






CLIMA DE ONDAS DE TEMPESTADES NA COSTA BRASILEIRA UTILIZANDO 41 ANOS DE DADOS DA REANÁLISE ECMWF ERA5

*Brazilian high energy waves climate based on past 41 years
using ECMWF ERA5 reanalysis Dataset.*

*Clima de olas de tormenta de Brasil basado en los últimos 41
años utilizando datos de reanálisis ECMWF ERA5.*

Branco Mateus Murata Eguchi  

Universidade Federal do Espírito Santo
bmeguchi@hotmail.com

Leonardo Azevedo Klumb-Oliveira  

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
leonardoklumb@ufrb.edu.br

Resumo: Ao longo da última década diversos trabalhos têm utilizado bancos de vento e ondas para caracterizar a climatologia ao longo da costa brasileira. No entanto, existe uma escassez de climatologia para ondas de alta energia, já que simulações destes eventos são frequentemente elaboradas em escalas regionais relacionadas a eventos específicos. A reanálise com assimilação de dados medidos *in loco*, permite que os bancos de dados sejam permanentemente atualizados, gerando resultados mais precisos. Este trabalho procurou caracterizar o clima de ondas de tempestades na costa brasileira a partir do banco de dados da reanálise ERA5 ECMWF. Ondas de tempestade foram definidas como aquelas ondas com alturas superiores ou iguais à média dos 5% das ondas mais altas do banco de dados ($\geq H_{5\%}$). Os resultados mostram que a ocorrência e duração das ondas de tempestades é semelhante ao longo da costa brasileira. Em média, ocorrem 10 eventos por ano com duração média de 20 horas. No entanto, cada ponto apresenta ondas com características diferentes ao longo do litoral brasileiro. Foram identificados dois padrões distintos de potência e incidência de ondas de tempestades. As regiões Sul e Sudeste apresentam um clima de ondas mais severo, enquanto os estados da Região Nordeste se encontram sob um clima de ondas mais ameno. Tal comportamento é influenciado pelos sistemas atmosféricos responsáveis por gerar tais ondas. Estes sistemas também apresentam concordância com o padrão sazonal de aumento e redução da potência de ondas de tempestades ao longo do litoral brasileiro.

Palavras-chave: Circulação Atmosférica. Potência de ondas. Sazonalidade.

Abstract: Over the last decade, many studies have used wind and waves records to determine the climatology throughout the Brazilian coast. Nonetheless, there is a scarcity of climatology for high energy waves, as the simulations of these events are frequently elaborated in regional scales related to specific events. The reanalysis with data assimilation measured in loco enables databases to be permanently updated, generating more accurate results. This study aims to characterize the climate of storm waves in the Brazilian coast, using the reanalysis database ERA5 ECMWF. Storm waves were defined as waves of superior or equal height to the average of 5% of the highest waves in the databases ($\geq H5\%$). The results show that the occurrence and duration of storm waves are similar along the Brazilian coast. On average, there is the occurrence of ten events per year with an average duration of 20 hours. However, each one presents waves of different characteristics throughout the Brazilian shore. Two distinct patterns of power and incidence of storm waves were identified. The South and Southeast regions present a severer waves climate, while states in the Northeast region present a softer waves climate. Such behavior is influenced by the atmospheric systems responsible for generating such waves. These systems also abide to the seasonal pattern of power increase and reduction of storm waves throughout the Brazilian shore.

Keywords: Atmospheric Circulation. Wave Power. Seasonality.

Resumen: En la última década, varios estudios han utilizado bancos de viento y olas para caracterizar la climatología a lo largo de la costa brasileña. Sin embargo, existe una escasez de climatología para las olas de alta energía, ya que las simulaciones de estos fenómenos suelen realizarse a escalas regionales relacionadas con fenómenos específicos. La reanálisis con asimilación de datos medidos in loco, permite actualizar permanentemente las bases de datos, generando resultados más precisos. Este trabajo buscó caracterizar el clima de olas de tormenta en la costa brasileña a partir de la base de datos de reanálisis ERA5 ECMWF. Las olas de tormenta se definieron como olas con alturas superiores o iguales a la media del 5% de las olas más altas de la base de datos ($\geq H5\%$). Los resultados muestran que la ocurrencia y duración de las olas de tormenta es similar a lo largo de la costa brasileña. En promedio, ocurren 10 eventos por año con una duración media de 20 horas. Sin embargo, cada punto presenta olas con características diferentes a lo largo de la costa brasileña. Se identificaron dos patrones distintos de potencia e incidencia de olas de tormenta. Las regiones Sur y Sureste presentan un clima de olas más severo, mientras que los estados de la Región Noreste están bajo un clima de olas más suave. Tal comportamiento está influenciado por los sistemas atmosféricos de la generación de dichas ondas. Estos sistemas también presentan concordancia con el patrón estacional de aumento y disminución de la potencia de las olas de tormenta a lo largo de la costa brasileña.

Palabras clave: Circulación Atmosférica. Potencia de olas. Estacionalidad.

Submetido em: 15/07/2022

Aceito para publicação em: 12/04/2023

Publicado em: 26/04/2023



1. INTRODUÇÃO

O conhecimento acerca do clima de ondas em regiões litorâneas é fundamental para o planejamento de obras costeiras, navegação e turismo. Herbich e Walters (1987) definem clima de ondas como a distribuição média de altura significativa, período e direção das ondas para um determinado intervalo de tempo em uma região. A análise do clima de ondas de alta energia permite investigar o comportamento médio e a sazonalidade dos estados de mar de alta agitação marítima, que são potenciais causas de danos às construções urbanas na orla, na forma de erosão e inundação costeira.

Em termos gerais, os eventos de agitação marítima mais expressivos que atingem as regiões litorâneas são associações entre sobrelevações regionais do nível do mar e ondas de alta energia, geralmente resultados da passagem de ciclones sobre o oceano. Porém, a costa brasileira possui uma climatologia de ondas diversificada, isso em função das diferentes orientações da linha de costa e dos diferentes sistemas meteorológicos atuantes. Entre estes, incluem-se as ciclogêneses no Atlântico Norte e Sul, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS).

Uma série de trabalhos têm sido publicados caracterizando o clima de ondas ao longo da costa brasileira, muitos deles utilizando produtos de reanálise e *hindcast* de ventos e ondas, por exemplo, Innocentini *et al.* (2000), Parise (2009), Pianca *et al.* (2010) Bulhões *et al.* (2016), Klumb-Oliveira *et al.* (2015), Oliveira *et al.* (2019) e Eguchi e Albino (2021).

No entanto, existe uma escassez de trabalhos referentes à climatologia para ondas de alta energia, já que simulações destes eventos são frequentemente elaboradas apenas em escalas regionais e em relação a eventos específicos (Candella e Souza, 2013; Machado *et al.*, 2020). Além disso, boa parte dos trabalhos utilizaram produtos como MMAB NWW3 (Chawla *et al.*, 2012) e GOW (Reguero *et al.*, 2012), que não utilizam assimilação de dados durante as rodadas dos modelos computacionais. Diferentemente do banco ERA5, que apresenta melhor resolução espaço-temporal e aplica assimilação de dados (Klumb-Oliveira e Fukai, 2020).

