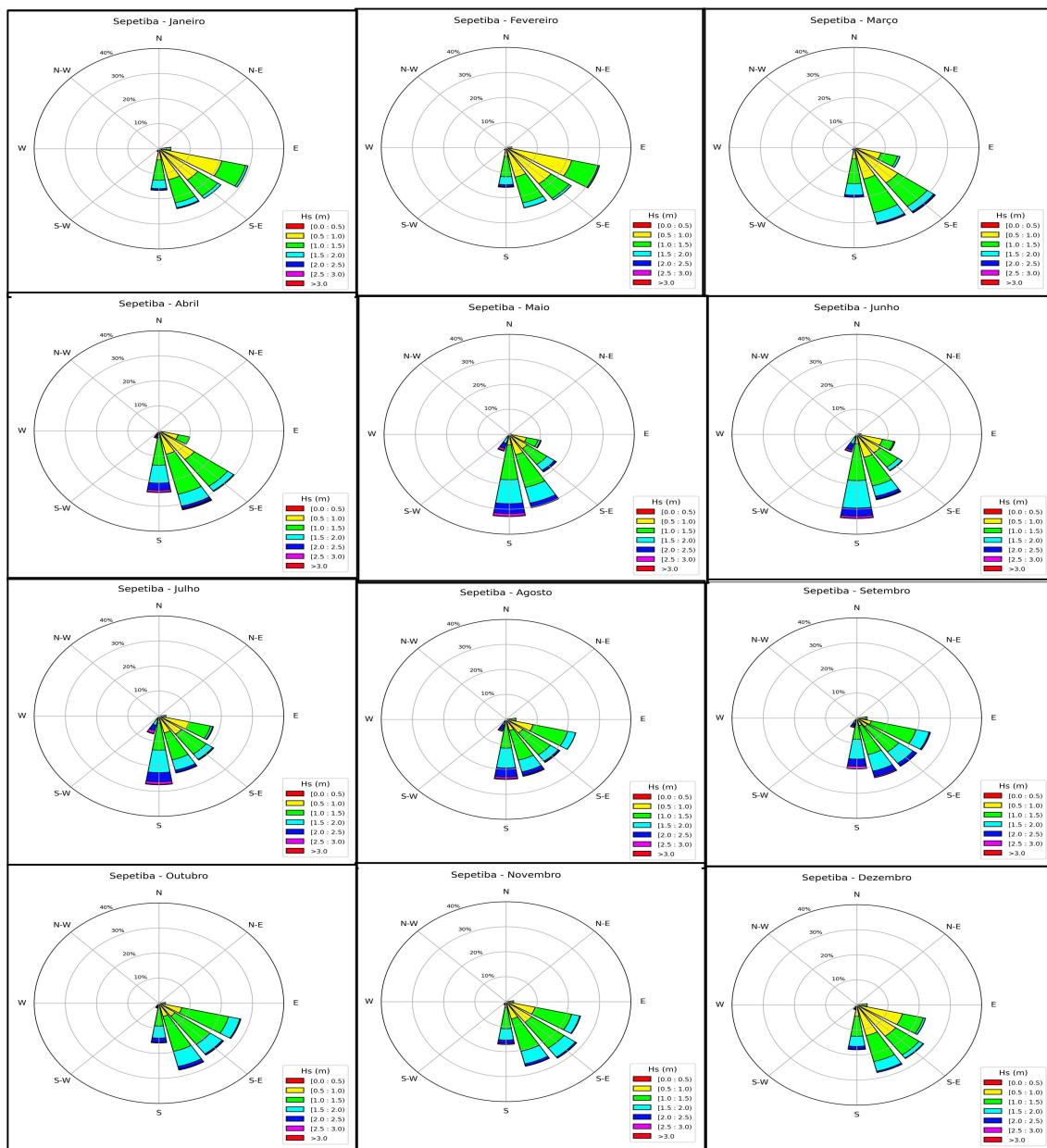
Figura 25 – Rosa de ondas mensais em Baía de Guanabara-RJ.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTYS*.

Em Sepetiba-RJ (Figura 26), a proximidade da Ilha Grande – RJ claramente diminui a incidência de ondas de S, forçando as ondas de SE durante a primavera e o verão. A maior energia das ondas durante o outono e a primavera é capaz de predominar com a direção S e SSE, ondas de 2,0 a 2,5 metros marcam o período de alta frequência de frentes frias, agora ondas de 1,0 a 1,5 metro são menos dominantes

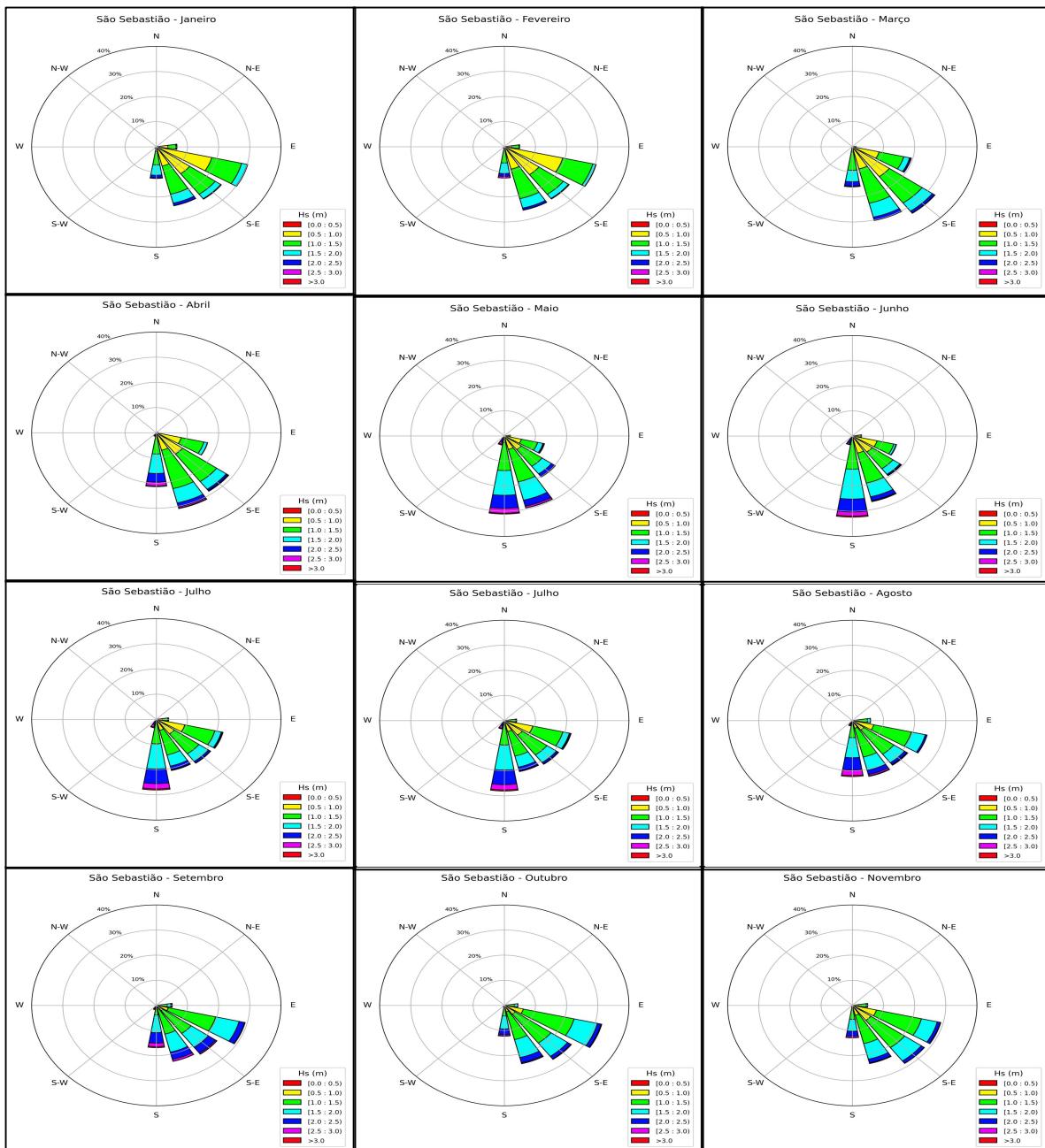
Figura 26 – Rosa de ondas mensais em Sepetiba-RJ.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTS*.

