



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

LINARA IVINA DE CASTRO RODRIGUES

**DINÂMICA COSTEIRA NO ENTORNO DO TERMINAL PORTUÁRIO DO PECÉM:
ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA DO BRASIL**

FORTALEZA

2022

LINARA IVINA DE CASTRO RODRIGUES

DINÂMICA COSTEIRA NO ENTORNO DO TERMINAL PORTUÁRIO DO PECÉM:
ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia. Linha de Pesquisa: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^ª Dra. Cynthia Romariz Duarte.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R614d Rodrigues, Linara Ivina de Castro.

Dinâmica costeira no entorno do Terminal Portuário do Pecém: estudo de caso no Sistema de Modelagem Costeira do Brasil / Linara Ivina de Castro Rodrigues. – 2022.
106 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

1. SMC-Brasil. 2. Hidrodinâmica costeira. 3. Clima de ondas. 4. Modelagem numérica. 5. Transporte longitudinal de sedimentos. I. Título.

CDD 551

LINARA IVINA DE CASTRO RODRIGUES

DINÂMICA COSTEIRA NO ENTORNO DO TERMINAL PORTUÁRIO DO PECÉM:
ESTUDO DE CASO NO SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA DO BRASIL

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dra. Cynthia Romariz Duarte (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Maria de Fátima Alves de Matos
Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis

Prof. Dr. Alex Costa da Silva
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda força concedida e por sempre cuidar de mim.

A minha família, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

A minha orientadora, Prof^a Dra. Cynthia Romariz Duarte pela confiança, paciência, por todo o apoio e motivação.

À CAPES, pelo auxílio financeiro com a manutenção da bolsa.

Ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) brasileiro, a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID) através do financiamento do Projeto SMC-Brasil por desenvolver o SMC-Brasil e pela disponibilização do mesmo.

Ao Complexo do Pecém por fornecer os dados necessários a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) que auxiliou com todos os equipamentos e a infraestrutura necessária para a execução esta pesquisa.

Aos amigos e colegas da UFC e do GEOCE, principalmente a Claudia, Maynara, Cassiano, Rayssa, Mateus, Aline, Meg, Iago, Isaac e Laryssa por toda a ajuda e pelos momentos compartilhados.

E a todos que não foram mencionados, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

What are men to rocks and mountains? Oh! what hours of transport we shall spend! And when we do return, it shall not be like other travellers, without being able to give one accurate idea of anything. We will know where we have gone -- we will recollect what we have seen. Lakes, mountains, and rivers shall not be jumbled together in our imaginations; nor, when we attempt to describe any particular scene ... (Pride and Prejudice, Jane Austen).

RESUMO

O presente trabalho apresenta o uso de uma ferramenta computacional aplicada a uma praia do estado do Ceará, com o objetivo de compreender e analisar a dinâmica costeira da praia e, a partir dos resultados das pesquisas disponíveis, com dados coletados *in situ*, comprovar a utilidade da ferramenta e de sua base de dados. As áreas do litoral estão sob constante alterações, causadas por eventos naturais ou por atividades antrópicas. No Brasil, onde fenômenos como a ocupação da zona costeira geram sérios impactos a esses ambientes, o estudo e conhecimento desses espaços é essencial para elaborar um planejamento apropriado a ocupação ordenada. Porém, parte desse estudo é dificultado por conta do déficit de dados para realizar essas caracterizações. Ferramentas com bancos de dados de reanálise entram como uma alternativa a essa deficiência. Para esse trabalho as ferramentas do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) foram aplicadas na Praia do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante, Estado do Ceará. A primeira parte da metodologia centralizou-se no pré-processamento da base de dados do SMC-Brasil. Na segunda parte, durante as etapas de pós-processo, foram obtidos os casos propagados em todo o domínio das malhas desenhadas e posterior reconstrução das séries de estados de mar em qualquer ponto do domínio. Por último, estimou-se o ponto de quebra em perfil e o transporte longitudinal de sedimentos. Dentre os resultados, o predomínio das direções de incidência para a área foi de ondas de NE a ESE. Os valores médios mais frequentes de altura de onda variaram de 1,3 m a 1,5 m e de período de pico em torno de 8 s. Os padrões de ondas *sea* e *swell* para área ficaram bem caracterizados nos resultados, de forma geral as ondas *sea* chegam das direções 080° Az a 120° Az, e as *swell* de 020° Az a 060° Az. Os resultados de propagação exibem, em sua maioria, uma resposta dos agentes hidrodinâmicos junto a estrutura do porto e o promontório do Pecém. O transporte longitudinal médio de sedimentos é concordante com a deriva litorânea, tem sua resultante de leste para oeste, com o valor estimado de aproximadamente 115.000 m³/ano. Tanto o clima de ondas para a região como a modelagem das propagações de ondas e correntes e o transporte de sedimento obtido através dos dados de reanálise de ondas do SMC-Brasil coincidiram, em grande parte, com os resultados coletado na literatura, a partir de medições *in situ*. A utilização do SMC-Brasil se mostrou uma boa ferramenta para auxiliar na compreensão inicial dos processos costeiros, sendo fácil de ser utilizada e com grande quantidade de recursos em um único *software*.

Palavras-chave: SMC-Brasil; hidrodinâmica costeira; clima de ondas; modelagem numérica; transporte longitudinal de sedimentos.

ABSTRACT

The present work presents the use of a computational tool applied to a beach in the state of Ceará to understand and analyze the beach's coastal dynamics and, from the results of the research available for the area, with data collected in situ, to prove the usefulness of the tool and its database. Coastal areas are constantly changing, caused by natural events or human activities. In Brazil, where phenomena such as the occupation of the coastal zone generate serious impacts on these environments, the study and knowledge of these spaces are essential to develop appropriate planning for adequate occupation. However, part of this study is hampered by the lack of data to perform these characterizations. Tools with reanalysis databases come in as an alternative to this deficiency. For this work, the tools of the Brazilian Coastal Modeling System (SMC-Brasil) were applied in Praia do Pecém, municipality of São Gonçalo do Amarante, state of Ceará. The first part of the methodology focused on the pre-processing of the SMC-Brasil database. In the second part, during the post-process steps, the propagated cases throughout the domain of the studied area were obtained followed by reconstruction of the series of sea states at any point in the domain. Finally, the wave breaking point in the profile and the longitudinal transport of sediments were estimated. Among the results, the predominance of waves incidence directions for the area was from NE to ESE. The most frequent mean values of wave height ranged from 1.3 m to 1.5 m and peak period around 8 s. The sea and swell wave patterns for the area were well characterized in the results, in general the sea waves arrive from the directions 080° Az to 120° Az, and the swells from 020° Az to 060° Az. The propagation results show, for the most part, a response of the hydrodynamic agents along with the port structure and the Pecém headland. The average longitudinal transport of sediments is in agreement with the coastal drift with a resultant from east to west and an estimated value of approximately $115,000 \text{ m}^3/\text{year}$. The wave climate for the region, the modeling of wave and current propagation and the sediment transport obtained through the wave reanalysis data from the SMC-Brazil largely coincided with the results collected in the literature, from in situ measurements. The use of the SMC-Brazil proved to be a good tool to assist in the initial understanding of coastal processes, being easy to use and with a large number of resources in a single software.

Keywords: SMC-Brazil; coastal hydrodynamics; wave climate; numerical modeling; longitudinal sediment transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Área de estudo mostrando localização no estado do Ceará, Praia do Pecém e praias vizinhas	17
Figura 2	– Geologia da área, principais drenagens e estradas de acesso ao porto	19
Figura 3	– Feições geológicas e geomorfológicas encontradas na área, a) promontório do Pecém, b) quartzitos do embasamento ocorrendo na praia do Pecém, c) granitóides intrusivos (Serra do Juá)	20
Figura 4	– Faixa de praia do Pecém a leste (a) e oeste (b) do promontório, c) detalhe para a ocupação das dunas, d) cordões litorâneos a oeste do promontório	22
Figura 5	– Localização das amostras de sedimento coletadas no Pecém pelo INPH e perfis onde foram coletadas as amostras pelo JICA	23
Figura 6	– Rosa dos ventos da estação de Fortaleza mostrando o padrão dos ventos entre dezembro e maio (a) e junho e novembro (b), dados de 2003 a 2020	25
Figura 7	– Histograma da altura significativa de onda (Hs) durante os anos de 1997, 2000 e 2001 registrada por ondógrafo instalado pelo INPH ao largo do Terminal Portuário do Pecém, (a) primeiro e (b) segundo semestre	27
Figura 8	– Histograma do período de pico dos anos de 1997, 2000 e 2001, registrado por ondógrafo instalado pelo INPH ao largo do Terminal Portuário do Pecém, (a) primeiro e (b) segundo semestre	28
Figura 9	– Rosa de ondas no Pecém, dados diários do ondógrafo Waverider no período de 1997 a 2000	29
Figura 10	– Variação mensal de Hs e Tp para o Pecém, dados do ondógrafo Waverider no período de 1997 a 2000	29
Figura 11	– Documentos temáticos presentes no SMC-Brasil	34
Figura 12	– Ferramentas do SMC-Brasil	35
Figura 13	– Etapas da geração da base de dados de ondas do SMC-Brasil e sua propagação desde profundidades indefinidas até a costa	38
Figura 14	– Características físicas da onda. L: Comprimento da onda; T: Período da onda. H: Altura da onda. a: Amplitude da onda	42
Figura 15	– Zonação do perfil de praia e zona submersa adjacente em função da morfologia	44
Figura 16	– Convenção dos sinais para o transporte longitudinal adotado no SMC-Brasil	47