O presente trabalho propõe a identificar e descrever o clima de ondas consideradas de alta energia para toda a Costa Sul, Leste e parte da Costa Norte brasileira, a partir da análise estatística das alturas significativas de ondas de reanálise ERA5. Posteriormente, foi possível determinar a variabilidade interanual dos parâmetros de ondas de tempestade, verificar suas

tendências de aumento ou redução e discutir os padrões atmosféricos responsáveis pelas ondas de alta energia.

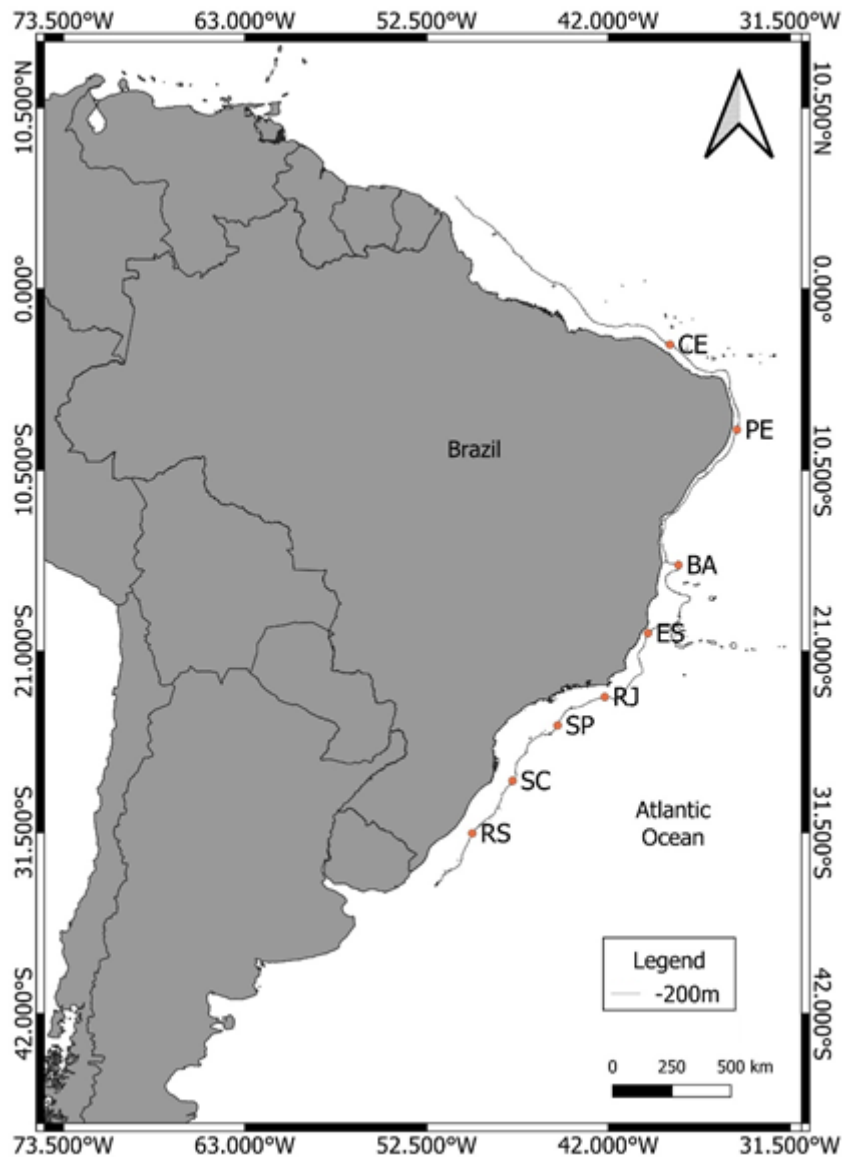
2. METODOLOGIA

2.1. Banco de dados ERA5

Para extração de dados de alturas significativas, períodos de pico e direções médias de ondas do tipo *swell* e *wind sea*, foram escolhidos 8 (oito) pontos ao longo da Costa Sul, Leste e parte da Costa Norte do Brasil (Figura 1). Os dados são provenientes do Projeto de Reanálise global ERA5, disponibilizado pelo Centro Europeu Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) (Hersbach *et al.*, 2018) e compreendem o intervalo entre os anos de 1979 e 2020 com resolução temporal de 1 hora e espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Para validação, os dados modelados foram comparados com informações de ondas medidas *in situ* por boias do Programa Nacional do Boias (PNBOIA), disponíveis na base de dados do Centro de Hidrogeografia da Marinha do Brasil (Marinha do Brasil, 2021) cujas posições coincidem com pontos centrais do modelo ERA5 (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização dos pontos ERA5 e PNBOIA ao longo da costa leste e norte do Brasil. Cada ponto é identificado com a sigla do estado correspondente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A tabela 1 apresenta o viés (Bias) e a raiz média dos erros quadráticos (RMSE) entre os dados de ondas medidos e modelados. De modo geral as alturas significativas, períodos de pico e direções médias das ondas do Projeto ERA5 apresentam concordância com os dados medidos por meio das boias PNBOIA. Com exceção da altura significativa e da direção média no ponto SC, os valores de RMSE são baixos para todos os pontos. O Viés mostra que o ERA5 superestima ligeiramente as alturas significativas, períodos de pico e direções médias. Somente no ponto SC há uma superestimação representativa (~0,5m) da altura significativa

de ondas. De modo geral, os dados ERA5 representam de maneira satisfatória o padrão de ondas medido.

Tabela 1- Viés (Bias) e a raiz média dos erros quadráticos (RMSE) da comparação entre os dados modelados (ERA5) e medidos (PNBOIA).

	RMSE			Bias		
	Hs (m)	Tp (s)	Dm (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dm (°)
CE	0,1	1,4	14	-0,02	0,6	-1
PE	0,1	1,2	10	0,04	0,3	2
BA	0,2	0,9	15	0,04	0,3	14
ES	0,2	1,4	20	0,10	0,5	9
RJ	0,2	1,0	13	0,04	0,3	6
SP	0,2	1,0	13	-0,04	0,1	-2
SC	0,6	1,0	42	0,54	0,3	1
RS	0,2	1,0	13	-0,06	0,0	-2
Média	0,2	1,1	17,5	0,1	0,3	3,4

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.2. Ondas de tempestades

You e Lord (2008), Durán *et al.* (2016), Earlie *et al.* (2018) e Castelle *et al.* (2017) sugerem que ondas de tempestades podem ser definidas como as ondas maiores ou iguais a média dos 5% das ondas mais altas do banco de dados ($H_{5\%}$) e duração mínima de 12 horas. Porém, com o objetivo de determinar a duração média de ondas de tempestades em cada ponto modelado, este trabalho utilizou como parâmetro apenas alturas de ondas superiores ao $H_{5\%}$. A determinação do $H_{5\%}$ foi feita para cada ano entre 1979 e 2020, assim como a quantificação do número, duração média e o intervalo médio entre os eventos.

Com intuito de caracterizar o padrão energético das ondas de tempestade e identificar as diferenças ao longo da costa do Brasil, foi feita regressão linear da potência de ondas por quadrantes de incidência para cada ponto. A potência de ondas foi calculada a partir da equação 1 (Gonçalves *et al.*, 2014; Atan *et al.*, 2016).



$$(1) \quad P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_p$$

Sendo, P é a potência de ondas (W/m), ρ representa a densidade da água do mar, g é a aceleração da gravidade e H_s e T_p representam, respectivamente, altura significativa e o período de ondas.