Mais ao sul, São Sebastião-SP (Figura 27), marca a maior disponibilidade de energia proveniente das passagens de frentes durante o outono e a primavera com ondas maiores que 1,5 metro dominantes, e a direção S mais evidente. Durante a primavera e verão, ondas de 1,0 a 1,5 metro são mais evidentes, assim como direção de SE mais proeminente, agora em acordo com a passagem de frentes deslocados a leste e menos frequentes.

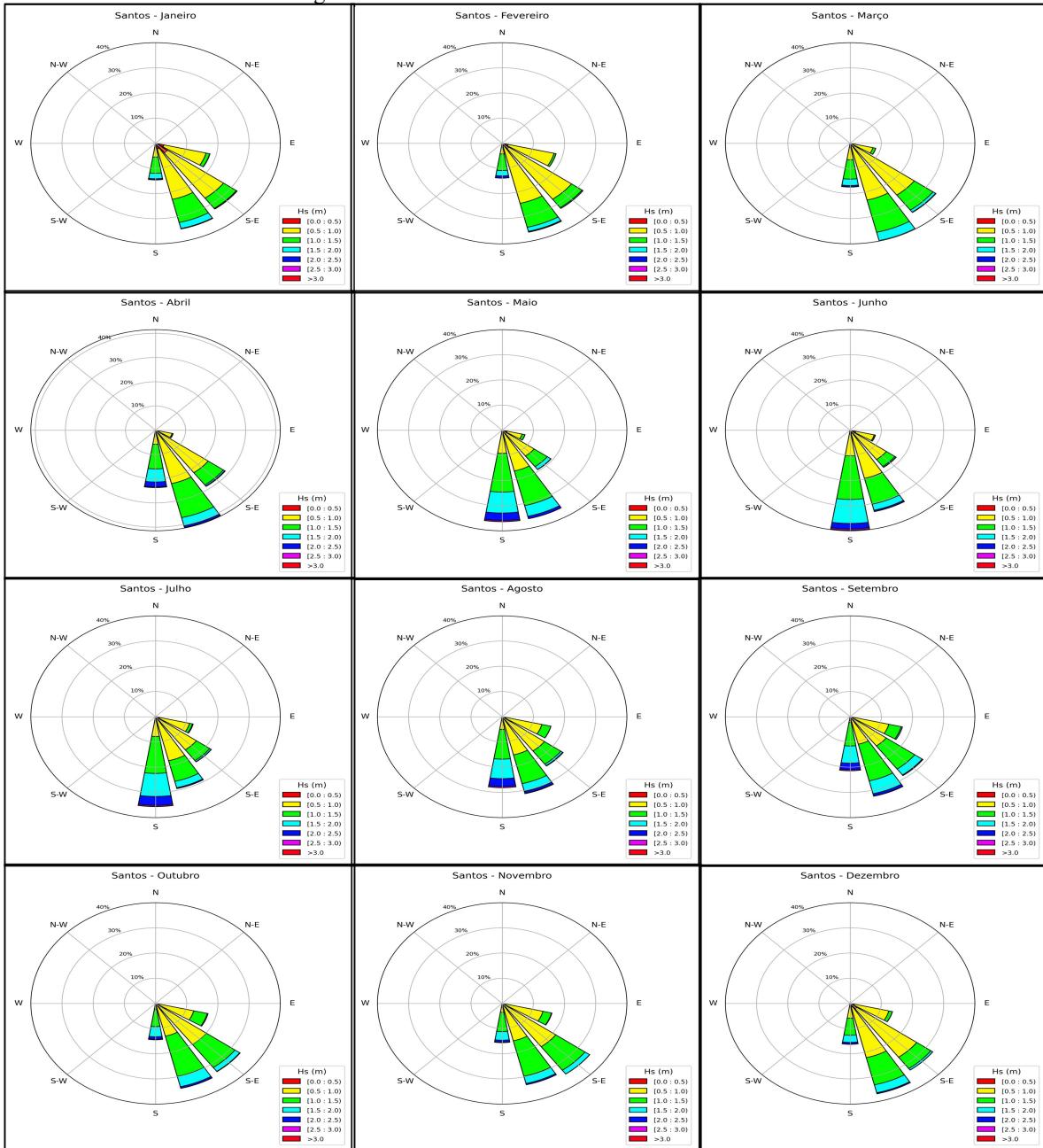
Figura 27 – Rosa de ondas mensais em São Sebastião-SP



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTYS*.

Na primavera e no verão, ondas de SSE e SE predominam com alturas mais baixas (0,5 a 1,0 metro) em Santos-SP (Figura 28), devido aos sistemas menos frequentes e deslocados a leste que interagem com a ASAS. No outono e no inverno há uma mudança da direção para S e ondas de 1,0 a 1,5 metros se mostram mais frequentes, assim como ondas de 2,0 a 2,5 metros aparecem.