Figura 17	– Fluxograma da metodologia do SMC-Brasil	49
Figura 18	– Interpolação da batimetria com pontos da Carta Náutica 705 da Marinha do Brasil (verde) e da base de dados do SMC-Brasil (azul)	50
Figura 19	– Pontos DOW disponíveis para a área de estudo, oriundos da Malha M006 do SMC-Brasil	52
Figura 20	– Parâmetros de onda analisados no Ponto DOW de coordenadas (X:538951.02, Y:9629835.30) e profundidade de 27 m, da Malha M006 do SMC-Brasil	53
Figura 21	– Área de trabalho com malhas de propagação (amarelo) de ondas empregadas para simulação no SMC-Brasil	55
Figura 22	– Região de domínio das malhas no SMC-Brasil	57
Figura 23	– Localização dos perfis de praia dispostos perpendicularmente a linha de costa da Praia do Pecém	58
Figura 24	– Pontos DOW da malha M006 do SMC-Brasil selecionados para comparação	59
Figura 25	– Ponto DOW escolhido (coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m) e malhas de propagação	60
Figura 26	– Ondógrafo Waverider (cota 20 m) do Porto do Pecém e ponto DOW (cota 27 m) escolhido para as propagações	62
Figura 27	– Caracterização do clima de ondas para o ponto DOW, oriundo do projeto de simulação no SMC-Brasil	63
Figura 28	– Espectro de ondas de abril/2000, processados pelo grupo JICA a partir dos dados do ondógrafo do Pecém	64
Figura 29	– Estatísticas descritivas de altura significativa e período de pico da onda do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m, oriundo das bases de dados do SMC-Brasil	65
Figura 30	– Caracterização 2D da onda, mostrando função de densidade conjunta de Hs e Tp do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m	66
Figura 31	– Distribuição de frequência de Hs e Tp, dados do ondógrafo do Pecém no período de março/1997 a dezembro/2000	67
Figura 32	– Regime extremo de altura de onda significativa, Hs e Tp do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m	68
Figura 33	– Relatório de rosetas direcionais de Hs do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m	69

Figura 34	– Variação mensal da altura de onda, dados do ondógrafo do Pecém no período de março de 1997 a dezembro de 2000	70
Figura 35	– Relatório de caracterização do nível de maré	71
Figura 36	– Relatório de caracterização da maré astronômica	72
Figura 37	– Relatório de caracterização de maré meteorológica	73
Figura 38	– Representação gráfica da classificação de máxima dissimilaridade dos casos selecionados a serem propagados no ponto DOW (seta indica direção de incidência das ondas), coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m	74
Figura 39	– Batimetria da região interpolada no SMC-Brasil com dados do BACO e da carta náutica 705 (linha de costa de baixa-mar de sizígia)	75
Figura 40	– Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	77
Figura 41	– Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de leste-nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	78
Figura 42	– Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	79
Figura 43	– Gráfico de isolinhas de Hs vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	80
Figura 44	– Gráfico de vetores e magnitude de Hs vindas de leste-sudeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	81
Figura 45	– Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	83
Figura 46	– Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste-nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	84
Figura 47	– Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	86

Figura 48	– Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste-sudeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE	87
Figura 49	– Histograma de arrebentação dos perfis 1, 2, 3 e 7, a linha preta pontilhada mostra a probabilidade de quebra ao longo do perfil, período de mare baixa ..	89
Figura 50	– Histograma de arrebentação dos perfis 4, 5, 6 e 8, a linha preta pontilhada mostra a probabilidade de quebra ao longo do perfil, período de mare baixa ..	91
Figura 51	– Transporte médio de sedimentos, formulação de CERC	94

LISTA DE SIGLAS

BACO	Base de Dados de Batimetria e Cartas Náuticas da Costa
CERC	<i>Coastal Engineering Research Center</i>
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
COPLA	Modelo de Correntes Induzidas pela Quebra de Onda Espectral
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DOW	Downscaled Ocean Waves
E	Leste
ENE	Leste-Nordeste
EROS	Modelo de Erosão/Sedimentação de Praias
ESE	Leste-Sudeste
GEBCO	<i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GOS	<i>Global Ocean Surges</i>
GOT	<i>Global Ocean Tides</i>
GOW	<i>Global Ocean Waves</i>
Hs	altura significativa de onda
Hs12	altura significativa de onda de tempestade
Hs50%	altura significativa de onda mediana
IH Cantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
JICA	<i>Japan International Cooperation Agency</i>
MAM	Março, Abril, Maio
MaxDiss	máxima dissimilaridade
MMT	Módulo de Modelagem do Terreno
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research
NE	Nordeste
NEB	Nordeste Brasileiro
NM	Nível Médio
OLUCA-SP	Modelo de Propagação de Ondas Espectrais

PETRA	Programa de Evolução do Perfil Transversal de Praias
SMC-Brasil	Sistema de Modelagem Costeira do Brasil
SWAN	<i>Simulating Waves Nearshore</i>
TEP	Terminal de Embarque Provisório
Tm	Período médio de onda
Tp	período de pico de onda
Tp12	período de pico para as condições de tempestade
Tp50%	período de pico em condições medianas
UC	Universidade de Cantabria
WWIII	<i>Wavewatch III</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.2	Localização e acesso	16
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	18
2.1	Geologia e geomorfologia	18
2.2	Característica dos sedimentos da região	23
2.3	Aspectos Meteorológicos	24
<i>2.3.1</i>	<i>Vento</i>	24
<i>2.3.2</i>	<i>Clima</i>	25
2.4	Aspectos Oceanográficos	26
<i>2.4.1</i>	<i>Ondas</i>	26
<i>2.4.2</i>	<i>Marés e Correntes</i>	30
2.5	Dinâmica Costeira	30
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
3.1	Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil)	33
<i>3.1.1</i>	<i>Base de dados</i>	36
3.2	Ondas	39
3.3	Morfologia da praia	43
3.4	Transporte de sedimentos	45
4	METODOLOGIA	48
4.1	Levantamento bibliográfico	48
4.2	Aplicação do SMC - Brasil	48
<i>4.2.1</i>	<i>Interpolação da batimetria</i>	49
<i>4.2.2</i>	<i>Seleção do Ponto DOW</i>	51
<i>4.2.3</i>	<i>Construção das malhas de propagação</i>	53

4.2.4	<i>Seleção dos casos</i>	55
4.2.5	<i>Propagação dos casos</i>	56
4.2.6	<i>Etapas de Pós-processo</i>	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Seleção do ponto de propagação	59
5.2	Clima de ondas	60
5.3	Caracterização do nível do mar	70
5.4	Propagação dos casos	73
5.5	Perfis de Praia	88
6	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros são altamente dinâmicos e vulneráveis a eventos causados tanto por atividade natural quanto por ação antrópica. Entender a evolução dos processos dinâmicos em ambientes costeiros é essencial para a preservação e planejamento adequado desses espaços. No entanto, dados em séries temporais longas e contínuas de alta qualidade para a caracterização da dinâmica costeira ainda são escassos ou nem sempre estão disponíveis no Brasil.

Uma alternativa para essa deficiência de dados se encontra no uso de modelos e ferramentas com bancos de dados de reanálise (QUETZALCÓATL *et al.*, 2019), tendo como exemplo o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) que é uma aplicação computacional que integra uma série de modelos numéricos e banco de dados como cartas náuticas, um acervo de dados modelados de 60 anos de ondas e níveis do mar para apoiar o gerenciamento costeiro do Brasil (GONZÁLEZ *et al.*, 2014).

Para consolidar a base de dados do SMC-Brasil em todo o litoral é necessário realizar estudos de caso aplicando o SMC-Brasil em diferentes estados, como forma de validar os modelos comprovando a utilidade do programa e de sua base de dados (DALINGHAUS *et al.*, 2016). Alguns trabalhos na costa brasileira já comprovaram a partir de métodos estatísticos e comparações qualitativas como os dados do SMC-Brasil obtiveram valores próximos a dados coletados *in situ* (GOMES JUNIOR, 2015; SILVA, 2014; SILVA *et al.*, 2017).

Entretanto, a utilização do SMC-Brasil, de modo geral, ainda está concentrada em estudos na costa leste do país, possuindo diversos estudos nos estados de Rio Grande do Norte (ALMEIDA *et al.*, 2015), Pernambuco (GOMES; SILVA, 2018), Sergipe (RODRIGUES; DOMINGUEZ, 2017), Bahia (SILVA *et al.*, 2016), Santa Catarina (DALINGHAUS, 2016), entre outros. Porém, em relação ao uso do SMC-Brasil nos estados do litoral norte do Brasil, ainda é escasso o número de trabalhos publicados em dissertações, teses e artigos científicos.