Por fim, tendências de aumento ou redução dos parâmetros foram calculadas através da determinação do coeficiente de Pearson (R) entre o intervalo temporal e as variáveis $H_{5\%}$, potência de ondas, altura significativa, período de pico, direção média, intervalo, quantidade e duração média ao longo dos 41 anos (1979 a 2020).

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os gráficos de ocorrência direcional das alturas significativas e períodos de pico das ondas de tempestade para os pontos. No ponto CE, as ondas de tempestade são provenientes em sua maioria do quadrante Leste com alturas significativas que variam entre 2,0 e 2,5m e os períodos de pico 7 a 9s. Observa-se uma parcela expressiva de ondas de Nordeste e Norte com alturas que também variam entre 2,0 e 2,5m, porém, com períodos de pico entre 15 e 17s (Figura 2).

O ponto PE apresenta somente ondas de Sudeste com alturas significativas e períodos de pico entre 2,5 e 3,0m e 9 a 11s, respectivamente. Neste ponto observa-se que as ondas mais próximas do quadrante Sul apresentam menores recorrências, no entanto, maiores alturas significativas e períodos de pico quando comparadas àquelas mais próximas ao quadrante leste (Figura 2).

Para o ponto BA, a ocorrência de ondas de tempestade abrange os quadrantes Sul, Sudeste e Leste, com ondas majoritariamente entre 2,5 e 3,0m de alturas significativas e 7 a 9s de períodos de pico. A maior concentração de ondas de tempestade se encontra nos quadrantes Sul e Sudeste. As ondas do quadrante Leste apresentam períodos de pico ligeiramente mais altos do que as demais, apesar da menor ocorrência (Figura 2).

No ponto ES é possível notar a prevalência de ondas de tempestade provenientes dos quadrantes Sudoeste, Sul e Sudeste com alturas significativas de 2,5 a 3,0m e períodos de pico

entre 13 e 15s. As maiores alturas significativas estão associadas às ondas de Sul e Sudoeste (Figura 3).

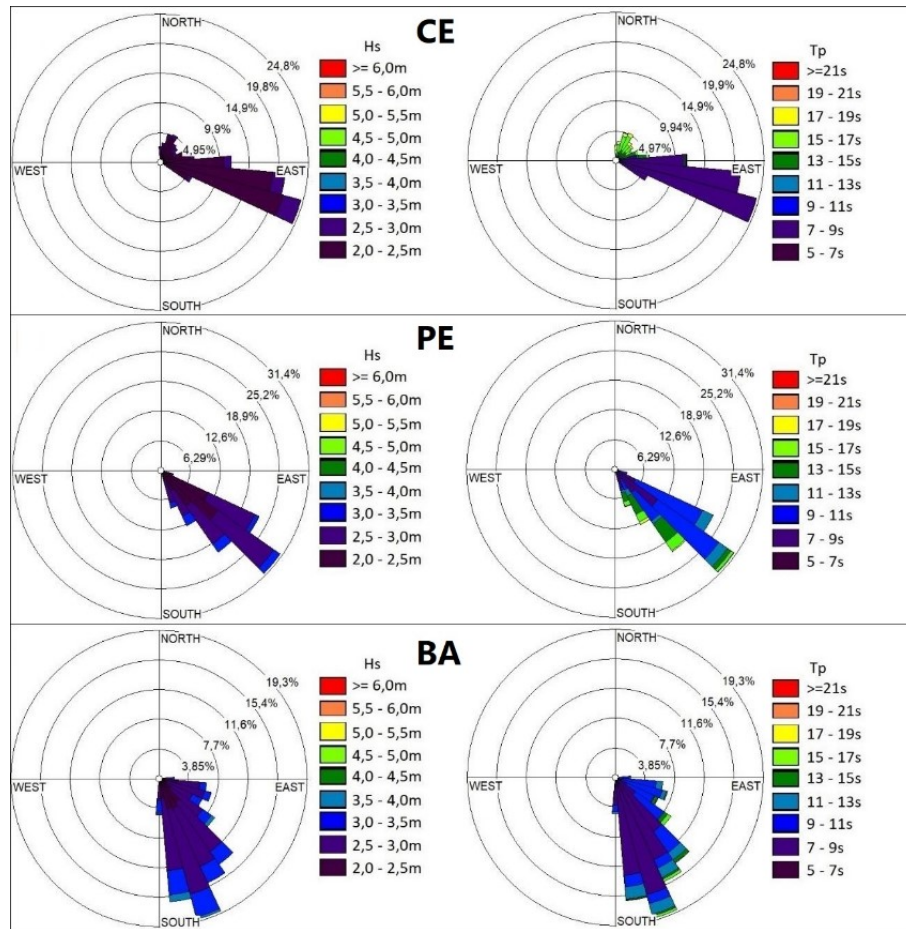
O ponto RJ tem ondas de tempestade predominantemente do quadrante Sudoeste, com alturas significativas que variam de 3,5 a 4,0m e períodos de pico entre 13 e 15s. Há também ocorrência de ondas de Sul e Sudeste, porém com menores representatividades (Figura 3).

As ondas de tempestade no ponto SP se assemelham ao ponto RJ, ambos apresentam prevalência da direção Sudoeste e períodos de pico entre 13 e 15s. No entanto, as alturas significativas no ponto SP mostram maior representatividade do intervalo de 4,0 a 4,5m (Figura 3)

No ponto SC a prevalência de ondas de Sudoeste se mantém, porém com períodos de picos entre 9 e 11s. As alturas significativas mais recorrentes encontram-se no intervalo de 4,0 a 4,5m, embora as classes de 4,5 a 5,0m e 5,0 a 5,5m sejam representativas. Neste ponto nota-se o aumento do período de pico das ondas do quadrante Sul (Figura 4).