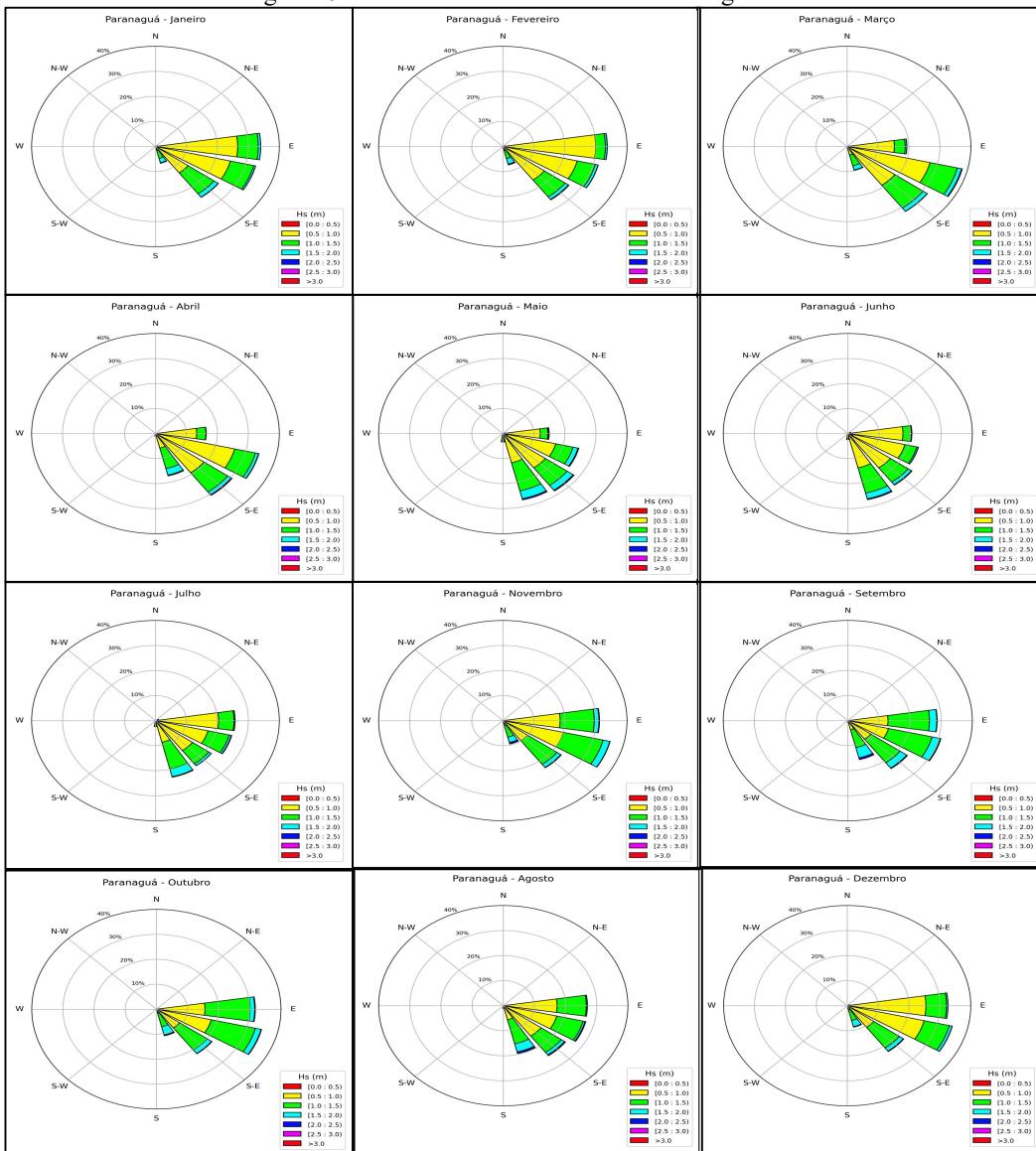
Figura 28 – Rosa de ondas mensais em Santos-SP.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTS.

Em Paranaguá (Figura 29), ondas de E predominam, o ponto de análise é mais próximo da costa, assim a frente de ondas se alinham com a costa, a altura de 1,0 a 1,5 metro se fazem mais frequentes na primavera e no verão. Para o período do outono e inverno, há uma dispersão da direção com a maior frequência da passagem das frentes com direção ESE até SSE no final do inverno, com ondas de 1,5 a 2,0 metros sendo mais frequentes.

Figura 29 – Rosa de ondas mensais em Paranaguá-PR.

