

MARIANY FERREIRA DE SOUSA

**Clima de ondas ao largo e no entorno da Ilha de Trindade –  
Arquipélago de Martin Vaz**

São Paulo

2021

MARIANY FERREIRA DE SOUSA

**Clima de ondas ao largo e no entorno da Ilha de Trindade –  
Arquipélago de Martin Vaz**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo

2021

SOUSA, Mariany Ferreira. **Clima de ondas ao largo e no entorno da Ilha de Trindade - Arquipélago de Martin Vaz.** Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

Versão Corrigida

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Julgamento \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

À Deus,  
A minha família,  
E a todos que me ajudaram nessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, que sempre acreditou em mim, nos meus sonhos e objetivos. A minha Mãe Rose, meu Pai Augusto e a Avó Maria que sempre tiveram orgulho de mim e sempre fizeram o máximo para garantir minha educação mesmo em momentos de dificuldades. Agradeço também a minha irmã Marina por me incentivar e acreditar que sou capaz, a minha tia Lucia por acreditar no meu potencial, a minha prima Luana e tia Lu por estarem sempre presentes.

Aos meus tios Regina e Marcos e primos por me acolherem tão bem em São Paulo, vocês fizeram eu me sentir em casa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Siegle, grande profissional, pela dedicação do seu tempo ao meu projeto de pesquisa, obrigada por estar sempre disposto a ajudar.

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica Costeira do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, pela ajuda integral. Em especial para Leo e a Débora por estarem presentes e disponíveis em ajudar e pela paciência ao tirarem minhas dúvidas.

Aos amigos Jonathan e Derley que foram muito importantes não somente durante minha fase de adaptação como em todo tempo que passei em São Paulo. E aos meus amigos de Fortaleza (Alice, Maylane, Rute, Celiane e Victor) que continuaram presentes em todo meu percurso.

À minha psicóloga Mariana que foi um anjo em minha vida e que conseguiu enxergar o melhor em mim em momentos em que até eu mesmo duvidei.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação e a realização do estudo. Ao projeto “Mapeamento de geohabitats na área submersa da Ilha de Trindade (Brasil)” do CNPq/Programa Arquipélago e Ilhas Oceânicas, pela obtenção e disponibilização dos dados utilizados nesse estudo.

O presente trabalho também foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Os meus mais sinceros agradecimentos a todos.

## Resumo

As ondas introduzem energia nas regiões litorâneas e influenciam nos processos costeiros, como no transporte de sedimentos e morfodinâmica. Além disso, diversos estudos já observaram relações entre ondas e biota, especialmente suas interações com as comunidades bentônicas e ictiológicas. No presente trabalho foi realizada a caracterização do clima de ondas ao largo da Ilha de Trindade, além da modelagem das ondas em todo seu entorno por meio do modelo numérico SWAN – *Simulating Waves Nearshore*, sendo, os dados do modelo, validados a partir de dados coletados em campo ao longo de 2 meses. A Ilha de Trindade está localizada a 600 milhas náuticas do estado do Espírito Santo e apresenta praias arenosas e costões rochosos em todo seu entorno, o que torna a caracterização do clima de ondas essencial para o entendimento dos processos costeiros da região. Foi utilizada uma série de 14 anos de dados de ondas (altura -  $H_s$ , período -  $T_p$  e Direção -  $D_p$ ) das porções sul e norte da ilha, extraídos do modelo WW3, a partir desses dados foi possível realizar cálculos estatísticos para definir o clima de ondas da região, além disso, a partir da definição dos cenários mais frequentes que ocorreram na região foi possível modelar os dados para todo o entorno da Ilha por meio do SWAN e obter a distribuição da força de onda e velocidade orbital de fundo. Como resultado observa-se que a altura das ondas prevalente é de 1,5-2,0 m; o período médio ficou localizado no intervalo entre 11 e 12 s e a direção predominante foi a de S-SW responsável por 47% dos dados. A partir dos resultados pode-se concluir que anualmente coexistem ondas do tipo sea e do tipo *swell*. Em ambos os setores, as ondas de leste são predominantes do tipo sea, enquanto nas demais direções (especialmente sul e norte) são predominantemente de *swell*. Anualmente e sazonalmente, a análise dos períodos que mais ocorrem na região indicam que as ondas de *swell* são mais frequentes ao largo de Trindade. Observou-se que há variação ao longo dos dois setores da ilha tanto em relação a energia da onda incidente, sendo o setor leste o que apresentou menor energia; quanto em relação a variação da velocidade orbital da onda que apresenta diferença de acordo com a mudança na direção da onda e conforme altura significativa da onda aumenta. Os dados indicam que as ondas são formadas em regiões mais afastadas, resultantes da passagem de frentes frias vindas de sul e sudeste. Este estudo é o primeiro a realizar, além da avaliação do clima de ondas a modelagem de ondas para todo o entorno da Ilha de Trindade, que pode nos fornecer dados valiosos para o estudo da dinâmica costeira dessa importante ilha oceânica brasileira.

Palavras-chave: modelagem numérica, dinâmica costeira, WaveWatch3, DELFT3D

## Abstract

The waves introduce energy into the coastal regions and influence coastal processes, such as morphodynamics and sediment transport. In addition, several studies have already observed relationships between waves and biota, especially their interactions with the benthic and ichthyological communities. In the present study, the characterization of the wave climate off the island of Trindade was carried out, in addition to the modeling of the waves around it using the numerical model SWAN - Simulating Waves Nearshore. The island of Trindade is located 600 nautical miles from the state of Espírito Santo and has sandy beaches and rocky shores throughout its surroundings, which makes characterizing the wave climate essential for understanding the coastal processes in the region. A series of 14 years of wave data (height -  $H_s$ , period -  $T_p$  and Direction -  $D_p$ ) of the southern and northern portions of the island, extracted from the WW3 model was used, from these data it was possible to perform statistical calculations to define the climate of waves in the region, in addition, from the definition of the most frequent scenarios that occurred in the region, it was possible to model the data for the entire surroundings of the Island through SWAN and obtain the distribution of the wave power and orbital velocity near bottom. As a result, it is observed that the prevailing wave height is 1.5-2.0 m, including in the seasonal cycle; the average period was located in the interval between 11 and 12 s and the predominant direction was that of S-SW responsible for 47% of the data. From the results, it can be concluded that sea and swell waves coexist annually. In both sectors, the east waves are predominant of the sea type, while in the other directions (especially south and north) they are predominantly swell. Annually and seasonally, the analysis of the periods that occur most in the region indicate that swell waves are more frequent off Trindade. It was observed that there is variation along the two sectors of the island both in relation to the energy of the incident wave, with the eastern sector having the lowest energy; and in relation to the variation of the orbital velocity of the wave that presents difference according to the change in the direction of the wave and as the significant height of the wave increases. The data indicate that the waves are formed in more distant regions, resulting from the passage of cold fronts coming from the south and southeast. This study is the first to carry out, in addition to the assessment of the wave climate, the modeling of waves for all the surroundings of the island of Trindade, which can provide us with valuable data for the study of the coastal dynamics of this important Brazilian oceanic island.

**Keywords:** numerical modeling, coastal dynamics, WaveWatch3, DELFT3D.

## Lista de Figuras

Figura 1: Elementos da onda. Legenda: $\lambda$ = comprimento de onda; H: altura da onda; A: amplitude da onda; h: profundidade local. ....	5
Figura 2: Mapa de localização da Ilha de Trindade.....	9
Figura 3: Mapa climatológico anual dos ventos a 10m de altura. Fonte: Farias (2019). 10	
Figura 4: Mapa climatológico sazonal dos ventos a 10m de altura. A) Inverno. B) Verão. Fonte: Farias (2019). ....	11
Figura 5: Mapa geológico da Ilha de Trindade modificado de Almeida (1961). Fonte: Marques (2019). ....	12
Figura 6:Localização das praias ao redor da Ilha de Trindade. ....	13
Figura 7: Grade utilizada no programa DELFT3D para o modelo de propagação de ondas. ....	17
Figura 8: Localização dos fundeios dos PACD's em frente à Praia do Príncipe e Portugueses na Ilha de Trindade.....	19
Figura 9: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do WW3 no ponto Norte (preto). a) Altura significativa observada na praia do Príncipe. b) Altura significativa observada na praia dos Portugueses. ....	22
Figura 10: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do WW3 no ponto Sul (preto). a) Altura significativa observada na praia do Príncipe. b) Altura significativa observada na praia dos Portugueses. ....	23
Figura 11: Comparação da frequência de ocorrência da $D_p$ modelada (preto) na praia do Príncipe (a) e na praia dos Portugueses (b) e observada (vermelho) in situ.....	24
Figura 12: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do SWAN (preto). a) Altura significativa na praia do Príncipe. b) Altura significativa na praia dos Portugueses. ....	25
Figura 13: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do SWAN (preto). a) Período de pico na praia do Príncipe. b) Período de pico na praia dos Portugueses. ....	26
Figura 14: Histograma com o período médio das ondas entre 2005 a 2018. ....	29
Figura 15: Histograma com a altura significativa média das ondas entre 2005 a 2018. ....	30
Figura 16: Histograma direcional para a análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b).....	32

Figura 17: Média sazonal da altura significativa durante as estações no período de estudo. .....	34
Figura 18: Média sazonal da altura significativa durante as estações no período de estudo. .....	34
Figura 19: Histograma com as direções médias das ondas entre os verões de 2005 a 2018. .....	35
Figura 20: Histograma dos percentuais de classes do período das ondas entre os verões de 2005 a 2018.....	36
Figura 21: Histograma dos percentuais de classes da altura significativa das ondas entre os verões de 2005 a 2018.....	37
Figura 22: Análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b). .....	39
Figura 23: Histograma dos percentuais de classes direção das ondas entre o outono de 2005 a 2018. ....	40
Figura 24: Histograma dos percentuais de classes do período das ondas entre o outono de 2005 a 2018. ....	41
Figura 25: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre o outono de 2005 a 2018. ....	42
Figura 26: Análise da direção em função do período de pico (a) da altura significativa (b). .....	44
Figura 27: Histograma dos percentuais das classes da direção das ondas entre o inverno de 2005 a 2018.....	45
Figura 28: Histograma dos percentuais das classes do período das ondas entre o inverno de 2005 a 2018.....	46
Figura 29: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre o inverno de 2005 a 2018. ....	47
Figura 30: Análise da direção em função do período de pico e da altura significativa..	49
Figura 31: Histograma dos percentuais das classes de direção das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.....	50
Figura 32: Histograma dos percentuais das classes do período das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.....	51

Figura 33: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.....	52
Figura 34: Análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b). .....	54
Figura 35: Altura significativa média e seus respectivos desvios padrão, estimados a partir da série temporal de 13 anos.....	55
Figura 36: Período de pico médio e seus respectivos desvios padrão. ....	56
Figura 37: Batimetria interpolada juntamente com a grade utilizada no DELFT3D. Profundidades são indicadas como valores positivos na representação do Delft3D.....	57
Figura 38: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha para os 13 anos simulados.....	61
Figura 39: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW).....	62
Figura 40: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e b) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N). .....	63
Figura 41: Distribuição sazonal da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) Verão, b) Outono. ....	64
Figura 42: Distribuição sazonal da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) Inverno, b) Primavera. ....	65
Figura 43: Mapa de distribuição da força da onda ao redor da ilha durante 13 anos (2005-2018).....	69
Figura 44: Mapa de distribuição da força da onda de acordo com as informações dos cenários a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW), c) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e d) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N). ....	70
Figura 45: Mapa de distribuição da média sazonal da força da onda a) Verão b) Outono. ....	71
Figura 46: Mapa de distribuição da média sazonal da força da onda a) Inverno, b) Primavera.....	72
Figura 47: Mapa de distribuição da velocidade orbital geral para a Ilha de Trindade. ...	74

Figura 48: Mapa de distribuição da velocidade orbital da onda de acordo com os cenários a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW), c) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e d) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N).....	75
Figura 49: Mapa de distribuição da velocidade orbital da onda sazonalmente a) Verão, b) Outono, c) Inverno e d) Primavera. ....	76
Figura 50: Comparação dos dados obtidos no presente trabalho com os dados obtidos por Calliari et al., 2016. ....	77

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação da intensidade da onda baseada no cálculo da força. ....	18
Tabela 2: Resultados da análise estatística para o modelo WW3.....	21
Tabela 3: Resultados da análise estatística para o modelo SWAN. ....	25
Tabela 4: Medidas estatísticas para os 13 anos simulados. ....	28
Tabela 5: Distribuição em classes das direções analisadas. ....	28
Tabela 6: Padrões típicos extremos do período de pico no intervalo de 2005 a 2018....	30
Tabela 7: Padrões típicos extremos da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018. .....	31
Tabela 8: Divisão trimestral do ano utilizado para a definição do clima de ondas sazonal. .....	33
Tabela 9: Padrão típico e extremo do período de pico no intervalo de 2005 a 2018. ....	36
Tabela 10: Padrões típicos extremos do período no intervalo de 2005 a 2018. ....	37
Tabela 11: Padrões típicos e extremo do período de pico no intervalo de 2005 a 2018. ....	41
Tabela 12: Padrões típicos e extremo da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018. .....	42
Tabela 13: Padrões típicos e extremo do período no intervalo de 2005 a 2018. ....	46
Tabela 14: Padrões típicos e extremo da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018. .....	47
Tabela 15: padrões típicos extremos do período no intervalo de 2005 a 2018. ....	51
Tabela 16: Padrões típicos e extremo do período no intervalo de 2005 a 2018. ....	52
Tabela 17: Cenários escolhidos para utilização no modelo.....	58
Tabela 18: Cenários utilizados como entrada no modelo.....	59
Tabela 19: Cenários sazonais utilizados como entrada no modelo. ....	60
Tabela 20: Tabela de classificação da força de onda de acordo com os cenários modelados.....	66

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	4
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	4
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
3.1.	ONDAS .....	5
3.2.	MODELAGEM NUMÉRICA DE ONDAS.....	7
4.	ÁREA DE ESTUDO .....	9
4.1.	FATORES METEOCEANOGRÁFICOS .....	10
4.2.	GEOMORFOLOGIA.....	12
5.	METODOLOGIA .....	15
5.1.	DADOS DISPONÍVEIS .....	15
5.1.1.	BATIMETRIA .....	15
5.1.2.	DADOS DE ONDA .....	15
5.2.	CLIMA DE ONDAS .....	15
5.3.	MODELAGEM NUMÉRICA DE ONDAS.....	16
5.4.	FORÇA DE ONDA.....	17
6.	RESULTADOS.....	19
6.1.	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	19
6.2.	CLIMA DE ONDAS.....	28
6.3.	CARACTERIZAÇÃO SAZONAL.....	33
6.3.1.	VERÃO.....	35
6.3.2.	OUTONO.....	40
6.3.3.	INVERNO.....	45
6.3.4.	PRIMAVERA .....	50
6.4.	CARACTERIZAÇÃO INTERANUAL.....	55
6.5.	MODELAGEM NUMÉRICA.....	57
6.5.1.	BATIMETRIA .....	57
6.5.2.	CENÁRIOS.....	58
6.5.3.	FORÇA DE ONDA.....	66
6.5.4.	VELOCIDADE ORBITAL JUNTO AO FUNDO.....	73
7.	DISCUSSÃO.....	77
8.	CONCLUSÃO .....	83
9.	REFERÊNCIAS .....	85

## 1. INTRODUÇÃO

A ocupação da zona costeira, assim como o seu uso, depende primordialmente do entendimento da dinâmica e dos fatores que influenciam a mesma. Essa dinâmica é resultado da interação de diversos componentes que resultam nas feições morfológicas presentes, como por exemplo a integração de fatores continentais, oceânicos e atmosféricos. Essas variações estão sujeitas a ação de agentes motrizes e passivos de origem antrópica e/ou natural (Neves, 2010). Os processos físicos nestas zonas são derivados da superposição de efeitos de vento, marés, correntes, ondas, configuração morfológica da costa, além de outros fatores. Portanto, o processo de transformação de ondas geradas ao largo até a zona costeira tem implicações importantes e que afetam diretamente a morfologia da costa (Komar, 1998).

Em ilhas oceânicas o processo geralmente tende a ser o mesmo que em áreas continentais, sendo sua morfologia afetada por fatores como ventos, ondas e correntes. Esses processos começam a influenciar o comportamento costeiro a partir da base da antepraia, sendo definida como o limite externo da “camada limite costeira”, variando de acordo com o clima de ondas e tendo a praia como o limite mais interno (e.g. Calliari et al., 2003). A troca de sedimento entre esses dois limites é responsável pelas modificações praias e todo esse processo ocorre através da zona de arrebentação (Calliari et al., 2003).

De acordo com o mesmo autor, o clima de ondas de águas profundas influencia diretamente a zona de arrebentação e as variações temporais no estado da praia dependem principalmente do regime ondulatório e das modificações que essas ondas sofrem à medida que se deslocam em direção a águas rasas. Além disso o grau de exposição da costa à ação das ondas também possui grande importância para a ecologia desse tipo de ambiente, diversos autores relacionam a abundância, distribuição e adaptação de organismos em costas rochosas e arenosas à energia das ondas que atingem esses locais (e.g. Vasconcellos et al., 2007; Gibbons, 1988; Gaylord, 1999; Friedlander et al., 2003)

A hidrodinâmica de uma praia juntamente com a morfologia está interligada e evolui ao mesmo tempo pois uma influencia a outra. A interação entre as ondas incidentes, modos ressonantes de oscilação, fluxos permanentes e aperiódicos que resultam dos fluxos gerados por marés e ondas e da arrebentação são fatores que resultam na hidrodinâmica de uma praia o que afeta diretamente os sedimentos praias e ocasionam gradientes espaciais e temporais em seu transporte (Wright & Short, 1984).

As ondas, ao se aproximarem da costa, sofrem uma série de transformações, uma vez que passam a interagir com o fundo e sua energia começa a ser dissipada. Este processo ocasiona a remobilização de sedimentos, o que pode contribuir para uma modificação morfológica local, além disso, a velocidade orbital da onda junto ao fundo também pode influir diretamente em organismos bentônicos locais, tendo, portanto, esse fator uma grande relevância ecológica.

A arrebentação da onda, ao atingir a costa, é responsável pelo transporte de sedimento ao longo da praia, influenciando de modo direto a morfologia local (Komar, 1996). Desse modo, as ondas podem ser consideradas de grande relevância na dinâmica costeira. Portanto, a determinação do clima de ondas possui uma importância fundamental para o planejamento de uso desta área, assim como a definição de áreas de risco para usuários, planejamento de construções de estruturas, entendimento da distribuição e comportamento da fauna local, além do conhecimento da hidrodinâmica para fins de navegação.

De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (1998), a determinação do clima de ondas de uma região consiste na quantificação de padrões temporais na agitação marítima da área. A agitação marítima, por sua vez, pode ser determinada a partir da coleta de dados em campo, porém por depender de equipamentos, financiamento e recursos humanos este tipo de aquisição pode se tornar uma tarefa difícil. Desse modo, utiliza-se a modelagem numérica do fenômeno aliado às observações em campo como uma alternativa, pois permite prever as características do clima de ondas de determinada região a curto, médio e longo prazo sem esbarrar em dificuldades operacionais e econômicas (Matos, 2014).

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma descrição detalhada do clima de ondas que atinge a Ilha de Trindade e a propagar esses resultados para todo seu entorno a partir do modelo numérico SWAN. Essas informações, além de trazerem o conhecimento a respeito do clima de ondas que atinge a região, fornecem subsídios para o entendimento da evolução desses perfis costeiros e contribuem com informações para outros trabalhos realizados na ilha, uma vez que se trata de uma área de importância estratégica nacional e que ainda se encontra pouco estudada na área de dinâmica costeira.

A Ilha de Trindade apresenta 21,7 km de linha de costa dividida em regiões rochosas, sendo essa a característica predominante em todo seu entorno; e arenosas. As praias arenosas apresentam sedimentos inconsolidados caracterizados por depósitos de minerais pesados (placers) que são selecionados a partir da energia do espraiamento das

ondas de acordo com a densidade dos grãos sendo depositados principalmente na linha de máxima preamar (Castro, 2010). Além dos sedimentos inconsolidados caracterizados por depósitos de minerais pesados a composição sedimentar das praias da Ilha de Trindade também consiste em depósitos continentais, compostos por conglomerados e cascalhos; e costeiros compostos por cascalhos de praia, areia, conglomerado e arenito, areia eólica e recifes de vermetídeos (Angulo et al., 2018). A ilha apresenta relevo assimétrico sendo a face sudoeste mais íngreme que a nordeste (SECIRM, 2017), observa-se que há uma maior erosão causada pelas ondas provenientes de sul e sudoeste que chegam a região com uma alta energia, isso ocorre porque as mesmas não conseguem dissipar sua força ao aproximarem-se da ilha devido as altas profundidades observadas no local (Almeida, 1961).

O entendimento da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar das praias da Ilha de Trindade é de extrema importância pois algumas delas possuem papel significativo no ciclo de vida de certos organismos marinhos, como por exemplo, das tartarugas marinhas que utilizam o local com finalidade reprodutiva. A partir da definição do clima de ondas e de sua propagação ao entorno da ilha é possível entender melhor essa dinâmica e até que ponto os recifes e as rochas de praia presentes interferem nesses processos. Estudos mostram que o uso da modelagem numérica com essa finalidade possibilita a compreensão do potencial de mobilidade sedimentar de uma região (e.g. Lavenere & Siegle, 2019). Esses resultados atrelados ao uso de SIG permitem um estudo detalhado desses processos em pontos específicos da ilha, permitindo compreender a implicação da ação das ondas em cada região e fornecendo subsídios para estudos posteriores.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Caracterizar o clima de ondas na Ilha de Trindade, tanto ao largo como a sua propagação e transformação até atingir a costa da ilha, relacionando o nível de energia que atinge a ilha com as suas principais feições morfológicas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar do clima de ondas que atinge a Ilha de Trindade;
- Definir a distribuição da força de ondas no entorno da ilha;
- Definir as velocidades orbitais das ondas junto ao fundo no entorno da ilha.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Ondas

Ondas são perturbações causadas pelo movimento de energia proveniente de uma fonte através de algum meio, no caso das ondas oceânicas este meio é a água do mar e as fontes podem ser diversas como por exemplo, o vento, movimentação de placas tectônicas, entre outros. Portanto, as características das ondas dependem das forças que as controlam.

As ondas podem ser classificadas a partir da força perturbadora que possibilita seu desenvolvimento, pela força restaurada que busca o retorno ao estado inicial anterior a perturbação e por seu comprimento de onda (Garrison, 2010).

No oceano, cinco tipos básicos de ondas podem ser distinguidos: ondas sonoras, ondas de capilaridade, ondas internas, ondas planetárias e ondas de gravidade (Massel, 1996). As ondas de interesse no presente trabalho são as ondas superficiais de gravidade, estas ocorrem por meio da transferência da energia do vento para a superfície marinha (Komar, 1998).

Os principais elementos da onda, de acordo com Garrison (2010), são: a crista da onda, sendo essa a parte mais alta da onda acima do nível da água; a cava que se trata do espaço entre uma crista e outra e está localizado abaixo do nível da água; a altura da onda que é definida a partir pela distância vertical entre uma crista e uma cava; o comprimento de onda que é a distância entre duas cristas sucessivas e o período da onda que é o tempo necessário para a onda se mover a distância de um comprimento de onda (Figura 1).

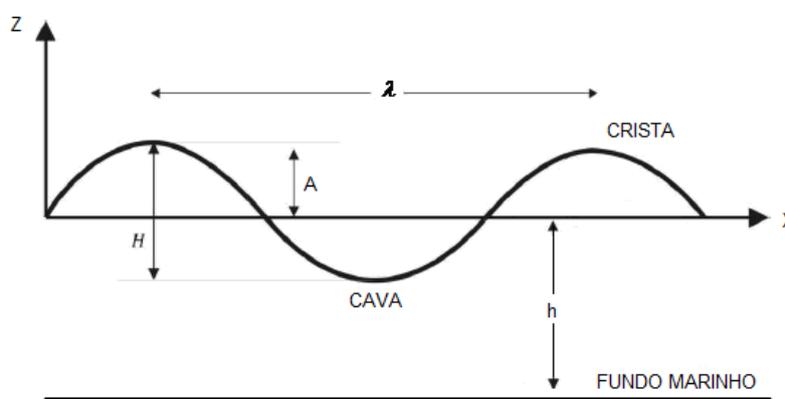


Figura 1: Elementos da onda. Legenda:  $\lambda$  = comprimento de onda;  $H$ : altura da onda;  $A$ : amplitude da onda;  $h$ : profundidade local.

As ondas que viajam no oceano possuem características distintas das que chegam a uma praia, pois ondas oceânicas não sofrem influência do fundo marinho, portanto ao chegarem em águas rasas as mesmas sofrem modificações, tais como, a refração, difração, empinamento e quebra e essas modificações ocorrem devido a fatores como, a variação da profundidade, a presença de rochas ou promontórios e os diferentes formatos das praias. A refração, que ocorre quando parte da onda começa a se deslocar sobre águas mais rasas e o atrito com o fundo faz com que sua velocidade diminua e ocorra um desvio na sua trajetória (Wright et al., 1999); a difração que ocorre quando a onda sofre desvio ou espalhamento a partir de um obstáculo durante sua propagação e que ao atingir a praia pode influenciar na distribuição de sedimentos no local (Klein et al., 2010).

Além disso, conforme as ondas se deslocam em direção a costa, há um aumento na sua amplitude à medida que a profundidade diminui, isso ocasiona uma variação na relação entre a altura da onda e seu comprimento, essa relação é conhecida como esbeltez da onda ou empinamento (do inglês, wave steepness), quando ocorre um aumento de “esbeltez” e a onda atinge altura maior do que a razão 1:7 do seu comprimento de onda ela arrebenta dissipando energia (Wright et al., 1999; Garrison, 2010).

As partículas de água de uma onda que se propaga em regiões profundas percorrem uma trajetória circular, tendo, na superfície, esse deslocamento a mesma direção de propagação da onda e o diâmetro orbital sendo correspondente à altura da onda, abaixo da superfície as partículas se movem com direção oposta ao movimento de propagação e o diâmetro orbital diminui exponencialmente, até tornar-se desprezível não havendo deslocamento de partículas de água nessa profundidade (The Open University, 1999).

Quando as ondas alcançam profundidades menores que metade do comprimento de onda, a mesma passa a interagir com o fundo e as orbitas passam a apresentar a forma elipsoide. Portanto, ondas que viajam em águas rasas apresentam uma velocidade orbital de fundo e influenciam diretamente os sedimentos e organismos presentes podendo realizar mobilização (Soulsby, 1997).

### **3.1.1. Ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento**

Ondas superficiais de gravidade são o principal agente físico que comanda a hidrodinâmica dos ambientes marinhos, representando a principal e mais constante fonte de transporte de energia no mar.

As ondas de gravidade são formadas na interface oceano-atmosfera, tem o vento como força geradora principal e força restauradora a aceleração da gravidade. Na fase inicial de formação, o vento produz turbulência na superfície do mar que origina pequenas ondas, conhecidas como ondas capilares, as mesmas apresentam comprimento de onda de alguns centímetros (Phillips, 1957).

Conforme o vento continua a agir sobre a superfície do mar, essas pequenas ondas evoluem e passam a apresentar maiores orbitas circulares, altura, comprimento e período. Os fatores que afetam o crescimento das ondas são força do vento, duração e a pista do vento que é a distância continua sobre a qual o vento sopra sem alteração na sua direção (Garrison, 2010).

As ondas ainda podem ser classificadas como vagas (*sea*) e marulhos (*swell*), as ondas que são geradas por ventos locais, dá-se o nome de *sea* ou vaga, sendo caracterizada por picos irregulares e pequenos períodos. O marulho ou *swell* é definido como ondas que foram geradas em regiões remotas, sendo mais regulares, com períodos maiores (Holthuijsen, 2007).

### **3.2. Modelagem numérica de ondas**

O clima de ondas de uma região pode ser definido a partir da obtenção de dados in situ ou a partir de modelagem numérica. Para fornecer uma boa estimativa do estado de mar a longo prazo por meio de boias, por exemplo, é preciso manter as mesmas em funcionamento por longos períodos o que demanda bastantes recursos financeiros, por essa razão a modelagem de ondas torna-se mais viável para obtenção destes dados. Existem diferentes tipos de modelos de ondas cada um com seu uso específico.

Para simulação de ondas em regiões costeiras dois tipos de modelos numéricos possuem destaque, os que resolvem a fase e os que utilizam a média da fase da onda (*phase averaging*), de acordo com Ris (1997). Os modelos que resolvem a fase utilizam a elevação superficial da água, resolvendo as componentes das ondas individualmente, de

acordo com Booij (1999), estes requerem uma resolução espacial correspondente a uma pequena fração do comprimento de onda e por esse motivo é limitado a domínios relativamente pequenos. Os modelos de *phase averaging* são baseados na equação do balanço de energia espectral e leva em consideração a geração, dissipação e interações onda-onda (Ris, 1997; Booij et al., 1999). Os modelos de terceira geração são esses, determinados através do espectro de energia que descreve a distribuição da energia ao longo da frequência e direção de propagação da onda.

Os modelos de terceira geração apresentam grande evolução principalmente no que diz respeito a interação entre oceano-atmosfera e entre as próprias ondas, isso possibilita uma melhor representação tanto em situações de mudanças súbitas de vento como na interação entre ondas *sea* e *swell* (Cruz, 2004).

O SWAN, modelo desenvolvido por Booij et al. (1999), vem sendo aplicado com o objetivo de obter estimativas do espectro de ondas em regiões costeiras, lagos e estuários, o mesmo utiliza dados de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos (Ris, 1997). Este modelo foi utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho, juntamente com o WW3 que possibilitou a determinação do clima de ondas ao largo da área de estudo.

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A Ilha de Trindade se encontra no extremo oriental da cadeia de montanhas submarinas denominada Vitória-Trindade, distante 1.160 quilômetros do continente (Figura 2). A ilha surgiu há aproximadamente três milhões de anos através de atividades vulcânicas, surgindo a partir do embate entre a água fria e o magma incandescente, nas profundezas do oceano atlântico, a ilha é a mais recente, heterogênea e topograficamente variada ilha oceânica do Brasil (Schaefer & Oliveira, 2015). A ilha está localizada entre os paralelos 20°29' e 20°32' S e entre os meridianos 29°21' e 29°17' W e possui uma área de aproximadamente 10 km<sup>2</sup>.