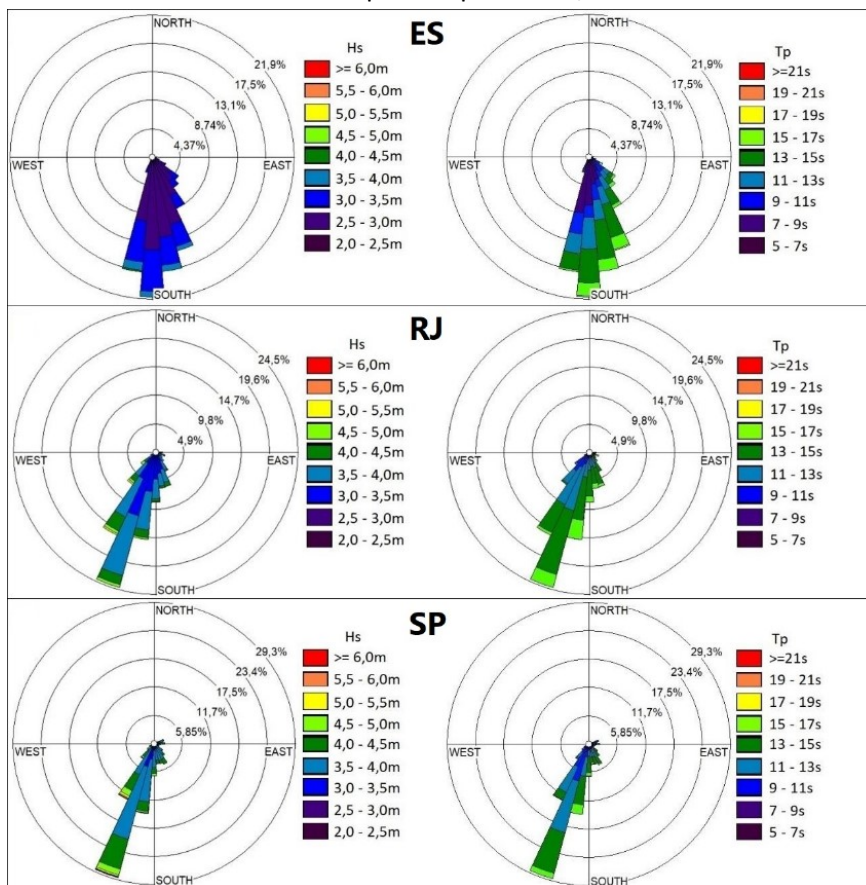
O ponto RS apresenta as maiores alturas significativas, sendo a classe entre 4,5 e 5,0m a mais representativa, além de sofrer grande influência de ondas acima dos 5,0m. Neste ponto a direção mais recorrente é de Sudoeste, porém, são observadas ondas de tempestade de praticamente todos quadrantes, exceto Noroeste e Norte. Os períodos de pico mais representativos estão na faixa entre 11 e 13s e apresentam um padrão de aumento de Oeste para Sudeste, embora reduzam suas ocorrências (Figura 4).

Figura 2 - Gráficos de ocorrência direcional de altura significativa (esquerda) e período de pico (direita) de ondas do banco de dados ERA5 para os pontos CE, PE e BA entre os anos de 1979 e 2020.



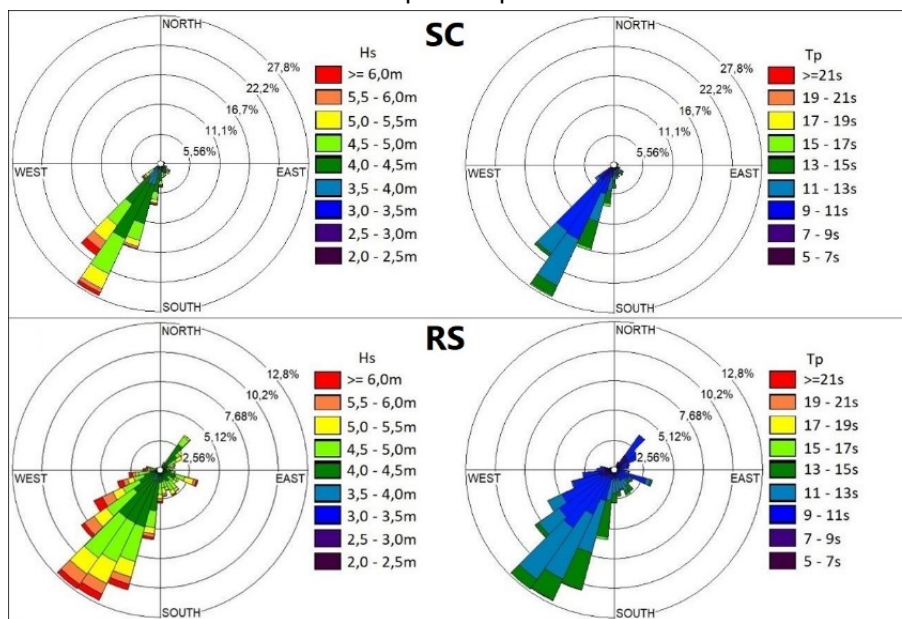
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 3 - Gráficos de ocorrência direcional de altura significativa (esquerda) e período de pico (direita) de ondas do banco de dados ERA5 para os pontos ES, SP e RJ entre os anos de 1979 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 4 - Gráficos de ocorrência direcional de altura significativa (esquerda) e período de pico (direita) de ondas do banco de dados ERA5 para os pontos SC e RS entre os anos de 1979 e 2020.