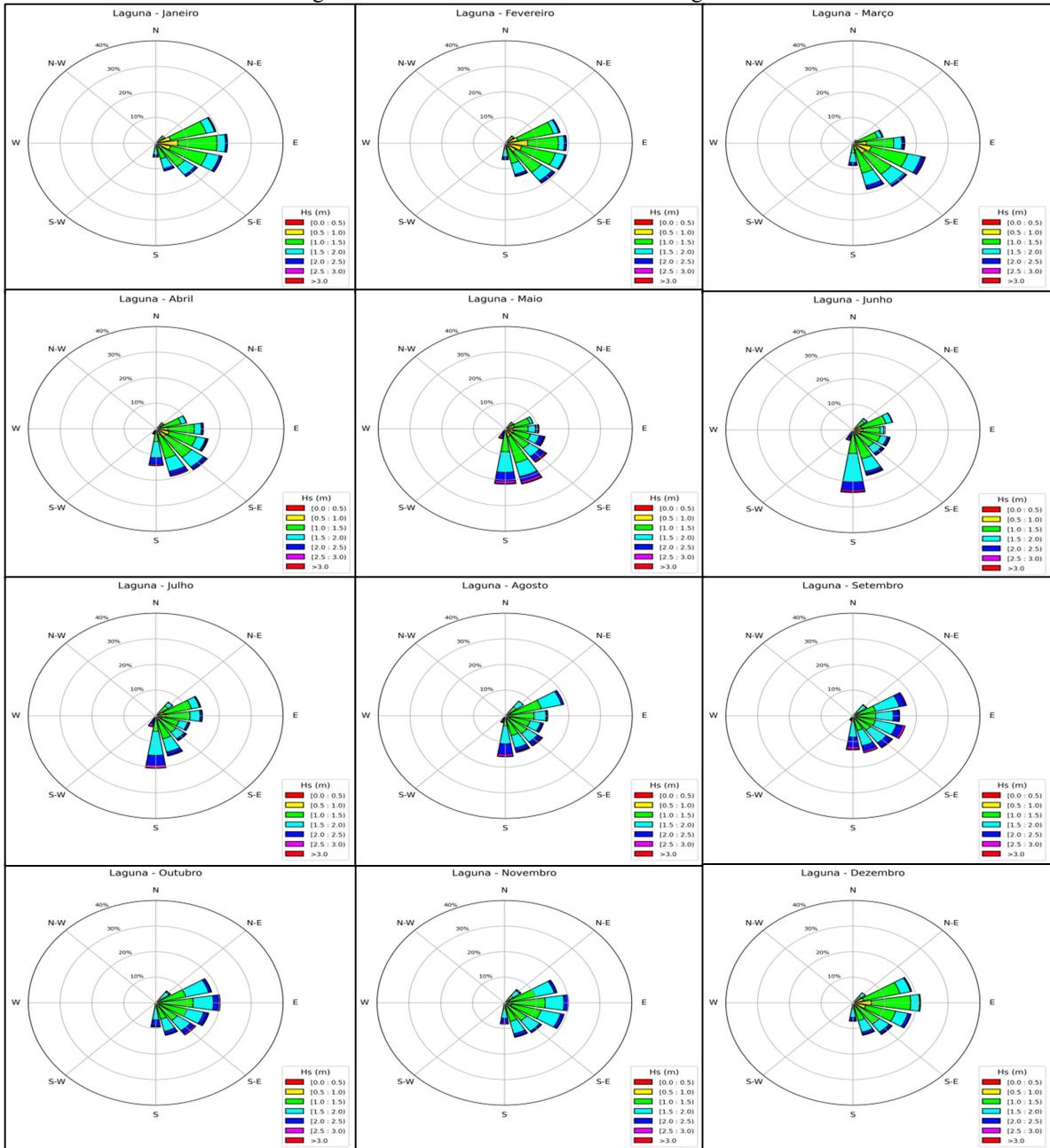


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do *WAVERTS*.

Em Laguna-RS (Figura 30), ondas de E e SE/E são mais frequentes durante a primavera e o verão, o flanco sul da ASAS favorece esse movimento nesta época, assim como altura

significativa de 0,5 a 1,0 metro. Para o período do outono e inverno as alturas significativas entre 1,0 e 1,5 metro são mais proeminentes, agora a passagem mais próxima de frentes faz com que o flanco norte dos centros de baixa transientes gere ondas de SSE e SE.

Figura 30 – Rosas de ondas mensais em Laguna-RS

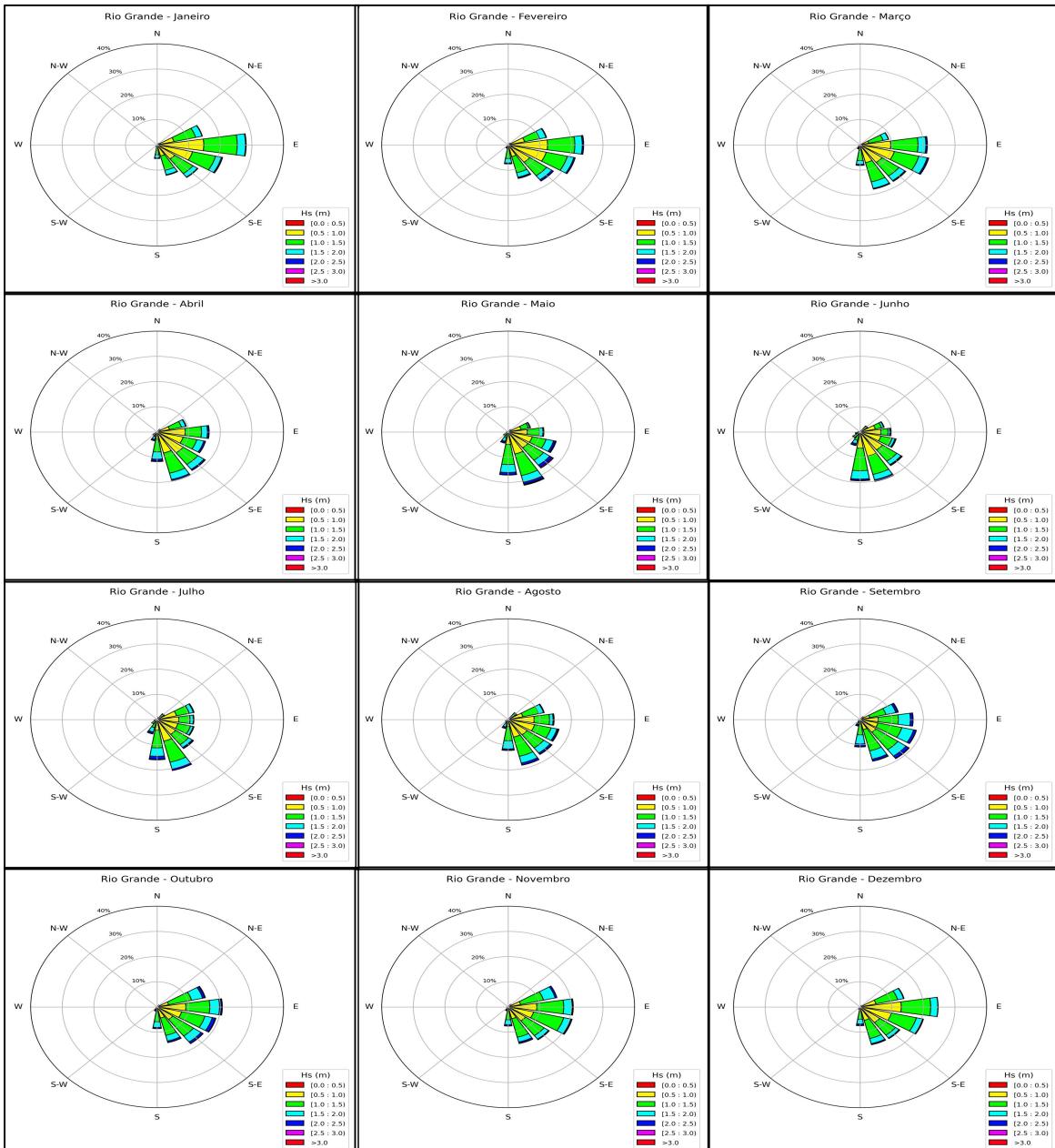


Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTYS.

Em Rio Grande-RS (Figura 31), há uma distribuição da direção das ondas de S a E durante todo o ano, enquanto na primavera e no verão a direção E é predominante e as alturas são

bem distribuídas de 1,0 a 2,0 metros, com menor frequência de ondas de 1,5 a 2,0 metros. Desse modo, a região com forte atuação de frentes no outono e inverno apresenta predominância de ondas de SSE e as alturas de 2,0 a 2,5 metros são mais frequentes.

Figura 31 – Rosa de ondas mensais em Rio Grande-RS.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTS.

Nos pontos analisados (Figuras 18 a 29) há uma mudança nas características da direção e altura significativa das ondas, com ondas mais altas aparecendo no outono e no inverno em todos

os locais. A direção das ondas difere com relação a ambos fatores, sistemas que os geram, ventos alísios na ZCIT geradas pela ASAS e passagem de frentes no Hemisfério Norte, assim como frentes ao sul do Brasil. Além da interação das ondas com o fundo, ao diminuir a profundidade local as frentes de onda se alinham com a plataforma continental, consequentemente com a costa brasileira. Isto torna a análise dos locais mais individualizáveis, com fatores além dos sistemas sinóticos como impactantes na direção delas.