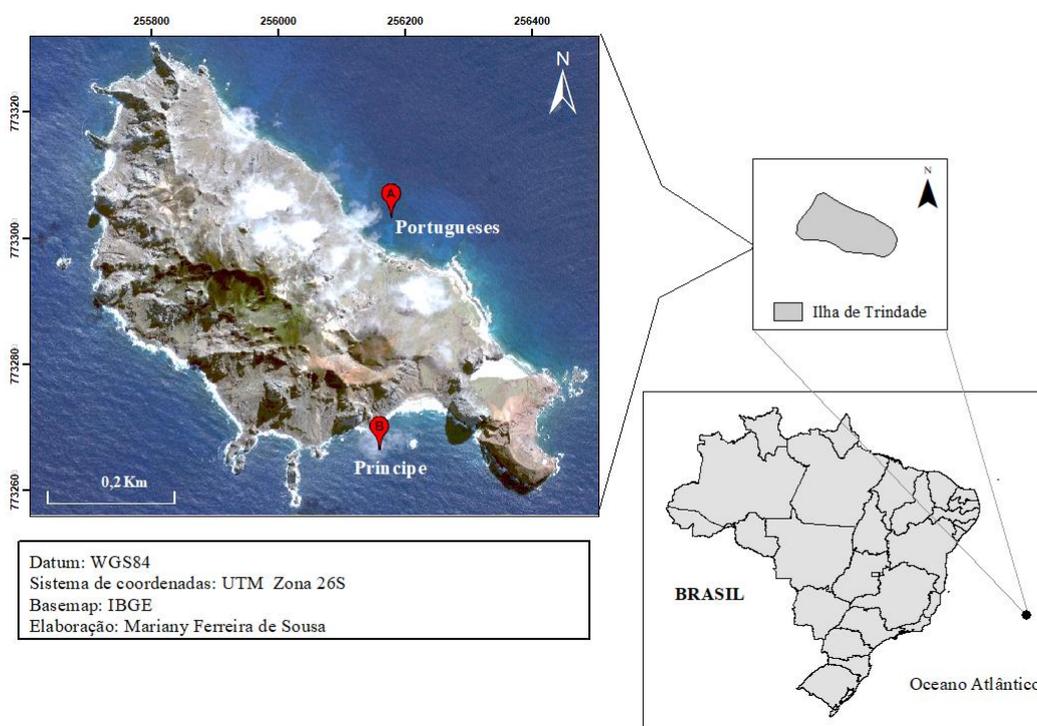


Figura 2: Mapa de localização da Ilha de Trindade.

A ilha abriga uma diversificada fauna marinha com recifes de algas calcáreas, invertebrados, peixes e aves, além disso devido a sua natureza vulcânica possui uma morfologia de fundo propícia a atrair cardumes de peixes o que pode ser bastante significativo economicamente a partir de atividades de pesca. As praias da Ilha de Trindade são formadas por areia e cascalho além de depósitos de antigas praias com

composição semelhante às encontradas atualmente e às vezes cimentadas por carbonato de cálcio, constituindo arenitos e conglomerados (Angulo et al., 2018).

#### 4.1. Fatores meteoceanográficos

O clima predominante na região, de acordo com Mohr et al (2009), é denominado oceânico tropical, caracterizado por alto teor de umidade e temperaturas elevadas. A variação altimétrica da ilha propicia a ocorrência frequente do fenômeno conhecido localmente por Pirajá, nomenclatura dada para a chuva orográfica (Alves, 1998).

Os ventos predominantes no local são os alísios de leste-sudeste apresentando baixa variação sazonal com magnitude típica de 5 m/s (Farias, 2019) (Figura 3, 4).

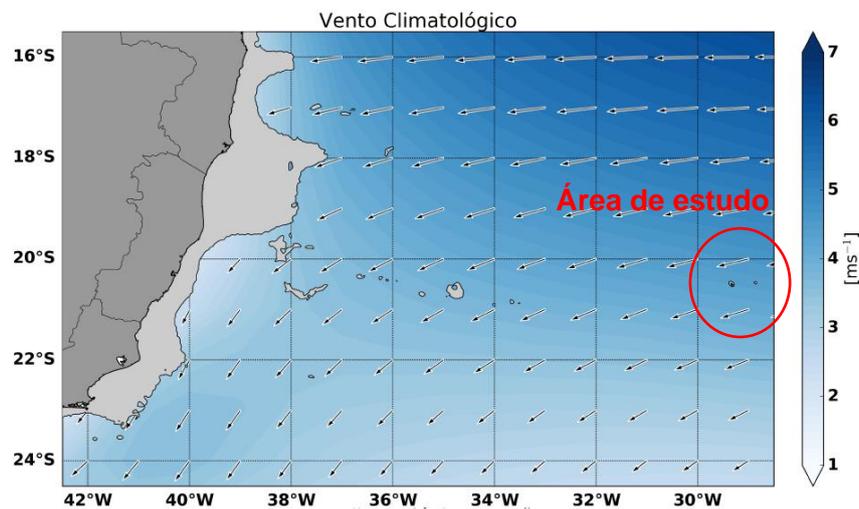


Figura 3: Mapa climatológico anual dos ventos a 10m de altura. Fonte: Farias (2019).

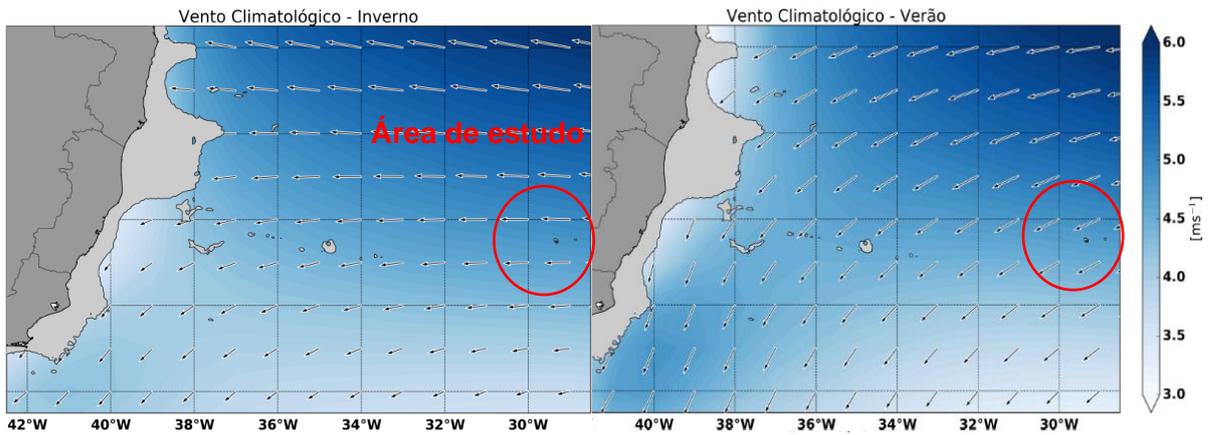


Figura 4: Mapa climatológico sazonal dos ventos a 10m de altura. A) Inverno. B) Verão. Fonte: Farias (2019).

Devido a passagem de frentes frias oriundas de latitudes mais altas, principalmente no inverno, também podem ser observados ventos do quadrante sul/sudeste, esse fator afeta bastante as condições marítimas (Alvarenga, 2018). A agitação marítima próxima à Ilha de Trindade é ocasionada por vagas, ondas originadas por ventos locais e por marulhos que são formados a partir de sistemas atmosféricos associados a ventos com direção e intensidade constantes e que se propagam a longas distâncias. A altura média das ondas varia entre 1 e 2 m (BNDO-DHN/CHM).

De acordo com as tábuas de marés da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) sistema de maré local é de micro maré semi-diurna, com amplitude de 1,3 m. As praias da Ilha de Trindade são caracterizadas pela ausência de bancos arenosos na zona de “surf”, isso faz com que um leve aumento na altura das ondas ocasione grandes variações no perfil de praia deste local (SECIRM, 2017)

De acordo com Calliari et al. (2016), baseado em resultados de reanálise através do modelo WW3 para um período de 10 anos (2005-2014), 33,7% das ondas chegam de sul, 23,4% de sudoeste, 18,1% leste, 10,3% norte e 10,1% de sudeste com o restante (4,4%) de noroeste, nordeste e oeste. Um perigo recorrente na ilha é um evento chamado localmente de “onda camelo”, sendo essa onda maior que 2 m de altura e com períodos superiores a 12 s, estas ondas diminuem de comprimento ao se aproximar da costa e sofrem aumento rápido de altura podendo galgar paredões rochosos, tal processo depende da profundidade local (SECIRM, 2017).

## 4.2. Geomorfologia

A Ilha de Trindade é uma porção emersa de um edifício vulcânico cristalino (Marques, 2019). A estrutura geológica da ilha pode ser caracterizada por três domínios: o Domínio Plano Axial que representa as maiores elevações da ilha caracteriza-se por relevos de morros delimitados por vales profundos; o Domínio de Vertentes Costeiras identificada a partir de superfícies rochosas abruptas que seguem em direção ao mar, onde se erguem grandes picos fonolíticos; e o domínio litorâneo (Almeida, 1961 apud Patrício 2012).

A coluna estratigráfica de Almeida (1961) engloba as praias modernas que apresentam sedimentos arenosos, calcarenitos, cascalhos e conglomerados; os aluviões com cones aluviais; além dos depósitos de talude e depósitos de terraços marinhos com arenitos de praia e cascalhos (Figura 5). Patrício (2012) corrobora com essas informações indicando a presença de unidades sedimentares do quaternário.

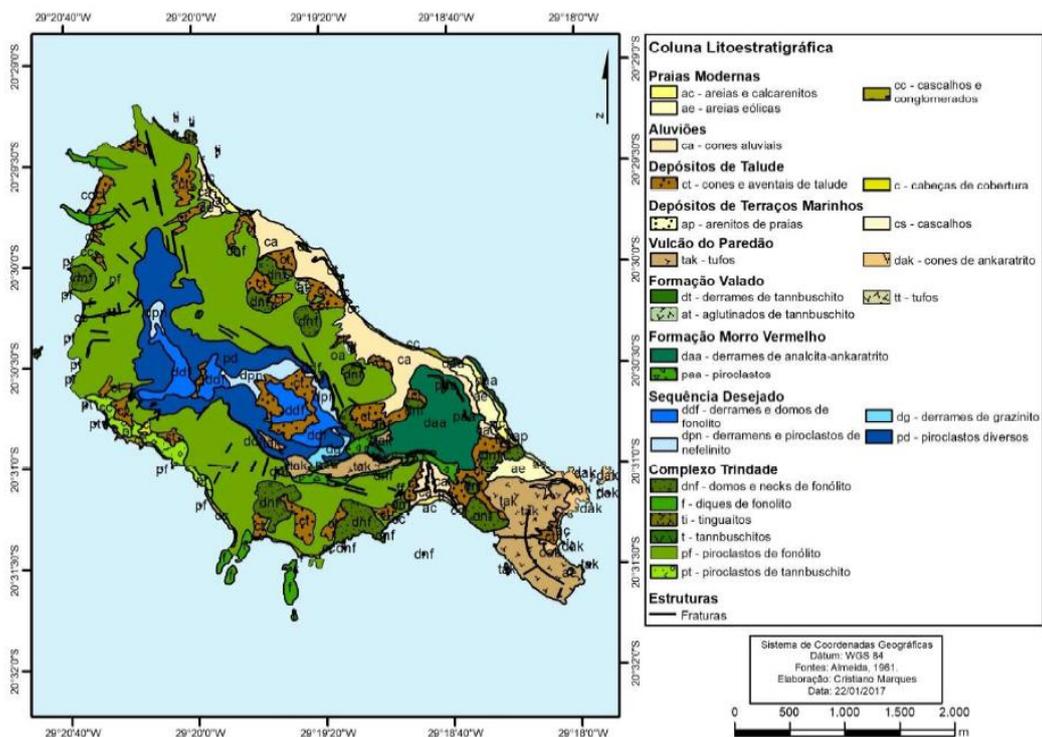


Figura 5: Mapa geológico da Ilha de Trindade modificado de Almeida (1961). Fonte: Marques (2019).

A ilha pode ser dividida em dois setores, sendo o primeiro voltado para o quadrante leste-nordeste e o segundo na face voltada para o continente com orientação oeste-sudoeste. O primeiro setor abrange as praias dos Cabritos, Portugueses, Calheta, Andradas, Tartarugas, Parcel, Túnel e a praia da ponta do Túnel; O setor dois engloba as praias do Príncipe, do Lixo, Farrilhões, praia do Eme, praia da Cachoeira, praia do Noroeste, praia das Orelhas e Ponta do Norte (Figura 6).



Figura 6:Localização das praias ao redor da Ilha de Trindade.

A estrutura geológica da ilha ocasionou uma diferenciação entre o lado leste e oeste. Apenas algumas praias da ilha apresentam sedimentos arenosos e a maioria com essa característica encontra-se no setor 1 voltado para a face leste-nordeste, os sedimentos desse setor variam de fino a médio.

De acordo com Calliari et al., (2016), o setor 2 ou setor oeste da ilha apresenta predominância de praias mistas de areia, seixos e rochas. Essas informações também foram observadas por Castro (2010) que descreve as praias do Príncipe e do Eme como praias compostas por sedimento de granulação de média a grossa. Os sedimentos presentes nas praias são resultado da erosão da formação rochosa adjacente a cada uma delas, sendo composta principalmente por minerais pesados como magnetita e concreções de hematita (Almeida 1961; Clemente et al. 2006).

Ademais, grande parte do litoral conta com a presença de recifes que são constituídos principalmente por algas calcáreas e vermetídeos, a presença desses recifes representa um controle topográfico, além de ser uma fonte de sedimento que influencia a energia e a circulação hidrodinâmica local, pois mantem a zona de arrebenção afastada da região praias agindo assim como um muro de proteção (Barth, 1958) e (Calliari et al., 2016). A aquisição de dados de velocidade orbital das ondas junto ao fundo é importante pois ajuda a entender a influência das mesmas nesses organismos.

## **5. METODOLOGIA**

### **5.1. DADOS DISPONÍVEIS**

#### **5.1.1. Batimetria**

A obtenção de dados batimétricos de qualidade da área de estudo é essencial para a obtenção de resultados confiáveis na aplicação da modelagem de ondas. Para o presente trabalho foram utilizados dados batimétricos obtidos pela carta náutica número 21 do ano de 2019 fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN, da Marinha do Brasil. Como os dados são disponibilizados por meio de arquivos de imagens georreferenciadas foi necessária a digitalização dos valores das profundidades com suas respectivas coordenadas. Esse procedimento foi realizado através do programa Surfer 9 (Golden Software). Posteriormente esses dados foram importados e interpolados na grade do modelo numérico Delft3D.

#### **5.1.2. Dados de onda**

A série temporal, para a região da Ilha da Trindade, foi extraída do modelo global de geração de ondas WW3, da NOAA/NCEP (Tolman 1997, 1999). Este modelo utiliza como forçantes os campos de ventos produzidos pelo modelo atmosférico global AVN do NCEP e possui uma base de dados de aproximadamente 15 anos, com resolução temporal de 3 h. O tratamento estatístico dos resultados de ondas extraídos permitiu a definição do clima de ondas da área de estudo. A análise dos picos energéticos possibilitou a quantificação da intensidade e frequência de eventos de alta energia ao longo do período estudado (2005-2018).

### **5.2. CLIMA DE ONDAS**

O clima de ondas pode ser definido como um conjunto de condições predominantes de ondas que atingem uma região particular do oceano em um determinado período (Inman & Masters, 1994). A série temporal para a região da Ilha da Trindade foi extraída do modelo global de geração de ondas WW3, desenvolvido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Este modelo utiliza como forçantes os campos de

ventos produzidos pelo modelo atmosférico global AVN do NCEP e possui uma base de dados de aproximadamente 15 anos, com resolução temporal de 3 h.

A clima de ondas do local de estudo foi definida a partir do tratamento estatístico dos parâmetros de período de pico ( $T_p$ ), altura significativa ( $H_s$ ) e Direção de pico ( $D_p$ ) extraídas do modelo. Os mesmos foram adquiridos com um intervalo de 3h, entre os anos de 2005 a 2018 a partir de 2 pontos distintos, o primeiro mais ao norte (20 S; 29 W) apresentando um total de 40408 ocorrências e um ponto mais ao sul (21 S; 29 W) com o mesmo número de ocorrências do ponto norte com resolução espacial de 0,5 graus.

Para definição dos eventos extremos que ocorrem na área de estudo foi utilizado o cálculo do percentil 90, onde considera-se apenas as ocorrências que estão no decil superior da distribuição do conjunto de dados de onda (Holthuijsen, 2007).

### **5.3. MODELAGEM NUMÉRICA DE ONDAS**

A propagação das ondas em direção a ilha foi realizada através da aplicação do modelo numérico DELFT3D (desenvolvido pela Deltares), mais especificamente o seu modulo de onda (WAVE). Acoplado ao modulo está o modelo de terceira geração, SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). O SWAN é capaz de calcular a interação de ondas provenientes de todos os ângulos e em diferentes frequências, o mesmo simula a propagação de ondas; geração de ondas a partir do vento; interações não lineares entre onda-onda e dissipação de energia para uma determinada topografia, fluxo e nível de água.

As condições de contorno utilizadas para a propagação de ondas no modelo foram obtidas a partir da definição do clima de onda local e os dados de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção ( $D$ ) foram utilizados como entrada no modelo. Para geração da grade foram utilizados os dados de batimetria extraídos da carta náutica local fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). O domínio do modelo compreende a região oceânica ao redor da ilha até a isóbata de 500 m com uma grade de resolução entre 120 e 40 m, sendo a menor resolução na região offshore e a maior no entorno da Ilha (Figura 7).

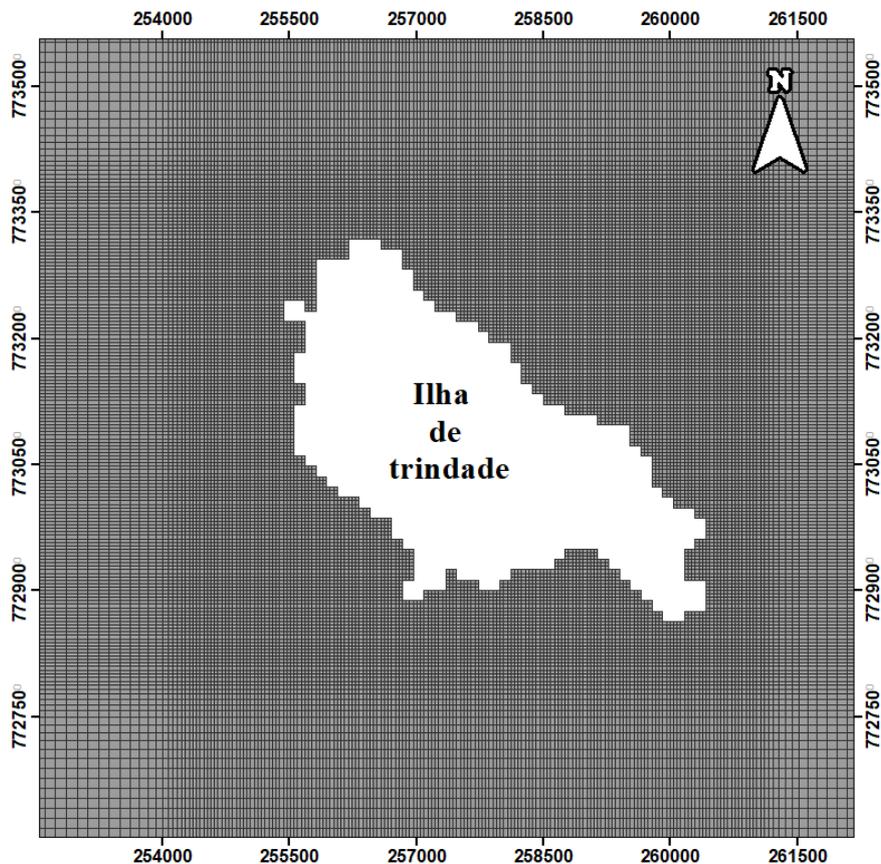


Figura 7: Grade utilizada no programa DELFT3D para o modelo de propagação de ondas.

Os resultados extraídos permitiram determinar as estimativas de força de onda, os setores da ilha que apresentam maiores alturas significativas, além da velocidade orbital junto ao fundo que é um aspecto importante para o estudo do transporte de sedimentos e distribuição de habitats bentônicos na região. Esses resultados também permitiram realizar o mapeamento da distribuição da força de ondas no entorno da ilha, aspecto fundamental para o entendimento de sua evolução e comportamento.

#### 5.4. FORÇA DE ONDA

A força da onda, expressa em kW/m, é um parâmetro que leva em consideração o efeito sinérgico do período de onda e da altura podendo ser relacionado ao volume praiar de acordo com Short (1978). O fluxo de energia da onda pode ser obtido pelo produto entre sua energia por unidade de área e a velocidade de grupo da onda (Holthuijsen, 2007).

Este parâmetro foi calculado utilizando os dados de Hs e Tp obtidos a partir dos resultados do modelo e por meio da Equação 1.

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \text{ onde,} \quad (1)$$

$\rho$ : densidade da água (1027 kg/m<sup>3</sup>)

g: aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)

H: altura de onda local (m)

T: período de onda (s)

Por fim, os cenários foram classificados de acordo com Costa (2015) em intervalos especificados na Tabela 1.

<b>Intensidade</b>	<b>Força da onda (kW/m)</b>
Extrema	$P \geq 50.000$
Intensa	$50.000 > P \geq 40.000$
Forte	$40.000 > P \geq 30.000$
Moderada	$30.000 > P \geq 20.000$
Fraca	$20.000 > P \geq 10.000$
Calma	$P < 10.000$

Tabela 1: Classificação da intensidade da onda baseada no cálculo da força.

## 5.5. VELOCIDADE ORBITAL DA ONDA JUNTO AO FUNDO

Os valores da velocidade orbital foram obtidos a partir do resultado da modelagem realizada por meio de uma função do módulo WAVE. O modelo faz o cálculo considerando a altura da onda, o período e a profundidade local (Komar & Miller, 1973).

## 6. RESULTADOS

### 6.1. VALIDAÇÃO DO MODELO

Em 2018 foram coletados dados de correntes e ondas em dois pontos próximos à Ilha de Trindade (Figura 8), um adjacente à Praia do Príncipe com coordenadas  $20^{\circ}31'28.36''S$ ;  $29^{\circ}19'0.79'' W$  e outro à Praia dos Portugueses com coordenadas  $20^{\circ}30'11.08''S$ ;  $29^{\circ}18'55.62''W$ . Os dados foram coletados a partir de dois PACD's (Perfiladores Acústicos de Correntes por efeito Doppler) fundeados de forma a medir informações de correntes na coluna d'água, ondas e nível do mar. Os dados foram medidos ao longo de aproximadamente 2 meses além de fornecerem uma série temporal de aproximadamente 2 meses. Esses dados, em adição as informações do clima de ondas local no período de coleta, foram utilizados para a calibração e validação do modelo numérico de propagação de ondas aplicado.

O processo de calibração inclui analisar a diferença entre os parâmetros obtidos a partir do modelo e comparar com os dados reais como, por exemplo, a altura significativa que é considerada um dos parâmetros mais comuns ao validar espectros de onda (Abdalla et al., 2006) com o objetivo de verificar a correlação entre eles e consequentemente a performance do modelo WW3 e SWAN.

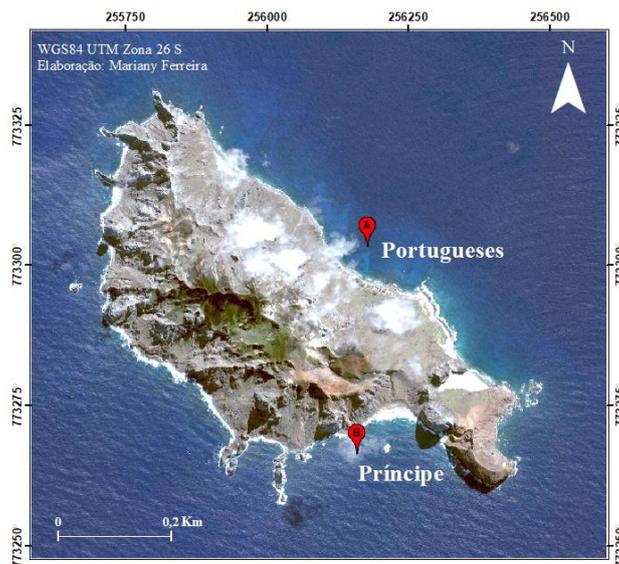


Figura 8: Localização dos fundeios dos PACD's em frente à Praia do Príncipe e Portugueses na Ilha de Trindade.

Para quantificar a qualidade do ajuste entre os resultados de modelos e medições reais é necessário o uso de parâmetros estatísticos específicos. O presente trabalho utilizou parâmetros disponíveis na literatura (Lalbeharry, 2001; Melo et al., 2008) os quais são definidos a seguir.

- I) A diferença entre a altura significativa modelada ( $H_m$ ) e a altura significativa observada ( $H_o$ );

$$\Delta H = H_m - H_o \quad (2)$$

- II) O valor médio da diferença entre os resultados do modelo e as medições (“Bias”) esse parâmetro mede o desvio médio entre os resultados do modelo e os dados reais, sendo positivo, o modelo tende a superestimar os dados medidos e se negativo, o modelo tende a subestimar as observações.

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H \quad (3)$$

- III) O Erro Médio Quadrático (RMSE) sendo definido como a raiz quadrada do valor médio do quadrado da diferença entre os dados modelados e as medições in situ, esse parâmetro indica a magnitude do erro dos valores modelados em relação aos valores medidos avaliando assim a acurácia dos resultados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta H^2} \quad (4)$$

- IV) O índice de espalhamento (SI), definido como a razão entre o RMSE e o valor médio das medições ( $\bar{o}$ ) esse índice fornece o grau de confiança nos resultados do modelo.

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{o}} \quad (5)$$

- V) Correlação linear (ou correlação de Pearson – r), mede a relação estatística entre duas variáveis contínuas. Se a associação entre os elementos não for linear, o coeficiente não será representado adequadamente. O coeficiente de correlação de Pearson pode ter um intervalo de valores de +1 a -1. Quanto maior for o valor absoluto do coeficiente, mais forte é a relação entre as variáveis. Para a correlação de Pearson, um valor absoluto de 1 indica uma relação linear perfeita. A correlação perto de 0 indica que não há relação linear entre as variáveis.

O modelo WW3 reproduziu bem as condições das ondas que chegam a Ilha, os resultados da validação indicaram que a bias dos dados coletados na praia do Príncipe e na praia dos Portugueses é 0,305 m e 0,316 m ao comparar os dados coletados com o ponto Sul dos dados modelados, respectivamente, e 0,258 m e 0,269 para o ponto Norte dos dados modelados. Já o RMSE foi de 0,547 e 0,432 ao comparar com o ponto Sul e 0,536 e 0,410 ao comparar com os dados referentes ao ponto Norte. O índice de espalhamento (SI) foi de 0,399 e 0,316 para o ponto Sul e 0,391 e 0,300 para o ponto Norte. Os valores de R foram aproximadamente 50% e todos se apresentaram positivos o que evidencia a boa representação do estado de mar pelo modelo (Tabela 2).

Parâmetro	SUL				NORTE			
	Príncipe		Portugueses		Príncipe		Portugueses	
	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
<b>Ô</b>	1.37	9.460	1.367	6.45	1.37	9.46	1.367	6.45
<b>Bias</b>	0.305	3.106	0.316	6.099	0.269	3.123	0.269	6.168
<b>RMSE</b>	0.547	4.355	0.432	6.861	0.536	4.424	0.41	6.943
<b>SI</b>	0.399	0.460	0.316	1.064	0.391	0.468	0.3	1.076
<b>R</b>	0.550	0.444	0.522	0.457	0.500	0.433	0.469	0.447

Tabela 2: Resultados da análise estatística para o modelo WW3.

Ao comparar os dados coletados nas duas praias observa-se que os valores obtidos pelo modelo no ponto sul representam melhor a praia do Príncipe enquanto os valores obtidos no ponto norte representam melhor a realidade da praia dos Portugueses. A comparação entre a serie temporal medida e a modelada pode ser observada nas Figuras 9, 10 e 11. O modelo WW3 disponibiliza os dados em intervalos de 3 horas enquanto os

dados obtidos em campo a partir do PACD são disponibilizados com intervalo de 1 hora, então a fim de tornar os dados mais uniformes e compatibilizar as duas séries de informações os mesmos foram organizados em intervalos de 3h.

A análise estatística revelou que os dados modelados mostram uma tendência de superestimar os parâmetros da onda, essa tendência também foi observada anteriormente em outras implementações por Tolman et al. (2002) e Melo et al. (2008), sugerindo que este é um comportamento típico do Modelo WW3. Analisando os dados pode-se concluir que, de maneira geral, os resultados obtidos comparam-se de maneira satisfatória, principalmente considerando que os dados utilizados como condição de contorno são baseados em resultados do modelo global de geração de ondas WW3.