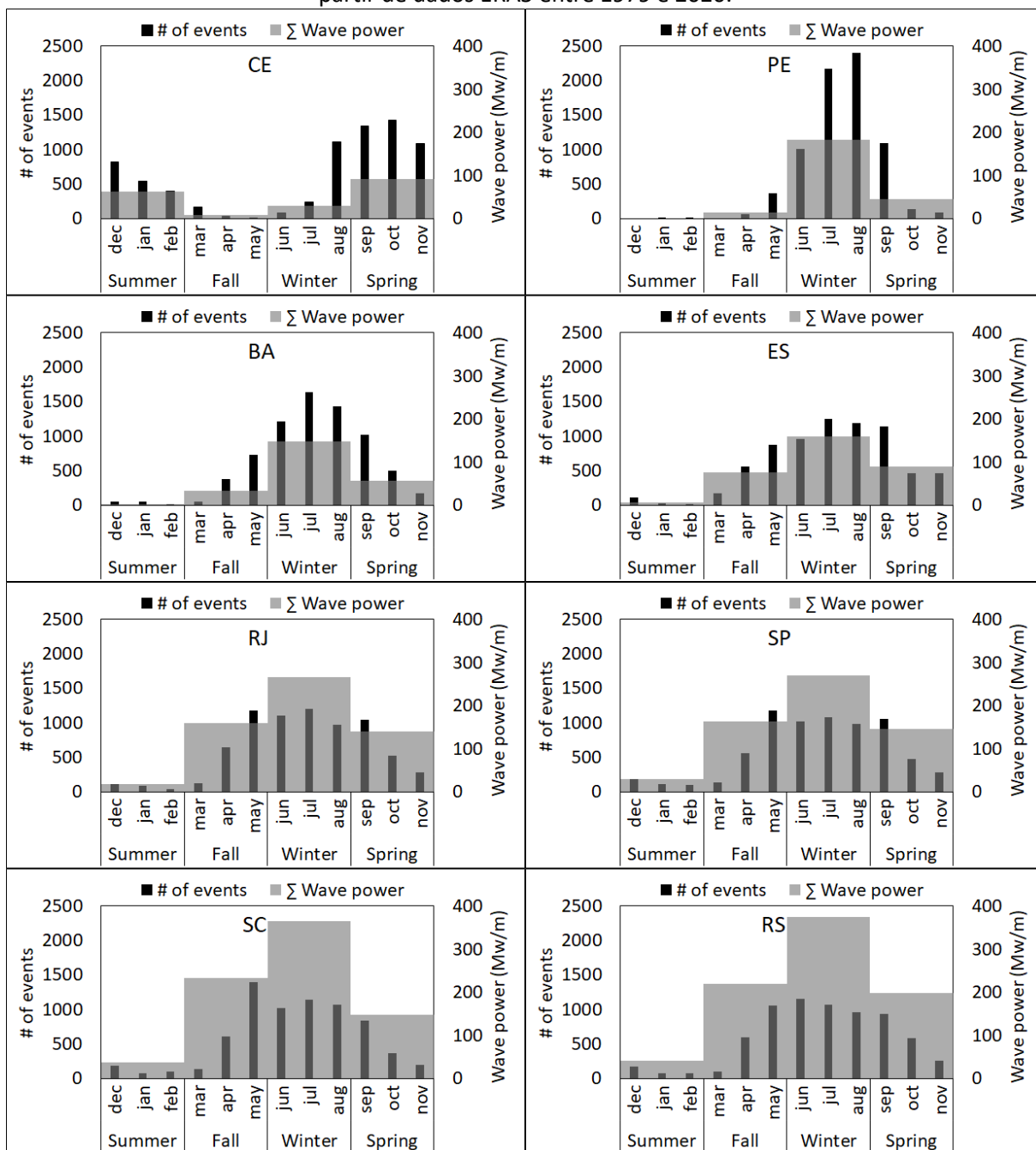


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A figura 5 apresenta a distribuição sazonal da ocorrência de ondas de tempestade e da potência acumulada de ondas. No ponto CE os picos de ocorrência e potência de onda se dão na primavera, entre os meses de setembro e outubro. No entanto, seguem altos para os meses de verão, diferentemente de todos os demais pontos. Em PE e BA, os picos de ocorrência e potência são bem pronunciados e ocorrem nos meses de inverno (julho e agosto), seguido de uma rápida redução no fim da primavera (outubro e novembro). Para os pontos no litoral Sudeste (ES, RJ e SP) e Sul (SC e RS), a ocorrência de ondas de tempestade inicia seu aumento em abril. Nestes pontos, a quantidade de tempestades permanece alta de maio até setembro, marcando o intervalo entre fim do outono e início da primavera como a temporada de ondas de tempestade. Para os litorais Sudeste e Sul o padrão sazonal de potência de onda acumulada destaca o potencial das ondas de inverno, que apresentam maiores potências de onda acumuladas, mesmo com ocorrência de ondas semelhantes ao outono e primavera.



Figura 5 - Distribuição sazonal da ocorrência de ondas de tempestade ao longo da costa brasileira a partir de dados ERA5 entre 1979 e 2020.

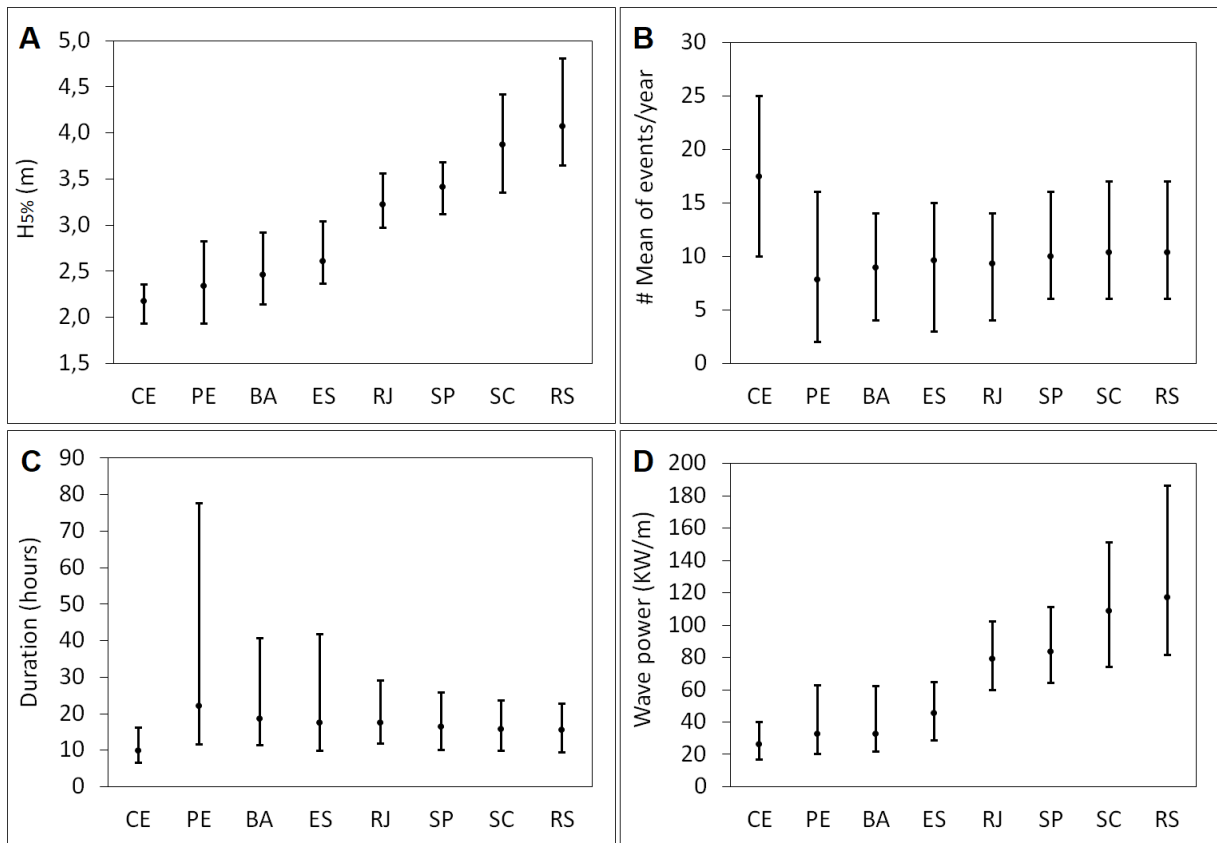


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A figura 6 traz os valores médios (pontos), máximos e mínimos (barras) dos parâmetros de ondas de tempestade em cada ponto, com base na análise anual entre 1979 e 2020. Observa-se um aumento do $H_{5\%}$ no sentido Norte-Sul, sendo os valores médios entre 1979 e 2020 de CE (2,2m), PE (2,3m), BA (2,5m), ES (2,6m), RJ (3,2m), SP (3,4m), SC (3,9m) e RS (4,1m). A média de quantidade de tempestades por ano é semelhante entre os pontos, com exceção do ponto CE, que apresenta em média 17 tempestades por ano, enquanto nos demais pontos

varia entre 8 e 10 tempestades por ano. Em termos de duração das ondas de tempestades, o ponto CE apresenta menor duração média, apenas 10h. Por outro lado, os demais pontos apresentam durações médias entre 15 e 17h, salvo o ponto PE que tem tempestades com duração média de 22h. O ponto PE se destaca pela maior duração média anual, com 78h durante o ano de 2007. Nota-se uma redução das durações máximas das tempestades a partir do ponto PE em direção ao ponto RS. O padrão de potência de ondas replica o de $H_{5\%}$, com um aumento de CE para RS.

Figura 6 - Valores médios, máximos e mínimos de $H_{5\%}$ (A), quantidade de eventos de tempestades (B), duração (C) e potência de onda (D).