Os alísios no norte gerados pela ASAS e pela Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) formam ondas de N e NE no norte brasileiro durante o ano inteiro, por isso a forte predominância do quadrante de N a E em Belém-PA (Figura 20). Descendo a costa brasileira mais ao sul há uma resultante das interações da ASAS com os ciclones que atingem o litoral brasileiro, alternando a direção das ondas de E a S, E com a ASAS mais dominante e S com as passagens de frentes mais frequentes.

A mudança do posicionamento da ASAS, sendo mais a oeste e próximo do equador no verão e primavera e mais próximo de 30° S durante o outono e primavera como visto por Sun *et al.*, 2017, teve papel fundamental na análise, pois é evidente que ele muda tanto o setor norte quanto o sul do Brasil. No verão e na primavera força ondas de NE mais predominantes, ao passo que a direção E é mais evidente no centro e sul do país. Enquanto no outono e inverno a maior passagem de frentes aliada com a ASAS forma uma pista suficiente para ondas mais altas e de SE e S.

#### **5.4 Análise Temporal de H<sub>s</sub>**

De modo a evidenciar o comportamento sazonal de localidades em latitudes diferentes, foram geradas séries temporais da altura significativa de onda em Belém-PA, Recife-PE, Baía de Guanabara-RJ e Rio Grande-RS, presentes na Figura 32(a) e (b) e Figura 33(a) e (b), respectivamente. Os dados correspondem ao período de 1980 a 2022, com as linhas azuis representando os valores diários e as linhas vermelhas a média móvel de 30 dias. As diferenças observadas refletem a posição geográfica e os regimes climáticos distintos de cada região.

A cidade de Belém-PA fica localizada na região Norte, sendo influenciada predominantemente pela ZCIT e pelos ventos alísios de nordeste. Nota-se pela Figura 32(a), que as ondas atingem maiores alturas durante o chamado “inverno amazônico”, estação chuvosa que

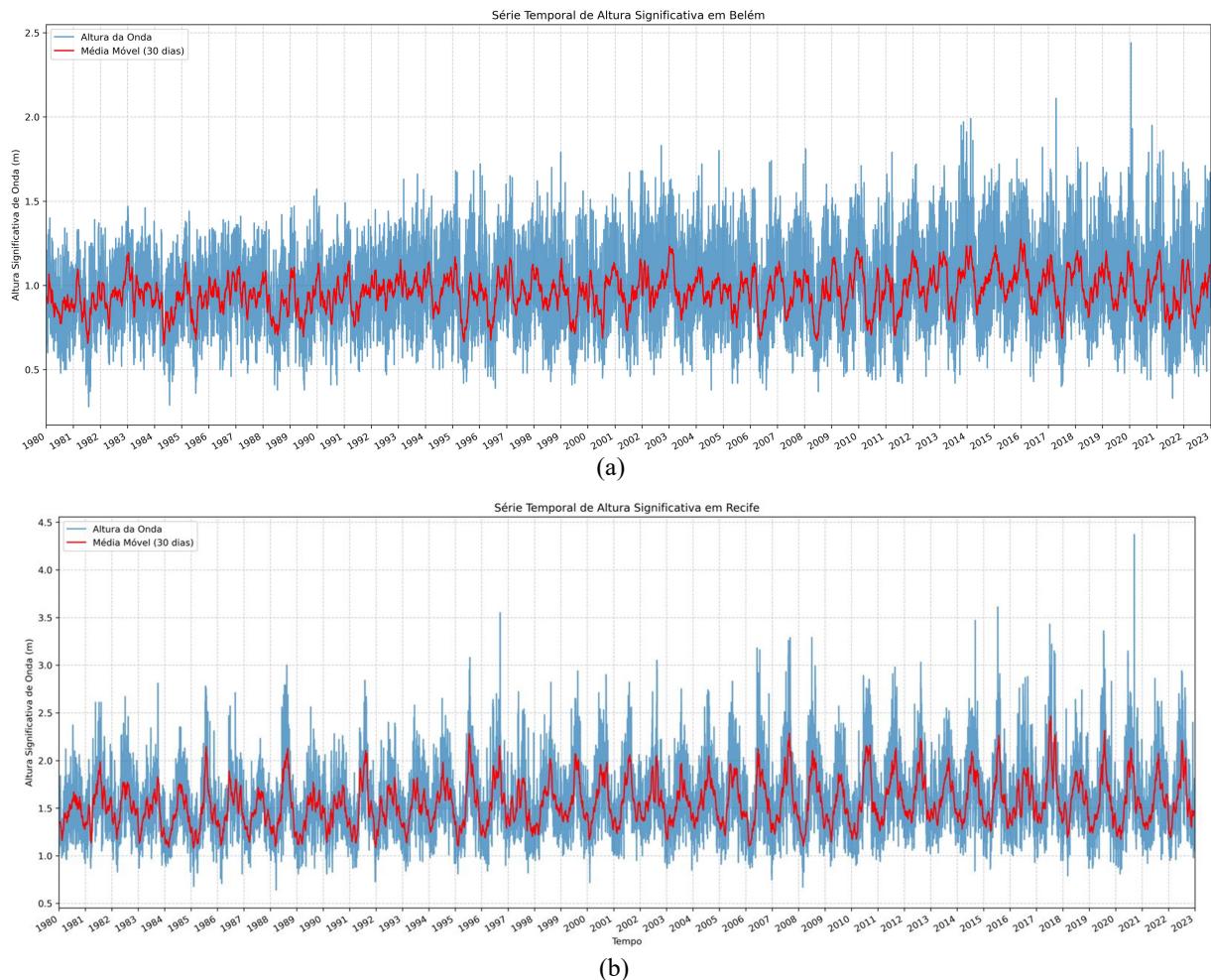
vai de dezembro a maio (Moura *et al.*, 2012). Nesse período, os ventos ficam mais fortes devido à aproximação da ZCIT sobre a região. Percebe-se que o aumento da altura das ondas é registrado entre o final do ano e meados do ano subsequente, que também corresponde ao período de inverno do Hemisfério Norte, onde há maior incidência de ondas oriundas da passagem de sistemas frontais. Além disso, é possível identificar menor variação das alturas até o início da década de 90 do século XX, seguido de maior variação no restante da série, com valores entre 0,4 a 2,4 metros, aproximadamente, entre os anos de 2020 e 2021.

Para representar o litoral leste do Brasil, optou-se por avaliar a localidade de Recife-PE (Figura 32.b). É possível notar que os maiores valores de  $H_s$  foram observados já no período do inverno boreal, oriundos dos ventos alísios mais fortes por consequência da intensificação da ASAS. As alturas apresentam maior variabilidade em comparação a Belém-PA (Figura 32.a), com diversos anos apresentando valores acima de 2,5 metros. O máximo obtido foi de 4,4 metros aproximadamente, entre o final de 2020 e o início de 2021.