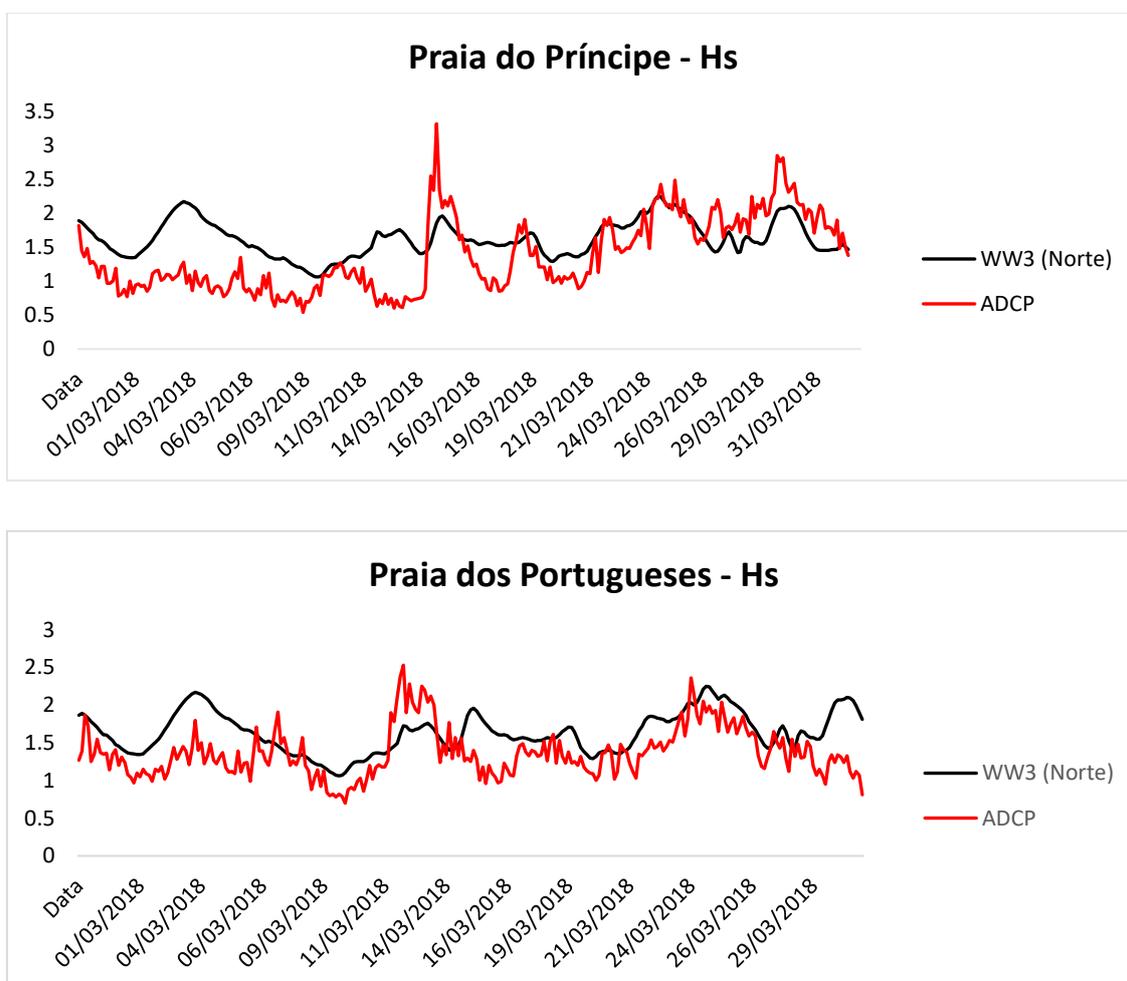


Figura 9: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do WW3 no ponto Norte (preto). a) Altura significativa observada na praia do Príncipe. b) Altura significativa observada na praia dos Portugueses.

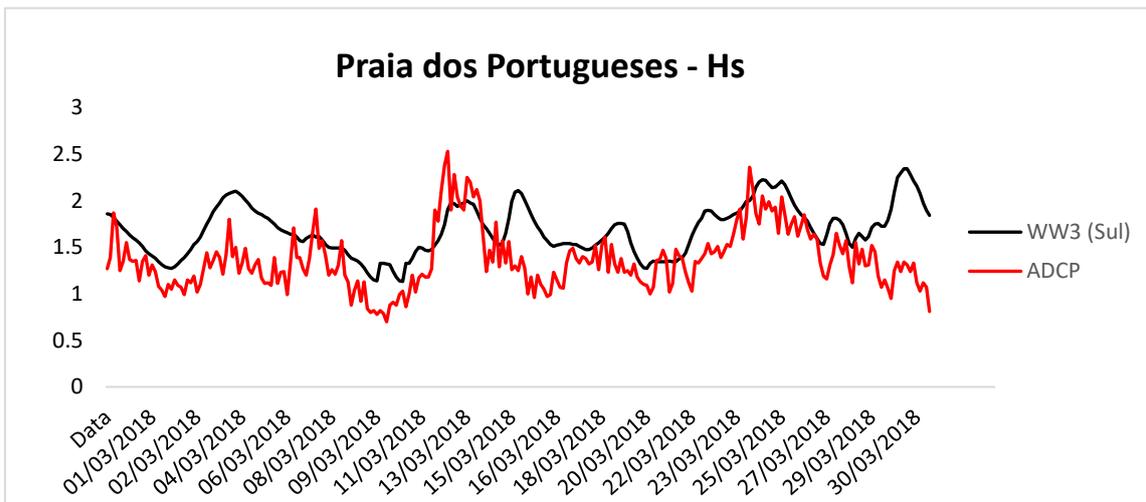
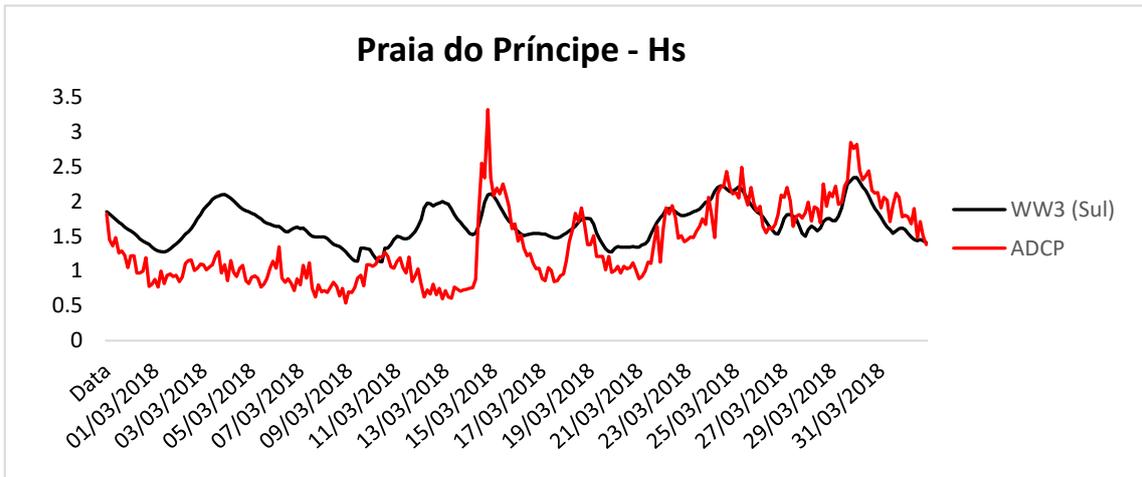


Figura 10: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do WW3 no ponto Sul (preto).  
 a) Altura significativa observada na praia do Príncipe. b) Altura significativa observada na praia dos Portugueses.

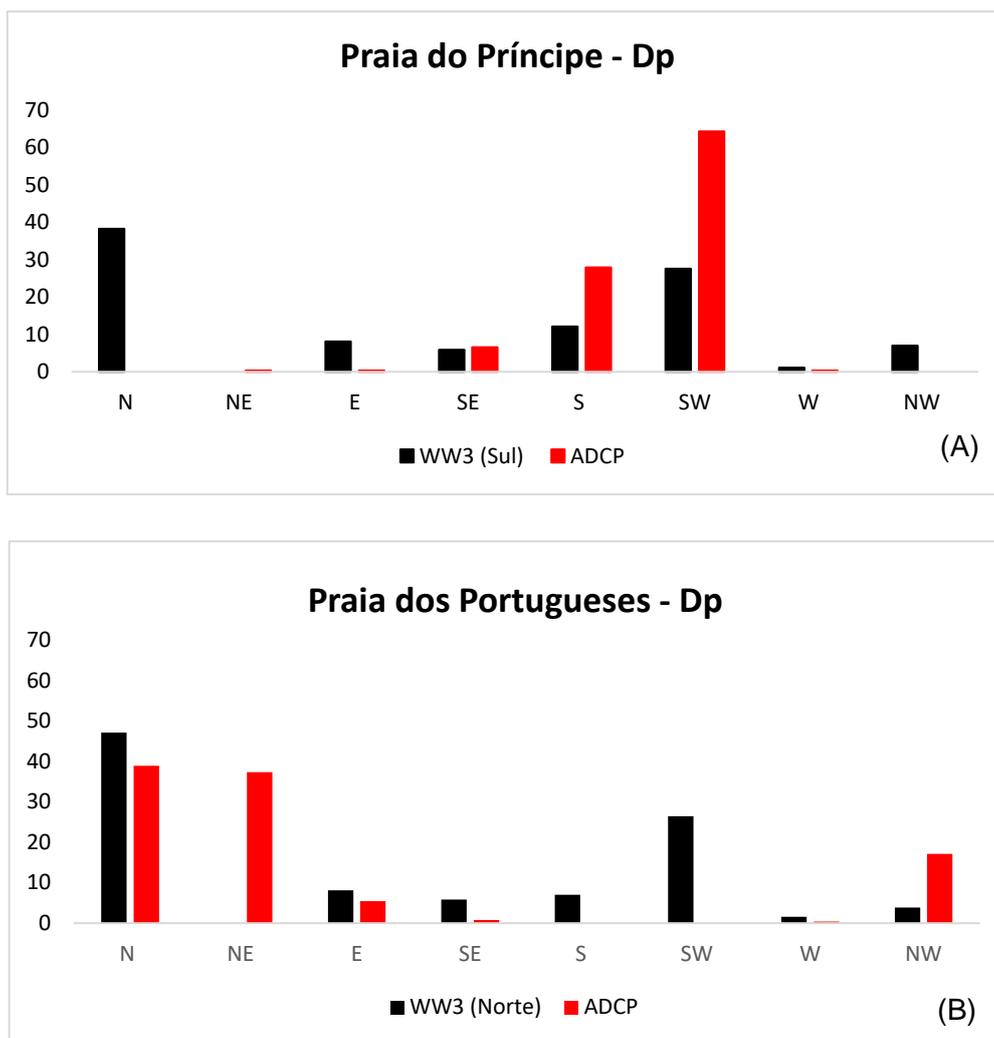


Figura 11: Comparação da frequência de ocorrência da Dp modelada (preto) na praia do Príncipe (a) e na praia dos Portugueses (b) e observada (vermelho) *in situ*.

A validação dos dados obtidos a partir da geração de ondas pelo modelo SWAN foi realizada por meio da seleção de dois pontos na grade com as mesmas coordenadas das praias onde foram coletados os dados *in situ* e os valores de altura significativa e período de pico foram extraídos do modelo, tornando possível assim realizar as análises estatísticas entre os parâmetros de onda modelados pelo SWAN e os parâmetros registrados pelo PACD. Os parâmetros estatísticos analisados foram os mesmos para o WW3 e podem ser observados na Tabela 3.

Parâmetro	Príncipe		Portugueses	
	Hs	Tp	Hs	Tp
$\bar{O}$	1.3	9.520	1.37	6.49
Bias	-0.051	-1.205	-0.278	-1.007
RMSE	0.431	1.571	0.369	1.929
SI	0.332	0.165	0.27	0.297
R	0.6026	0.897	0.7019	0.778

Tabela 3: Resultados da análise estatística para o modelo SWAN.

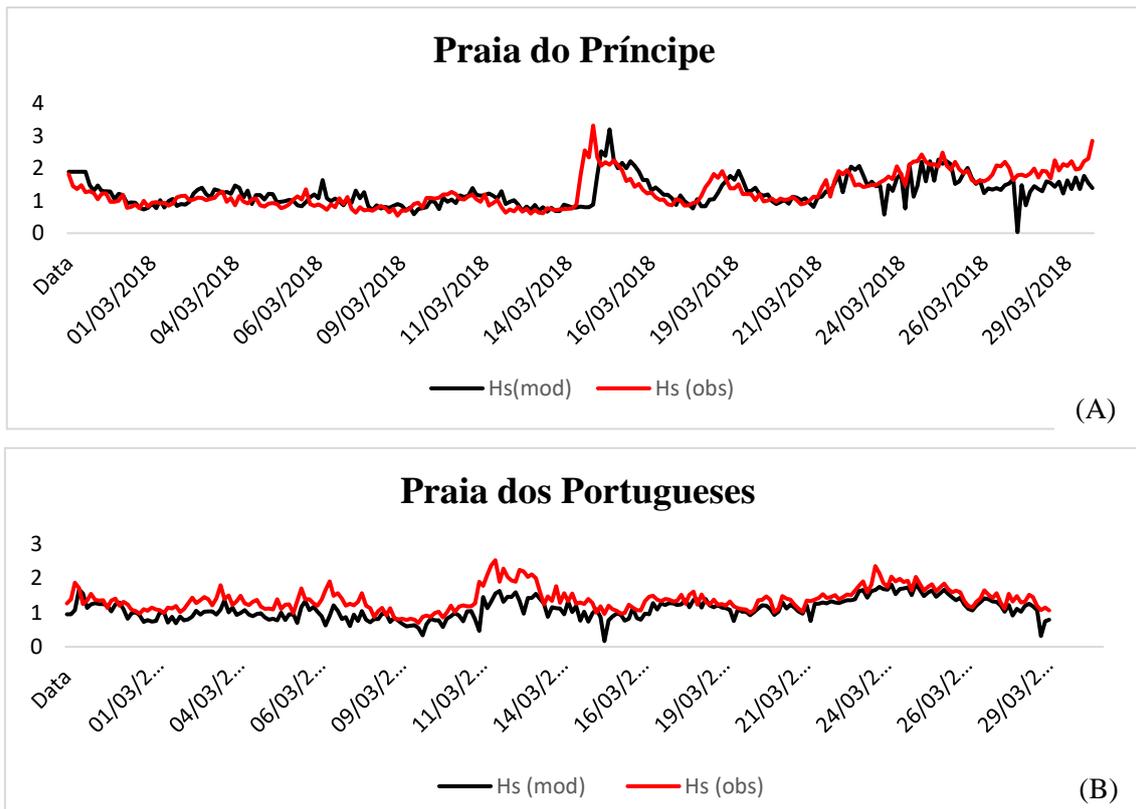


Figura 12: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do SWAN (preto). a) Altura significativa na praia do Príncipe. b) Altura significativa na praia dos Portugueses.

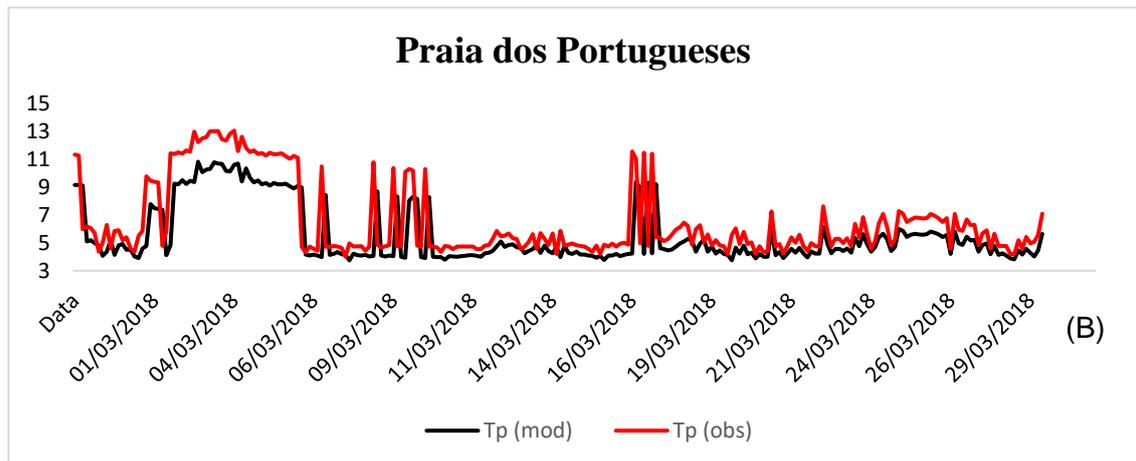
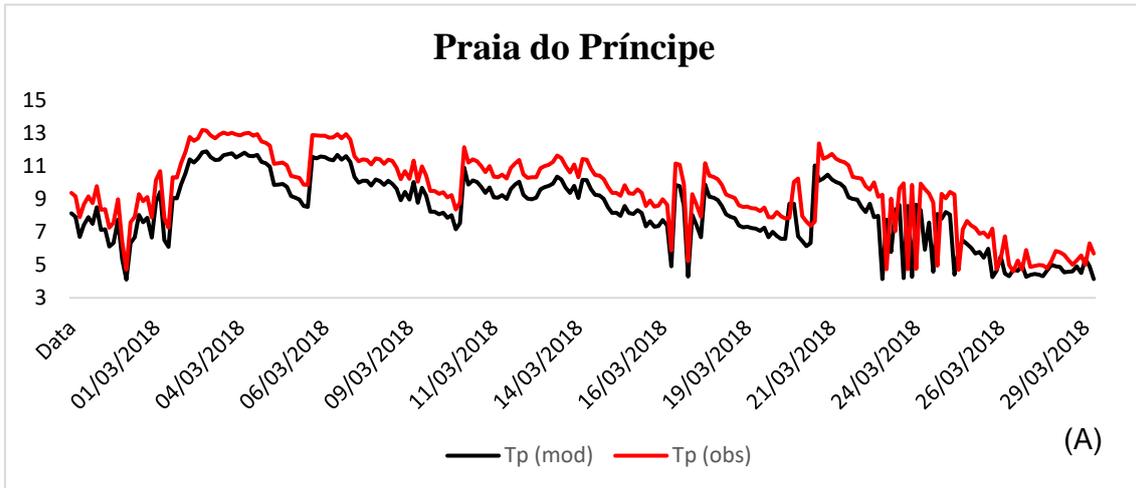


Figura 13: Série temporal medida (vermelho) e modelada a partir do SWAN (preto). a) Período de pico na praia do Príncipe. b) Período de pico na praia dos Portugueses.

Para validação do modelo de onda SWAN foi utilizada uma série temporal de ondas de fevereiro a março de 2018 com intervalo de dados de 3 horas. No geral observa-se que o modelo reproduz muito bem os parâmetros medidos. A análise estatística mostra uma tendência de subestimar a altura significativa da onda e o período de pico, tais características podem ser observadas nas figuras 12 e 13. A tendência de subestimar dados de onda também foi verificada por outros autores como Marinho (2020).

Conforme pode ser observado na Tabela 3, os valores médios da altura significativa e do período de pico medidos foram 1,30 m e 9,50 s para a praia do Príncipe e 1,37 m e

6,49 s para a praia dos Portugueses, respectivamente, em comparação com os dados médios modelados que foram 1,25 m e 8,32 s para praia do Príncipe e 1,09 m e 5,50 s para a praia dos Portugueses, respectivamente. O valor de SI ficou próximo de 30% o que indica confiança para a modelagem numérica. Os resultados indicaram um erro médio (RMSE) de 0,43 e 0,36 m para a Hs e 1,57 e 1,92 s para Tp na praia do Príncipe e Portugueses, respectivamente. Observa-se que o coeficiente de correlação obtido para a altura significativa foi de 60% na praia do Príncipe e 70% para a praia dos Portugueses, para o período de pico o R foi de aproximadamente 89% para a praia do Príncipe e 77% para a praia dos Portugueses.

Após a calibração e validação do modelo os resultados mostraram confiança nos dados trabalhados e baixo índice de erro. O modelo foi capaz de reproduzir com acurácia a agitação marinha para o período analisado, o que permitiu que a simulação numérica fosse realizada para o entorno da Ilha de Trindade.

## 6.2. CLIMA DE ONDAS

A caracterização do clima de ondas durante o período de estudo (2005 – 2018) pode ser verificada na tabela 1, onde mostra a direção, período médio e altura significativa das ondas, além dos valores máximos e mínimos de cada um desses parâmetros, a variância, o desvio padrão e a amplitude. Os valores extremos foram analisados a partir do cálculo do percentil 90 e pode ser observado na Tabela 4.

Parâmetro	Média	Variância	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	90° percentil
D (°)	SUL	5173.17	71.92	359.95	0.01	359.94	-
Tp (s)	11,1	6.10	2.47	24.81	2.45	22.36	14.29
Hs (m)	2,05	0.39	0.62	5.68	0.54	5.14	2.90

Tabela 4: Medidas estatísticas para os 13 anos simulados a partir do modelo WW3.

- **Direção (D)**

Foram analisados 40408 dados. Para obter os resultados esses dados foram agrupados em 8 classes de acordo com a Tabela 5. A porcentagem de cada classe foi realizada considerando o total de dados do intervalo estudado (2005-2018).

Classes	Intervalo	Ponto	% ocorrência
1	(337.5 - 22.5)	N	10.57
2	(22.5 - 67.5)	NE	0.95
3	(67.5 - 112.5)	E	20.44
4	(112.5 - 157.5)	SE	9.96
5	(157.5 - 202.5)	S	32.34
6	(202.5 - 247.5)	SW	22.09
7	(247.5 - 292.5)	W	1.19
8	(292.5 - 337.5)	NW	2.46

Tabela 5: Distribuição em classes das direções analisadas.

A direção predominante está localizada na classe 5 que representou 32,34% dos dados analisados mostrando que a direção predominante é a sul, a segunda mais representativa foi a classe 6 (SW) com 22,09% dos dados e a seguinte, classe 3 (E) com 20,44% dos valores. A direção de menor incidência foi a NE (classe 2) com apenas 0,95% dos dados.

- **Período de pico (Tp)**

Os dados do período médio foram divididos em 9 classes com intervalo de 2s começando por valores menores que 2 até valores maiores ou iguais a 16, a partir disso foi possível fazer a caracterização do clima de ondas e a análise estatística (Figura 14).

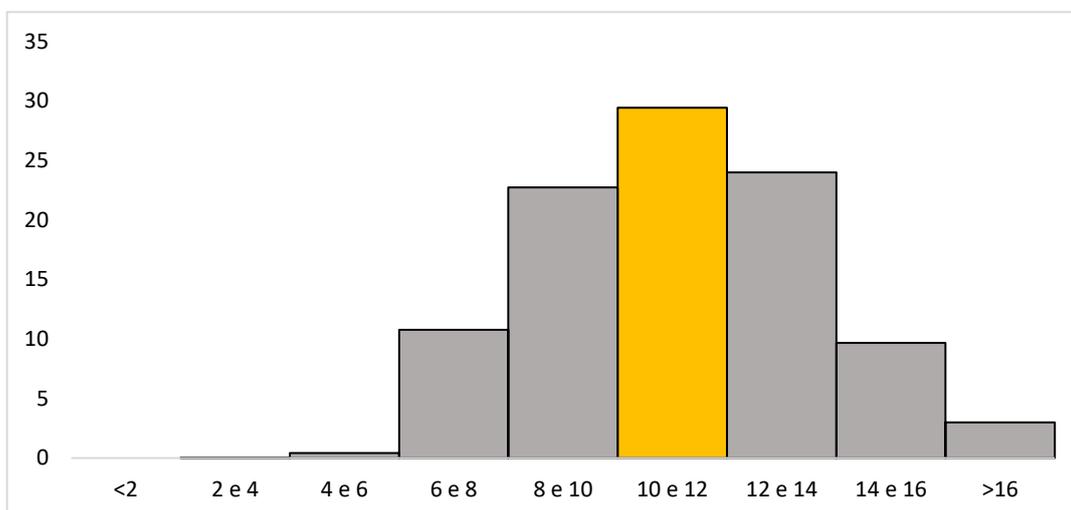


Figura 14: Histograma com o período médio das ondas entre 2005 a 2018.

Os resultados mostram que há bastante variação nos valores do período de pico das ondas incidentes na Ilha, a classe modal que representa o intervalo com maior número de ocorrências apresentou 29,42% dos valores e está presente no intervalo das classes de 10 e 12 s (Tabela 6). O restante dos dados ficou distribuídos entre as demais classes e a segunda mais representativa foi o intervalo entre 12 e 14 s com 23,98% dos dados.

Os casos extremos foram obtidos a partir do cálculo do percentil 90 e abrange os valores acima de 14,3 s compreendendo o intervalo entre 14,3 e 24,9 s no ponto norte, sendo o valor 24,9 s o maior encontrado.

Padrão	Período (s)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[10-12]	29,42
Extremo	Percentil 90%	[14,3 - 24,9]	10

Tabela 6: Padrões típicos extremos do período de pico no intervalo de 2005 a 2018.

- **Altura significativa (Hs)**

A análise estatística dos padrões típicos da altura significativa deu-se a partir da divisão dos valores em classes com diferença de 0,5 m entre si (Figura 15). O padrão típico está compreendido no intervalo de 1,5 a 2 m representando 38,91% dos dados (Tabela 7). Sendo seguido por ondas de 2 a 2,5 m sendo 25,13% dos dados. Os casos extremos analisados a partir do percentil 90 abrange o intervalo de Hs entre 2,9 a 5,28 m. Não foram encontrados valores menores que 0.5 m e maiores que 5,28 m.

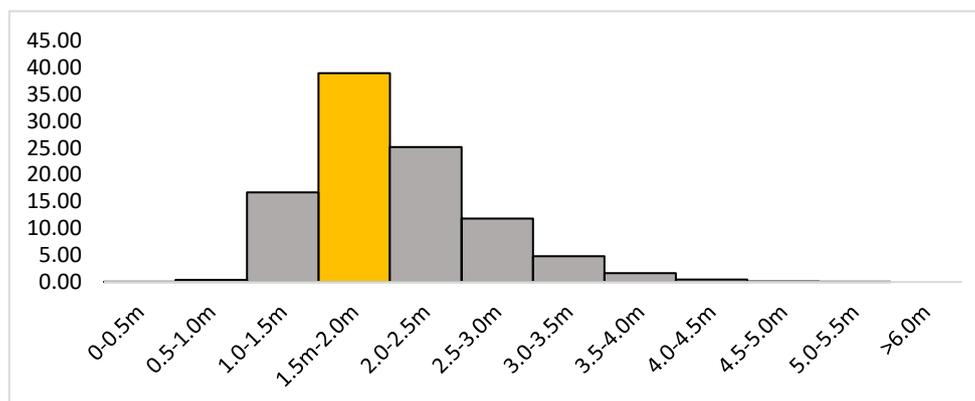


Figura 15: Histograma com a altura significativa média das ondas entre 2005 a 2018.

Padrão	Altura significativa (m)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[1,5 – 2,0]	38,91
Extremo	Percentil 90%	[2,9 – 5,28]	10

Tabela 7: Padrões típicos extremos da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018.

- **Período (Tp) em função da Hs**

Ao analisar o período de pico em função da Hs, é evidenciado que o intervalo típico de Tp (10 a 12 s) é representado por ondas com alturas entre 1,5 e 2,0 m (11,57%) e 2,0 e 2,5 m (7,72%). Os períodos mais significativos após o período típico são representados por ondas com Tp entre 12 e 14 s e com altura significativa entre 1,5 a 2,0 m (8,31%) e 2,0 a 2,5 m (6,09%), seguido por 8 a 10s com Hs entre 1,5 e 2,0 (8,35%) e 2,0 a 2,5 m (5,98%) e Tp entre 6 e 8 s com Hs concentrado principalmente no intervalo de 1,5 e 2,0 m.

- **Direção em função do período**

Os resultados da análise do Tp típico (10 a 12 s) em função da direção mostram que as ondas estão distribuídas principalmente entre as direções Sul (14,43%) e SW (9,42%). Além disso, ondas com período entre 8 e 10s foram provenientes principalmente de E (10,57%) e SE (5,71%) e ondas com período de pico entre 12 e 14 s apresentaram maior concentração na direção S (9,25%) e SW (8,81%). Uma ocorrência isolada, mas relevante, também pôde ser observada em ondas com período entre 6 e 8s na direção E com 8,75% (Figura 16 (a)).

- **Direção em função da Hs**

A partir da análise conjunta da altura significativa em função da direção, pôde-se observar que a classe modal de Hs (1,5 a 2,0 m) concentra-se principalmente na direção Sul com 11,58% dos casos, direção leste sendo representado por 8,43% e Sudoeste com 7,77% das ocorrências (Figura 16 (b)), os resultados mostram a nítida relação com as direções de ondas mais ocorrentes no local de estudo. Além disso, ondas com Hs entre 2,0 e 2,5 m estão associadas a direção S (8,63%), SW (6,34%) e E (5,51%).

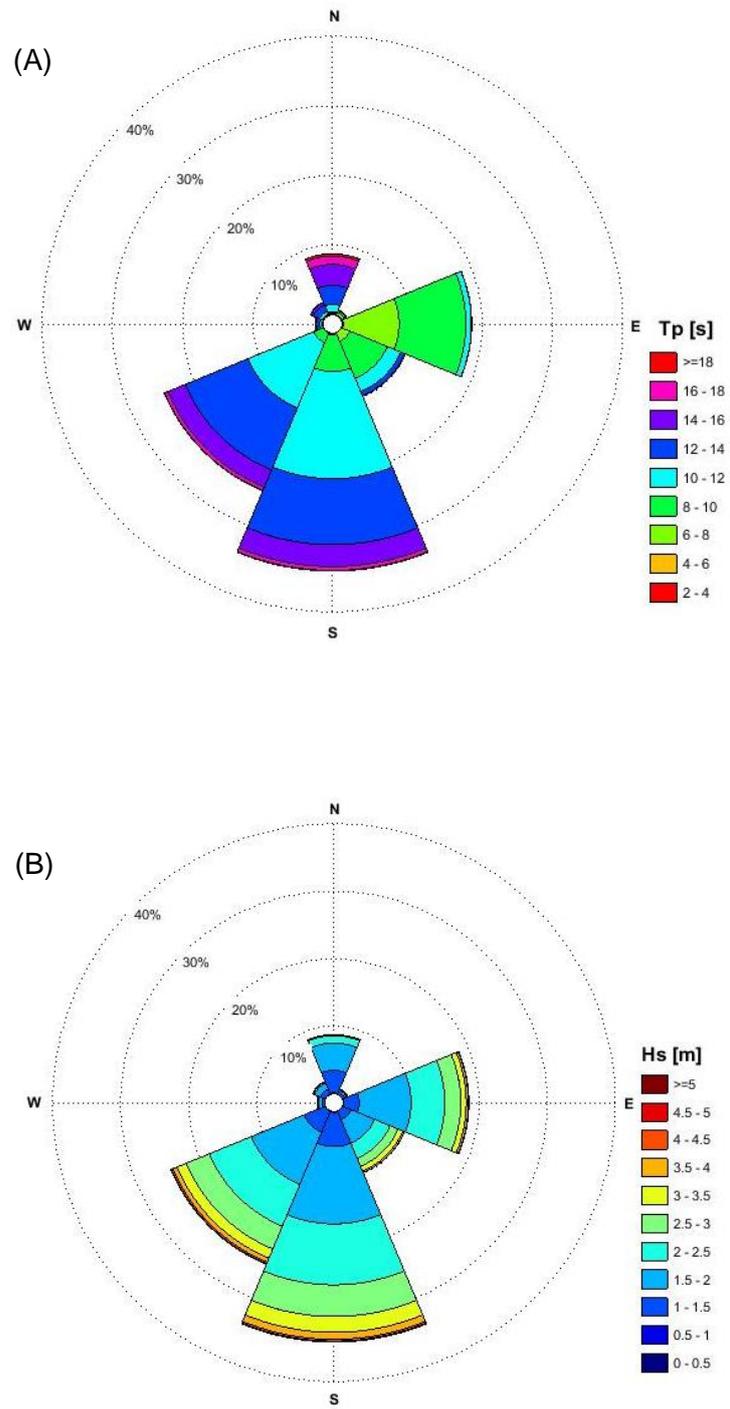


Figura 16: Histograma direcional para a análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b).