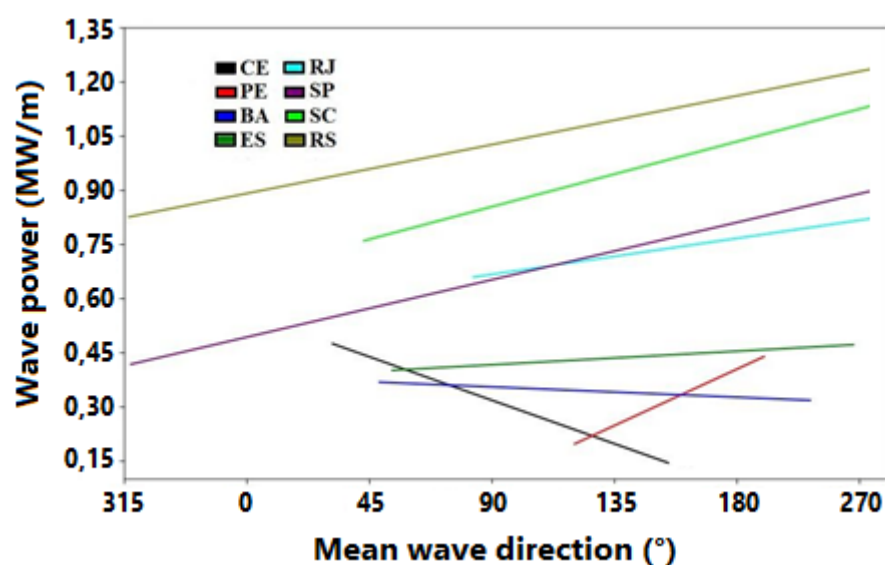


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A figura 7 apresenta a regressão linear entre potência e a direção média de incidência das ondas de tempestade para cada ponto. Os pontos RJ, SP, SC e RS apresentam maiores potenciais de ondas de tempestade, em concordância com o padrão de alturas significativas e períodos de pico descrito anteriormente. Nota-se que os pontos PE, ES, RJ, SP, SC e RS apresentam ajustes semelhantes, em que a potência de ondas de tempestade é maior para ondas dos quadrantes Sudeste, Sul e Sudoeste. Por outro, lado o ponto CE mostra um ajuste

linear em que as maiores potências de ondas de tempestade ocorrem em ondas dos quadrantes Nordeste e Norte. O ponto BA apresenta leve inclinação de sua reta com ajuste semelhante ao ponto CE. Apesar de apresentar uma faixa estreita de direção de ondas de tempestade, o ponto PE se destaca com a maior inclinação de sua reta, o que significa que a potência das ondas de tempestade aumenta substancialmente à medida que as ondas tendem a vir de Sudeste a Sul-Sudeste.

Figura 7 - Regressão linear entre a direção média de incidência e a potência de ondas de tempestade.

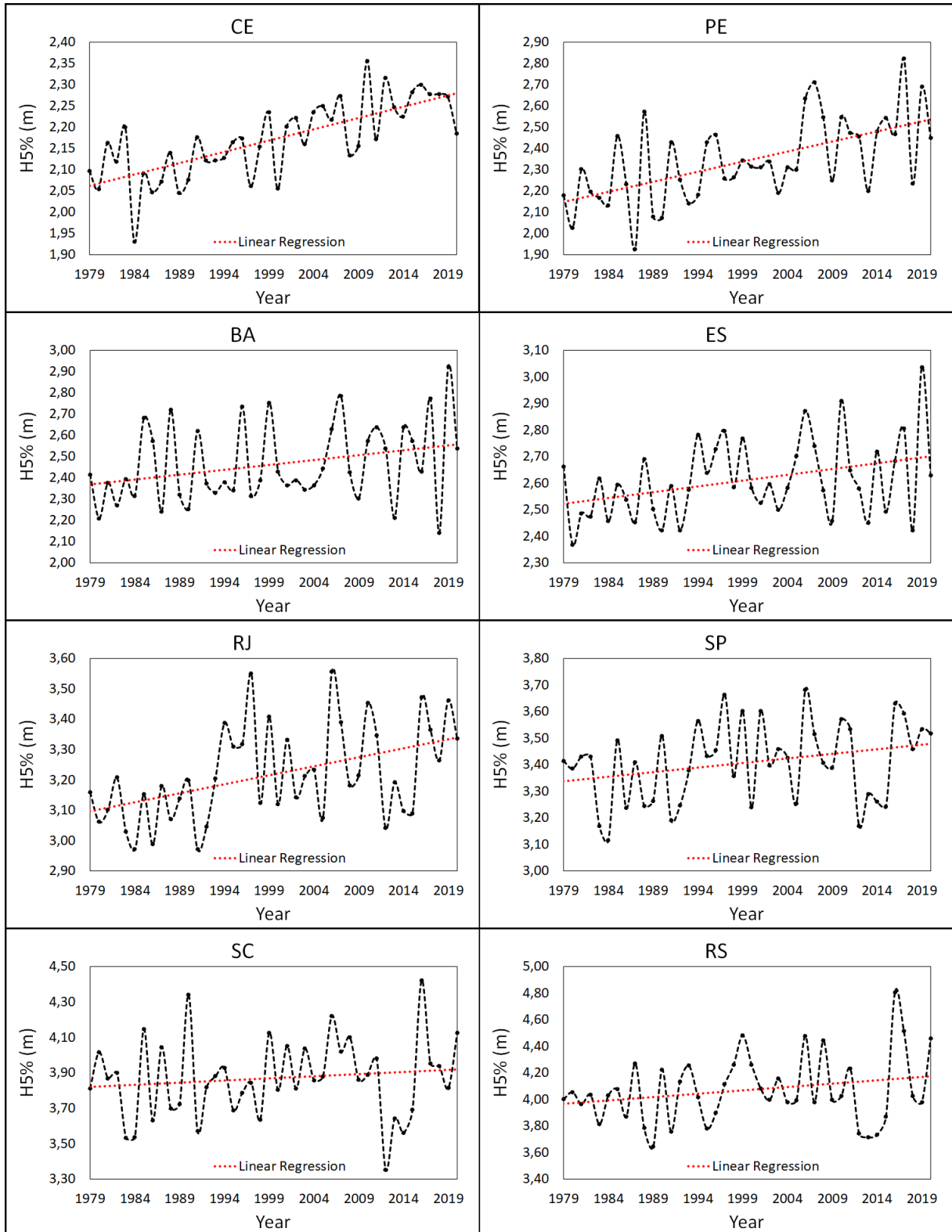


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A figura 8 apresenta o comportamento interanual dos dados de alturas de ondas de tempestades para cada ponto, bem como a regressão linear dos mesmos. Em maior detalhe, a tabela 2 traz os coeficientes de Pearson (r) como resultados da regressão linear para os parâmetros em cada ponto entre os anos de 1979 e 2020.

O ponto CE apresenta aumento para $H_{5\%}$ e altura significativa das ondas de tempestade. Em PE há aumento do $H_{5\%}$, altura significativa e da potência de ondas de tempestade. RJ apresenta aumento de $H_{5\%}$ e do período de pico das ondas de tempestade. O ponto SP mostra aumento do período de pico das ondas de tempestade. Nenhum ponto apresentou tendência de alteração da direção média e duração média de ondas de tempestade.