Por outro lado, a Baía de Guanabara-RJ, localizada na região Sudeste do Brasil e encontra-se sob forte influência de sistemas frontais. De acordo com a Figura 33.a, os maiores valores de altura significativa de ondas ocorrem durante o período de junho a setembro, correspondendo ao inverno do Hemisfério Sul, quando ventos de direção S/SE estão mais intensos e elevam as ondas na costa, caracterizando as ressacas (Reboita *et al.*, 2009). Tal fator explica as maiores alturas nesta localidade no inverno austral, o que já era esperado conforme maior incidência de sistemas de marulhos que acompanham os sistemas de alta pressão pós-frontais. Fica evidente maior variabilidade das ondas nesta localidade, ao longo dos anos, com amplitudes de até 4,0 metros, como é o caso dos anos 1997, 2000 e 2002.

Por último, o comportamento das ondas no extremo sul do Brasil pode ser visto na Figura 33.b, através da série temporal de Rio Grande-RS. A localidade não apresentou um ciclo sazonal bem definido ao longo do ano. Os valores da média móvel de  $H_s$  estão em torno de 1,0 a 1,5 metro, enquanto a curva azul reflete grande amplitude, de 0,5 a 2,5 metros, possuindo picos dos valores individuais acima de 3,0 metros. Mesmo a maior frequência de ciclones extratropicais durante o inverno não foi suficiente para gerar um padrão sazonal na região. Podendo ser explicado pela presença dos sistemas frontais

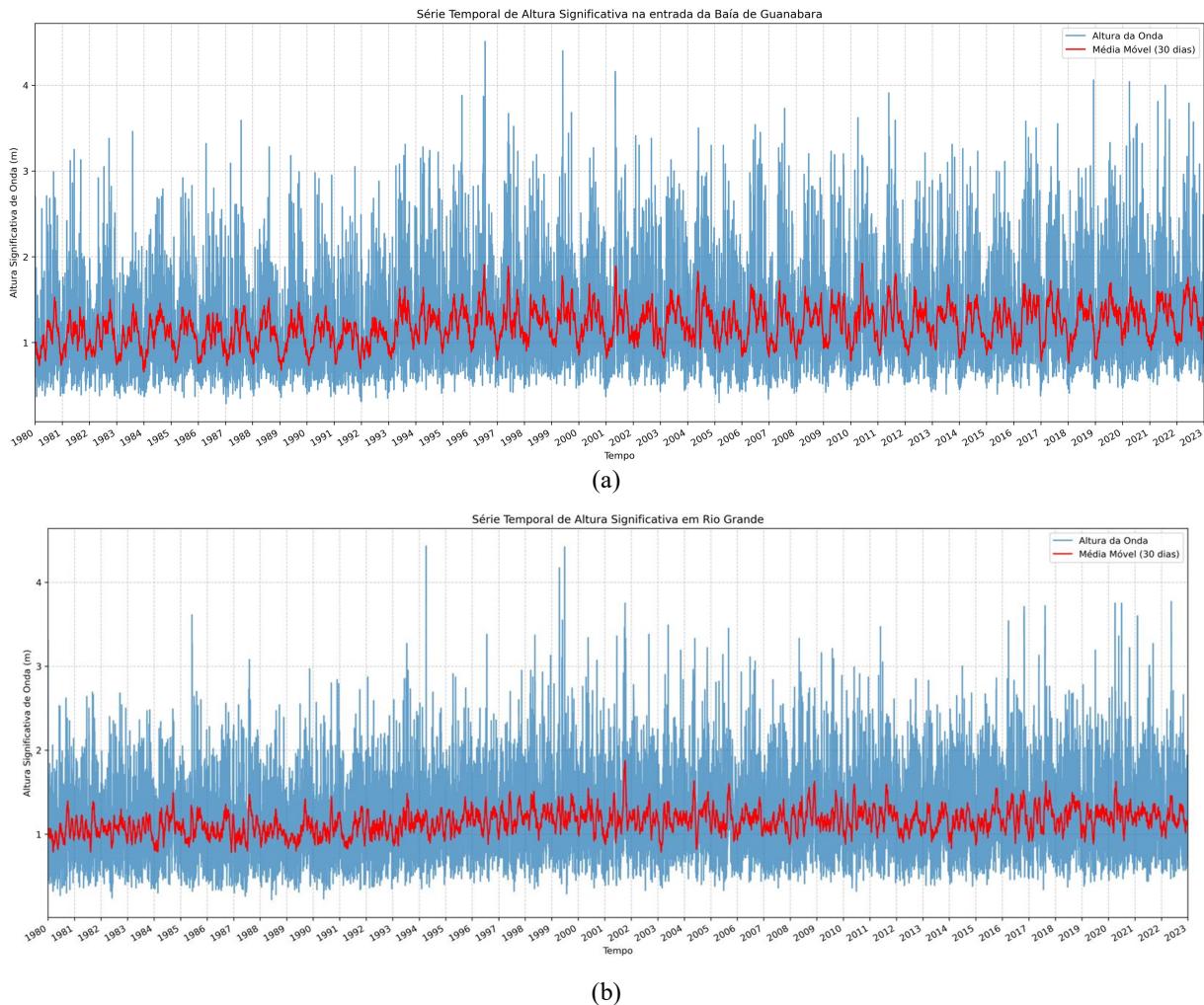
Figura 32 – Série temporal de  $H_s$  (metros) em (a) Belém-PA e (b) Recife-PE.



Legenda: A linha azul (vermelha) representa os dados a cada 3 horas (médias móveis mensais de 30 dias).

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERTS.

Figura 33 – Série temporal de  $H_s$  de onda (metros) na (a) Baía de Guanabara-RJ e em (b) Rio Grande-RS.



Legenda: A linha azul (vermelha) representa os dados a cada 3 horas (médias móveis mensais de 30 dias).

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WAVERYS.

Por fim, comparando-se ambas as localidades, as maiores variações de ondas, durante os últimos anos, foram observadas mais ao sul, região esta que é diretamente influenciada por sistemas transientes de latitudes médias, principalmente durante o inverno.

## 6. Conclusão

A presente climatologia mensal de ondas para a METAREA V, construída a partir do conjunto *WAVERYS* (1980–2022), demonstrou consistência metodológica e capacidade de representação espacial refinada das variáveis de ondas:  $H_s$ , Dir e  $T_p$ . A utilização de médias mensais em grade de alta resolução, aliada à geração de cartas mensais, rosas direcionais e séries

temporais com média móvel, permitiu caracterizar com clareza tanto o padrão de longo prazo quanto as oscilações sazonais relevantes para o domínio costeiro adjacente ao litoral brasileiro. Em termos metodológicos, o produto resultante eleva o detalhamento costeiro disponível nas cartas climáticas, fornecendo uma base homogênea e reproduzível para análises comparativas e aplicações operacionais.