A zona costeira do estado do Ceará, possui um longo histórico de ocupação na faixa de praia e pós praia, influenciado por fatores de desenvolvimento urbano e socioeconômico (MAIA *et al.*, 2020), ocasionando um acentuado processo de exploração dos recursos desses ambientes, como impactos decorrentes da erosão costeira (MORAIS *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2019; SILVA NETO *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2016). Essas características somadas a interação de fatores naturais como ondas, correntes e transporte de sedimentos determinam a evolução do ambiente, produzindo uma mudança na geomorfologia costeira em diferentes escalas temporais (BIRD, 2008), tornando o seu estudo cada vez mais necessário.

Entre as praias do Ceará a praia do Pecém foi escolhida em função da quantidade de medições que integra o programa de monitoramento ambiental da região e também por ser alvo de diversas pesquisas acadêmicas (BENSI, 2006; DUARTE *et al.*, 2018; MAGINI; MARTINS; PITOMBEIRA, 2013; SILVA *et al.*, 2011; VIEIRA, 2007), pois a mesma abriga o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Essas características tornam a área ideal para testar a ferramenta SMC-Brasil e seu banco de dados para uma área da costa do estado do Ceará.

O CIPP, que está incluído no Plano de Desenvolvimento Sustentável do Estado do Ceará (CEARÁ, 1995), e contribui grandemente para redução de desemprego e fixação da população local no município (PAMPLONA, 1998). Sua criação também vem favorecendo o desenvolvimento do parque industrial local, atendendo a demanda das indústrias e empresas.

Com sua posição geográfica estratégica, o Porto do Pecém possui o menor tempo de trânsito, em relação aos portos brasileiros, entre o Brasil e os principais parceiros comerciais como a Europa e os Estados Unidos (AZENHA; PEQUENO, 2016). Segundo o Plano mestre do Pecém (2015) o porto movimentava diversos tipos de mercadoria como, carvão mineral, clínquer, escoria de alto forno, minério de ferro, gás natural liquefeito, combustíveis e contêineres.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2019, a atividade da comunidade local que sofreu maior impacto com a instalação do porto foi a atividade de pesca artesanal, com a exclusão de áreas de pesca preferenciais, por questões de segurança.

Além disso, as atividades relacionadas ao porto provocaram mudanças na praia, como foi exposto por Magini, Martins e Pitombeira (2013), que separou em dois momentos os impactos ambientais em relação a sedimentação/erosão a oeste do porto, um no período de construção onde ocorreu erosão, pois os sedimentos ficaram aprisionados no Terminal de Embarque Provisório (TEP) e outro no período pós construção, com a praia mais abrigada passou a ocorrer uma maior sedimentação onde anteriormente havia erosão.

1.1 Objetivos

Analisar a dinâmica costeira na praia do Pecém, com uso do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil; e

Comparar qualitativamente os resultados do SMC-Brasil com dados *in situ*.

1.1.1 *Objetivos específicos*

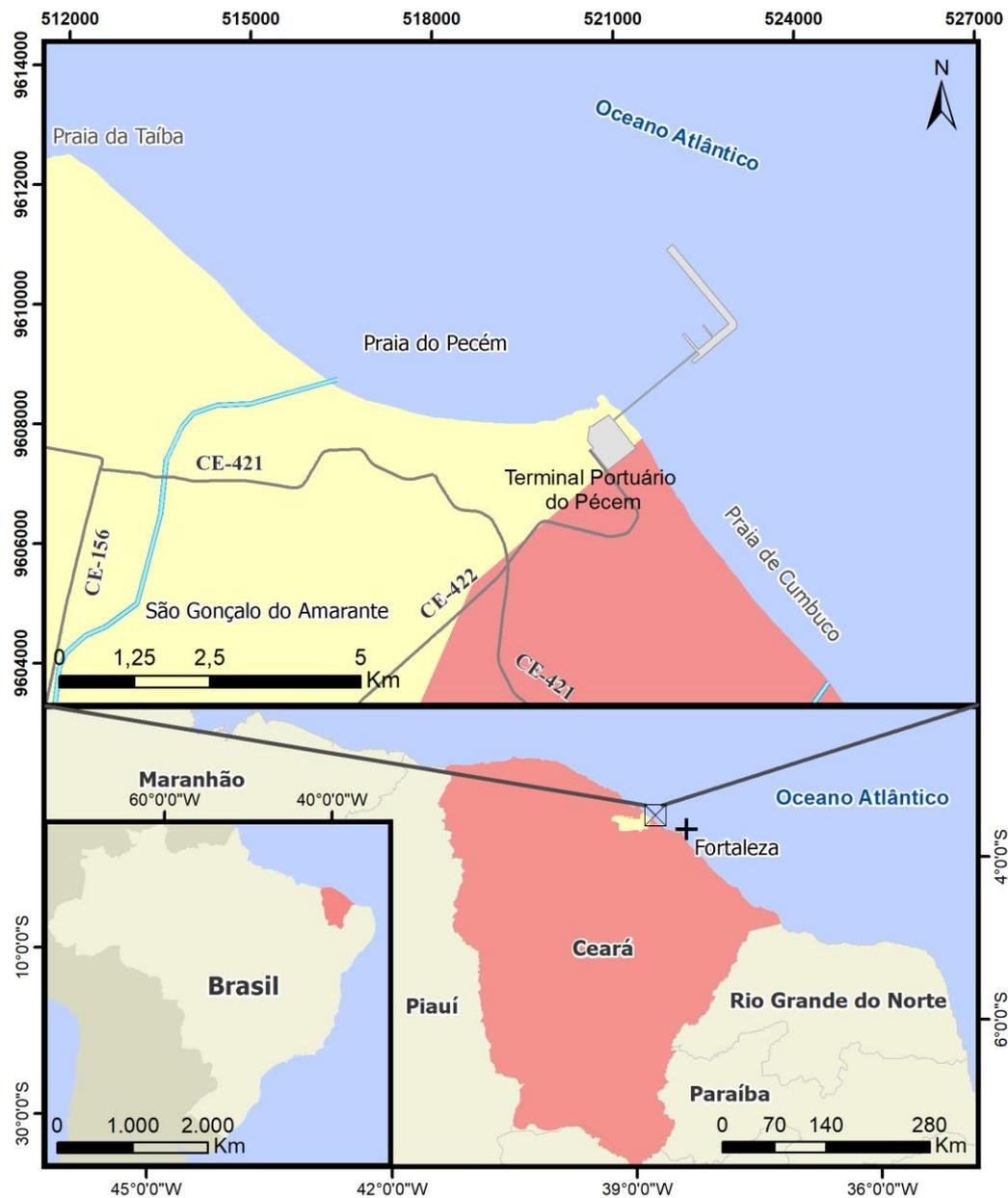
Como objetivos específicos podem ser citados:

- a) Caracterizar o clima de ondas e regime de nível do mar ao largo da Praia do Pecém através da análise estatística dos 60 anos de dados de reanálise contidos na base do SMC-Brasil;
- b) Examinar o campo local de ondas e correntes incidentes na praia do Pecém, referentes aos estados de mar representativos adquiridos por meio de modelagem numérica no SMC-Brasil;
- c) Realizar a análise de perfis de praia, probabilidade de quebra de onda no perfil e fluxo de energia, mediante clima de ondas de 1948 a 2008;
- d) Estimar o transporte longitudinal de sedimentos; e
- e) Comparar os dados obtidos a partir da modelagem no SMC-Brasil com dados reais obtidos para a área da Praia do Pecém.

1.2 Localização e acesso

A área de estudo (FIGURA 1) se encontra no distrito do Pecém, litoral oeste do estado do Ceará, no município de São Gonçalo do Amarante (região da grande Fortaleza) (IPECE, 2017a). O acesso pode ser feito pela CE-085 e CE-421; a área situa-se a uma distância de aproximadamente 50 km da capital Fortaleza.

Figura 1 – Área de estudo mostrando localização no estado do Ceará, Praia do Pecém e praias vizinhas



Fonte: Elaborado pela autora, a partir do banco de dados do catálogo do IPECE (<http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/ogc/index.php>)

O trecho estudado possui aproximadamente 15 km de faixa de praia. O principal foco do estudo está localizado na Praia do Pecém, mas engloba parte das praias vizinhas (praia do Cumbuco e praia da Taíba).