### 6.3. CARACTERIZAÇÃO SAZONAL

De forma a caracterizar o clima de onda sazonal, o ano foi dividido em trimestres de acordo com as estações climáticas para o hemisfério sul. O intervalo definido para cada estação pode ser observado a seguir.

<b>Estação</b>	<b>Início</b>	<b>Final</b>
Verão	21 de dezembro	20 de março
Outono	21 de março	20 de junho
Inverno	21 de junho	22 de setembro
Primavera	23 de setembro	20 de dezembro

Tabela 8: Divisão trimestral do ano utilizado para a definição do clima de ondas sazonal.

Os parâmetros analisados foram distribuídos seguindo os mesmos critérios de classificações anteriores, a direção foi dividida em 8 classes, o período dividido em classes com intervalo de 2 s; e a altura significativa dividida em intervalos de 0,5 m iniciando com valores menores ou iguais a 0,5 m até valores maiores que 6 m. O valor total de ocorrências para cada estação foi utilizado para definir os percentuais referentes a cada classe de direção, período e altura. A média dos parâmetros analisados pode ser observada nas figuras 17 e 18. A média mostra que durante o outono e inverno as ondas apresentam os maiores valores de Hs enquanto durante o verão e a primavera os valores de altura significativa foram menores em relação ao período o mesmo apresentou pouca variação no decorrer das estações do ano.

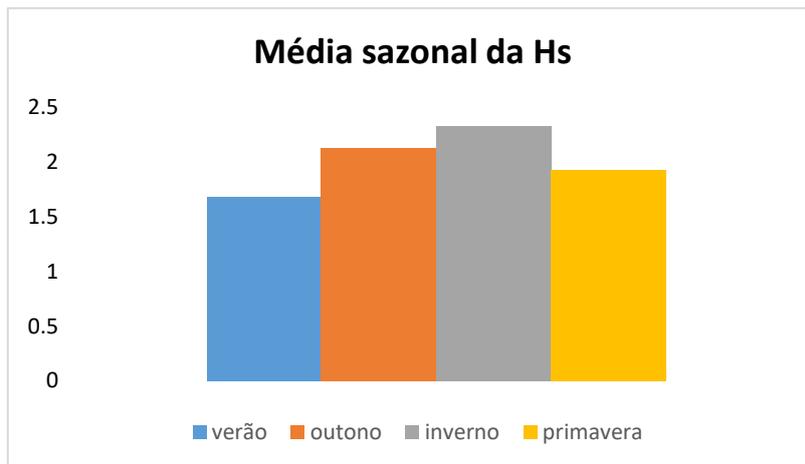


Figura 17: Média sazonal da altura significativa durante as estações no período de estudo.

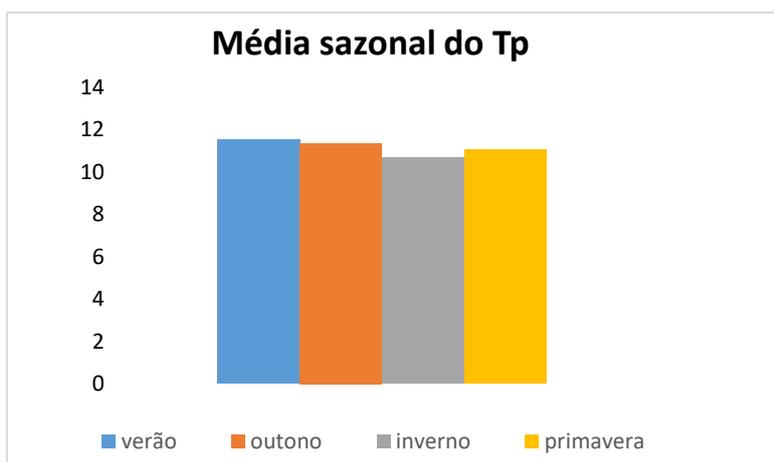


Figura 18: Média sazonal da altura significativa durante as estações no período de estudo.

### 6.3.1. VERÃO

- **Direção (D)**

Houve grande variabilidade em relação a incidência de ondas durante o verão, sendo provenientes principalmente de norte com 23,90%. O total de dados para essa estação foi 9767, a partir da análise estatística observou-se que 21,93% das ondas possuem direção sul, seguido por 21,51% de sudoeste e 16,54% de leste (Figura 19).

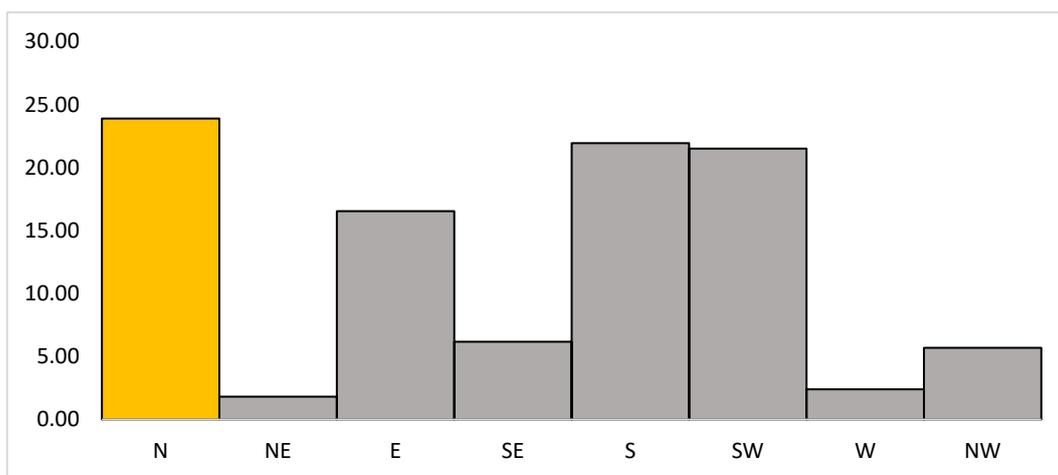


Figura 19: Histograma com as direções médias das ondas entre os verões de 2005 a 2018.

- **Período (Tp)**

Os dados referentes ao período de onda ficaram bem distribuídos entre as classes (Figura 20). A classe de maior ocorrência observada para o período em análise foi a que abrangia valores entre 10 e 12 s (27,66%). O decil superior delimitou a faixa do padrão extremo, a mesma variou entre 14,83 a 24,93. O maior valor encontrado para o período foi 24,93 s (Tabela 9).

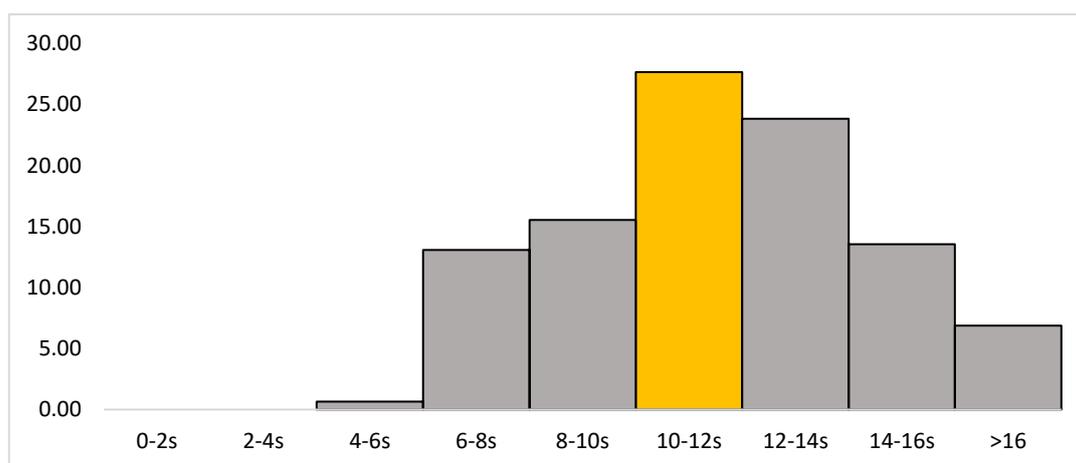


Figura 20: Histograma dos percentuais de classes do período das ondas entre os verões de 2005 a 2018.

Padrão	Período (s)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[10 – 12 s]	27,66
Extremo	Percentil 90%	[14,83 – 24,93]	10

Tabela 9: Padrão típico e extremo do período de pico no intervalo de 2005 a 2018.

- **Altura Significativa (Hs)**

A classe modal referente a altura significativa está localizada entre os valores de 1,5 e 2 m representando (50,80%) dos dados como pode ser observado na Tabela 10, seguida por valores entre 1 e 1,5m (31,41%). A faixa de valores para casos extremos ficou entre 2,2 e 4,3 m. Os valores percentuais das classes restantes podem ser observados na Figura 21. Não houve valores maiores que 4,3 m e apenas (0,03%) ficou entre 4 e 4,3 m.

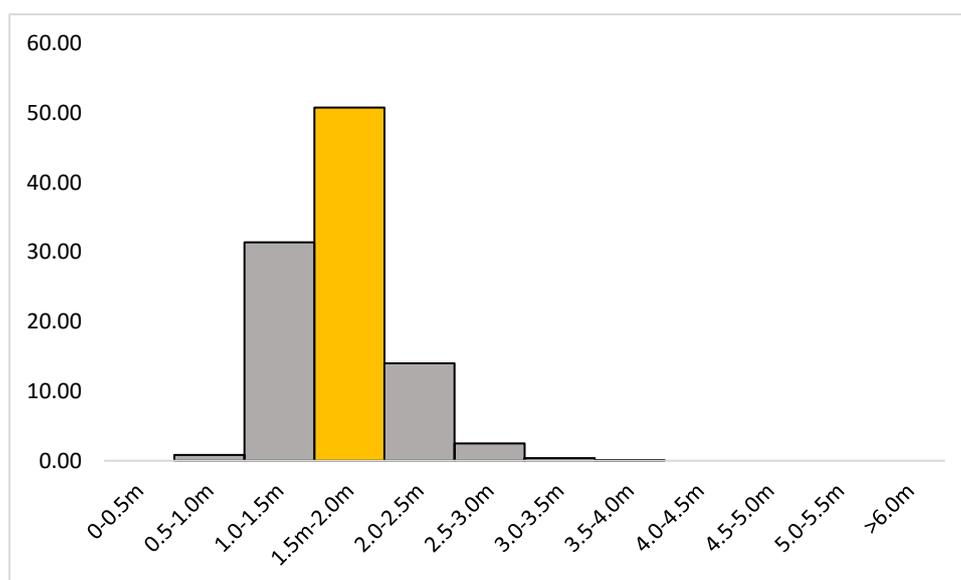


Figura 21: Histograma dos percentuais de classes da altura significativa das ondas entre os verões de 2005 a 2018.

Padrão	Altura significativa (m)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[1,5 – 2,0]	50,80
Extremo	Percentil 90%	[2,2 – 4,3]	10

Tabela 10: Padrões típicos extremos do período no intervalo de 2005 a 2018.

- **Período (Tp) em função da Hs**

Durante o verão ao analisar o intervalo da Hs em função do período de pico (Tp) mais frequente é observado que há uma relação bastante significativa entre a Hs típica que corresponde ao intervalo de 1,5m a 2,0m (50,81%) com o Tp típico que vai de 10 a 12 s (27,66%) representando 14,07% dos dados. Os valores adjacentes estão distribuídos principalmente entre 6 e 16 segundos e concentrados no intervalo da altura significativa mais frequente e no segundo intervalo mais frequente compreendendo valores de Hs entre 1 e 1,5 m concentrado no intervalo entre 8 a 14 segundos.

- **Direção em função do período de pico**

A direção típica no verão é proveniente principalmente de Sul e sudoeste com 21,94% e 21,52 dos valores, respectivamente, 9,91% das ondas de sul e 10,31% das ondas de sudoeste estão associadas ao intervalo do período de pico compreendido entre 10 e 12 segundos, esse intervalo representa 27,66% dos casos totais para o verão (Figura 22 (a)).

- **Direção em função da Hs**

Na análise da direção em função da Hs fica explícita a relação do intervalo típico de Hs com as direções das ondas com maior ocorrência na região (Norte), mostrando que ondas com Hs entre 1,5 e 2m estão associadas a ondas provenientes de Norte representando 11,88% dos casos. As Hs típicas estão associadas, respectivamente, à ondas provenientes de Norte (11,88%), SW (11,06%), Leste (10,13%), Sul (9,72%) (Figura 22 (b)).

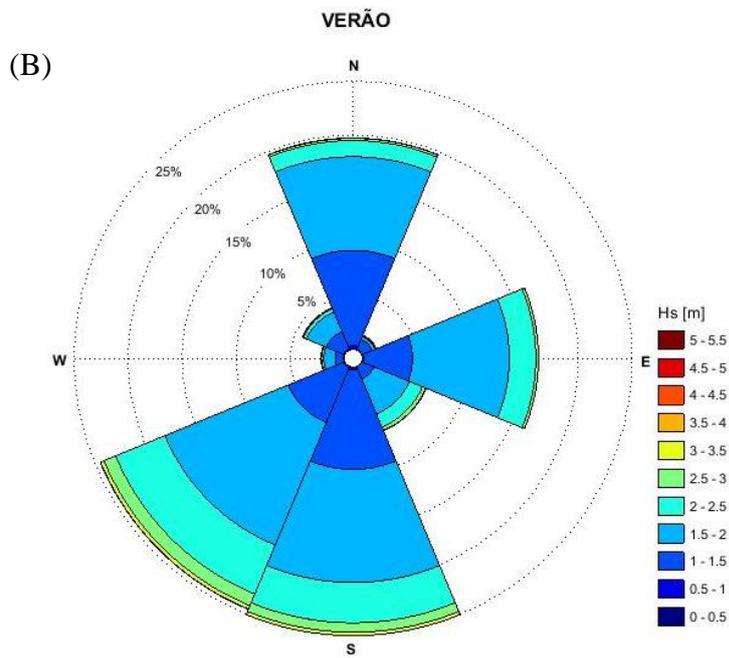
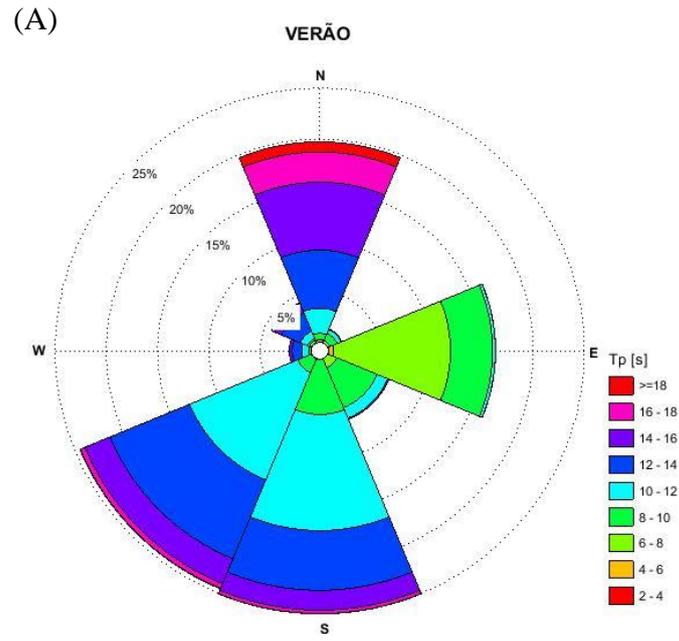


Figura 22: Análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b).

### 6.3.2. OUTONO

- **Direção**

Durante o outono as ondas apresentam direção predominante sul, sendo composto por, aproximadamente, 40,47% do total de 10304 valores, seguida por ondas de sudoeste com 25,92% dos dados e da direção leste com 14,63%. Os valores percentuais das demais classes podem ser observados no Figura 23.

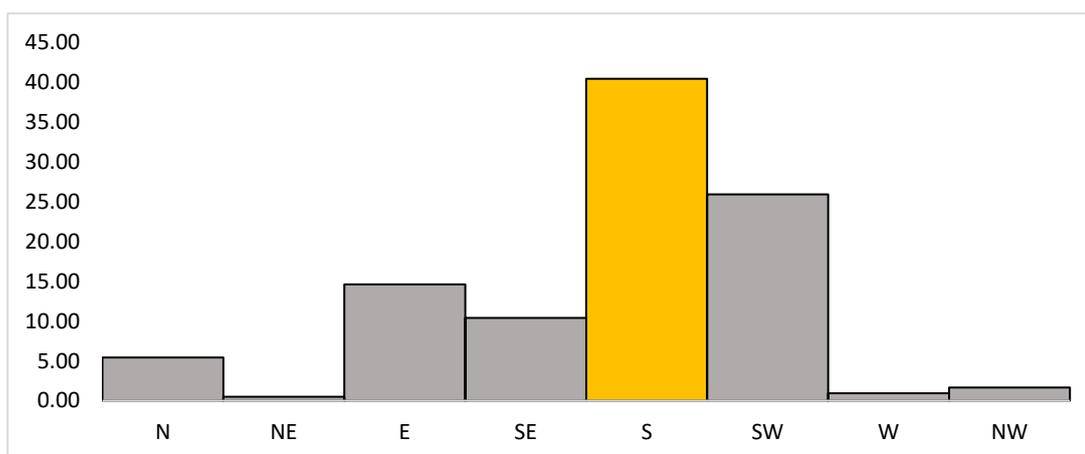


Figura 23: Histograma dos percentuais de classes direção das ondas entre o outono de 2005 a 2018.

- **Período (Tp)**

Os valores de Tp para o outono apresentaram bastante variabilidade e ficaram bem distribuídos entre as 9 classes (Figura 24). O resultado da análise estatística para o período mostrou que a classe modal está compreendida entre 10 e 12s representando 31,95%, seguido pelo intervalo entre 12 e 14s com 28,90%. Para casos extremos o intervalo ficou compreendido entre 14,1 a 21,3 (Tabela 11). Não houve valores acima de 21,3 s.

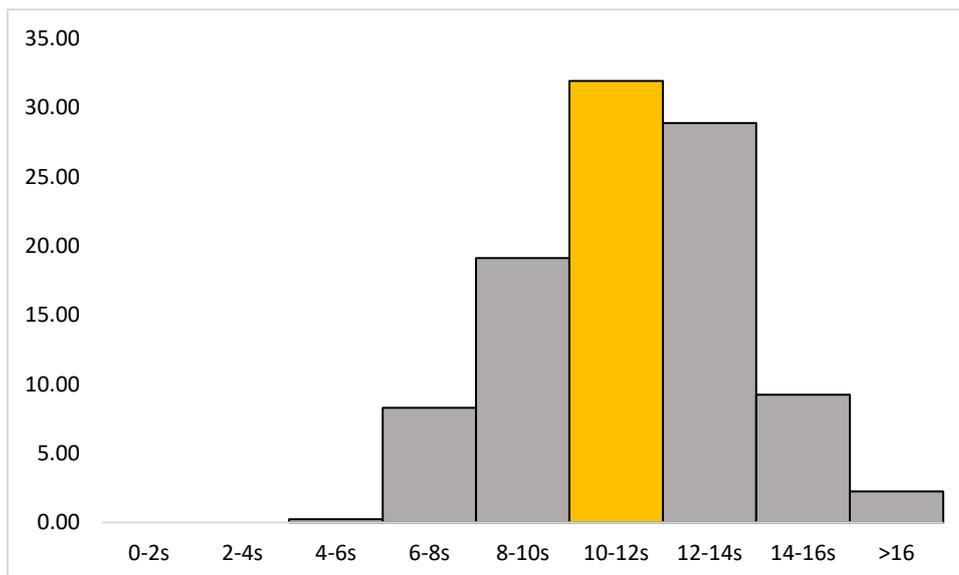


Figura 24: Histograma dos percentuais de classes do período das ondas entre o outono de 2005 a 2018.

Padrão	Período (s)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[10 - 12]	31,95
Extremo	Percentil 90%	[14,1 – 21,3]	10

Tabela 11: Padrões típicos e extremo do período de pico no intervalo de 2005 a 2018.

- **Altura significativa (Hs)**

A análise estatística a partir dos dados da altura significativa mostrou que a classe modal durante outono está localizada entre 1,5 e 2 m com 36,03%, além disso 31,58% dos dados estão entre 2 e 2,5% (Figura 25). A análise dos casos extremos, realizada a partir do cálculo do percentil 90 mostrou que os mesmos estão compreendidos no intervalo entre 3 a 5,3 m (Tabela 12). Não houve valores menores que 1 e maiores que 5,3 m.

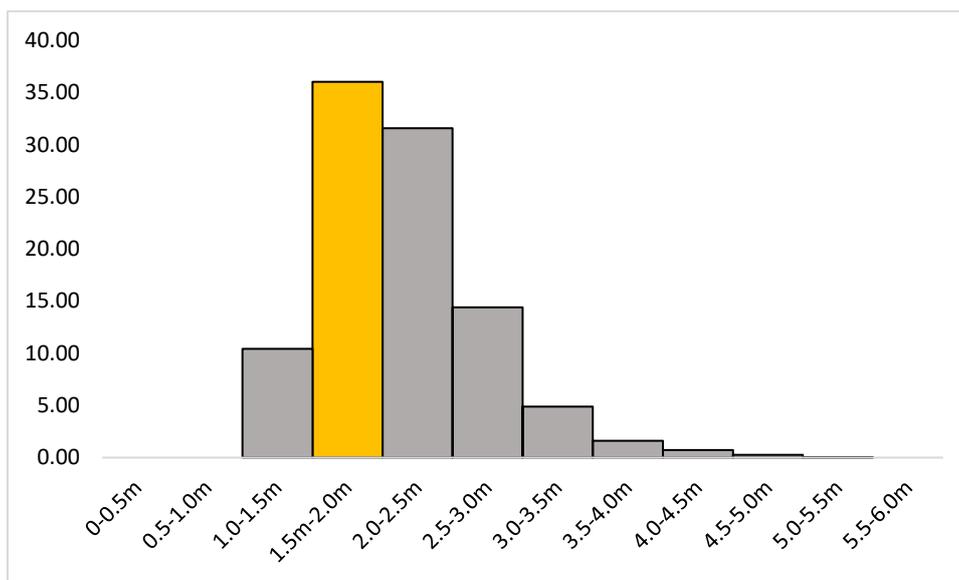


Figura 25: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre o outono de 2005 a 2018.

Padrão	Altura significativa (m)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[1,5 – 2,0]	36,03
Extremo	Percentil 90%	[3 – 5,3]	10

Tabela 12: Padrões típicos e extremo da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018.

- **Período (Tp) em função da Hs**

Ao analisar o período em função da altura significativa vemos que a maior porcentagem das ondas do intervalo mais frequente (10-12 s) estão associadas principalmente a dois intervalos de altura o primeiro entre 1,5 e 2,0 m com 11,89% das ondas e o segundo entre 2,0 e 2,5m com 11,09%. No geral as ondas estão concentradas principalmente nos intervalos de período de pico entre 12 e 14 s com 28,9% e 8 a 10 s com 19,13%. Em contrapartida a altura significativa geral varia entre 1,5 e 2 m com 36,03% seguida por 2 a 2,5 m e 2,5 a 3 m com 31,58% e 14,42% respectivamente.

- **Direção em função do período**

A direção principal de ocorrência durante o período do outono ficou concentrada na direção sul com 40,47% dos casos e SW com 25,92% das ocorrências, a direção leste ficou em terceiro de acordo com a porcentagem de ocorrência de 14,63%. As ondas provenientes da direção principal (S) tiveram período variando entre 10 e 12 s coincidindo com o período modal com 17,38% dos casos e 12 a 14 s com 12,94% dos casos (Figura 26 (a)).

- **Direção em função da Hs**

As ondas provenientes da direção principal (S) apresentaram altura significativa principalmente de 1,5 e 2 m com 13,87% dos casos, seguidas pelo intervalo entre 2,0 e 2,5 m com 12,35% das ondas com direção sul. Outro intervalo que apresentou relevância significativa foi o de 2,5 a 3,0m com 14,42% dos casos totais e 6,25% das ondas com direção sul (Figura 26 (b)).

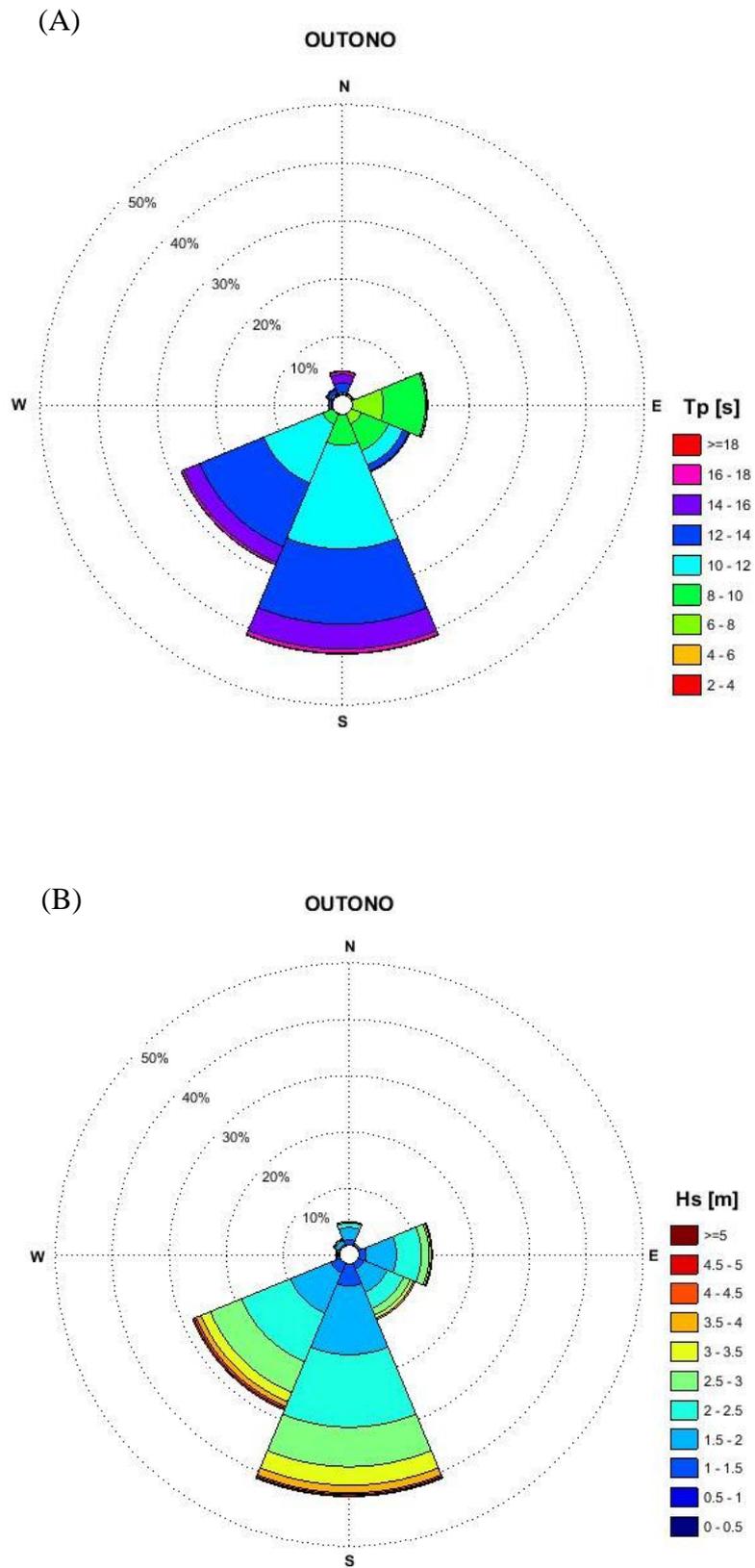


Figura 26: Análise da direção em função do período de pico (a) da altura significativa (b).

### 6.3.3. INVERNO

- **Direção (D)**

Os dados de direção de onda analisados no período do inverno mostraram-se bem distribuídos entre as classes, mas assim como nas análises anteriores a classe que mais ocorreu foi a sul com 38,71%, seguida por 28,72% referente a direção leste. A classe que apresentou menos representatividade foi a norte com apenas 2 ocorrências (0,02%) do total de 10688 da estação. O restante da distribuição pode ser observado na Figura 27.

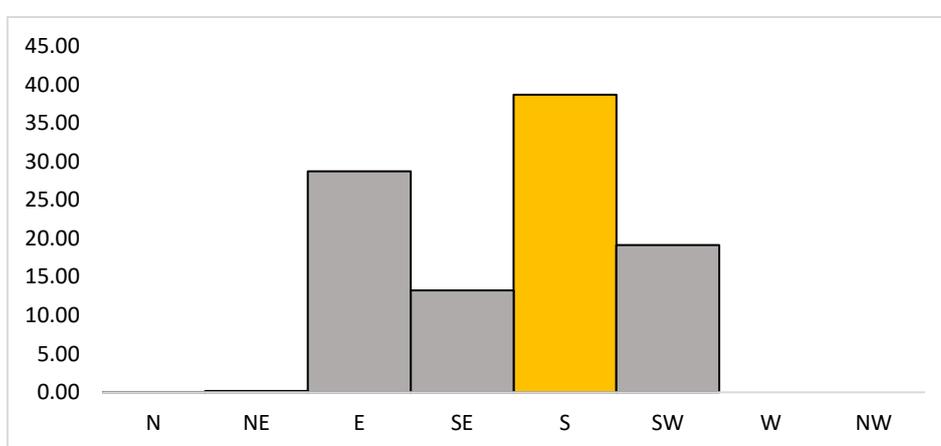


Figura 27: Histograma dos percentuais das classes da direção das ondas entre o inverno de 2005 a 2018.