Figura 8 – Gráfico interanual das alturas de ondas de tempestades para cada ponto (Linha preta) e regressão linear (Linha vermelha).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Tabela 2- Valores de coeficiente de Pearson obtidos pela regressão linear de cada parâmetro ao longo do tempo (1979-2020). Em negrito, os valores que apresentam tendências significativas de aumento ou redução de cada parâmetro analisado ($p \geq 0,5$ ou $\leq -0,5$).

Coef. de Pearson	CE	PE	BA	ES	RJ	SP	SC	RS
H _{5%} médio	0,7	0,6	0,3	0,4	0,5	0,3	0,1	0,2
Hs médio	0,7	0,6	0,2	0,2	0,1	0,0	-0,1	0,0
Tp médio	-0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	0,2	0,3
Dm médio	0,2	0,1	-0,3	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1
Potência de ondas	0,0	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	0,1
Frequência dos eventos	0,3	0,0	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
Nº de tempestades	0,4	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3
Duração média	-0,3	0,0	0,0	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,2

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. DISCUSSÕES

O clima de ondas ao longo da costa brasileira é altamente diversificado em decorrência de uma série de fatores, entre eles a extensão de 10.800 km de sua linha de costa, que vai da latitude 4° N a 33,7°S. Tamanho extensão confere diferentes graus de orientação da costa ao oceano, por exemplo, a orientação Caraíba (NO-SE) do Amapá ao Rio Grande do Norte, e a orientação Brasileira (NE-SO) do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul.

O padrão de ondas de tempestades apresenta concordância com análises prévias do clima de ondas realizadas por Innocentini *et al.* (2000) e Pianca *et al.* (2010). Os autores destacam que as Regiões Norte e Nordeste são mais expostas às ondas geradas por ventos relacionados à ZCIT e ao flanco esquerdo de ventos do ASAS. Já a Região Sudeste e a Sul apresenta características híbridas, entre ondas de menores alturas geradas pelo ASAS e ondas de maiores alturas vindas dos quadrantes Sudeste, Sul e Sudoeste geradas por ciclones extratropicais e subtropicais, cuja origem se dá na costa da Argentina, Uruguai e Sul do Brasil (Reboita *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que a atuação dos sistemas atmosféricos gera número de episódios de ondas de tempestade semelhantes para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul. No entanto, o aumento da potência de ondas de tempestade no sentido Norte-Sul indica que as estas possuem características distintas para cada região. Além disso, foi identificada uma migração anti-horária do intervalo de maior ocorrência de ondas



de tempestade, partindo da direção ESE (105°) no CE, para SSW (213°) no RS. Este comportamento pode ser explicado pelo padrão de migração de sistemas ciclônicos do Atlântico Sul, responsáveis por gerar ondas de mais alta energia que atingem as áreas costeiras. Os sistemas ciclônicos migram do Sul da América do Sul em direção à África, se afastando da costa brasileira à medida que se deslocam para menores latitudes (Satyamurty e Mattos, 1989; Reboita *et al.*, 2005; Parise, 2009). Assim, seus efeitos sobre as ondas de tempestade que atingem a costa Nordeste do Brasil são reduzidos, onde passam a predominar as ondas geradas pelos sistemas de ventos relacionados à ZCIT e ao flanco esquerdo de ventos do ASAS.

A sazonalidade das ondas de tempestade é reflexo do padrão atmosférico, principalmente ligado à ocorrência de frentes frias associadas a ciclones extratropicais (Godoi *et al.*, 2014; Cardozo *et al.*, 2015). O aumento da ocorrência de ondas de tempestade entre abril e setembro apresenta concordância com estudos realizados na costa Sudeste do Brasil (ex.: Bulhões *et al.*, 2016; De Souza *et al.*, 2016; Lins-de-Barros *et al.*, 2018). Segundo Lübbecke *et al.* (2014), o principal controle atmosférico na bacia Sul do Oceano Atlântico é o Anticiclone ou Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul, que atua como uma barreira no deslocamento de ciclones rumo às menores latitudes (Pereira e Klumb-Oliveira, 2015).

Durante os meses de equinócio ocorre redução da intensidade e tamanho do ASAS (Sun *et al.*, 2017), corroborando com o padrão de elevada potência de ondas acumuladas no outono e primavera nas regiões Sul e Sudeste. Apesar do ASAS estar fortalecido durante o inverno, seu centro se desloca para menores latitudes (Sun *et al.*, 2017), permitindo assim a migração dos ciclones, que são mais numerosos nesta estação (Reboita e Marrafon, 2021). Durante os meses de verão tem-se um aumento na intensidade e tamanho do ASAS (Sun *et al.*, 2017), este padrão corrobora com as elevadas potências de ondas acumuladas para o ponto CE, sob maior influência do padrão de ventos gerados pelo ASAS. Além disso, Parding *et al.* (2019) destacam uma maior ocorrência de tempestades durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro no Atlântico Norte. Este padrão de circulação gera ondas vindas dos quadrantes Nordeste e Norte e corrobora com o alto potencial energético de ondas durante os meses de verão para o ponto CE, em concordância com Silva *et al.* (2011).

A análise da potência de ondas indica, pelo menos, dois padrões distintos. O primeiro, que abrange as águas ao largo das regiões de RS, SC, SP e RJ, e ES, apresenta um crescimento

linear diretamente proporcional entre a potência de ondas e a sua direção de incidência, isto é, a potência de ondas aumenta gradativamente de Norte para Sudoeste. Esta relação é mais pronunciada nas regiões de RS, SC e SP, e mais suave em RJ e ES. O resultado demonstra a maior exposição destas regiões aos eventos de grande energia que ocorrem no Atlântico Sul, sobretudo ciclones extratropicais. Taljaard (1967), Gan e Rao (1991) e Sinclair (1994) identificaram a costa leste da América do Sul como uma região ciclogênica, com ciclogêneses ocorrendo entre as latitudes 35°S e 55°S.

Um segundo padrão indica uma relação inversamente proporcional bem pronunciada na região de CE e mais suave em BA, ou seja, a potência de ondas aumenta de Sul para Nordeste. Isto sugere que a maior energia de ondas nestas regiões está ligada às ondas de Nordeste e Norte, associadas aos ventos Alísios de Leste e Nordeste, que fazem parte do ASAS. Além disso, eventos de alta energia também são resultantes de ciclones extratropicais e tropicais que ocorrem no Atlântico Norte (Innocentini *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2011).

A tendência de aumento de $H_{5\%}$ para os pontos CE e PE pode indicar que o clima de ondas em geral está aumentando sua altura significativa, visto que H_s médio também apresenta tendência de aumento nestes pontos. Já para o ponto RJ, a tendência de aumento de $H_{5\%}$ pode estar relacionada com a manutenção do clima de ondas e intensificação apenas dos eventos extremos. Pianca *et al.* (2010) apresentam associação de ondas mais altas com períodos mais longos, em especial para as costas Sul e Sudeste do Brasil. Assim, a tendência de aumento de T_p no ponto RJ corrobora com a hipótese de aumento de ondas extremas, já que o H_s médio deste ponto não apresenta tendência de incremento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantidade de ondas de tempestade é semelhante ao longo do litoral brasileiro. No entanto, as características destas ondas diferem fortemente, gerando um gradiente latitudinal de potência de ondas, que aumenta no sentido Norte-Sul. O gradiente de potência de ondas e a relação da direção média de ondas reflete a diferença em termos de direção, intensidade, pista e duração dos ventos ligados aos sistemas atmosféricos responsáveis por gerar tais ondas.