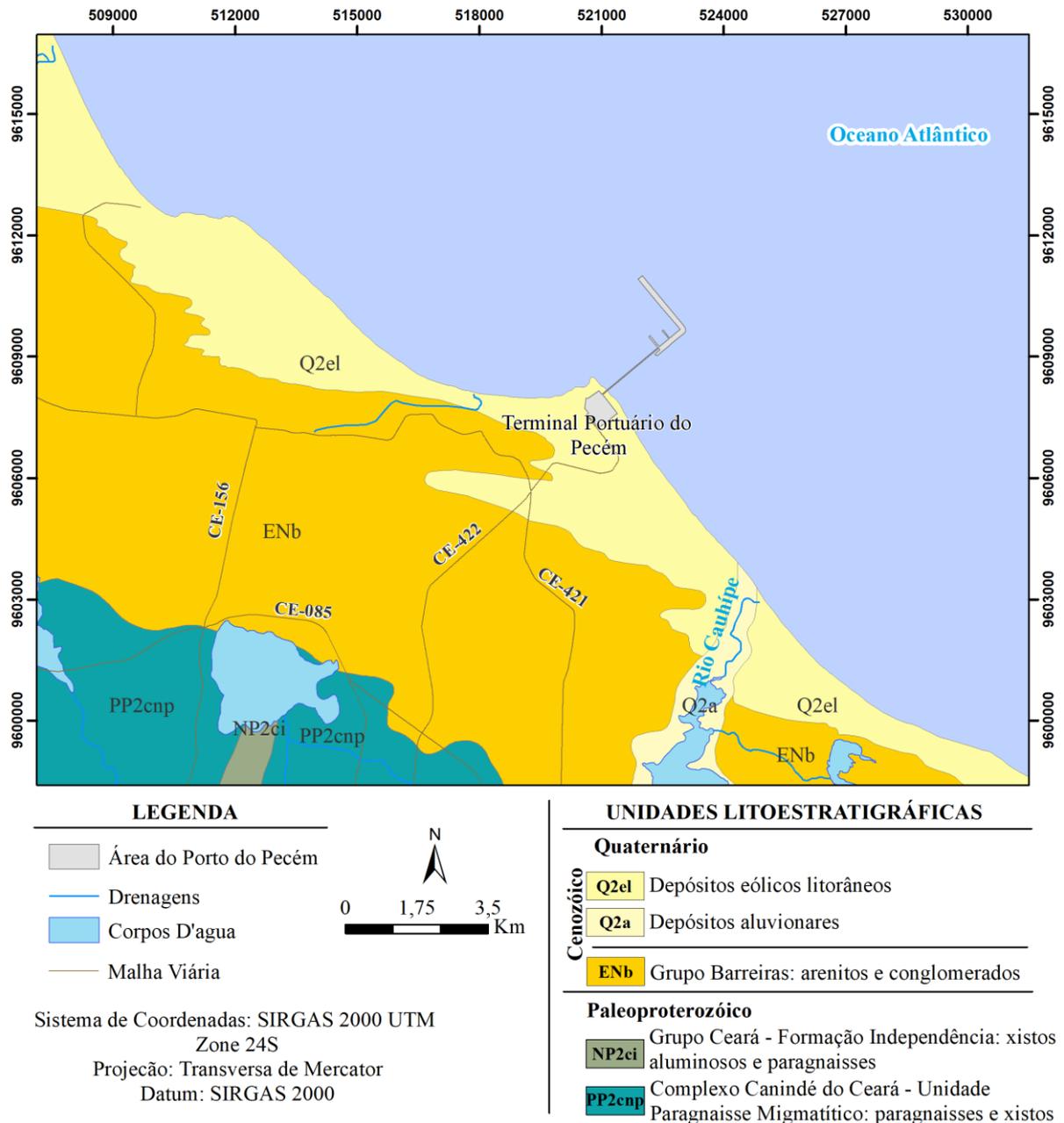
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A zona costeira do estado do Ceará possui uma linha de costa de 573 km de extensão, seu litoral é diretamente influenciado por fatores de desenvolvimento que muitas vezes causam extensos processos de erosão (MORAIS *et al.*, 2006). Porém, processos em zonas costeiras dependem também de diferentes condições do ambiente, com isso em mente esse tópico pretende apresentar, de modo geral, as principais características da área de estudo.

2.1 Geologia e geomorfologia

O contexto geológico da área, apresentado na Figura 2, é caracterizado pela presença de terrenos cristalinos e coberturas sedimentares cenozóicas, composto por três principais unidades litoestratigráficas: o embasamento (Complexo Ceará), os tabuleiros costeiros (Formação Barreiras) e os sedimentos quaternários (Sistemas Depositionais Costeiros) (MOURA, 2014).

Figura 2 – Geologia da área, principais drenagens e estradas de acesso ao porto

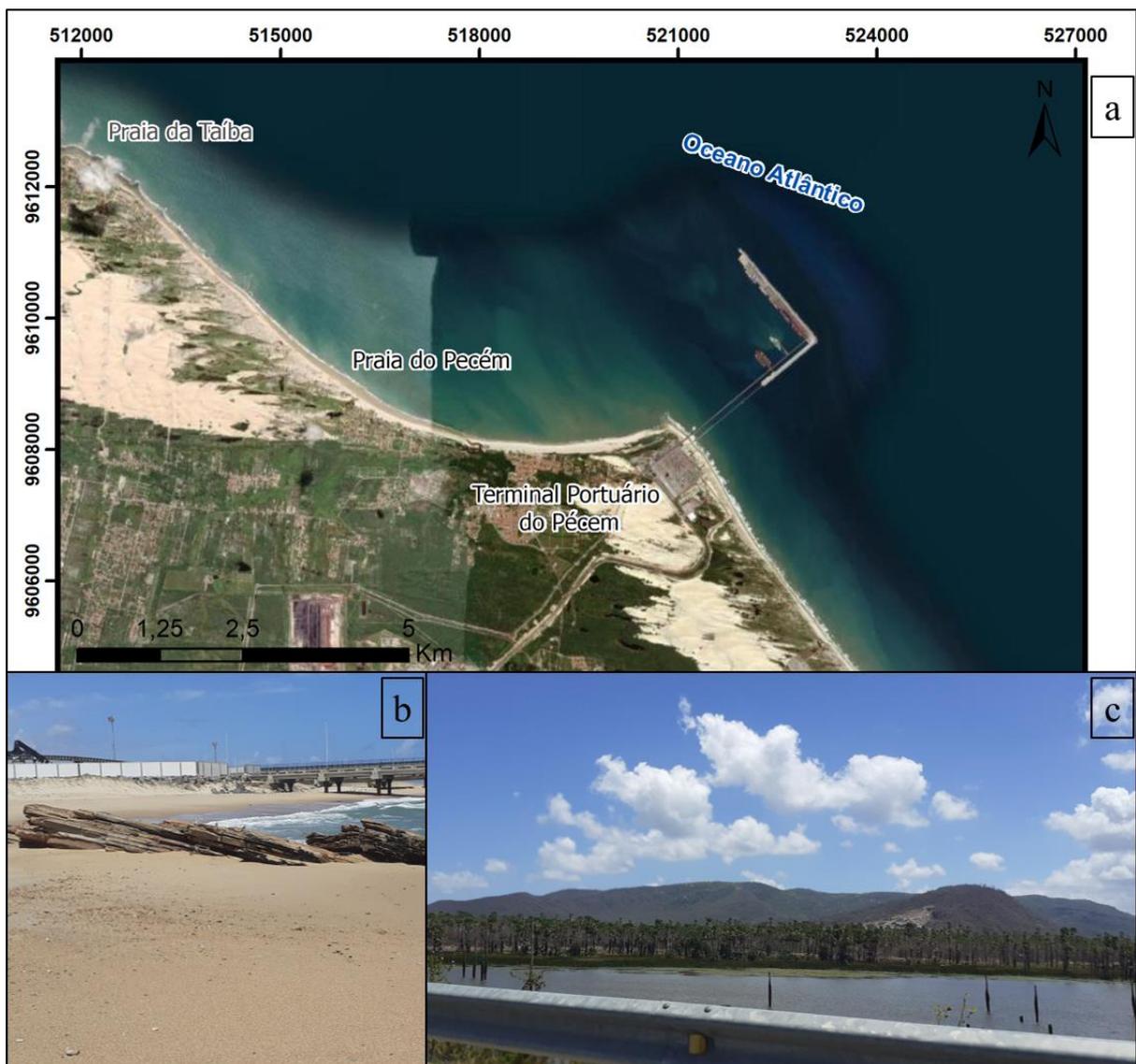


Fonte: Elaborado pela autora, a partir do banco de dados do GeoSGB do Serviço Geológico do Brasil.

O Complexo Ceará, descrito por Medeiros, Cavalcante e Souza (1993) é composto por rochas de idade pré-cambriana, representado quase exclusivamente por paragneisses eventualmente migmatíticos e lentes de quartzitos intercaladas em biotita-gnaisses e anfibolito-gnaisses das unidades Independência e Canindé (CAVALCANTE *et al.*, 2003). A Unidade Independência ocorre na porção sudoeste da área, sendo constituída por paragneisses aluminosos indiferenciados, além quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas, e eventualmente anfibolitos. As litologias da unidade Canindé são constituídas por gnaisses e

gnaisse migmatitos, metamorizadas na fácies anfibolito de alta temperatura (CAVALCANTE *et al.*, 2003). Na área de estudo a geomorfologia das rochas cristalinas (FIGURA 3) pode constituir alguns promontórios, mas também forma a depressão sertaneja e as serras isoladas (serrotes Juá, Conceição e Camará), ocorrem numa faixa geográfica posterior aos tabuleiros, em direção ao sertão (MAGINI; MARTINS; PITOMBEIRA, 2013).

Figura 3 – Feições geológicas e geomorfológicas encontradas na área, a) promontório do Pecém, b) quartzitos do embasamento ocorrendo na praia do Pecém, c) granitóides intrusivos (Serra do Juá)



Fonte: Autora.

A Formação Barreiras recobre rochas do embasamento e é formada por arenitos argilosos, de tons avermelhados, creme ou amarelados, com níveis conglomeráticos e

concreções lateríticas de óxi-hidróxidos de ferro. Exibe matriz argilosa caulínica, com cimento argiloso ou silicoso (ALHEIROS *et al.*, 1988). Seus depósitos são interpretados como de um sistema fluvial entrelaçado, associado a leques aluviais, depositados por processos gravitacionais e de tração, condicionados a um regime de fluxo de alta energia em sistemas continentais (MORAIS, 1980). Com idade atribuída ao intervalo de tempo que varia do Mioceno ao Pleistoceno Inferior (SUGUIO; NOGUEIRA, 1999). Geomorfologicamente ocorre como tabuleiros pré-litorâneos ou formando frentes de falésias nas zonas mais costeiras (MAGINI; MARTINS; PITOMBEIRA, 2013).