- **Período (Tp)**

A análise estatística referente aos dados do período apresentou bastante variabilidade. A classe modal representou 32,86% dos dados (Figura 28). As classes subsequentes ficaram com 27,40% para o intervalo entre 9 e 10; 13,89% para o intervalo entre 10 e 11; 14,62% para o intervalo entre 10 a 12s e 21,08% para o intervalo entre 12 e 14 s. Para casos extremos o intervalo ficou entre 13,7 e 21,5 s, sendo o último o maior valor encontrado para o período durante o inverno (Tabela 13).

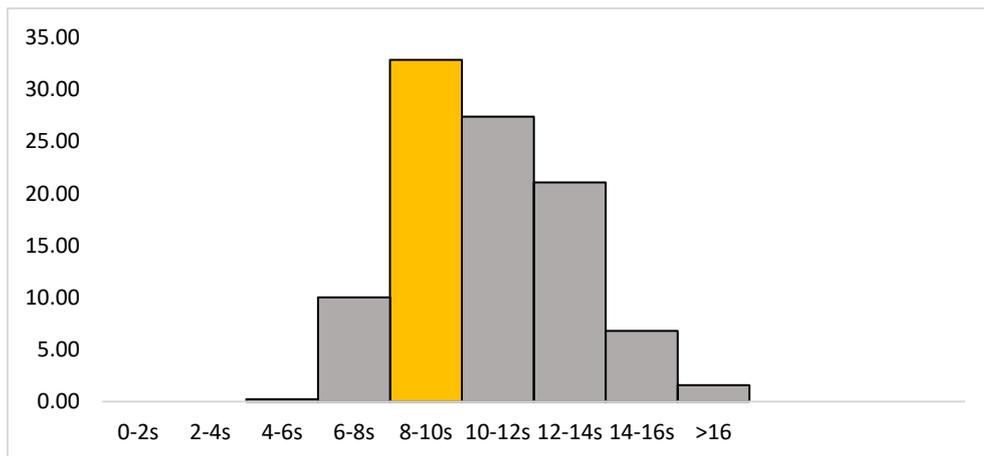


Figura 28: Histograma dos percentuais das classes do período das ondas entre o inverno de 2005 a 2018.

Padrão	Período (s)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[8 - 10]	32,86
Extremo	Percentil 90%	[13,7 – 21,5]	10

Tabela 13: Padrões típicos e extremo do período no intervalo de 2005 a 2018.

- **Altura significativa (Hs)**

A altura significativa ficou distribuída similarmente entre os intervalos de 1,5 a 2,0 m com 26,45% e 2,0 a 2,5 m com 28,18% sendo este o intervalo típico dos dados, de acordo com a Figura 29. Seguida por 21,24% do intervalo entre 2,5 e 3 m. Para casos extremos os valores ficaram entre 3,3 e 4,96 m. Não foram observados valores acima de 4,9 e abaixo de 0,5 m (Tabela 14).

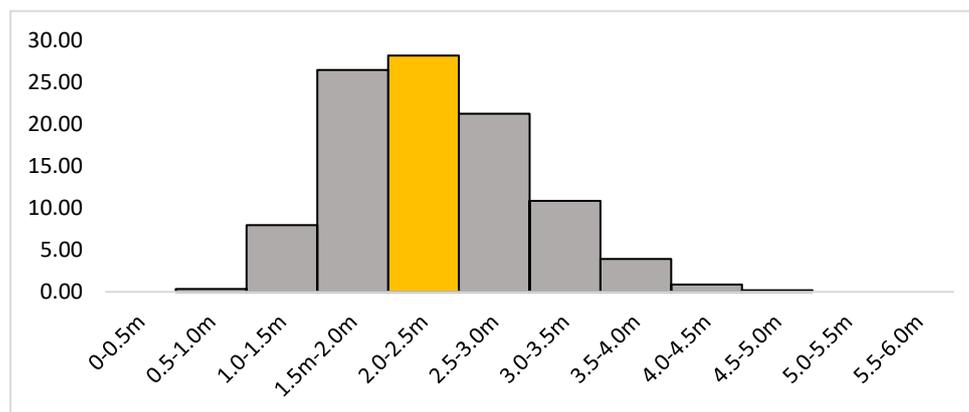


Figura 29: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre o inverno de 2005 a 2018.

Padrão	Altura significativa (m)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[2,0 - 2,5]	28,18
Extremo	Percentil 90%	[3,3 – 4,9]	10

Tabela 14: Padrões típicos e extremo da altura significativa no intervalo de 2005 a 2018.

- **Período (Tp) em função da Hs**

O período modal durante o inverno foi o do intervalo entre 8 e 10s (32,86%) e a Hs associada a esse intervalo ficou entre 2,0 e 2,5m com 9,44% e 1,5 a 2,0 m com 9% dos casos. No cenário geral durante o inverno as ondas apresentaram períodos entre 8 e 14 segundos, tendo o intervalo entre 10 a 12 s 27,4% dos dados e entre 12 e 14 s 21,08% dos dados.

- **Direção em função do período**

A direção principal de ocorrência durante o inverno foi a de sul com 38,71% dos casos e leste com 28,72% das ocorrências, a direção sudoeste (SW) ficou em terceiro de acordo com a porcentagem de ocorrência de 19,14%. As ondas provenientes da direção principal (S) tiveram período variando entre 10 e 12 s coincidindo com o período modal com 16,30% dos casos e 12 a 14 s com 11,98% dos casos (Figura 30 (a)).

- **Direção em função da Hs**

Ao analisar a direção em função da altura significativa nota-se que ondas provenientes da direção principal sul (38,71%) estão associadas a Hs entre 1,5 e 2,0 m representando 11,36% do total dos casos. A Hs típica (2,0 a 2,5 m) está associada, respectivamente, a ondas com direção S (10,67%), E (8,71%), SW (5,58%), Sul (9,72%) (Figura 30 (b)).

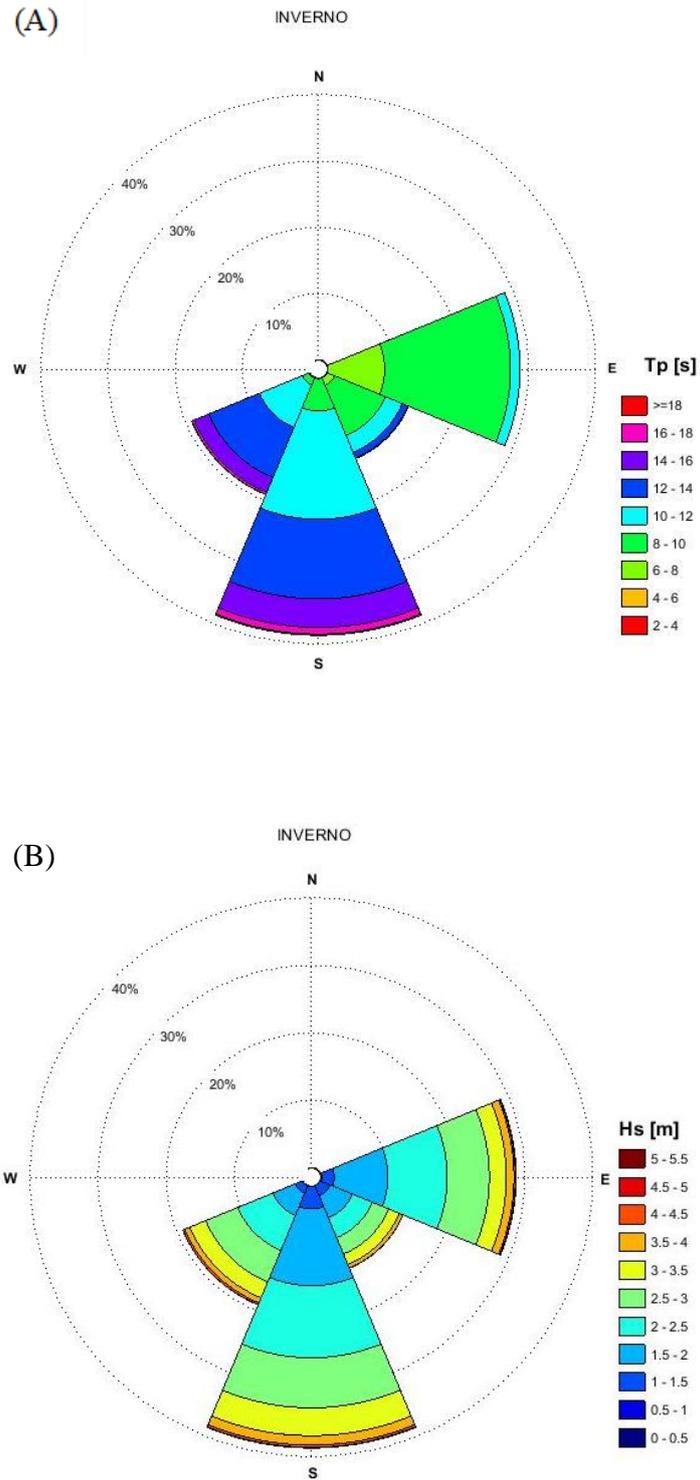


Figura 30: Análise da direção em função do período de pico e da altura significativa.

### 6.3.4. PRIMAVERA

- **Direção (D)**

A direção principal observada na primavera a sul assim como nas estações anteriores com 27,55% do total de 9985 casos. A segunda direção com maior porcentagem de dados foi o Sudoeste com 22,19% dos valores. A direção de menor incidência foi a nordeste (NE) com apenas 1,38% dos dados (Figura 31).

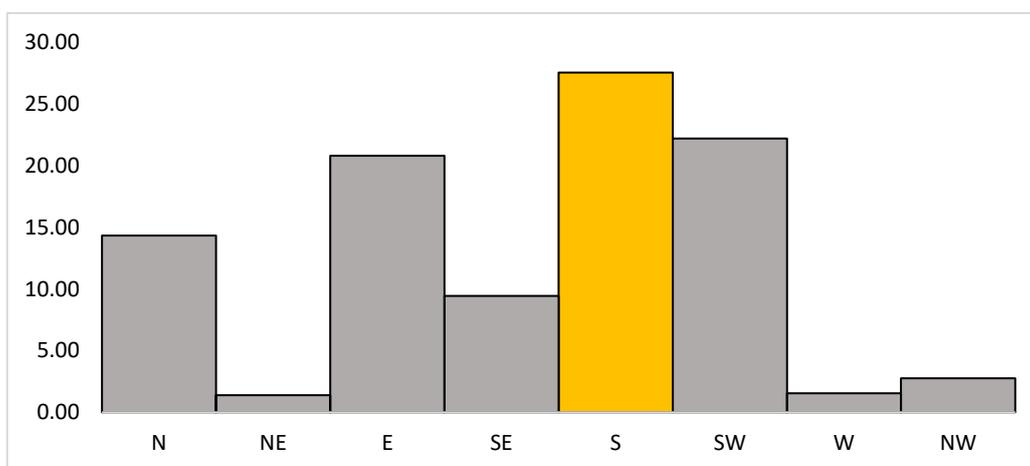


Figura 31: Histograma dos percentuais das classes de direção das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.

- **Período (Tp)**

Os resultados da análise do período mostram que a primavera é caracterizada por ondas com períodos típicos entre 10 e 12 segundos (30,93%) seguido por ondas de período entre 8 a 10 s (22,48%) como pode ser observado no Figura 32. Para períodos superiores ao percentil 90% que denota valores de eventos extremos, o intervalo ficou entre 14,2 a 22,8 s (Tabela 15).

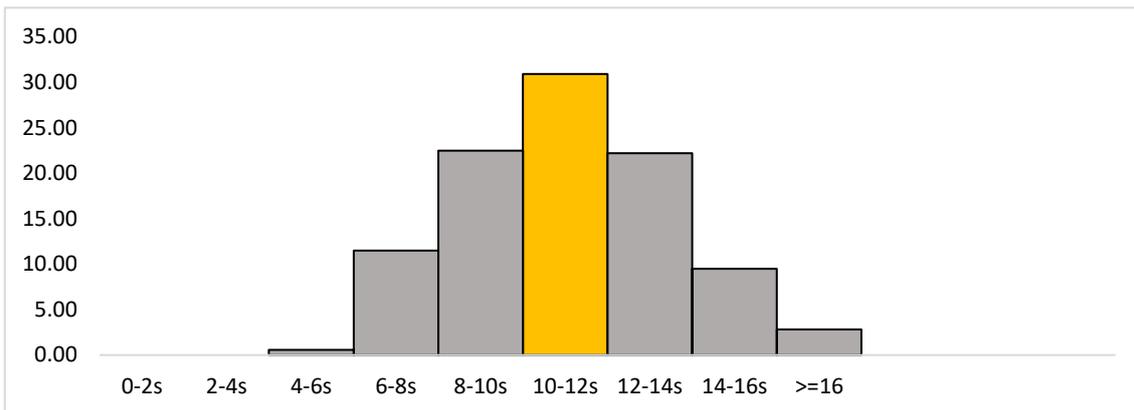


Figura 32: Histograma dos percentuais das classes do período das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.

Padrão	Período (s)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[10 - 12]	30,93
Extremo	Percentil 90%	[14,2 – 22,8]	10

Tabela 15: padrões típicos extremos do período no intervalo de 2005 a 2018.

- **Altura significativa (Hs)**

A primavera é caracterizada por ondas que possuem Hs típicas entre 1,5 e 2,0 m (43,42%), o restante da distribuição percentual pode ser observado na Figura 33. Para Hs com valores superiores ao percentil 90% o limite inferior do intervalo foi de 2,64 até 4,20 m (Tabela 16). o valor mínimo encontrado para a altura significativa foi de 0,85 m e não foram encontradas ocorrências maiores que 4,20 m.

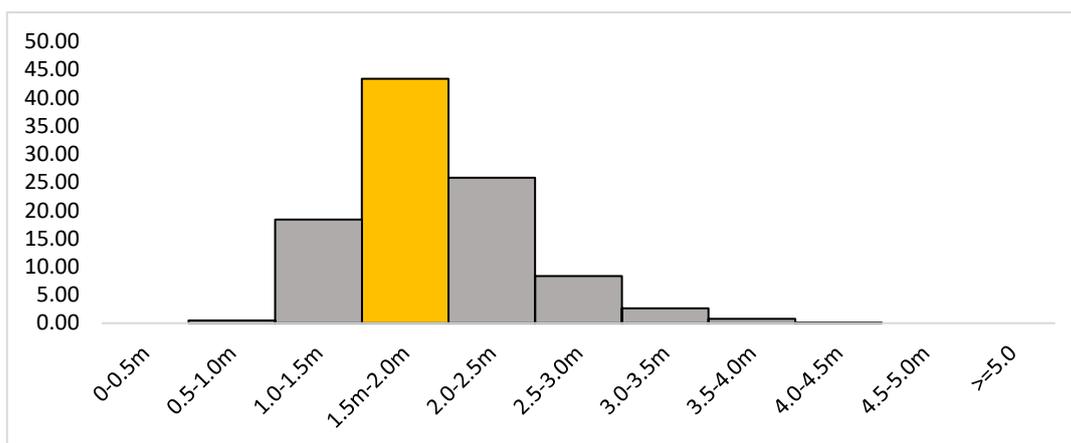


Figura 33: Histograma dos percentuais das classes da altura significativa das ondas entre a primavera de 2005 a 2018.

Padrão	Altura significativa (m)		
	Estatística	Intervalo	%
Típico	Classe modal	[1,5 – 2,0]	43,42
Extremo	Percentil 90%	[2,64 – 4,20]	10

Tabela 16: Padrões típicos e extremo do período no intervalo de 2005 a 2018.

- **Período ( $T_p$ ) em função da  $H_s$**

A análise do período em função da  $H_s$ , mostrou que o período típico correspondente ao intervalo entre 10 a 12 s (30,93%) dos casos está associado a ondas com  $H_s$  entre 1,5 e 2,0m essa relação corresponde a 13,07% dos casos e mostra a explícita relação entre o período modal e a altura significativa que se destaca.

- **Direção em função do período**

A direção sul foi a de principal ocorrência durante a primavera com 27,55% dos casos e SW com 22,19%, a direção leste ficou em terceiro de acordo com a porcentagem de ocorrência de 20,80%. As ondas provenientes da direção principal (S) tiveram período variando entre 10 a 12s essa relação foi representada por 13,86% dos dados coincidindo com o período modal das ocorrências que representou 30,93% dos dados analisados (Figura 34 (a)).

- **Direção em função da  $H_s$**

A análise da direção em função da altura significativa mostra a explícita a relação do intervalo típico de  $H_s$  (1,5 a 2,0m) com as direções das ondas com maior ocorrência na região (S), mostrando que ondas com  $H_s$  variando entre 1,5 e 2m estão associadas a ondas provenientes de Sul representando 11,53% dos casos. A  $H_s$  típica está associada principalmente a ondas com direção sul (11,53%), leste (9,44%) e sudoeste (9,18%) (Figura 34 (b)).

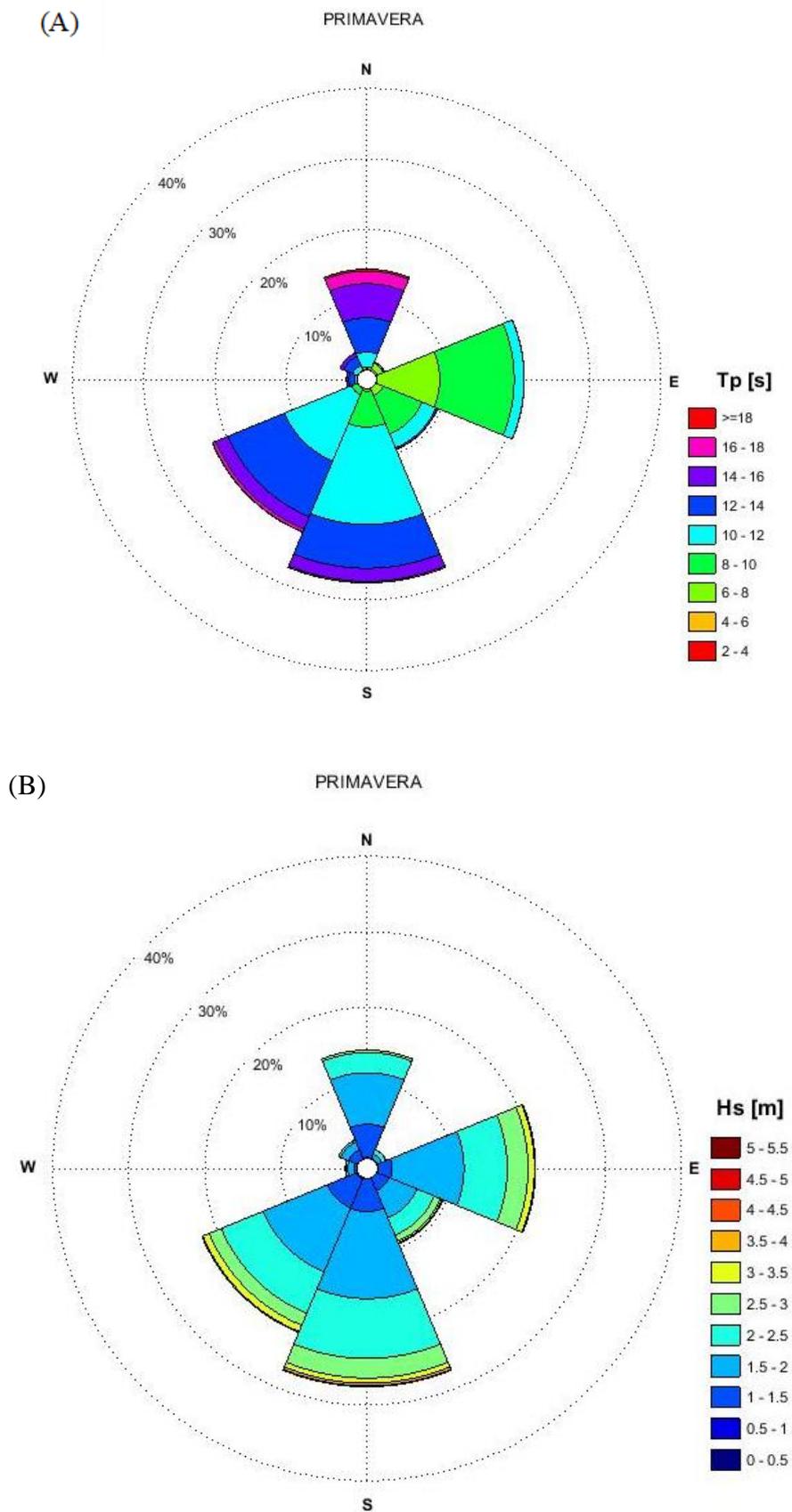


Figura 34: Análise da direção em função do período de pico (a) e da altura significativa (b).

#### 6.4. CARACTERIZAÇÃO INTERANUAL

A variação da altura significativa ( $H_s$ ) foi analisada mensalmente ao longo dos 13 anos estudados (Figura 35). No contexto geral, pode ser observado um comportamento sazonal da  $H_s$ , pois nota-se que no intervalo dos meses de abril a setembro período correspondente ao outono/inverno há um evidente aumento nos valores médios, sendo o maior valor observado em junho, mês que marca o início do inverno, ao mesmo tempo que o verão apresenta os menores valores, estando a altura mínima presente no mês de fevereiro com 1,66 m.

Quanto ao desvio padrão, nota-se que ele se apresenta menor durante o verão onde também é menor o valor de  $H_s$ , de acordo com Nogueira 2014, essa homogeneidade de valores durante o verão dá-se devido a área de estudo estar sob influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), dessa maneira a região apresenta estabilidade atmosférica e como consequência ondas com menores valores de  $H_s$  e desvio padrão.

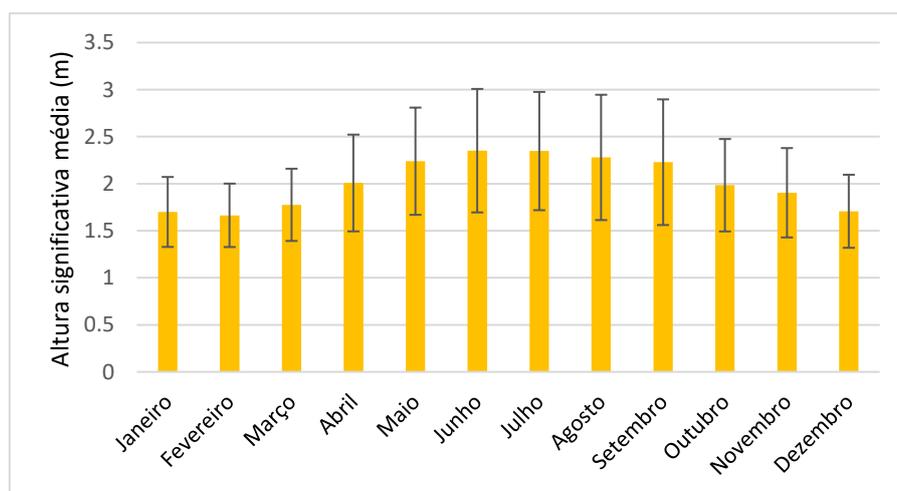


Figura 35: Altura significativa média e seus respectivos desvios padrão, estimados a partir da série temporal de 13 anos.

O período de pico médio também foi analisado mensalmente durante o período de estudo. Na Figura 36 pode-se observar os valores médios de  $T_p$  e o desvio padrão característico de cada mês.

Os menores valores médios são observados nos meses de julho a outubro associados também aos menores valores do desvio padrão. Os maiores valores médios foram observados durante os meses de janeiro a junho e de novembro a dezembro, associados a esses estão também os maiores valores do desvio padrão.

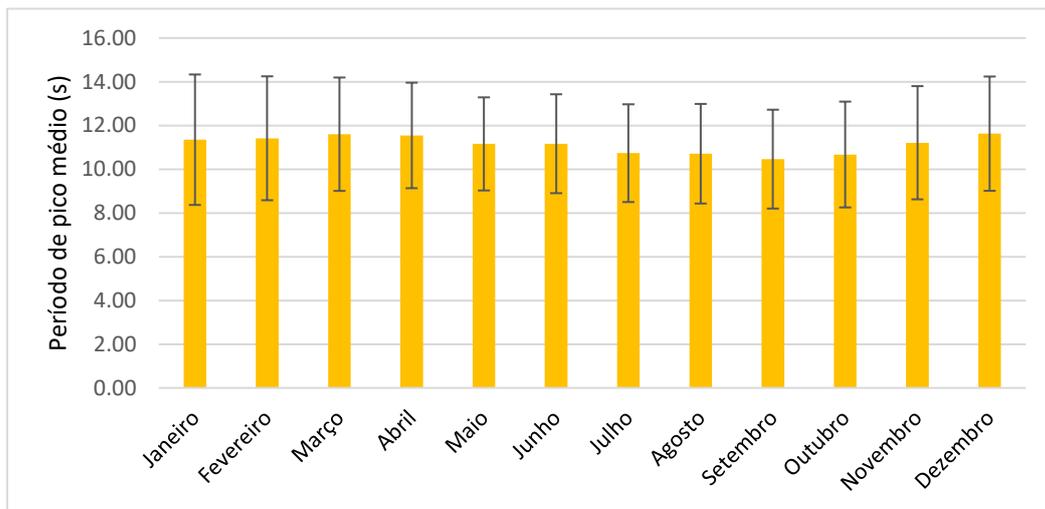


Figura 36: Período de pico médio e seus respectivos desvios padrão.

## 6.5. MODELAGEM NUMÉRICA

### 6.5.1. BATIMETRIA

A partir da digitalização da carta náutica disponibilizada pela DHN foi possível realizar a interpolação dos dados com a grade numérica a ser usada posteriormente para modelagem dos dados. Observam-se profundidades que variam de 900 m em regiões mais afastadas até 5 m em regiões mais próximas a ilha (Figura 37).

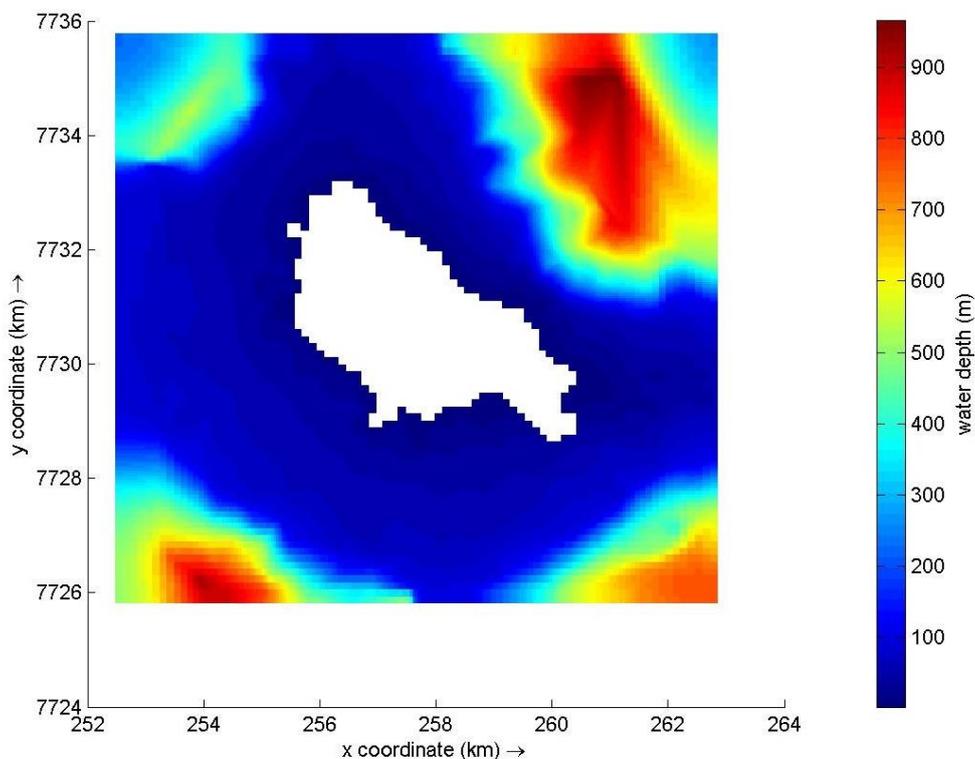


Figura 37: Batimetria interpolada juntamente com a grade utilizada no DELFT3D. Profundidades são indicadas como valores positivos na representação do Delft3D.

## 6.5.2. CENÁRIOS

A relação entre a direção e a altura significativa pode ser observada na tabela 17, onde são destacados os casos mais frequentes. São considerados frequentes os casos em que ocorrem com uma porcentagem maior que 5%. Ao todo, sete conjuntos de dados satisfazem este requisito. Na Tabela 18 observa-se os cenários definidos de acordo com a porcentagem de ocorrência de cada parâmetro e que foram utilizados como entrada para os experimentos numéricos no modelo DELFT3D.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL
<b>0-0.5</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
<b>0.5-1.0</b>	0.11	0.00	0.11	0.01	0.09	0.05	0.01	0.02	0.40
<b>1.0-1.5</b>	3.66	0.36	2.20	1.46	4.91	2.81	0.35	0.97	<b>16.72</b>
<b>1.5-2.0</b>	<b>5.19</b>	0.36	<b>8.43</b>	3.80	<b>11.58</b>	<b>7.77</b>	0.65	1.13	<b>38.91</b>
<b>2.0-2.5</b>	1.40	0.18	<b>5.51</b>	2.62	<b>8.63</b>	<b>6.34</b>	0.16	0.29	<b>25.13</b>
<b>2.5-3.0</b>	0.22	0.02	2.82	1.20	4.30	3.22	0.03	0.04	11.84
<b>3.0-3.5</b>	0.0025	0.01	0.92	0.65	1.95	1.27	-	0.01	4.80
<b>3.5-4.0</b>	0.0025	0.01	0.37	0.21	0.63	0.41	-	0.0049	1.64
<b>4.0-4.5</b>	-	-	0.06	0.01	0.21	0.17	-	-	0.45
<b>4.5-5.0</b>	-	-	0.02	-	0.05	0.04	-	-	0.12
<b>5.0-5.5</b>	-	-	-	-	0.00	0.00	-	-	0.01
<b>5.5-6.0</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00
<b>TOTAL</b>	10.57	0.95	<b>20.44</b>	9.96	<b>32.34</b>	<b>22.09</b>	1.19	2.46	

Tabela 17: Frequência de ocorrência de ondas em diferentes direções (em porcentagem) e alturas significativas (em metros), referentes ao clima geral de ondas (2005-2018), em destaque estão as frequências maiores que 5% que foram utilizadas para definir os parâmetros de entrada no módulo WAVE.