A sazonalidade das ondas de tempestade está ligada ao padrão de migração de

ciclones gerados no sul da América do Sul, das tempestades geradas no oceano Atlântico Norte e do ASAS. Por fim, indica-se que as tendências de aumento de $H_{5\%}$ podem estar ligadas a diferentes causas, como a alteração do clima de ondas como um todo, ou somente alteração das ondas extremas e episódicas.

O presente artigo enfatiza o uso de modelos numéricos para preencher uma lacuna científica que é caracterizar e avaliar o comportamento de ondas de tempestades, visto que a coleta de dados *in situ* é extremamente difícil em momentos de tempestades. A caracterização do clima de ondas de tempestade apresentada é uma importante ferramenta para entender as forçantes que regem processos costeiros ao longo da linha de costa e que podem gerar problemas de ordenamento territorial de uso em espaços urbanizados. Desta forma, os autores ressaltam que é imprescindível o aprofundamento deste tipo de estudo em todo litoral brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Auxílio nº 88887.145855/2017-00 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Projeto Universal 421657/2016-2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ao Centro Europeu Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) pela disponibilização do banco de dados de ondas do modelo ERA5.

REFERÊNCIAS

ATAN, Reduan; GOGGINS, Jamie; NASH, Stephen. A detailed assessment of the wave energy resource at the atlantic marine energy test site. **Energies**, v. 9, n. 11, p. 967, 2016.

BULHÕES, Eduardo *et al.* Coastal Impacts Induced by Storm Waves between Cape Frio and Cape Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**, n. 75 (10075), p. 1047-1051, 2016.

CANDELLA, Rogério Neder; SOUZA, Shirley Marques Lima. Extreme ocean waves at the southeastern Brazilian coast generated by an abnormal trajectory cyclone in may, 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 441-456, 2013.

CARDOZO, Amanda Balbino *et al.* Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o modo anular sul (Climatology of cold fronts over South America and its relation with the southern annular mode). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

CASTELLE, Bruno *et al.* Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast. **Marine Geology**, v. 385, p. 41-55, 2017.

CHAWLA, Arun; SPINDLER, Deanna; TOLMAN, Hendrik. 30 Year Wave Hindcasts using WAVEWATCH III with CFSR winds, Phase 1. **NOAA/NWS/NCEP/MMAB. Maryl. USA**, v. 23, 2012.

DA SILVEIRA PEREIRA, Nair Emmanuela; KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo Azevedo. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coastal zone of Rio de Janeiro (Brazil). **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 15, n. 3, p. 353-370, 2015.

DE SOUZA, Taís Almeida; BULHÕES, Eduardo; DA SILVA AMORIM, Isadora Borges. Ondas de tempestade na costa Norte Fluminense. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 6, n. 2, 2016.

DURAN, Ruth *et al.* Morphological changes, beach inundation and overwash caused by an extreme storm on a low-lying embayed beach bounded by a dune system (NW Mediterranean). **Geomorphology**, v. 274, p. 129-142, 2016.

EARLIE, Claire; MASSELINK, Gerhard; RUSSELL, Paul. The role of beach morphology on coastal cliff erosion under extreme waves. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 6, p. 1213-1228, 2018.

EGUCHI, Branco; ALBINO, Jacqueline. Influência dos Modos de Variabilidade Climática Sobre Eventos De Ressacas No Litoral Sul Do Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 165-183, 2021.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface cyclogenesis over south America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GODOI, Victor; PARENTE, Carlos; TORRES, Audálio. An overview of events of high sea waves at the mouth of Guanabara Bay. **Pan-Amamerican Journal of Aquatic Science.**, v. 9, n. 2, p. 70-87, 2014.

GONÇALVES, Marta; MARTINHO, Paulo; SOARES, C. Guedes. Assessment of wave energy in the Canary Islands. **Renewable Energy**, v. 68, p. 774-784, 2014.

HERBICH, John; WALTERS, Tom. Wave climate. In: **Climatology**. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4_195. 1987.

HERSBACH, Hans. 2018: **ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present**. In: COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S) CLIMATE DATA STORE (CDS). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu>. Acesso em: 03 fev. 2021.



INNOCENTINI, Valdir *et al.* Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: Caso de 24 de outubro de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 2, p. 177-186, 2000.

INNOCENTINI, Valdir *et al.* The incident ocean waves in the northeastern Brazilian coast associated with eastern African atmospheric disturbances. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 367-374, 2005.

KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo; FUKAI, Denise. A reanálise e sua utilização como ferramenta para o gerenciamento. *In*: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIROS, L. **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 154-169. ISBN 978-65-992571-0-0.

KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo; DA SILVEIRA PEREIRA, Nair Emmanuela; LEÃO, Rafael Rocha. Morfodinâmica multitemporal em praia refletiva no litoral centro-norte do RJ, em resposta ao clima de ondas regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, 2015.

LINS-DE-BARROS, Flavia Moraes; KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo; LIMA, Rafael. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Journal of Integrated Coastal Zone Management/Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 18, n. 2, p. 85-102, 2018.

LÜBBECKE, Joke *et al.* Variability in the South Atlantic anticyclone and the Atlantic Niño mode. **Journal of Climate**, v. 27, n. 21, p. 8135-8150, 2014.

MACHADO, Jeferson *et al.* Condições atmosféricas associadas a eventos de ressaca no litoral sul e do sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 529-544, 2020.

MARINHA DO BRASIL. **Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil – Dados PNBOIA**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>. Acesso em: 06/05/2021.

OLIVEIRA, Bruna *et al.* A high-resolution wave hindcast off Santa Catarina (Brazil) for identifying wave climate variability. **Regional Studies in Marine Science**, v. 32, p. 100834, 2019.

PARDING, Kajsa *et al.* Statistical projection of the North Atlantic storm tracks. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n. 7, p. 1509-1522, 2019.

PARISE, Cláudia; CALLIARI, Lauro Júlio; KRUSCHE, Nisia. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, p. 175-188, 2009.

PIANCA, Cássia; MAZZINI, Piero Luigi; SIEGLE, Eduardo. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 53-70, 2010.

REBOITA, Michelle Simões; MARRAFON, Vitor Hugo. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. **Terræ Didática**, v. 17, 2021.

REBOITA, Michelle Simões; ROCHA, Rosmeri Porfírio da; AMBRIZZI, Tércio. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA. 2005.

REGUERO, Borja *et al.* A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, 2012.

SATYAMURTY, Prakki; MATTOS, Luiz Fernando de. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.

SILVA, Alex Costa da *et al.* Características das ondas "Sea" e "Swell" observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography**, v. 39, n. 2, p. 123-132, 2011.

SINCLAIR, Mark. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2239-2256, 1994.

SUN, Xiaoming; COOK, Kerry; VIZY, Edward. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279-3296, 2017.

TALJAARD, Hanes. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 6, n. 6, p. 973-987, 1967.

YOU, Zai-Jin; LORD, Doug. Influence of the El Niño–Southern Oscillation on NSW Coastal Storm Severity. **Journal of Coastal Research**, n. 24 (10024), p. 203-207, 2008.