Os afloramentos da formação Barreiras não ocorrem na praia, segundo Moura (2014) eles ocorrem de leste a oeste na porção centro-sul do município de São Gonçalo do Amarante, sendo que a oeste se estende até o limite norte próximo as estradas principais. Pode-se ainda observar um nível de arenitos conglomeráticos de tonalidade avermelhada e em outra porção ocorre um pacote homogêneo, formado por arenitos de granulação fina a média, com tonalidade alaranjada, sem ocorrência de níveis conglomeráticos (MOURA, 2014).

Por último, os sedimentos quaternários, constituídos por terraços marinhos (holocênicos e pleistocênicos) classificados por Brandão (1994) em coberturas colúvio-aluviais, paleodunas e dunas móveis ou recentes (FIGURA 4).

Ainda segundo Brandão (1994), os depósitos colúvio-aluviais são compostos essencialmente por areias, cascalhos, siltes e argilas recentes, podendo associar-se à matéria orgânica. As paleodunas constituem-se predominantemente por areias bem selecionadas de granulação fina a média, quartzosa ou quartzofeldspática, de coloração amarelada, alaranjada ou acinzentada, e geralmente ocorrem fixadas pela vegetação recente. Distribuem-se sob forma de cordões contínuos, dispostos paralelamente à linha de costa. As dunas móveis ou recentes são litologicamente constituídas por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas, com grãos de quartzo foscos e arredondados, muitas vezes encerrando níveis de minerais pesados (BRANDÃO, 1994).

Figura 4 – Faixa de praia do Pecém a leste (a) e oeste (b) do promontório, c) detalhe para a ocupação das dunas, d) cordões litorâneos a oeste do promontório

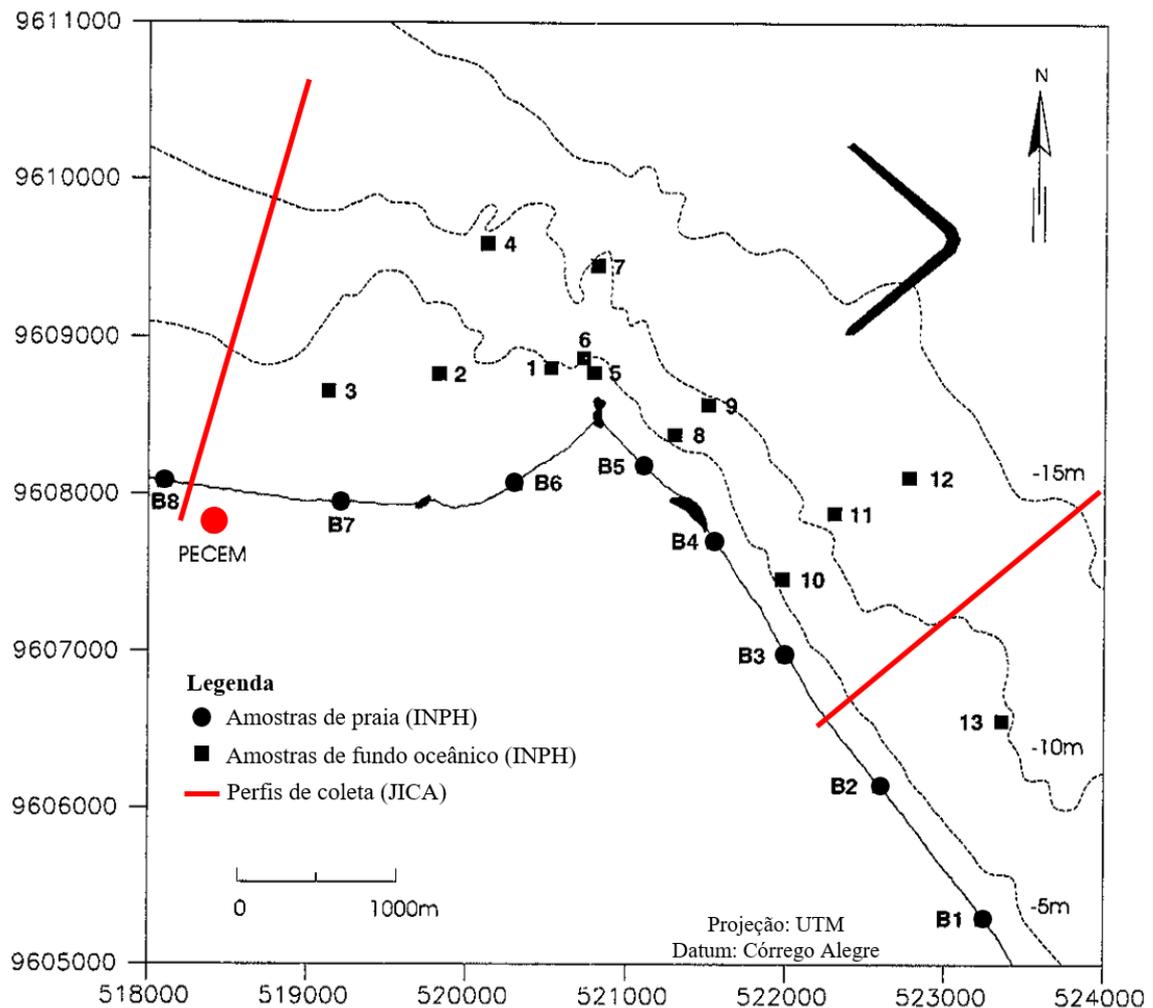


Fonte: Autora.

2.2 Característica dos sedimentos da região

As características dos sedimentos da região estão disponíveis no relatório apresentado em 1997 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), cujas amostragens foram realizadas em 1997, antes da construção do porto, em 8 pontos localizados na linha de costa e 13 pontos localizados *offshore*, até aproximadamente a cota batimétrica de 10 m (FIGURA 5). Os resultados mostram que o diâmetro médio da área da praia é de 0,20 mm e do solo oceânico é de 0,25 mm, classificados em areia média a fina.

Figura 5 - Localização das amostras de sedimento coletadas no Pecém pelo INPH e perfis onde foram coletadas as amostras pelo JICA



Fonte: Adaptado de INPH (1997).

Uma nova amostragem foi realizada, após a construção do porto, pelo Grupo de Estudo *Japan International Cooperation Agency* (JICA), cujas amostras foram coletadas ao longo de 2 perfis, do lado leste e oeste do porto, com 17 pontos de amostragem em cada perfil (JICA, 2006). Foi possível observar as características de cada profundidade nos perfis, a saber: à profundidade de 5 m o que predomina é a areia, em cerca de 7 a 11 m por conta do afloramento do substrato rochoso a coleta das amostras foi dificultada; finalmente em profundidades maiores que 12 m foram encontrados diferentes componentes (areia, silte e fragmentos de concha). Os resultados mostram que o diâmetro médio do é de 0,33 mm na linha leste e 0,26 mm na linha oeste, o que é condizente pois caracteriza um local mais tranquilo para as atividades do porto.