<b>Evento</b>	<b>Direção</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>
1	S	2.2	11.91
2	SW	2.2	12.18
3	E	2.2	8.25
4	E	1.75	7.84
5	S	1.75	11.52
6	SW	1,75	11.94
7	N	1,71	13.95

Tabela 18: Cenários utilizados como entrada no modelo.

Ao arredondar os valores de entrada para o inteiro mais próximo nota-se que não há variação na altura da onda em cada cenário, isto ocorre principalmente devido a profundidade ao redor da ilha não apresentar grande variação. As direções semelhantes também apresentaram período de pico semelhante ao realizar o arredondamento, sendo a direção norte que a apresentou maior período de pico e a direção sul a que mais ocorreu na região. O resultado das simulações pode ser observado nas Figuras 39 e 40. Além dos cenários definidos na Tabela 18 também foram realizadas simulações para caracterizar o cenário geral a partir da normalização dos valores obtidos em cada cenário de acordo com sua frequência de ocorrência (Figura 38).

Para realizar a simulação sazonal foram selecionados os casos que ocorreram com uma porcentagem maior que 5%, a partir da definição desses cenários os valores de Hs, Tp e D foram utilizados como condição de contorno para o modelo que gerou dados para todo o entorno da ilha. Ao final os valores obtidos em cada cenário foram multiplicados pela sua frequência de ocorrência e somados gerando uma tabela de valores que possibilitou a definição do cenário geral de cada estação (Figuras 41, 42). Os cenários sazonais podem ser observados na Tabela a seguir.

Ao analisar a distribuição da altura significativa, de forma geral, nota-se que os menores valores estão localizados no setor leste da ilha principalmente adjacente as praias dos Cabritos, Portugueses e Calhetas, enquanto os maiores valores se encontram principalmente na região sul da Ilha entre a Praia do Lixo e a Praia do Príncipe. Essa variação foi observada também nos cenários sazonais, sendo a primavera e o verão as estações com menores valores de Hs e o outono e inverno com valores mais elevados.

<b>VERÃO</b>				
<b>Evento</b>	<b>Direção</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>(%)</b>
1	S	1.76	11.27	11.53
2	E	1.78	7.9	9.44
3	SW	1.76	12	9.18
4	S	2.2	11.52	7.92
5	N	1.73	13.69	6.83
6	SW	2.2	12.2	5.94
7	E	2.2	8.37	5.69
<b>OUTONO</b>				
<b>Evento</b>	<b>Direção</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>(%)</b>
1	S	1.3	11.58	13.87
2	S	2.2	12	12.35
3	SW	2.2	12	9.41
4	SW	1.78	11.88	7.63
5	S	2.7	12.4	6.25
6	E	1.75	8	5.95
7	SW	2.69	12.38	5
<b>INVERNO</b>				
<b>Evento</b>	<b>Direção</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>(%)</b>
1	S	1.77	11.54	11.36
2	S	2.2	12	10.67
3	E	2.2	8.38	8.71
4	E	1.78	7.99	7.9
5	S	2.7	12.5	7.39
6	E	2.7	8.6	6.18
7	SW	2.24	12.19	5.58
8	SW	2.7	12.4	5.06
<b>PRIMAVERA</b>				
<b>Evento</b>	<b>Direção</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>(%)</b>
1	S	1.76	11.27	11.53
2	E	1.78	7.9	9.44
3	SW	1.76	12	9.18
4	S	2.2	11.52	7.92
5	N	1.73	13.69	6.83
6	SW	2.2	12.2	5.94
7	E	2.2	8.37	5.69

Tabela 19: Cenários sazonais utilizados como entrada no modelo.

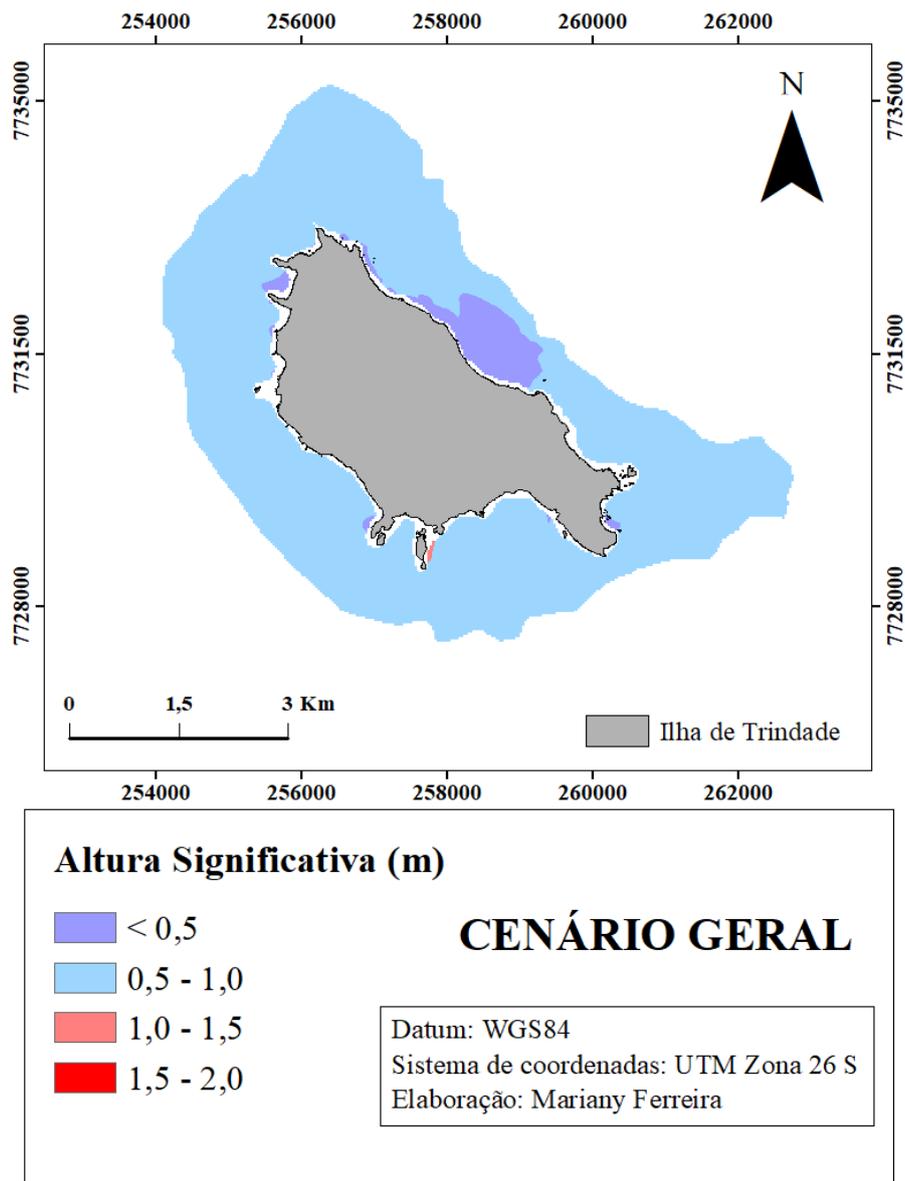


Figura 38: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha para os 13 anos simulados.

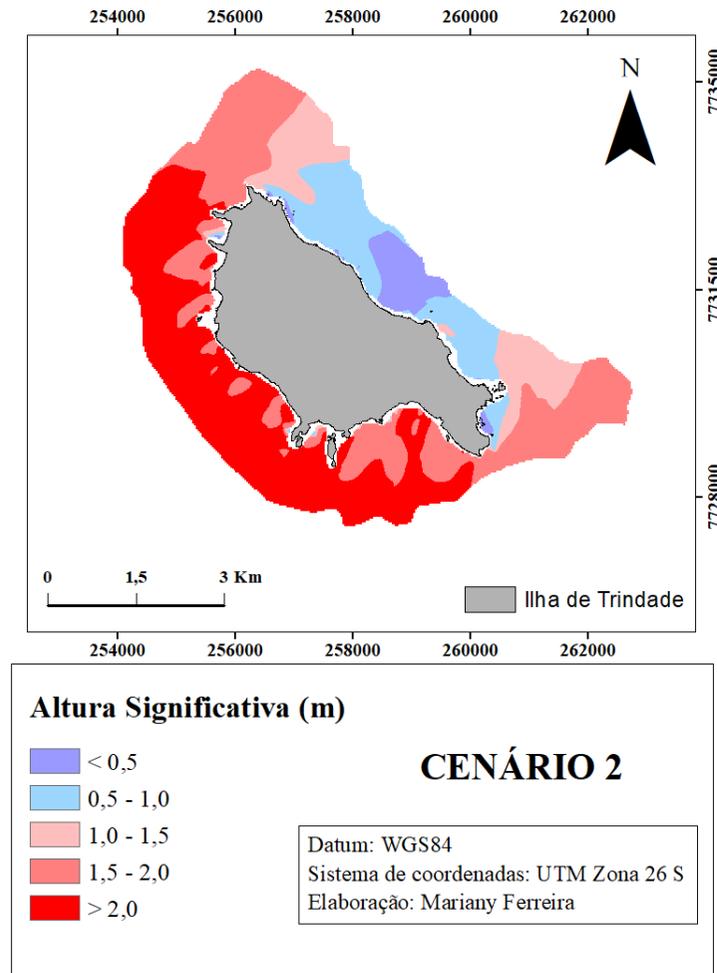
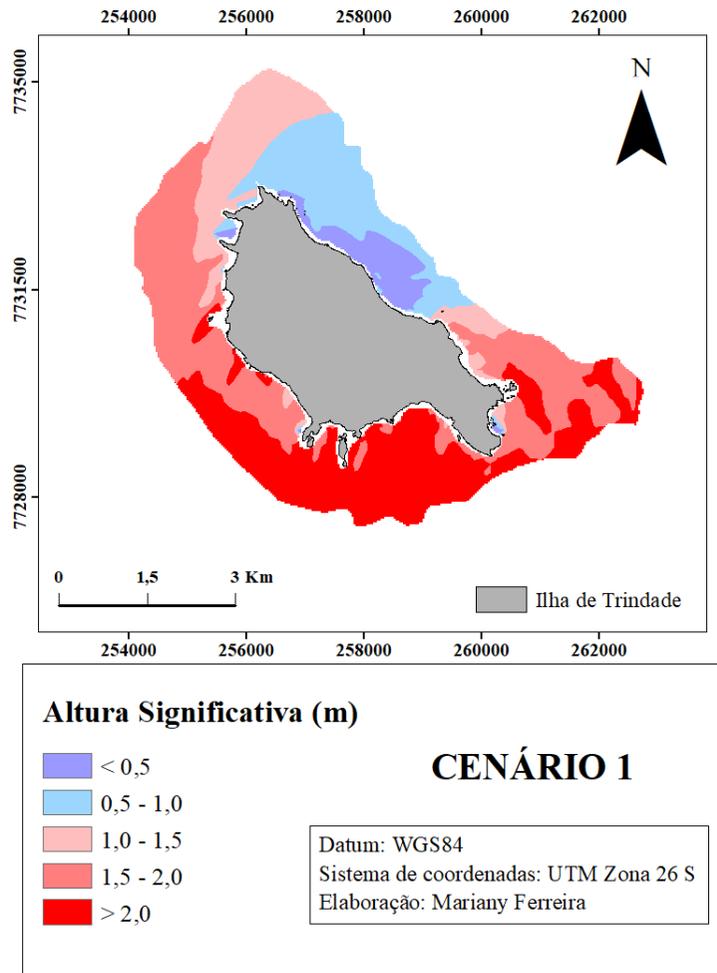


Figura 39: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW).

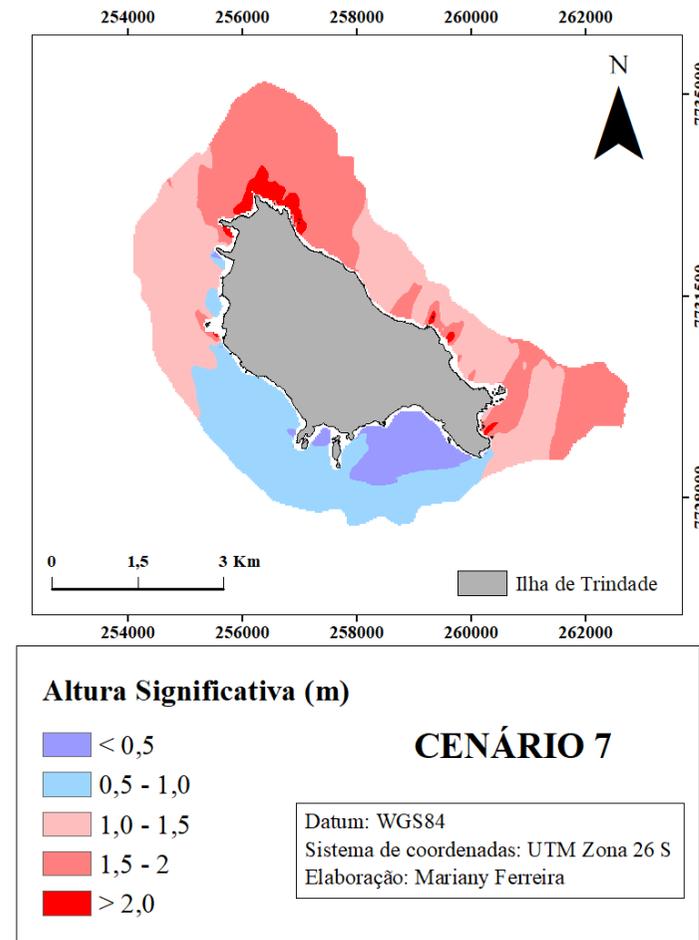
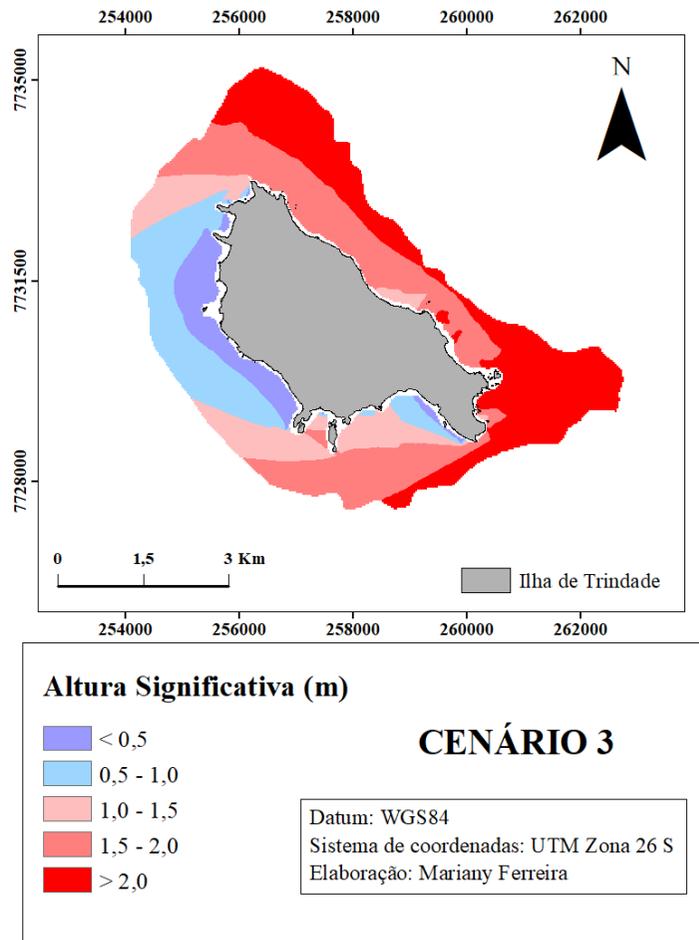


Figura 40: Distribuição da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e b) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N).

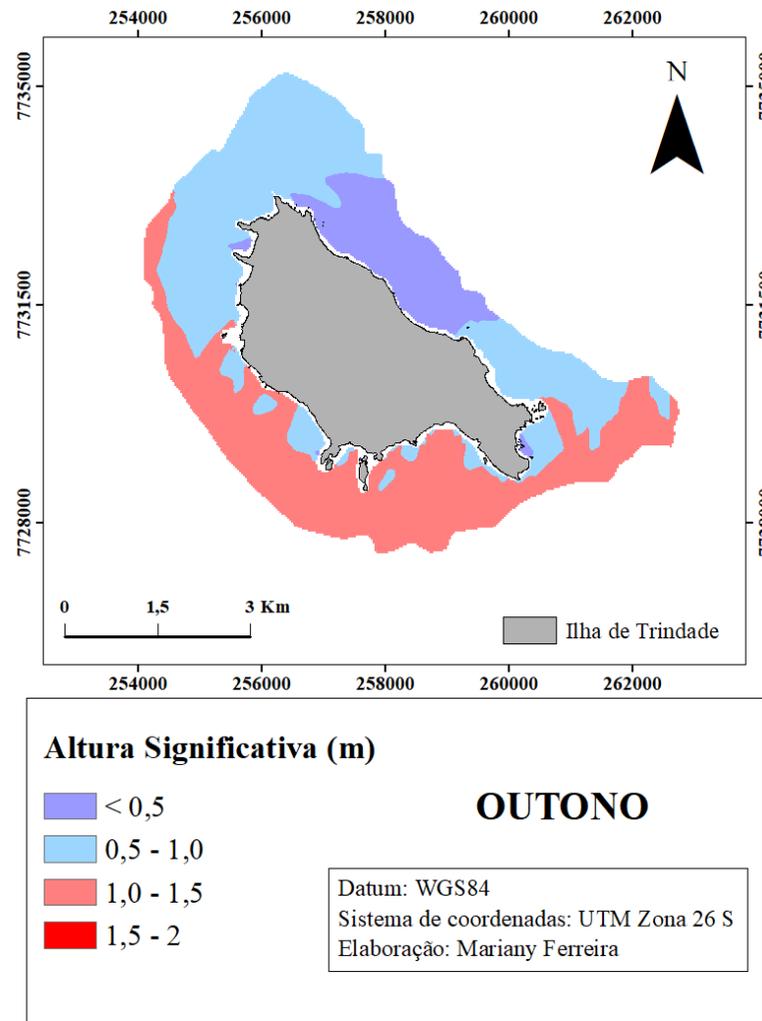
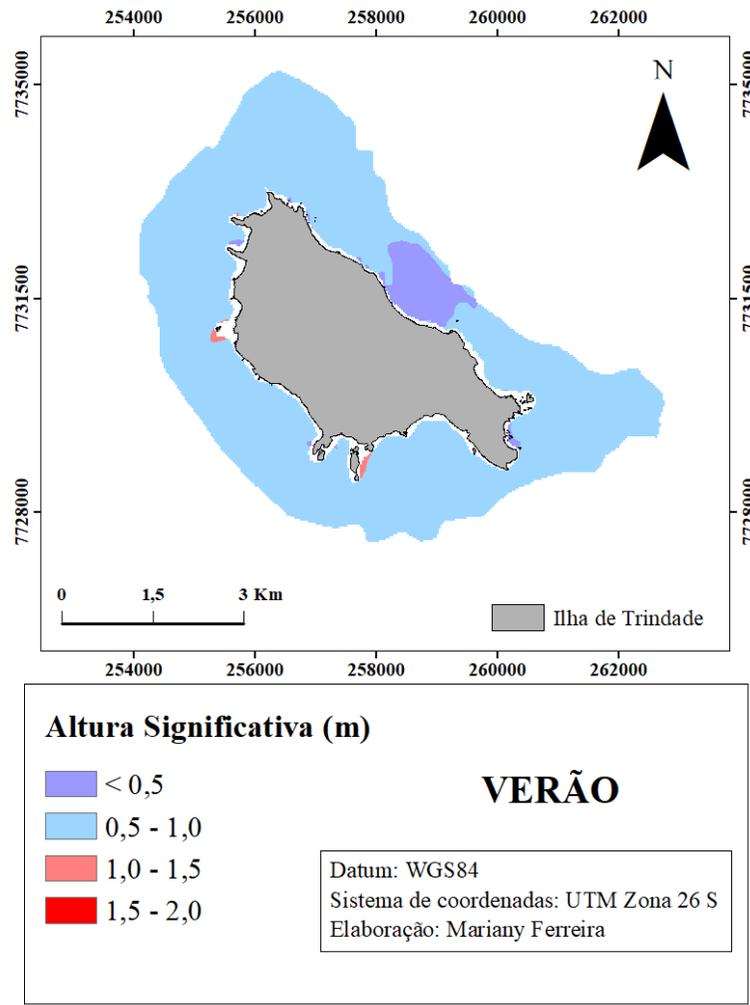


Figura 41: Distribuição sazonal da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) Verão, b) Outono.

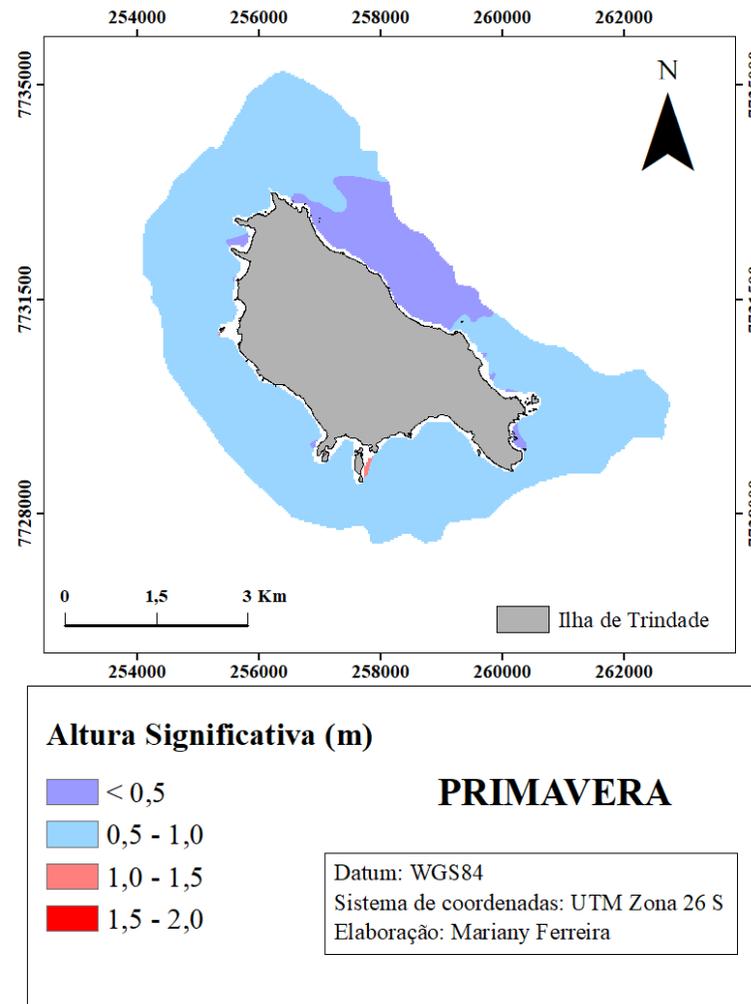
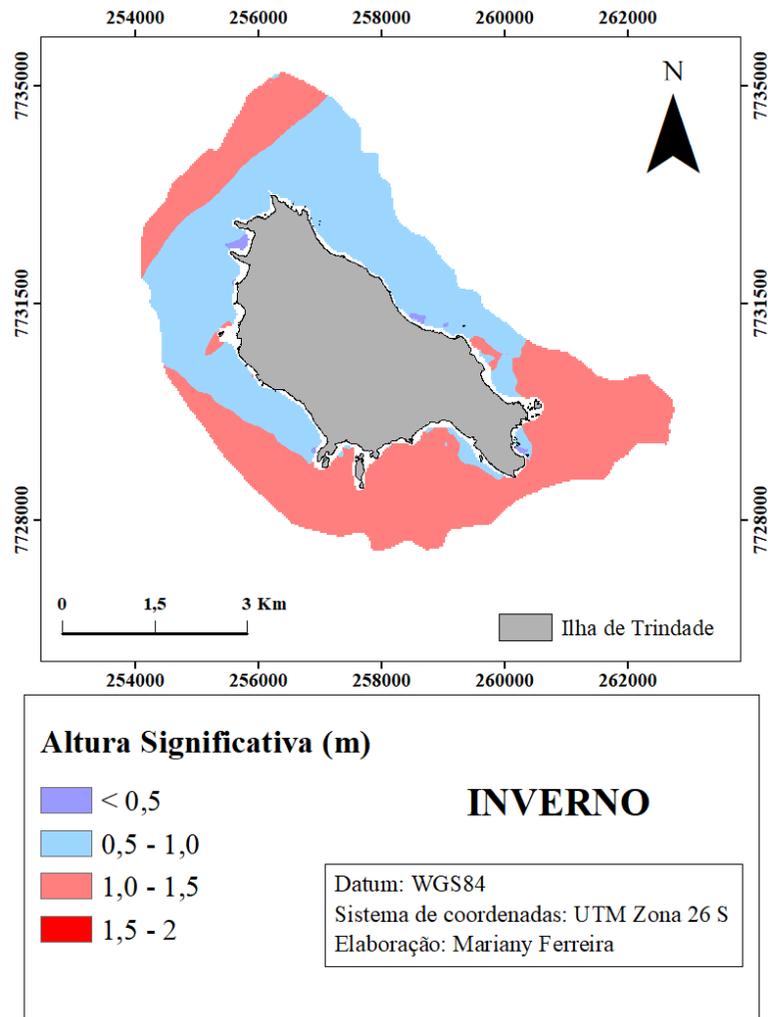


Figura 42: Distribuição sazonal da altura significativa das ondas ao redor da ilha de acordo com os cenários modelados. a) Inverno, b) Primavera.

### 6.5.3. FORÇA DE ONDA

A força de onda foi calculada para cada cenário anteriormente definido durante o período de 2005 a 2018, além disso também foi possível realizar mapas de distribuição da força de onda ao redor da ilha a partir dos dados fornecidos após a modelagem numérica. Como houve pouca variação nos dados de altura significativa e período de pico para ondas com a mesma direção foram produzidos mapas de apenas para 4 cenários (C1, C2, C3 e C7) e esses representaram os demais (Figura 44). O cenário geral da força de onda ao longo dos 13 anos foi calculado a partir da soma das forças de cada cenário multiplicadas por suas respectivas porcentagens de ocorrência e pode ser observada na Figura 43. Além disso também foi realizado o cálculo para distribuição da força sazonalmente (Figura 45, 46).

<b>EVENTO</b>	<b>DIREÇÃO (°)</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Tp(s)</b>	<b>FORÇA (kW/m)</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
C1	180° (S)	2,2	11,91	56584,84	EXTREMA
C2	225° (SW)	2,2	12,18	57867,62	EXTREMA
C3	90° (E)	2,2	8,25	39196,05	FORTE
C4	90° (E)	1,75	7,84	23568,67	MODERADA
C5	180° (S)	1,75	11,52	34631,52	FORTE
C6	225° (SW)	1,75	11,94	35894,13	FORTE
C7	360° (N)	1,71	13,95	40041,41	INTENSA

Tabela 20: Tabela de classificação da força de onda de acordo com os cenários modelados.

Os resultados relativos ao cenário geral da força de onda mostram que existe variação espacial da força ao longo dos setores da ilha sendo mais acentuado na região sul do setor 1 voltado para o continente, variando entre calma, no setor leste abrangendo todas as praias desse setor com exceção da região adjacente à praia dos Andradas; a fraca no setor oeste voltado ao continente, sendo as praias da Cachoeira (26822,7 kW/m), do lixo (25417,5 kW/m) e a praia do Príncipe (21244,3 kW/m) as que apresentaram a maior força de onda.

Sazonalmente, as ondas apresentam pouca variação. A diferença principal está durante verão e o inverno, onde no verão as ondas variam apenas entre calmas a

moderadas e no inverno alguns pontos da ilha apresentam força de onda classificada como forte e intensa. De forma geral, nenhuma das estações apresentou força de onda classificada como extrema. Ao analisar a força de onda durante o inverno observa-se a situação contrária ao verão, toda a região sul da ilha desde a praia do Parcel até a praia do Noroeste recebe ondas com força variando entre moderada e intensa. Os valores extremos estão concentrados na praia Príncipe, praia do Lixo e praia da Cachoeira; as ondas classificadas como calmas e fracas ficaram concentradas no setor leste da ilha principalmente entre a praia da Calheta e a praia da Ponta do Norte.

Analisando os resultados obtidos a partir dos cenários mais frequentes observa-se que houve pouca variação em relação a força das ondas e as mesmas variaram entre moderadas a extremas (Tabela 20). Ao analisar o mapa de distribuição de força ao redor da ilha é possível constatar que existe uma variação espacial determinada pelo ângulo de incidência da onda e que tem como consequência a variação da força bastante visível nos dois setores (Figura 43).

Além do ângulo de incidência da onda o que influencia a distribuição da força de onda ao redor da ilha é a variação da topografia devido a presença de rochas submersas e emersas, além da presença de corais na região de pós-praia, essa variação da profundidade que é “sentida” pela onda ao se aproximar da ilha causa consequentemente variação na força de onda que é diretamente proporcional à altura da onda que por sua vez é inversamente proporcional a profundidade local.

Para o cenário 1 com ondas incidentes principalmente de sul a força ficou concentrada no setor 1 e variou entre forte e extrema. As praias que apresentaram intensidades extremas no setor foram as seguintes: Praia do Príncipe, Praia do Lixo, Farilhões e a Praia da Cachoeira com exceção das praias do Noroeste, Orelhas e Ponta Norte que apresentaram variação de força entre fraca e moderada. O setor 2, apresentou intensidades menores em relação a força de onda, variando entre calma a moderada com exceção do setor sul da face 2 onde a praia do parcel apresentou-se com ondas classificadas como fortes e extremas.

Ao analisar o cenário 2 que possui incidência principal de sudoeste nota-se pouca variação em relação ao mapa de força do cenário 1, é possível verificar que todas as praias do setor 1 apresentam força de onda bastante elevada, sendo essa a principal diferença entre os cenários, além de nenhuma praia do setor 2 apresentar variação de força de forte a extrema variando apenas entre calma e moderada.