Os resultados revelaram um gradiente latitudinal pronunciado na METAREA V, com regimes claramente distintos entre os setores Norte–Nordeste e Sudeste–Sul. No setor Norte–Nordeste, a influência da ZCIT e da posição das ASAS se traduziu em campos de energia incidindo predominantemente de E/SE, com menores valores médios de  $H_S$  e  $T_P$  relativamente ao extremo sul; já no Sudeste–Sul observa-se uma dominância de eventos associados a frentes extratropicais e sistemas pós-frontais durante o outono–inverno, resultando em aumentos sistemáticos de  $H_S$  e  $T_P$  nas cartas mensais. Essas diferenças sazonais e espaciais foram quantificadas e mapeadas ao longo dos doze meses, evidenciando a migração sazonal dos padrões de vento e sua conexão com as anomalias locais de energia de onda.

As análises locais demonstraram contrastes comportamentais dentre os pontos de interesse: por exemplo, Belém/PA apresenta respostas sazonais vinculadas à variabilidade da ZCIT e a contributos de origem tropical, com picos de  $H_S$  concentrados no período dezembro–maio; em contraposição, a Baía de Guanabara/RJ apresentou maior ocorrência de valores elevados de  $H_S$  no inverno austral (junho–setembro), associados a ressacas geradas por altas pós frontas e circulação extratropical. As rosas de onda e as séries temporais complementares evidenciam não apenas direções preferenciais e bandas de energia, mas também a sazonalidade na composição espectral que é determinante para avaliação de risco e planejamento marítimo.

Em termos aplicados, os produtos gerados constituem insumos de elevado valor para o CHM/DHN e para a elaboração de Boletins Climatológicos, oferecendo subsídios diretos para atualização do Atlas de Cartas Piloto, previsão marítima de médio prazo e planejamento de operações portuárias e de navegação.

Além dos resultados obtidos, destaca-se que o conjunto de dados WAVERTYS demonstrou ser o mais adequado para estudos climatológicos voltados à METAREA V. Sua alta resolução espacial ( $\sim 0,2^\circ$ ), elevada acurácia e compatibilidade com bibliotecas de fácil acesso e ampla utilização científica conferem ao produto robustez, confiabilidade e aplicabilidade operacional.

A facilidade de processamento e automação em ambiente computacional torna o WAVERYS uma ferramenta eficiente para a geração de produtos meteoceanográficos e climatológicos, como os Boletins Climatológicos (BC) e futuras atualizações do Atlas de Cartas Piloto da DHN.

Assim, recomenda-se sua adoção contínua como fonte de referência para a modelagem e análise do regime de ondas no Atlântico Sul, fortalecendo a capacidade da Marinha do Brasil em produzir e disseminar informações oceanográficas de alta qualidade. Assim como, a incorporação progressiva das cartas mensais derivadas do *WAVERYS* aos fluxos operacionais. Em suma, a climatologia produzida fornece uma síntese robusta da variabilidade zonal das ondas na METAREA V, representando um avanço relevante na caracterização do estado do mar para fins científicos e operacionais.

## Referências Bibliográficas

- COTRIM, C. S.; SEMEDO, A.; LEMOS, G. Brazil Wave Climate from a High-Resolution Wave Hindcast. *Climate* 2022, 10, 53. <https://doi.org/10.3390/cli10040053>
- HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.
- HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 77, n. 3, p. 437–471, 1996.
- KOMEN, G. J. et al. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- LAW-CHUNE, S.; AOUF, L.; DALPHINET, A.; LEVIER, B.; DRILLET, Y.; DREVILLON, M. WAVERTS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. *Ocean Dynamics*, v. 71, p. 357–378, 2021.
- MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. Atlas de Cartas Piloto. Niterói/Rio de Janeiro: CHM, 2021.
- \_\_\_\_\_. Centro de Hidrografia da Marinha. Carta de Serviços ao Usuário do CHM. Niterói/Rio de Janeiro: CHM, 2024.
- \_\_\_\_\_. Diretoria de Hidrografia e Navegação. NAVEMARINST 10-11A – Normas para Solicitação de Produtos Meteoceanográficos ao CHM. Niterói/Rio de Janeiro: DHN, 2021.
- \_\_\_\_\_. Diretoria de Hidrografia e Navegação. NORMAM-701 – Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima. Niterói/Rio de Janeiro: DHN, 2023.

MIGUENS, A. P. Navegação: a Ciência e a Arte. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2000. Vol. III (Cap. 45).

ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. Resolução A.839(19): Diretrizes para a segurança marítima e proteção ambiental. Londres: IMO, 1995.

PIANCA, C.; MENDEZ, F. J.; CAMARGO, R. D. Wave climate variability in the South Atlantic Ocean. *Journal of Coastal Research*, v. 26, n. 6, p. 993–1001, 2010.

POLI P., et al., 2013. The data assimilation system and initial performance evaluation of the ECMWF pilot reanalysis of the 20th-century assimilating surface observations only (ERA-20c). ECMWF ERA report series, ECMWF, Shinfield Park, Reading, 14.

Pimenta, F., Saavedra, O., Oliveira, D., Assireu, A., Torres, A., De Freitas, R., Neto, F., Lopes, D., Oliveira, C., De Lima, S., De Oliveira Neto, J., & Veras, R. (2023). *Characterization of Wind Resources of the East Coast of Maranhão, Brazil*. Energies. <https://doi.org/10.3390/en16145555>.

POND, S.; PICKARD, G. L. *Introductory Dynamical Oceanography*. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1983.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 91, p. 1015–1057, 2010.