2.3 Aspectos Meteorológicos

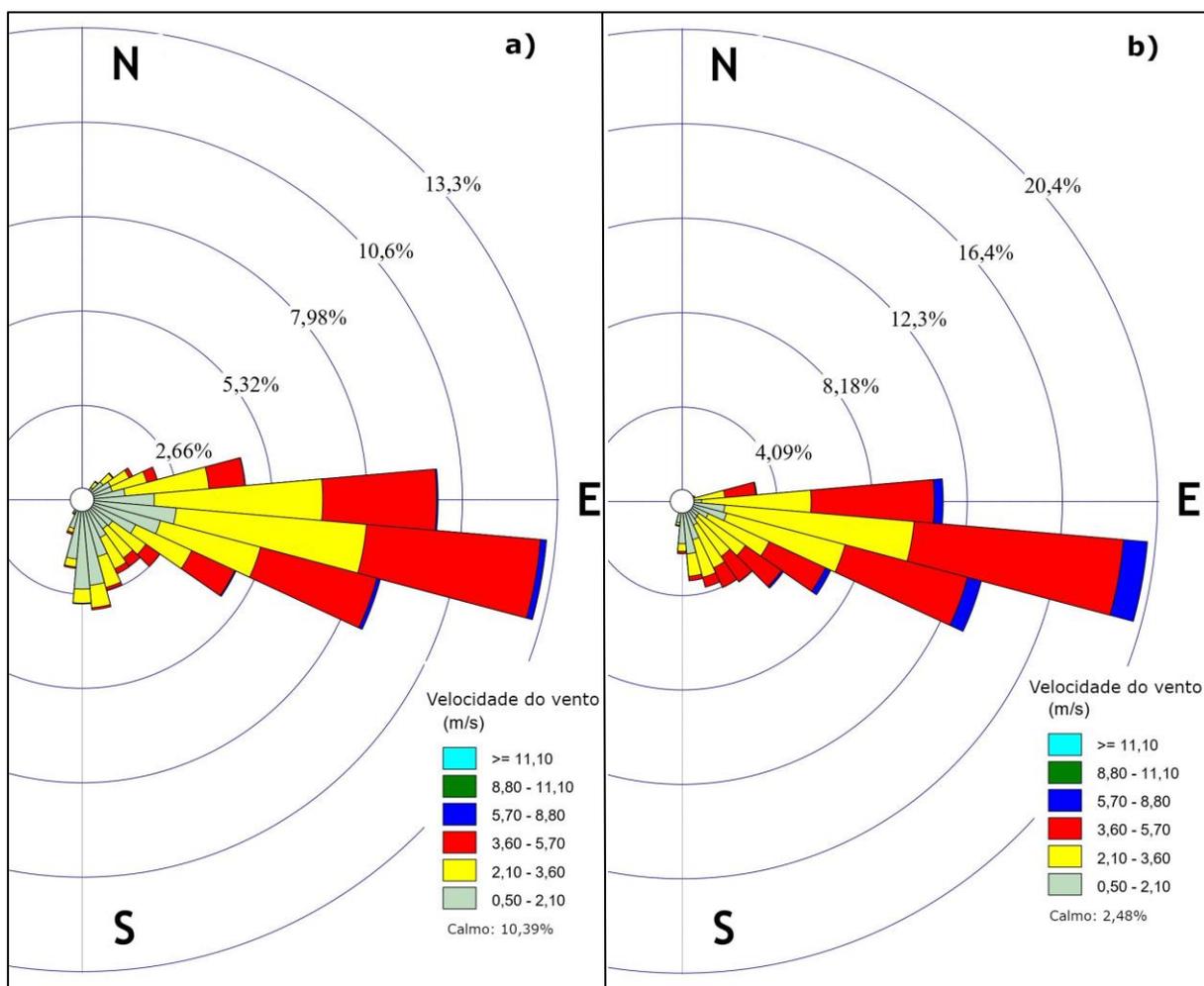
2.3.1 Vento

O regime dos ventos na em toda costa do Estado do Ceará são caracterizados na escala Beaufort, de forma geral, como ventos frescos durante o período de estiagem e, na quadra chuvosa, por ventos fortes (VIEIRA, 2007). De acordo com Silva *et al.* (2011), a direção e intensidade dos ventos na região costeira do Ceará tem uma forte relação com a variação sazonal das ondas do tipo *sea*, pois são geradas por campos de ventos locais e atuam no transporte litorâneo de sedimentos.

Para a área do Porto do Pecém, as medições de velocidade e direção dos ventos encontram-se no Relatório Final realizado pelo INPH em 1997, que caracteriza a área do projeto por um regime estável, com velocidades da direção leste de 6 m/s a 8 m/s e direção principal do vento de leste para leste-sudeste (FIGURA 6). Ao longo do ano a direção do vento é quase constante de leste-nordeste para leste-sudeste, e ventos com velocidades que excedem 10 m/s ocorrem com maior frequência de julho a novembro (JICA, 2006).

As ocorrências dos ventos são em parte controladas pelo movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se desloca de norte a sul com o movimento das estações (FIGURA 6). De dezembro a maio, devido à presença marcante da ZCIT e de tempestades extratropicais no Hemisfério Norte, o predomínio é de ventos de leste, com ocorrências de sudeste e nordeste. No outro período, de junho até novembro, as maiores influências são de ventos locais e dos ventos alísios de sudeste (AMARANTE *et al.*, 2001).

Figura 6 - Rosa dos ventos da estação de Fortaleza mostrando o padrão dos ventos entre dezembro e maio (a) e junho e novembro (b), dados de 2003 a 2020



Fonte: Elaborado pela autora no *software* WRPLOT, a partir do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (estação A305).

2.3.2 Clima

A região do Nordeste Brasileiro (NEB), onde está localizado o Estado do Ceará, tem máximos pluviométricos concentrados no primeiro semestre do ano. O sistema atmosférico que é o principal responsável pelas chuvas do início do ano no NEB é a Zona de Convergência Intertropical.

A ZCIT possui uma migração latitudinal durante o ano, alcançando a sua posição mais ao sul durante os meses de março a maio (MAM), estabelecendo a estação chuvosa na região (REBOITA *et al.*, 2012). A estação seca acontece com o retorno da ZCIT para suas posições mais ao norte (UVO; NOBRE, 1989). As mudanças no regime das chuvas durante o ano ocorrem por conta da atuação e combinação de outros mecanismos, como os Eventos de El

Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), que causam o deslocamento das células de Walker e Hadley inibindo ou intensificando a duração do período chuvoso (UVO; BERNDTSSON, 1996).

Em relação ao regime térmico, a temperatura média anual para localidades próximas ao litoral do Estado do Ceará é quase constante ao longo do ano, com temperatura média de 26,7 °C, média máxima de 30,3 °C e média mínima de 23,5 °C, onde nos meses de junho a agosto a temperatura do ar é ligeiramente menor que durante os outros meses (JICA, 2006).

Através da classificação de Köppen, a área em estudo compõe a região climática do tipo As, correspondendo ao clima tropical chuvoso, com chuvas de inverno (ÁLVARES *et al.*, 2013). Geralmente, a estação chuvosa estende-se pelos meses de janeiro a maio, consolidando-se a partir da segunda quinzena de fevereiro, com as maiores precipitações ocorrendo entre os meses de março e maio. A estação seca, que acontece de setembro a novembro, tem uma média de temperatura entre 26 a 28 °C (IPECE, 2017b).

Segundo INPH (1997), as taxas de evaporação são superiores a 1600 mm por ano, com um mínimo no mês de abril e máximo no mês de outubro, seguindo um regime sazonal. Na região de Fortaleza, a média anual da umidade relativa do ar atinge 77,0% que oscila ao longo do ano segundo o regime pluviométrico (IPECE, 2018).

2.4 Aspectos Oceanográficos

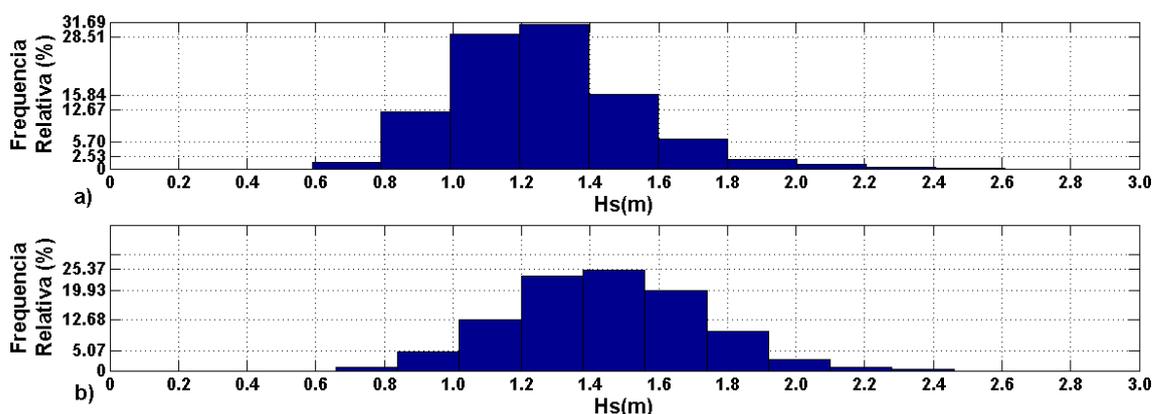
2.4.1 Ondas

O clima de ondas no Estado do Ceará possui, na maior parte dos casos, dois cenários diferentes, um para os meses de dezembro a abril (compreende o verão) e um para os meses de junho a novembro (correspondendo ao inverno). No verão, a incidência de ondas geradas no Atlântico Norte, ondas *swell*, é mais intenso e decai nos meses seguintes, onde a incidência do clima de ondas geradas próximo à costa (*sea*) prevalece (JICA, 2006).

Os dados para caracterizar o clima de ondas da região do Porto do Pecém foram obtidos a partir das medições realizadas pelo INPH de 1997 a 2005 por meio de um *Waverider* direcional instalado a 4 km *offshore*, nas coordenadas X:520270,262 Y:9614028,507 a uma profundidade de aproximadamente 20 m. próximo ao Porto do Pecém e são discutidos e interpretados nos trabalhos de Bensi (2006), Gonçalves (2017), Silva *et al.* (2011) e Vieira (2007).

As características de ondas no Pecém exibem uma altura significativa de onda (Hs) de 1,25 a 1,50 m e que raramente ultrapassa 2,00 m, como exposto na Figura 7, que apresenta a análise estatística semestral dos dados históricos dos anos de 1997, 2000 e 2001 (SILVA *et al.*, 2011). Os maiores valores de Hs, que ocorrem no segundo semestre, se associam a estação seca e aos meses com ventos de maior intensidade, relacionados às estações de inverno e primavera no Hemisfério Sul.

Figura 7 - Histograma da altura significativa de onda (Hs) durante os anos de 1997, 2000 e 2001 registrada por ondógrafo instalado pelo INPH ao largo do Terminal Portuário do Pecém, (a) primeiro e (b) segundo semestre



Fonte: Silva *et al.* (2011).