O cenário 3 apresenta onda de direção leste e apresentou força de onda variando apenas até o limite definido como intenso, não tendo ondas com valores de força maiores que 50 mil kW/m que seriam as ondas consideradas extremas, sendo a praia do parcel a única com força de onda de forte a intensa. O setor oeste da ilha apresentou as menores intensidades de onda desde a praia do príncipe até a praia da Ponta Norte.

O cenário 7 foi o que mais destoou em relação aos demais, por ter direção de onda norte as maiores forças de onda ficaram concentradas no extremo norte da ilha mais especificamente entre as praias das Orelhas, Ponta Norte e praia dos Cabritos variando de forte em regiões mais afastadas da costa a extrema em locais próximos a região da praia. Alguns outros pontos também apresentaram, isoladamente, força de onda classificada como extrema, no setor Oeste a praia da Cachoeira e no setor Leste na praia da Calheta e do Túnel. O setor Oeste apresentou menor força de onda, sendo classificada como calma toda região desde a praia da ponta do Túnel até pouco antes da praia da cachoeira.

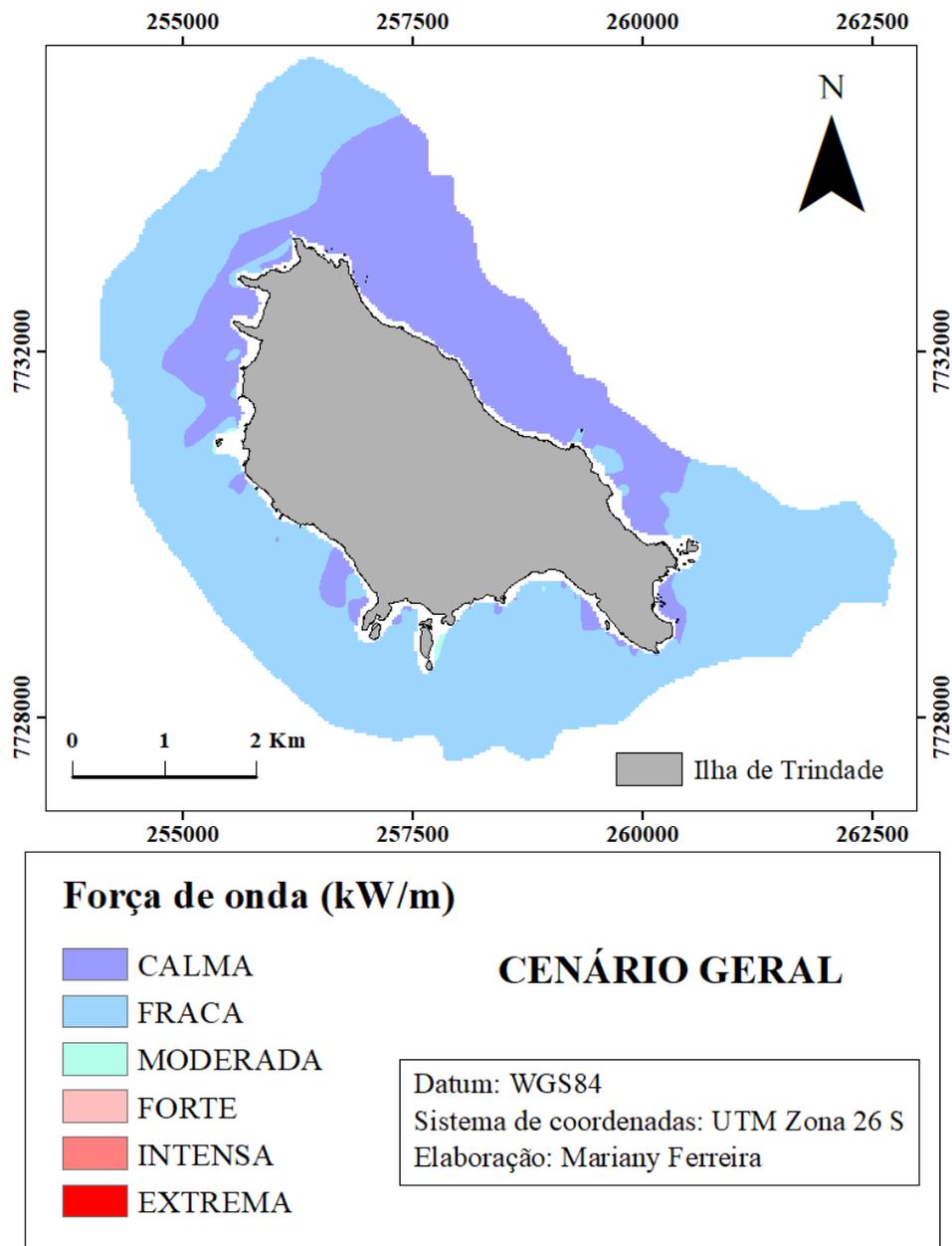


Figura 43: Mapa de distribuição da força da onda ao redor da ilha durante 13 anos (2005-2018).

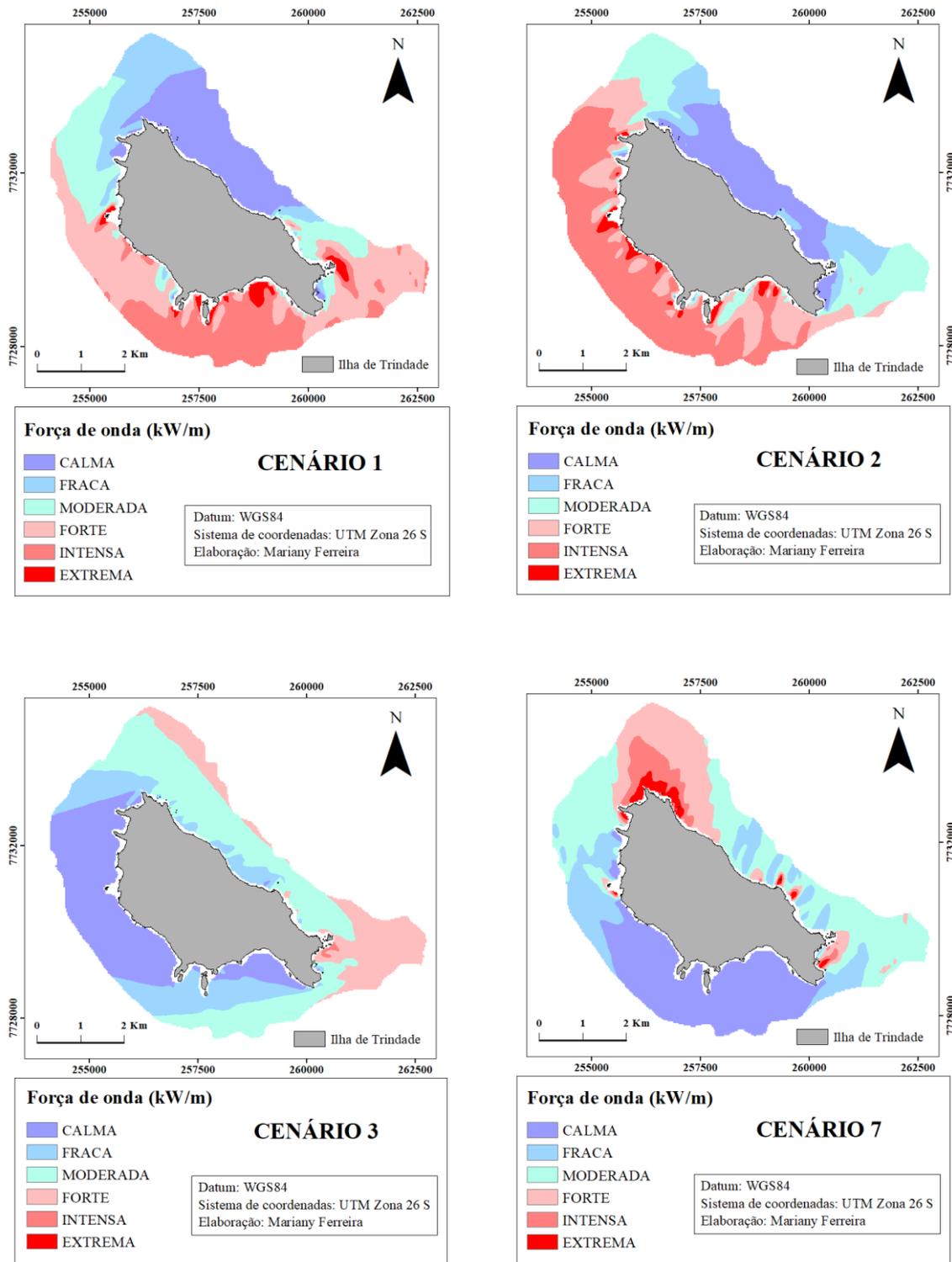


Figura 44: Mapa de distribuição da força da onda de acordo com as informações dos cenários a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW), c) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e d) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N).

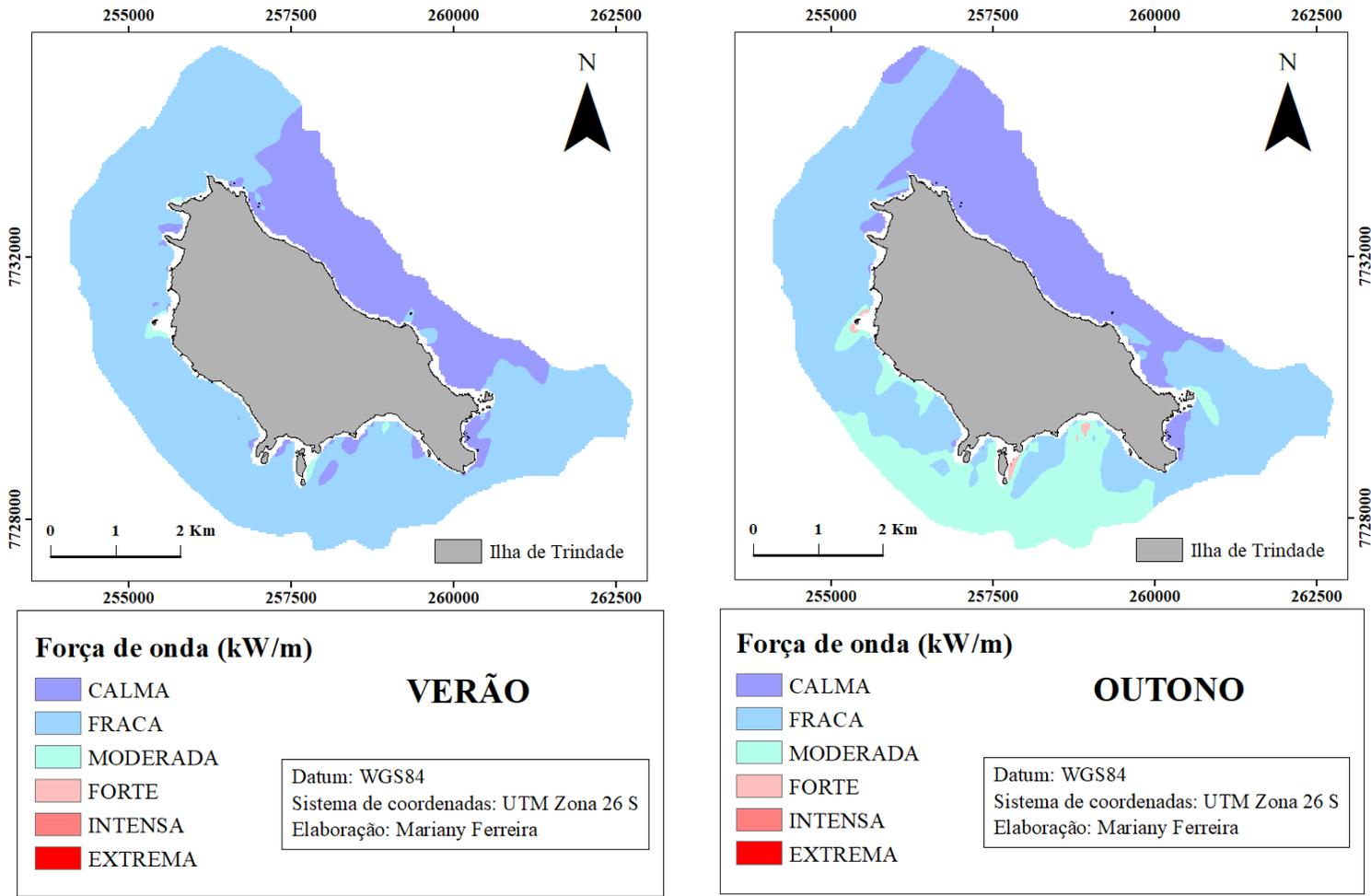


Figura 45: Mapa de distribuição da média sazonal da força da onda a) Verão b) Outono.

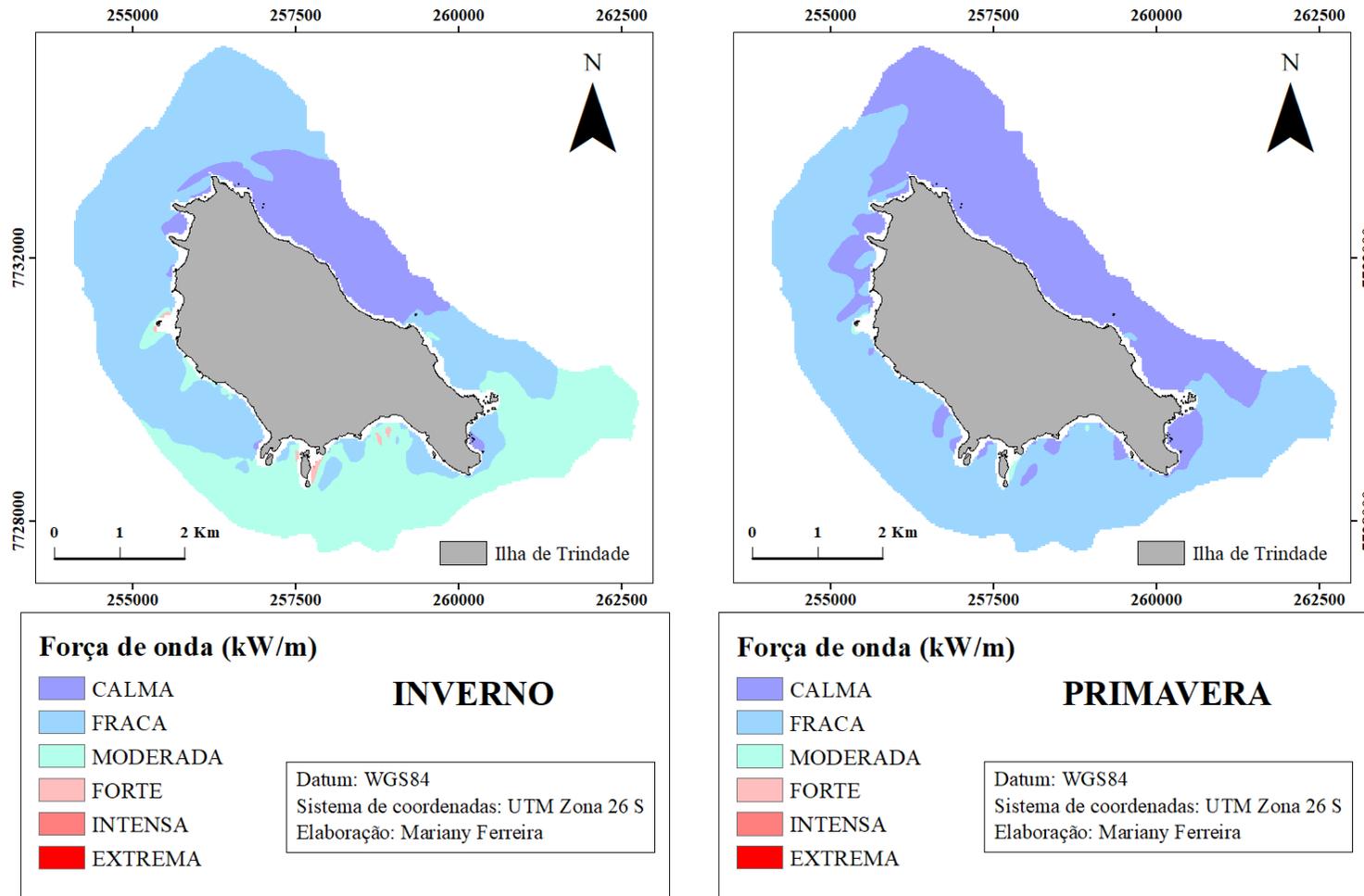


Figura 46: Mapa de distribuição da média sazonal da força da onda a) Inverno, b) Primavera.

#### 6.5.4. VELOCIDADE ORBITAL JUNTO AO FUNDO

Os valores das velocidades orbitais juntos ao fundo foram obtidos a partir da modelagem esses dados possibilitaram a confecção mapas de distribuição da velocidade ao redor da ilha. De forma geral a região Sul da Ilha e a região adjacente à praia dos Andradas apresentaram maiores velocidades com aproximadamente 0,6 m/s (Figura 47). Ao analisar sazonalmente os resultados, observa-se que há uma variação gradual no decorrer dos meses, onde durante o verão a velocidade orbital é menor em todo o entorno da ilha, sendo o maior valor encontrado, aproximadamente 0,7 m/s, próximo a praia do Príncipe, durante o Outono vemos que as velocidades passam a aumentar sendo o pico durante o inverno com valores maiores que 0,8 m/s na região da praia do Príncipe e na praia dos Andradas. Com o fim do inverno e chegada da Primavera observa-se que os valores passam a diminuir novamente, durante todas as estações os menores valores de velocidade orbital encontram-se principalmente na região Norte, com exceção do verão em que as ondas são predominantemente de norte; e Leste da Ilha, isso se dá principalmente devido a direção principal de onda que chega à Ilha (Sul) (Figura 48).

No cenário 1 pôde-se observar um aumento da velocidade desde a isóbata de 50 m até a linha de costa sendo mais acentuada na região da praia dos Andradas e na praia do Príncipe com velocidades máximas variando entre 1,46 e 1,82 m/s nesses setores. Para o cenário 2 houve pouca variação uma vez que o ângulo de incidência da onda varia pouco e a batimetria também não apresenta grandes variações. Ao analisar o cenário 3 observa-se que o setor 2 da ilha apresenta maiores velocidades orbitais junto ao fundo principalmente entre as praias da Calheta até a praia do Túnel. No cenário 7 as regiões de maiores velocidades ficam restritas a apenas algumas praias sendo mais acentuada na região adjacente à praia das Andradas. Os mapas podem ser observados na Figura 49.

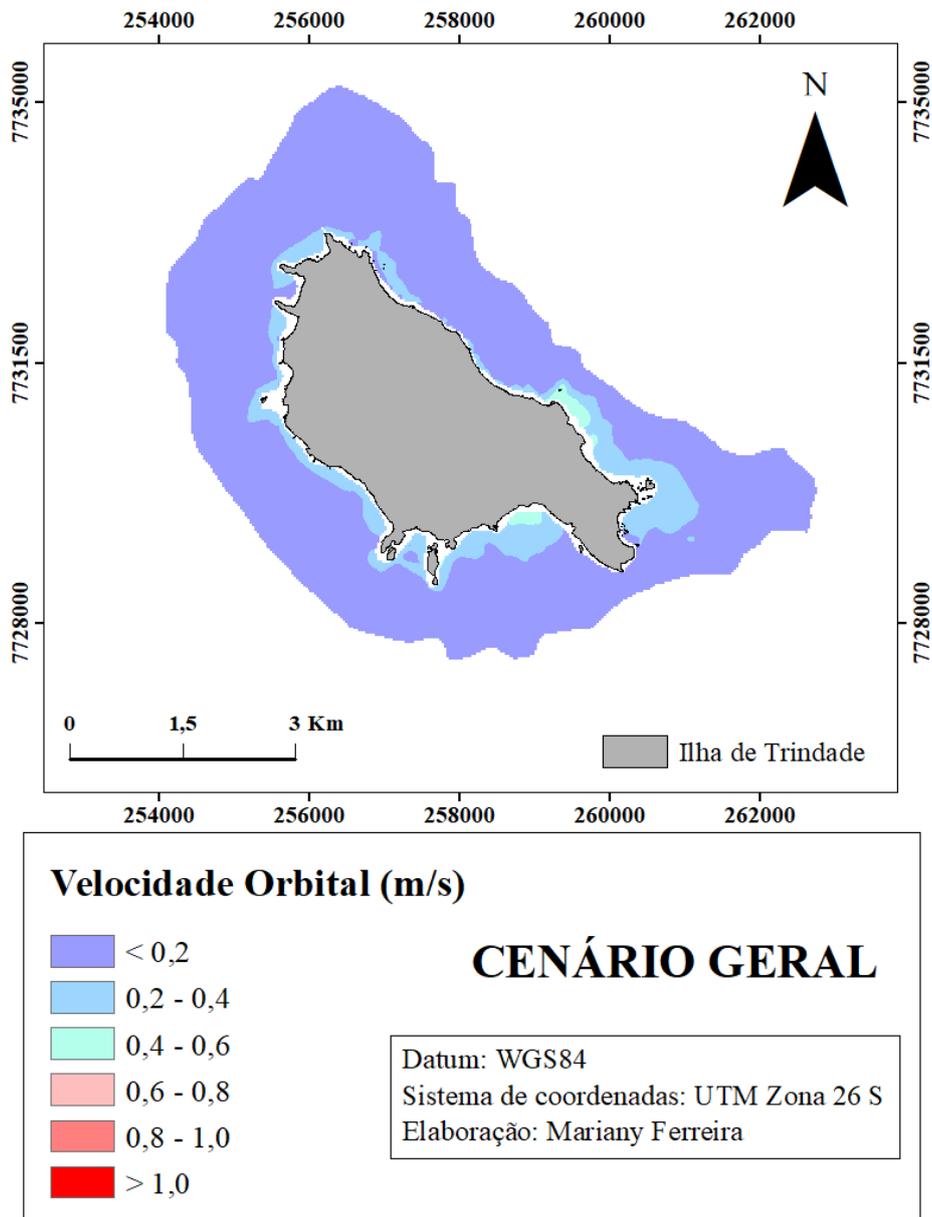


Figura 47: Mapa de distribuição da velocidade orbital geral para a Ilha de Trindade.

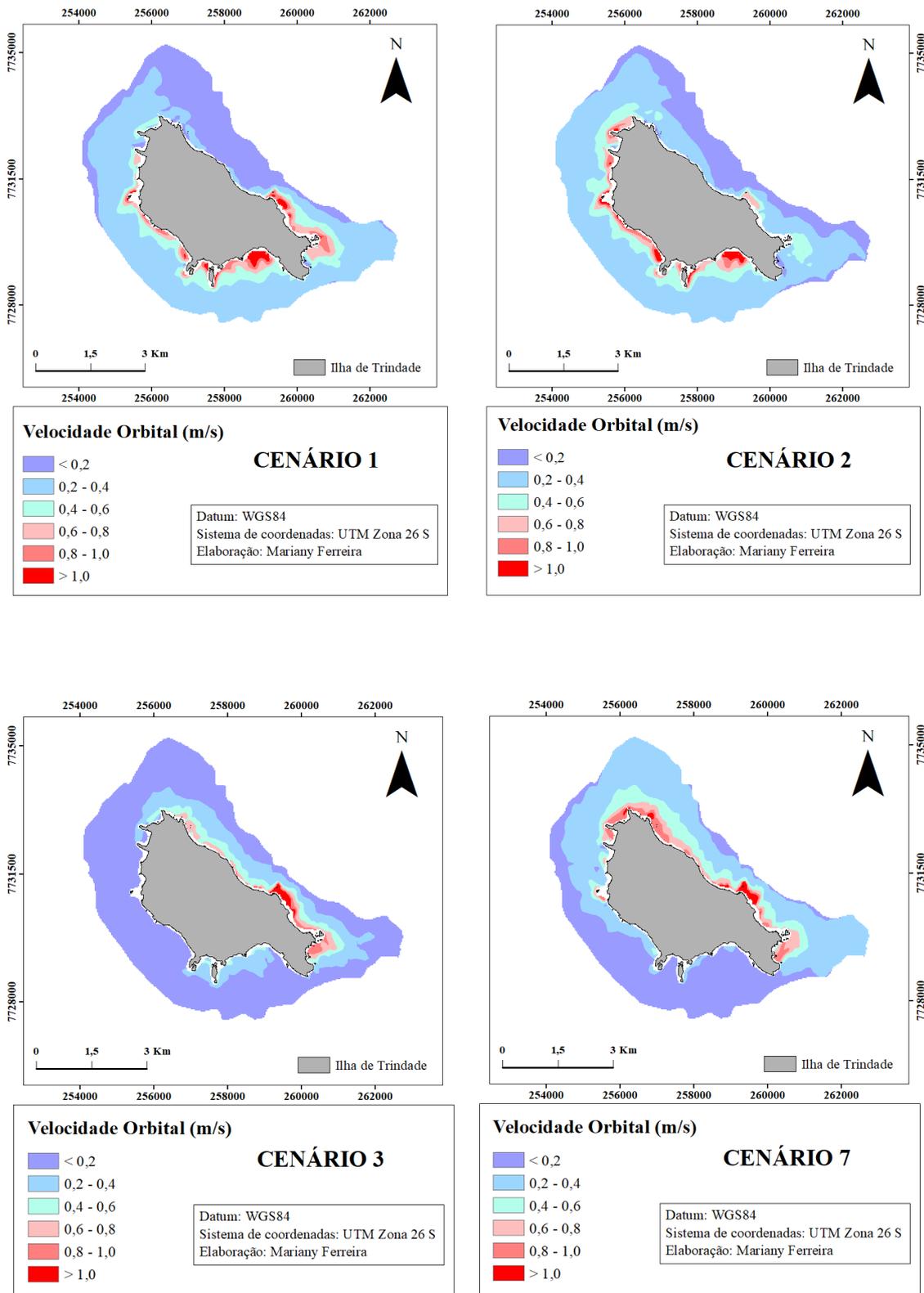


Figura 48: Mapa de distribuição da velocidade orbital da onda de acordo com os cenários a) C1 (Hs: 2,2; Tp: 11,9; Dir: S), b) C2 (Hs: 2,2; Tp: 12,18; Dir: SW), c) C3 (Hs: 2,2; Tp: 8,25; Dir: E) e d) C7 (Hs: 1,71; Tp: 13,95; Dir: N).

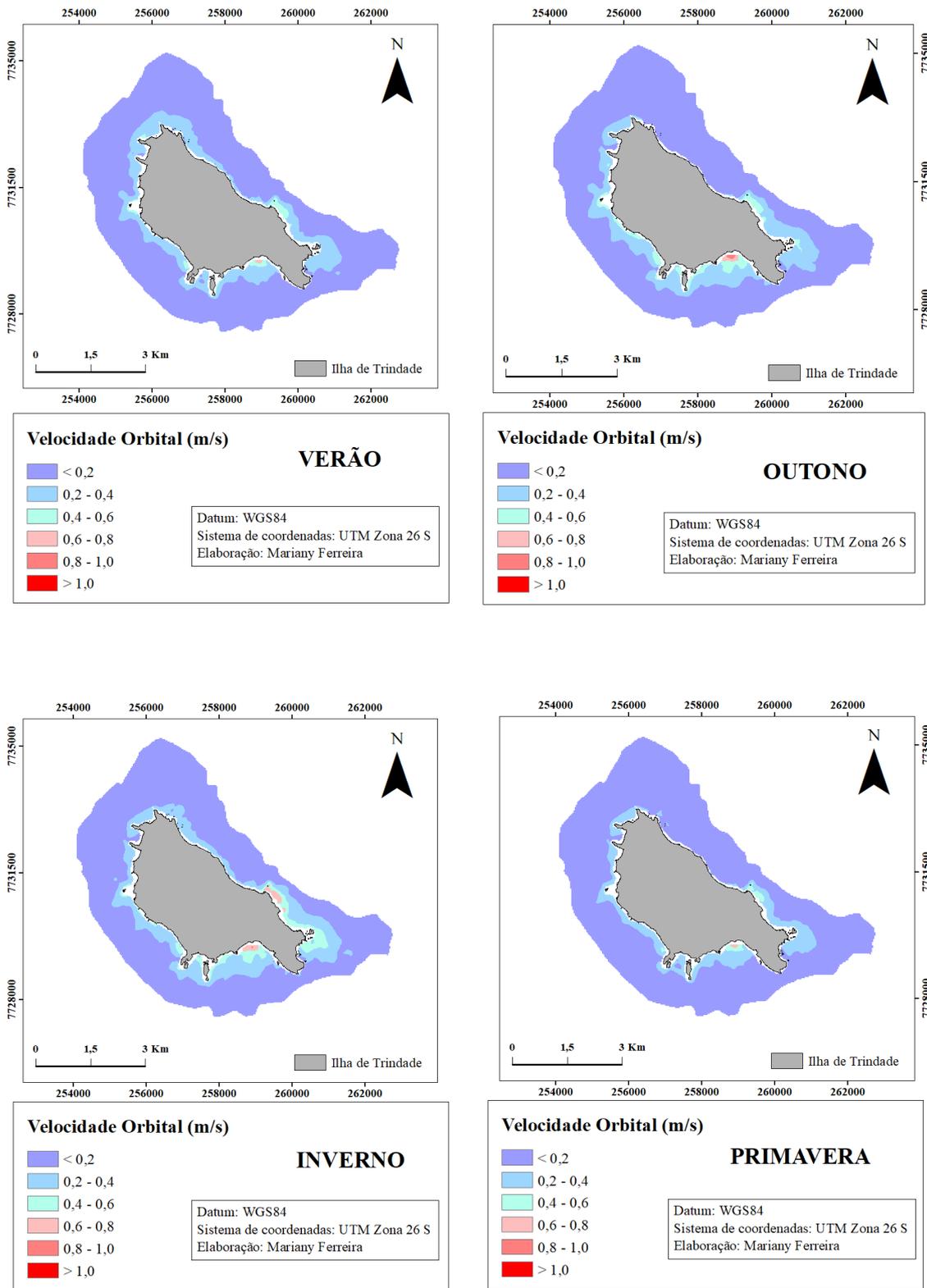


Figura 49: Mapa de distribuição da velocidade orbital da onda sazonalmente a) Verão, b) Outono, c) Inverno e d) Primavera.