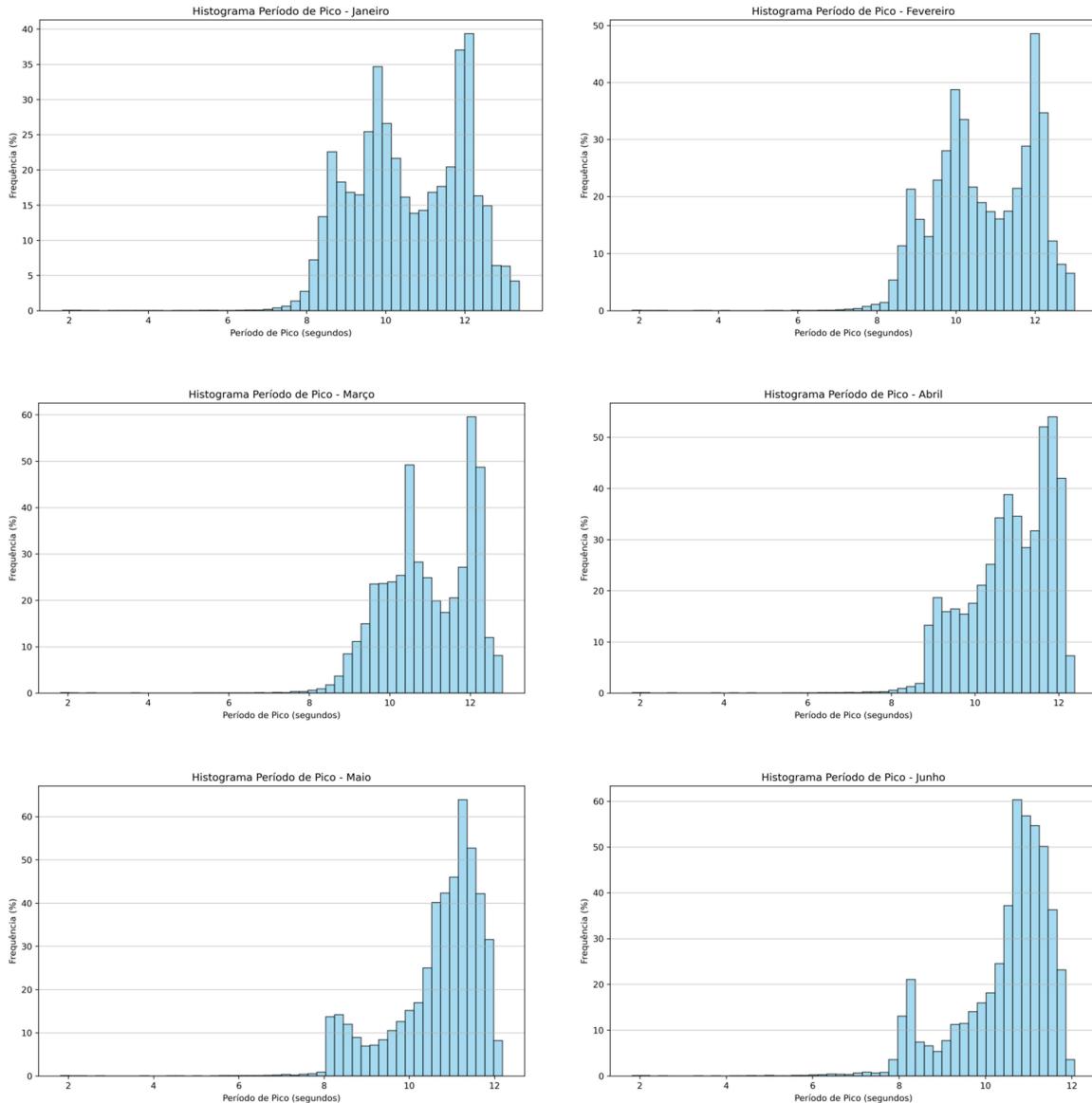
SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, Boston, v. 27, p. 2185–2208, 2014.

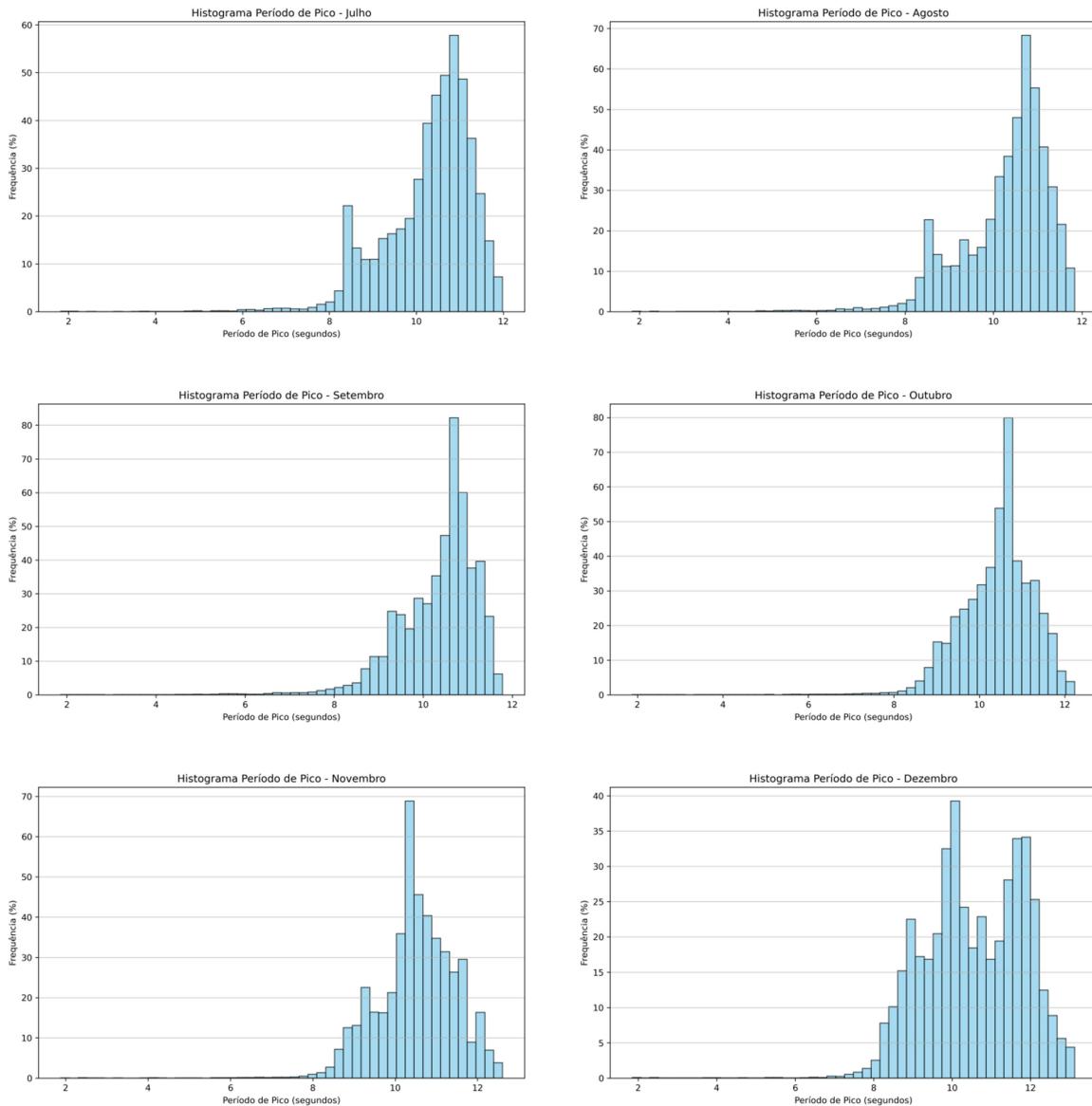
SILVA, M. B. L. da. *Classificação de Weather Patterns e suas relações com extremos de onda no Litoral Sul e Sudeste do Brasil*. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. *The South Atlantic Subtropical High: climatology and interannual variability.* Journal of Climate. Early online release, 2017.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>.

## APÊNDICE A – Histogramas do Período de Pico de janeiro a dezembro de 1980 a 2022.

Figura A.1 - Histogramas do Período de Pico





Fonte: Elaborado a partir dos dados do *WAVERTS*.