Para a direção de onda, as informações geradas a partir de dados históricos de ondas durante os anos de março de 1997 a dezembro de 2000 compõem a Tabela 1, que mostra a distribuição de frequência por direção de onda. Observa-se que a região apresenta duas direções mais expressivas, aquelas ondas vindas do quadrante leste-sudeste que aparecem com frequência de 40,3% e do quadrante nordeste com frequência de 24,5% (JICA, 2006).

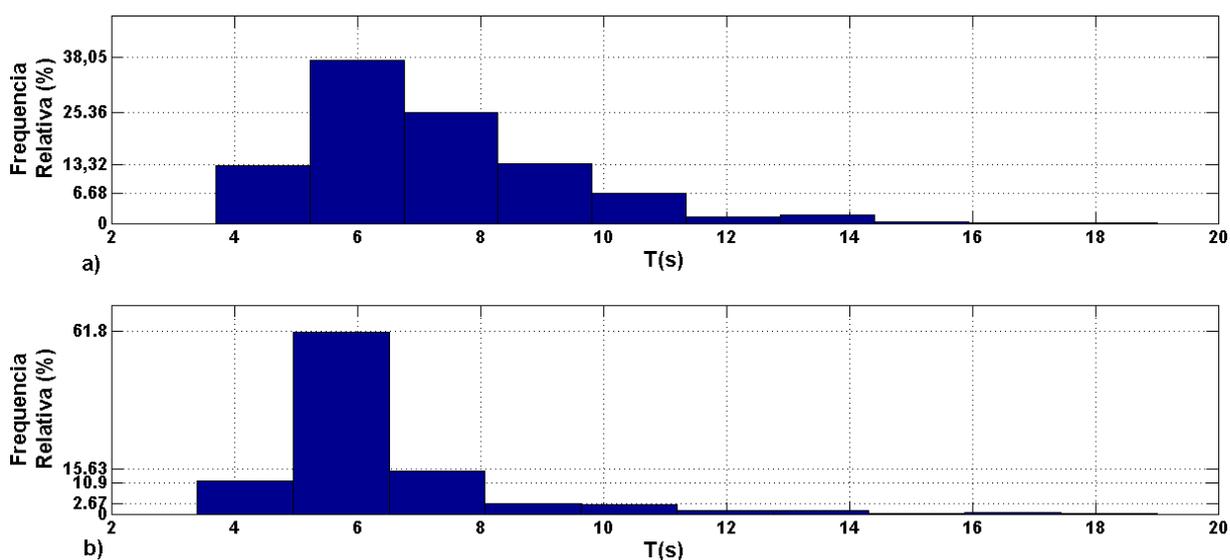
Tabela 1 – Distribuição de frequência de Hs e direção de onda de 1997 a 2000, medidos pelo ondógrafo instalado pelo INPH, situado ao largo do Terminal Portuário do Pecém

Direction / Hs (m)	0.5-0.75	0.75-1.0	1.0-1.25	1.25-1.5	1.50-1.75	1.75-2.00	2.00-2.25	2.25-2.5	Total
N			0.1%	0.0%	0.0%				0.1%
NNE	0.0%	0.5%	2.9%	3.4%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	7.5%
NE	0.2%	2.5%	10.1%	9.4%	2.1%	0.1%	0.0%	0.0%	24.5%
ENE	0.1%	1.2%	3.8%	3.1%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	8.8%
E	0.0%	1.1%	4.6%	7.9%	4.1%	1.0%	0.1%	0.0%	18.8%
ESE	0.0%	0.6%	6.0%	14.9%	13.3%	4.5%	0.8%	0.2%	40.3%
SE				0.0%	0.0%				0.0%
Total	0.3%	5.9%	27.5%	38.8%	20.8%	5.7%	0.9%	0.2%	100%

Fonte: JICA (2006).

No histograma de frequência relativa, apresentado pela Figura 8, pode-se observar que o período de pico de onda (T_p) com maior frequência está entre 6 e 7 s com 26,61% de ocorrência, relacionados a ondas do tipo *sea* e ondas de períodos maiores de 10 s aparecem com uma frequência de aproximadamente 20%, indicando ondas do tipo *swell* (BENSI, 2006).

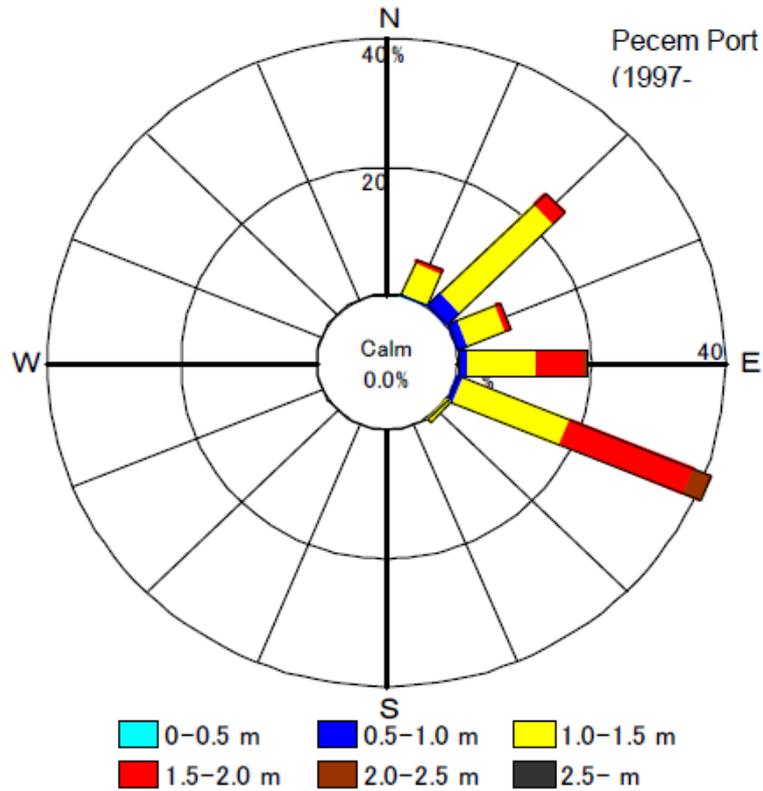
Figura 8 - Histograma do período de pico dos anos de 1997, 2000 e 2001, registrado por ondógrafo instalado pelo INPH ao largo do Terminal Portuário do Pecém, (a) primeiro e (b) segundo semestre



Fonte: Silva *et al.* (2012).

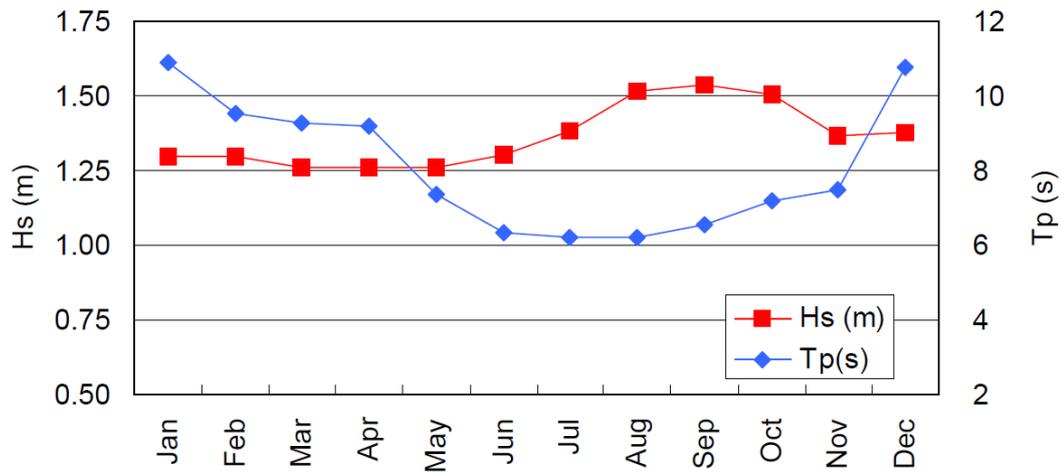
Segundo Vieira (2007), as ondas *swell* ocorrem mais frequentemente no decorrer de dezembro a abril (verão e outono no Hemisfério Sul); essas ondas são caracterizadas por sua menor altura e o período de onda mais longo com direção predominante de nordeste, entre 015° e 070° Az. De junho a novembro a predominância muda para as ondas *sea*, onde a altura da onda aumenta e o período de pico é geralmente mais curto, com aproximadamente 6 s e direção de propagação leste-sudeste entre 070° e 120° Az (FIGURAS 9 e 10). Durante os meses intermediários ambos os tipos de onda podem ocorrer simultaneamente (ELFRINK *et al.*, 1998).

Figura 9 – Rosa de ondas no Pecém, dados diários do ondógrafo *Waverider* no período de 1997 a 2000



Fonte: JICA (2006).

Figura 10 – Variação mensal de Hs e Tp para o Pecém, dados do ondógrafo *Waverider* no período de 1997 a 2000



Fonte: JICA (2006).

2.4.2 Marés e Correntes

A área possui um regime de meso-maré com predominância semi-diurna, tendo nível médio (NM) de 1,43 m, com preamar máxima de 3,09 m e baixa mar mínima de -0,11 m, sendo a variação de maré da ordem de 3 m. Os dados correspondem ao período de 1996 a 1997 das medições realizadas pelo INPH em uma estação instalada na extremidade da Ponta do Pecém (INPH, 1997). A amplitude média registrada pelo marégrafo teve oscilações aproximadas entre -0,2 e 3,2 m em referimento ao NM com valores médios da ordem de 1,55 m (VIEIRA, 2007).