## 7. DISCUSSÃO

As características inerentes ao regime de ondas de uma região estão relacionadas principalmente ao tipo de fenômeno meteorológico que as formaram. As condições meteorológicas locais são caracterizadas pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) estando a Ilha de Trindade situada a noroeste do mesmo (Almeida, 1961). Em termos gerais, verificou-se duas direções preferenciais para as ondas na região a de sul e sudoeste, caracterizadas por altura significativa e período de pico médios de 2 m e Tp de 11 s, respectivamente. Além disso, foi evidenciado a partir do cálculo do percentil 90 os casos extremos ao longo dos 13 anos analisados que apresentaram ondas com Hs maior que 2,9 m e período maior que 14,29 s.

Os valores encontrados estão em conformidade com o clima de ondas descrito por Calliari *et al.* (2016), ao largo da região de interesse. No estudo, os autores mostram que as ondas chegam de sul (33,7%) em sua maioria seguidas por ondas de sudoeste (23,4%), leste com (20,44%) e norte com (10,57%), em relação à altura significativa o valor médio encontrado foi 2,12 m e para período de pico foi de 11,07s valores bem similares aos encontrados no presente trabalho (Figura 50). Os valores também corroboraram com resultados obtidos por Pinheiro (2017) que descreve as ondas da região com direção predominantemente de Sul (31%) e Sudoeste (23%), seguido por ondas de Leste (20%).

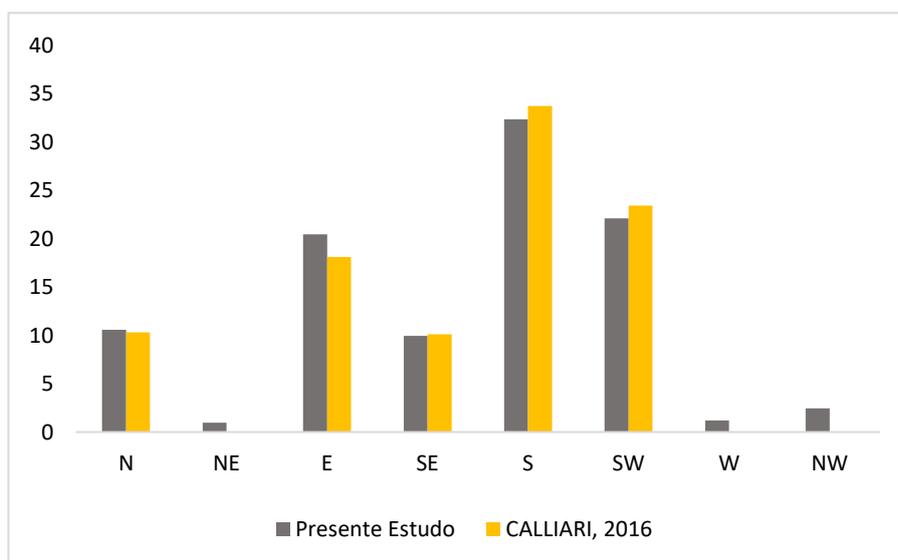


Figura 50: Comparação dos dados obtidos no presente trabalho com os dados obtidos por Calliari *et al.*, 2016.

A Ilha de Trindade encontra-se na latitude do estado do Espírito Santo (ES), região sudeste do Brasil. Nesta região existe a predominância de dois sistemas principais de circulação atmosférica o Anticiclone Semipermanente do Atlântico Sul (ASAS) que é um sistema de alta pressão que atua sobre o atlântico sul durante o ano todo e é responsável pela manutenção dos Ventos Alísios de Nordeste; e o Anticiclone Polar Migratório (APM) que se trata de núcleos de alta pressão precedidos de sistemas frontais e geram ondas oceânicas, sendo mais intenso durante o inverno no hemisfério sul (Silva, 2013).

A partir da análise do clima de ondas, é possível observar uma sazonalidade da altura significativa e, portanto, do potencial energético das ondas que atingem a ilha com diminuição da energia durante os meses de primavera e verão e aumento durante os meses correspondentes ao outono e inverno. Durante o verão a região está sob influência da ASAS, neste cenário a estabilidade atmosférica promovida configura padrão de ondas com menores valores de Hs e, portanto, menor potencial energético. As ondulações são provenientes, em sua maioria, do quadrante norte assim as praias mais afetadas são, a praia da Ponta do Norte e a Praia dos Cabritos que foram as únicas a apresentar força de onda classificada como forte e intensa em alguns pontos. De modo geral os resultados mostraram que no verão as ondas variam principalmente entre calmas e moderadas nos dois setores da ilha.

Quando o verão chega ao fim, o ASAS perde força e o que passa a atuar são as frentes frias que ocorrem com maior frequência nesse período (Cavalcanti et al., 2009; Pianca et al., 2010). Além da passagem de frentes frias oriundas de latitudes mais altas principalmente no inverno também podem ser observados ventos do quadrante sul/sudeste (Alvarenga, 2018). A entrada de frentes frias na Ilha de Trindade durante o inverno também foi relatada por Alves (1998) e Almeida (2002) que afirmam que no intervalo de abril a outubro há ocorrência de frentes chegando à ilha com intervalo de aproximadamente uma semana. Esses fatores afetam bastante as condições marítimas locais ocasionando um aumento na Hs e na força de onda.

Durante esses meses a altura significativa e período de pico médio foi de aproximadamente 2 m e 11 s, respectivamente, a direção principal das ondas foi de Sul, essas ondas são descritas por Calliari et al. (2016) como ondas de tempestade e são geradas por ciclones extratropicais no Atlântico. Esse cenário pode ocasionar perda de sedimento em algumas praias que não contam com a proteção dos recifes como a praia do príncipe por exemplo, que é uma praia localizada na porção sul da ilha e em

decorrência da direção principal, assim como as praias do setor oeste, sofre ação direta dessas ondas de maior potencial energético em todos os cenários analisados, tanto sazonalmente, como na média geral. Os resultados de Pinheiro (2017) mostram que durante os meses de outono-inverno é possível identificar picos de ondas associados a eventos de alta energia que são duradouros e favorecem a ocorrência de maiores alterações costeiras nesses períodos.

Houve uma variação considerável nos valores do período de pico ao comparar os meses de inverno e verão. O comportamento diferencial do período da onda tem grande influência na configuração da praia, sendo esse um fator importante no comportamento morfodinâmico local. Períodos de ondas maiores ocasionam um maior transporte de sedimento em direção à praia, ou seja, ondulações do tipo *swell* propiciam perfis praias acrescidos (Daly et al., 2011). Algumas praias da Ilha de Trindade já foram descritas como praias que apresentam perfil de inverno e verão, como por exemplo a praia da Calheta onde Calliari et al. (2016) afirma que durante o inverno há uma maior perda de sedimento e no verão um maior acúmulo.

Em adição ao clima de ondas ao largo da Ilha de Trindade, pela primeira vez é apresentada o padrão de propagação de ondas em direção à ilha e a distribuição de sua força. O conhecimento a respeito da força de onda nas praias da Ilha de Trindade possui grande importância, principalmente para o entendimento sobre os processos hidrodinâmicos que influenciam cada um desses locais. Essas informações, também resultam em subsídios para estudos de distribuição e de comportamento de organismos bentônicos que habitam a região. Analisando a distribuição da força de onda na região costeira da Ilha de Trindade, observa-se que a energia da onda que chega no setor leste é menor em relação ao setor oeste apresentando força de onda máxima no setor leste de 14492,9 kW/m e mínima de 2768,6 kW/m na região adjacente à praia da Calheta, nessa região acontecem os desembarques geralmente de pessoas e materiais, enquanto no setor oeste o valor máximo da energia foi de 26822,7 kW/m na região adjacente à praia da cachoeira e o mínimo foi de 173,8 kW/m na região próxima aos Farilhões, esse cenário se repete ao se analisar os cenários sazonais apresentando poucas variações entre as praias de cada setor.

Áreas com elevados gradientes batimétricos, onde a transição de águas profundas para rasas é muito acentuada ocasionam a chegada de ondas a costa com bastante energia (Rusu, 2012). A diminuição da força de onda nesse setor da Ilha pode estar relacionada a presença de recifes de corais, segundo Gourlay (1996) apud (Siegle & Costa, 2017) a

morfologia de estruturas de recifes gera a atenuação da onda incidente, podendo assim haver uma diminuição da força de onda conforme a distribuição dos recifes de corais.

Todo o entorno da Ilha de Trindade apresenta irregularidades batimétricas, além de recifes em algumas áreas e promontórios rochosos, essas irregularidades podem resultar em um clima de ondas menos variável condicionando praias mais estáveis, de acordo Wright & Short (1984). A praia das Tartarugas por exemplo, assim como as praias de Andradas e Cabritos, não apresenta modificação morfológica significativa devido a presença de recifes e rochas na zona de arrebentação, conferindo proteção contra a influência das ondas. Essa praia foi classificada por Pinheiro (2017) como um ambiente de alta estabilidade com alterações mínimas no perfil de praia. A alta estabilidade da praia das Tartarugas possibilita a desova da tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) que têm o local como área de reprodução prioritária juntamente com o Atol das Rocas e a ilha de Fernando de Noronha. Sendo a Ilha de Trindade a sétima maior colônia da espécie no Atlântico Sul, apresentando aproximadamente, 3600 ninhos depositados anualmente por temporada reprodutiva (Moreira, 1995; Magalhães, 2010).

A agitação marinha ocasionada por ondas incidentes possui papel importante no estabelecimento e na riqueza de organismos marinhos em um determinado local. Brazeiro (2001) estudou 12 praias expostas no Chile, em um período de dois anos, a fim de relacionar a riqueza de espécies com a morfodinâmica e fatores físicos locais e chegou à conclusão que a riqueza diminui de forma significativa com o aumento da inclinação da praia e que, além da inclinação, a erosão praial também controla comunidade da macrofauna bêntica. McLachlan (1983) ainda destaca que o número de indivíduos bênticos tende a aumentar à medida que o grau de exposição da praia e a ação das ondas diminuem.

Ilhas oceânicas são regiões vulneráveis ao aumento do nível do mar e aos impactos das mudanças climáticas. Estudos dos efeitos dessas mudanças em ilhas do Pacífico e Índico realizados por Church et al. (2006) antecipam sérios problemas aos seus habitantes devido a um claro aumento do nível do mar, além da maior frequência e intensidade de eventos extremos. Autores associam os impactos na região costeira dessas ilhas às alterações nos padrões climáticos como temperatura, precipitação e ventos; e ao aumento da energia das ondas (Church et al., 2006; Reguero et al., 2019).

Apesar do papel protetor que possui essas estruturas de recifes também deve ser levado em consideração os efeitos das mudanças climáticas no local, pois a variação na coluna d'água como consequência do aumento do nível do mar pode trazer problemas à

região como erosão, por exemplo, principalmente nas praias arenosas, uma vez que é difícil que as taxas de crescimento do recife sigam o aumento rápido do nível do mar ocorrendo assim uma redução da atenuação das ondas incidentes, ou seja as ondas chegarão a costa da ilha com uma energia mais acentuada (Siegle & Costa, 2017).

Os resultados de mobilidade do fundo marinho da região se mostraram sensíveis a variações da altura significativa, período de pico e direção da onda. Ao analisar a variação da velocidade orbital de fundo verifica-se que esse parâmetro tende a aumentar com o aumento da altura da onda e pode variar de acordo com a direção de origem da onda. Além disso para todos os cenários verifica-se que a velocidade orbital é menor em regiões mais profundas em comparação com regiões de menor profundidade que apresentaram maior velocidade orbital e, portanto, mais potencial de remobilização de fundo.

Durante o outono, inverno e primavera a distribuição da velocidade orbital da onda próximo ao fundo teve seu maior valor na região adjacente à Praia do Príncipe, região sul da ilha, isso é explicado devido as elevadas alturas significativas nessa região que recebe ondas de sul ao longo da maior parte do ano. As praias podem ser classificadas em dois estados extremos, de acordo com a morfodinâmica: dissipativas, com perfil suave, ondas quebrando longe da faixa entremarés, com baixa inclinação, maior número de espécies, abundância e biomassa (Short & Wright, 1983; McLachlan, 2005); e reflectivas, caracterizadas por sedimento mais grossos, maior inclinação e forte exposição ao hidrodinamismo com ondas quebrando diretamente na zona entremarés (Lepka, 2008).

A praia do príncipe, assim como a praia do Túnel, foi classificada por Calliari et al. (2016) como reflexiva e tendo um perfil de praia bastante inclinado. Como o estabelecimento de espécies bentônicas depende principalmente das características morfológicas e morfodinâmicas da praia (McLachlan, 1983), a ausência de recifes nessas praias pode ser explicada por essas características.

Além disso o local também apresenta um padrão de circulação celular, através de correntes de retorno perpendiculares à praia, essas correntes apresentam grande perigo para banhistas e são responsáveis pela maioria dos afogamentos no mar. Nessas praias além do perigo das correntes de contorno os acidentes também estão associados a um evento recorrente chamado localmente de “Onda Camelo” que é descrito como uma ocorrência súbita de ondas altamente energéticas com altura de 2 m e períodos maiores que 12 s, que ao alcançarem águas rasas sofrem um aumento abrupto de altura, sendo atribuídas sete fatalidades desde 1963 (Pinheiro, 2017; Calliari et al., 2016).

Apenas durante o verão essa situação é modificada pois a ilha passa a receber ondas de Norte e a zona de sombra que antes estava localizada em boa parte do setor leste da ilha é transferida para região sul. Nessa época do ano os maiores valores de velocidade orbital da onda ficaram concentrados próximo a praia dos Andradas. De acordo com estudos realizados por Calliari et al. (2016), a Praia dos Andradas é caracterizada por granulação de areia média a grossa, esse fato corrobora com o resultado de um alto valor de velocidade orbital de fundo encontrado no local, pois é necessária uma alta energia para transportar sedimentos grossos. Para que se possa realizar uma análise com maior precisão a respeito da velocidade orbital de fundo é necessário que sejam utilizados dados batimétricos com uma melhor resolução e mais próximos as praias da ilha.

O modelo SWAN foi implementado para a Ilha de Trindade com o intuito de fornecer maiores informações a partir da definição do clima de ondas de forma a integrar os dados de Hs, Tp e Direção com as interferências das variações morfológicas locais e as condições meteoceanográficas, sendo essa a primeira análise de propagação de ondas para todo o entorno da Ilha de Trindade, assim como a descrição da força de onda e da velocidade orbital de fundo.

A análise da distribuição da força de onda que chega à ilha assim como da velocidade orbital e da distribuição da altura significativa por meio da integração de dados em estrutura de SIG (Sistema de Informação Geográfica) possibilitou a caracterização das ondas que atingem as praias da Ilha de Trindade. A importância do uso de SIG com fins de gestão costeira tem sido amplamente descrita na literatura, como em Tolvanen & Suominen (2005), onde os autores analisaram, entre outros resultados, a distribuição da força de onda temporalmente em um arquipélago Finlandês e caracterizaram, a partir de mapas, parâmetros relevantes para entendimento dos processos costeiros do local.

Em adição à compreensão do clima de ondas ao largo, e sua propagação em direção à Ilha de Trindade, os resultados encontrados no presente trabalho são considerados importantes aliados no processo de gestão costeira, pois fornecem informações imprescindíveis a análise e diagnóstico das alterações geomorfológicas e ecológicas locais, contribuindo para estudos relacionados à distribuição de habitats e comunidades bentônicas da plataforma e dos costões rochosos, por exemplo, além de servirem como informações de base para estudos posteriores no entorno da ilha

## 8. CONCLUSÃO

- O presente trabalho descreveu o clima de ondas da Ilha de Trindade utilizando dados de 13 anos (2005 - 2018) de reconstituição da agitação marítima a partir de dados do modelo WW3 e SWAN, abordando o clima de ondas ao largo e a sua propagação em direção à ilha.
- Os resultados do modelo WW3 tiveram correlação de aproximadamente 50% em relação aos dados medidos *in situ*, ao analisar o resultado da correção dos dados obtidos a partir do SWAN vemos que o mesmo apresenta valores acima de 60%, chegando a 89% em relação ao período de pico na praia do Príncipe. Em termos gerais, os dois modelos conseguiram reproduzir de forma satisfatória os dados analisados.
- Com base no clima de ondas obtido a partir da série temporal de 13 anos, após a validação do modelo numérico foi possível caracterizar o clima de ondas geral e a força de onda que atinge cada setor da ilha.
- No geral, observou-se que são mais frequentes ondas com altura entre 1,5 e 2 m com período médio de 11 s. Com duas direções de onda preferenciais de Sul e Sudeste.
- A climatologia sazonal de direção de onda para o outono, inverno e primavera seguem o mesmo padrão da climatologia geral com direção predominantemente de Sul, o verão, todavia, apresenta direção diferente das demais estações e mostra predominância de ondas de Norte.
- O verão apresentou menores alturas significativas e maiores períodos. A direção principal foi a de Norte com período variando entre 10 e 12 s e altura significativa variando entre 1,5 e 2 m. Os casos extremos observados para o verão a partir do cálculo do percentil 90 ficou entre o intervalo de 2,18 a 3,79 m. A força de onda durante o verão também foi baixa variando apenas entre calma e moderada.

- No outono a direção principal foi de Sul com período variando entre 10 e 12 s e altura significativa variando entre 1,5 e 2 m. Os casos extremos obtidos mostraram que a altura significativa variou entre 3 e 5,28 m e o período variou entre 14,11 e 21,04 s.
- No intervalo relativo ao inverno foram observadas maiores alturas significativas e menores valores de período de pico estando associadas principalmente a entrada de frentes frias na região sudeste. A direção principal permaneceu de Sul, porém com períodos variando entre 8 e 10 s e com alturas significativas maiores variando entre 2 e 2,5 m. Para os casos extremos obtidos a partir do cálculo do percentil 90 observou-se que o período variou entre 13,7 e 20,84 e a altura significativa variou entre 3,3 e 4,96 m.
- Para a primavera a direção principal foi de Sul, o período variou entre 10 e 12 s e a altura significativa variou entre 1,5 e 2 m. Os extremos para essa estação ficaram entre 14,24 e 22,78 para o período de pico e 2,64 e 4,20 m para a altura significativa.
- A força da onda ao redor da ilha variou de acordo com a variação da altura significativa da onda, no cenário médio geral observa-se que a força foi maior na região sul da ilha estando relacionada diretamente com a direção de onda predominante no local (Sul). No decorrer das estações verificou-se que a força de onda sazonal segue o mesmo padrão da força de onda geral durante o outono, inverno e primavera. Reduzindo os valores conforme se aproxima do verão, estação que apresenta menor variação e menores valores de força ao redor da ilha.
- Durante o outono, inverno e primavera a distribuição da velocidade orbital da onda próximo ao fundo teve seu maior valor na região adjacente à Praia do Príncipe, região sul da ilha. Variando durante o verão onde a praia dos Andradas passa a apresentar maiores velocidades orbitais de fundo. Essa mudança está relacionada com a variação da direção de incidência da onda.

## 9. REFERÊNCIAS

ABDALLA, S. 2006. Global Validation of ENVISAT wind, wave and water vapour products from RA-2, MWR, ASA and MERIS. Tech. rep., ESA Contract Report 17585.

ALMEIDA, F. F. M. 1962. Petrologia da Ilha da Trindade. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, F. F. D. 2002. Ilha de Trindade: Registro de vulcanismo cenozóico no Atlântico Sul. SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, DA; QUEIROZ, ET, WINGE, M, 369-377.

ALVES, R.J.V. 1998. Ilha da Trindade e Arquipélago de Martim Vaz: um ensaio geobotânico. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha

ALVARENGA, J. G. 2018. Avifauna da Cadeia Vitória-Trindade: História, diversidade e conservação.

ANGULO, R. J., DE SOUZA, M. C., BARBOZA, E. G., DA CAMARA ROSA, M. L. C., FERNANDES, L. A., GUEDES, C. C. F., MARTIN, C. M. 2018. Quaternary sealevel changes and coastal evolution of the Island of Trindade, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 84, 208-222.

BANCO NACIONAL DE DADOS OCEANOGRÁFICOS (BNDO) – DHN/CHM.

BARTH, R. 1958. Observações biológicas e meteorológicas feitas na Ilha de Trindade. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 56(1), 261-279.

BOOIJ, N. R. R. C., RIS, R. C., & HOLTHUIJSEN, L. H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.

BRAZEIRO, A. 2001. Relationship between species richness and morphodynamics in sandy beaches: what are the underlying factors. *Marine Ecology Progress Series*, 224, 35-44.

- CALLIARI, L. J., DE SOUZA PEREIRA, P., SHORT, A. D., SOBRAL, F. C., MACHADO, A. A., PINHEIRO, Y. G., & FITZPATRICK, C. 2016. Sandy Beaches of Brazilian Oceanic Islands. In *Brazilian Beach Systems* (pp. 543-571). Springer, Cham.
- CALLIARI, L. J., MUEH C. D., HOEFEL, F. G., & TOLDO Jr, E. 2003. Morfodinâmica praias: uma breve revisão. *Revista brasileira de oceanografia*, 51(UNICO), 63-78.
- CASTRO, J. W. A. 2010. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: uma visão da Geologia ambiental. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(3), 303-319.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. et al. 2009. *Tempo e Clima. Oficina de Textos*, Sao Paulo – SP.
- CHURCH, J. A., WHITE, N. J., & HUNTER, J. R. 2006. Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. *Global and Planetary Change*, 53(3), 155-168.
- CLEMENTE, E. P. 2006. Land environments of the Trindade island, South Atlantic: soil and physical environment characterization as a subsite for creation of a conservation unit. 179 f. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química,) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- CRUZ, L. M. M. 2004. Estudo comparativo de variações espaciais e temporais nas “forçantes meteorológicas” em um modelo de ondas de terceira geração no oceano atlântico sul (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro).
- DALY, C. J., BRYAN, K. R., ROELVINK, J. A., KLEIN, A. H. F., HEBBELN, D., & WINTER, C. 2011. Morphodynamics of embayed beaches: the effect of wave conditions. *Journal of Coastal Research*, 1003-1007.
- FARIAS, I. U. Eddy-Induced Ekman Pumping in the Vitória-Trindade Ridge Region. 2019. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, University of São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/D.21.2020.tde-13032020-133135. Acesso em: 2021-02-03.

FRIEDLANDER, A. M., BROWN, E. K., JOKIEL, P. L., SMITH, W. R., & RODGERS, K. S. 2003. Effects of habitat, wave exposure, and marine protected area status on coral reef fish assemblages in the Hawaiian archipelago. *Coral reefs*, 22(3), 291-305.

GARRISON, T. 2010. *Fundamentos de oceanografia*. Cengage Learning.

GAYLORD, B. 1999. Detailing agents of physical disturbance: wave-induced velocities and accelerations on a rocky shore. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 239(1), 85-124.

GIBBONS, M. J. (1988). The impact of wave exposure on the meiofauna of *Gelidium pristoides* (Turner) Kuetzing (Gelidiales: Rhodophyta). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(6), 581-593.

GOURLAY, M. R. 1996. Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles. *Coastal Engineering*, 28, 17 –55.

HOLTHUIJSEN, L. H., BOOIJ, N., & RIS, R. C. 1993. A spectral wave model for the coastal zone. In *Ocean Wave Measurement and Analysis* (pp. 630-641). ASCE.

HOLTHUIJSEN, L. H. 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. Delft University of Technology and UNESCO–IHE, Cambridge University Press.

INMAN, D. L., & MASTERS, P. M. 1994. Status of research on the nearshore. *Shore and Beach*, 62(3), 11-20.

JANSSEN, P.A.E.M.; HANSEN, B. & BIDLOT, J-R. 1997. Verification of the ECMWF wave forecasting system against buoy and altimeter data *Weather and Forecasting*, 12, (4), 763-784.

KLEIN A.H.F., FERREIRA O., DIAS J.M.A., TESSLER M.G., SILVEIRA L.F., BENEDET L., MENEZES J.T.G.N. ABREU J.G.N. 2010. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: A review. *Coastal Engineering*, 57:98-111.

KOMAR, P. D., & MILLER, M. C. 1973. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *Journal of Sedimentary Research*, 43(4), 1101-1110.

- KOMAR, P. D. 1996. Tidal-inlet processes and morphology related to the transport of sediments. *Journal of Coastal Research*, 23-45.
- KOMAR, P. D. 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall. New Jersey, 539.
- LALBEHARRY, R. 2001. Evaluation of the CMC Regional Wave Forecasting System against Buoy Data; *Atmosphere-Ocean* 40 (1), 1-20.
- LEPKA, D. L. 2008. Macrofauna de praias arenosas com diferentes graus de morfodinamismo no Parque Estadual da Ilha do Cardoso, SP, Brasil.
- LAVENÈRE-WANDERLEY, A. A., & SIEGLE, E. 2019. Wave-induced sediment mobility on a morphologically complex continental shelf: eastern Brazilian shelf. *Geo-Marine Letters*, 39(4), 349-361.
- MAGALHÃES, M. S., FREITAS, M. D. L., SILVA, N. B. D., & MOURA, C. E. B. D. 2010. Morfologia do tubo digestório da tartaruga verde (*Chelonia mydas*). *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 30(8), 676-684.
- MARINHO, C., ARIGONY NETO, J., NICOLODI, J. L., LEMKE, N., & FONTOURA, J. A. S. 2020. Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Ocean and Coastal Research*, 68.
- MARQUES, C. P. M., JÚNIOR, A. P. M., & de OLIVEIRA, F. S. (2019). Hidrogeomorfologia da ilha da Trindade: a única rede hidrográfica permanente nas ilhas oceânicas brasileiras. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(2).
- MASSEL, S. R. 1996. *Ocean surface waves: their physics and prediction*. World scientific.
- MATOS, M. F. A., AMARO, V. E., FORTES, C. J. E. M., & SCUDELARI, A. C. 2014. Interação entre ondas oceânicas e fundo marinho: resultados na plataforma continental setentrional do Rio Grande do Norte.
- MATOS, M. F. A. 2013. Modelagem do clima de ondas e seus efeitos sobre as feições morfológicas costeiras no litoral setentrional do Rio Grande do Norte.

- MCLACHLAN, A. 1983. Sandy beach ecology—a review. *Sandy beaches as ecosystems*, 321-380.
- MELO FILHO, E. et al. 2008. Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina.
- NEVES, C. F., & MUEHE, D. 2010. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. *Parcerias estratégicas*, 13(27), 217-296.
- MOHR, L.V. 2009. Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo—volume II. Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 280 pp.
- MOREIRA, L., C. BAPTISTOTTI, J. SCALFONE, J. C. THOMÉ and A. P. L. S. DE ALMEIDA 1995. Occurrence Of *Chelonia Mydas* On The Island Of Trindade, Brazil. *Marine Turtle Newsletter* Vol:70 2.
- NOAA WW3. National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>
- NOGUEIRA, I.C.M. 2014. Caracterização do clima de ondas na Bacia do Espírito Santo através de modelagem numérica. Dissertação de mestrado.
- PATRÍCIO, R. L. 2012. Mapeamento da Ilha da Trindade, Atlântico Sul. Graduação (trabalho de conclusão de curso em Geologia), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP, 2012, 80 p.
- PIANCA, C., MAZZINI, P. L. F., & SIEGLE, E. 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1), 53-70.
- PINHEIRO, Y. G. 2017. Morfodinâmica das praias arenosas e riscos costeiros do setor leste da Ilha da Trindade, ES. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande.
- PHILLIPS, O. M. 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of fluid mechanics*, 2(5), 417-445.
- REGUERO, B.G., LOSADA, I.J., MÉNDEZ, F.J., 2019. A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nat. Commun.* 10, 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>.

RIS, R. C. 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering.

RIS, R. C., HOLTHUIJSEN, L. H., & BOOIJ, N. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7667-7681.

RUSU, L., & SOARES, C. G. (2012). Wave energy assessments in the Azores islands. Renewable Energy, 45, 183-196.

SIEGLE, E., COSTA, M.B., 2017. Nearshore Wave Power Increase on Reef-Shaped Coasts Due to Sea-Level Rise. Earth's Futur. 5, 1054–1065. <https://doi.org/10.1002/2017EF000624>

Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do mar. PROTRINDADE: programa de pesquisas científicas na Ilha de Trindade. 10 anos de pesquisas/SECIRM - Brasília, 2017. 200p. il.

SCHAEFER, C. E. G. R., & DE OLIVEIRA, F. S. 2015. Brazil in the South Atlantic: The Fernando de Noronha and Trindade Archipelagos. In Landscapes and Landforms of Brazil (pp. 65-77). Springer, Dordrecht.

SHORT, A. D. 1978. Wave power and beach-stages: a global model. In Coastal Engineering 1978 (pp. 1144-1162).

SHORT, A. D., & WRIGHT, L. D. 1983. Physical variability of sandy beaches. In Sandy beaches as ecosystems (pp. 133-144). Springer, Dordrecht.

SILVA, P. E. D. 2013. Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

SOULSBY, R. 1997. Dynamics of marine sands. 249 p. London: Thomas Telford.

TOLMAN, H. L. 1997. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 1.15. NOAA/NWS/NCEP/OMB, Technical Note 151.

TOLMAN, H.L. 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB. Tech. note 166. 110p. edn. Disponível em: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch>.

TOLMAN, H.L.; BALASUBRAMANYAN. B.; BURROUGHS, L.D.; CHALIKOV, D.V.; CHAO, Y.Y.; CHEN, H.S & GERALD, V.M. 2002. Development and implementation of wind-generated ocean surface models at NCEP; *Weather and Forecasting*, 17, 311-333.

TOLMAN, H. L. 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276, 220.

TOLVANEN, H., & SUOMINEN, T. 2005. Quantification of openness and wave activity in archipelago environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2-3), 436-446.

VASCONCELLOS, R. M., SANTOS, J. N. D. S., SILVA, M. D. A., & ARAÚJO, F. G. 2007. Efeito do grau de exposição às ondas sobre a comunidade de peixes juvenis em praias arenosas do Município do Rio de Janeiro, Brasil. *Biota Neotropica*, 7(1), 0-0.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. 1998. *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, 2nd ed., Genève, Switzerland, Pub. 702. Secretariat of the World Meteorological Organization.

WRIGHT, L. D., & SHORT, A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, 56(1-4), 93-118.

WRIGHT, J., COLLING, A., & PARK, D. 1999. *Waves, tides and shallow-water processes* (Vol. 4). Gulf Professional Publishing.

YOUNG, I. R. 1999. *Wind generated ocean waves*. Elsevier Ocean Engineering Book Series. v. 2.