Ao estudar as correntes na área do Porto do Pecém, Bensi (2006) observou valores para o mês de maio de 2005 velocidades médias entre 0,13 e 0,23 m/s com um fluxo transversal à linha costa, além de outro fluxo com direção quase paralela à costa no mês de julho de 2005, com velocidades médias entre 0,19 e 0,25 m/s. Com essa e outras medições realizadas pelo INPH (1997), os autores constataram que as correntes não são afetadas pela diferença na condição de maré.

2.5 Dinâmica Costeira

Segundo Bensi (2006), o alinhamento da linha de costa do Estado do Ceará exibe um padrão geral de direção sudeste-noroeste. Ainda segundo o mesmo autor, a atuação regular dos ventos alísios de sudeste orienta as ondas, que passam a atingir a costa com uma direção oblíqua, gerando o mecanismo de deriva litorânea. Essas características configuram o transporte litorâneo de sedimentos na costa do Estado do Ceará que apresenta um sentido dominante também de sudeste para noroeste (CARVALHO; MAIA; DOMINGUEZ, 2007, MATOS, 1978). O transporte induzido pelas ondas é o principal responsável pelo equilíbrio das células costeiras no Estado do Ceará (BENSI, 2006).

Carvalho, Maia e Dominguez (2007) calcularam o sentido da deriva litorânea em um cenário induzido pelas ondas do tipo *sea*, com direção de 060° a 090° Az e períodos de 5 e 6,5 s, e observaram que o sentido dominante da deriva é para noroeste, assim como já é estabelecido para a costa do Ceará, porém, também verificaram que segmentos situados no final de uma enseada e início de um promontório apresentam uma inversão no sentido da deriva (de noroeste para sudeste).

De acordo com o trabalho de Bittencourt *et al.* (2003), a área do Pecém é uma das áreas do estado com maior tendência aos processos da deriva litorânea, devido à mínima

refração nas ondas predominantes de leste, preservando os níveis de energia próximos aos originais, o que produz pouca alteração na altura original das ondas. Além disso, os ângulos de incidência do trem de onda estão próximos de 45° em relação a linha de costa, o que proporciona uma maior quantidade de energia à deriva litorânea.

Assim como exposto por MORAIS *et al.* (2006), as principais causas dos processos erosivos no estado do Ceará acontecem pela influência de vários fatores, entre eles, o pouco fornecimento de sedimento pelos rios, as variações sazonais de direção do vento, ondas, a configuração de maré, o barramento de corredores eólicos e a ocupação inadequada.

Na praia do Pecém, uma das variações na costa é causada pela variação sazonal no regime de ondas onde no período de novembro a abril, ocorrendo erosão da praia devido ao *swell* vindo do Hemisfério Norte (ELFRINK *et al.*, 1998), cujas ondas são caracterizadas por sua menor altura, período de pico de aproximadamente 10 s e sua direção predominante é de nordeste (VIEIRA, 2007). De julho a novembro, as condições das ondas são dominadas pelas ondas *sea*, onde a altura da onda aumenta e o período de pico é geralmente mais curto, com aproximadamente 6 s com direção entre leste e leste-sudeste (VIEIRA, 2007), essas ondas retiram sedimentos da zona de estirâncio e/ou antepraia removendo estes sedimentos na direção leste-oeste (MAGALHÃES; MAIA, 2003).

A implantação do porto também afetou a dinâmica da região, como durante construção do TEP, feito para auxiliar a construção das estruturas *offshore* do Porto do Pecém. Primeiramente, houve um processo de erosão a oeste da estrutura e progradação a leste. Após a retirada do TEP, as condições originais de movimentação dos sedimentos retornaram e o sedimento aprisionado pela estrutura passou a ser transferido para oeste, e ao que a praia passou a sofrer processos de progradação (PITOMBEIRA, 2004).

No Ceará, estudos de transporte de sedimentos foram realizados principalmente nas praias de Fortaleza (ALVES, 2012; MAIA, 1998), a leste da área de estudos, onde foi estimado que o volume de sedimentos transportados é de aproximadamente 860.000 m³/ano.

A modelagem do transporte de litorâneo da região foi realizada pelo INPH em 1997, e validada a partir do levantamento de perfis de praia realizado por Pitombeira (2004) no período de 1996 a 2004. Segundo INPH (1997), um transporte litorâneo anual líquido da ordem de 350.000 m³/ano ocorre ao longo de toda a linha de costa e as variações sazonais de sua posição acontecem por causa da variação anual de predominância ora das ondas de *sea* ora de *swell*. Na área próxima à ponta do Pecém, o volume de sedimento transportado estimado foi de 85.000 m³/ano.

Em relação à morfodinâmica, a maioria das praias do estado do Ceará foram classificadas por Moraes *et al.* (2006) como dissipativas, exceto na margem oeste da Baía do Litoral, na praia de Guajirú, e na Baía Metropolitana no setor mais a leste, entre as praias de Barra Nova e Barra Velha e na praia de Morro Branco, onde as características da praia são classificadas como intermediárias. A morfodinâmica do Pecém foi classificada por Queiroz (2014) combinando os índices Alcance Relativo da Maré (RTR) e parâmetro de Dean (Ω), também classificada como praia dissipativa.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil)

O SMC foi inicialmente desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) da Universidade de Cantabria (UC), Espanha, apoiado pela Direção Geral de Costas do Ministério de Meio Ambiente Espanhol. O sistema foi adaptado e repassado à administração pública brasileira, dentro do projeto de investigação “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira”, com a colaboração de vários órgãos internacionais e brasileiros (DALINGHAUS *et al.*, 2018).

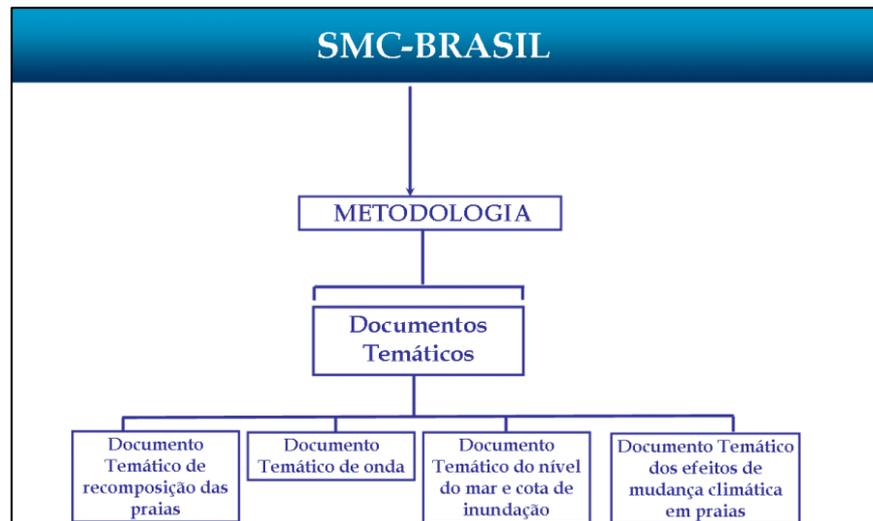
O SMC-Brasil é uma aplicação informática que consiste em uma série de bancos de dados de cartas náuticas, ondas e níveis do mar, além de modelos numéricos organizados de acordo com as escalas espaciais e temporais das várias dinâmicas que afetam a morfologia de uma praia. Permite implementar a metodologia de trabalho encontrada nos Documentos Temáticos e Manuais do Usuário e de Referência, para o estudo e/ou solução de problemas no litoral brasileiro (DALINGHAUS *et al.*, 2018).

Os Documentos Temáticos presentes no SMC-Brasil encontram-se na Figura 11 e estão descritos abaixo:

- a) Documento Temático de Recuperação de Praias: integra a metodologia que deve ser seguida para o estudo de uma praia ou projeto de sua recuperação. Quais dados, modelos, escalas que devem ser estudadas, são reunidas neste documento (BRASIL, 2018d);
- b) Documento Temático de Ondas: descreve a metodologia seguida para gerar e validar as séries temporais (60 anos, a cada hora) de ondas ao longo da costa, bem como sua transferência a partir de profundidades indefinidas até a praia de estudo (BRASIL, 2018c);
- c) Documento Temático do Nível do Mar e Cota de Inundação: contém a metodologia para a determinação do nível do mar ao longo da costa do Brasil, incluindo a maré astronômica e a meteorológica (*Storm Surge*). Também descreve a metodologia para avaliar a cota de inundação em uma área da costa, incluindo a maré astronômica e meteorológica e o aumento do nível do mar na costa devido à quebra das ondas. (BRASIL, 2018b);
- d) Documento Temático dos Efeitos de Mudança Climática em Praias: engloba a metodologia que permite fazer uma análise futura sobre qual será a tendência de

estabilidade de uma praia, devido aos efeitos da mudança climática sobre as dinâmicas: altura, período e direção das ondas e do nível do mar. Este documento ajuda a fazer uma avaliação de uma praia com relação a sua tendência a erosão ou a progradação da linha de costa, o giro da planta da praia, a mudança na cota de inundação, etc. (BRASIL, 2018a).

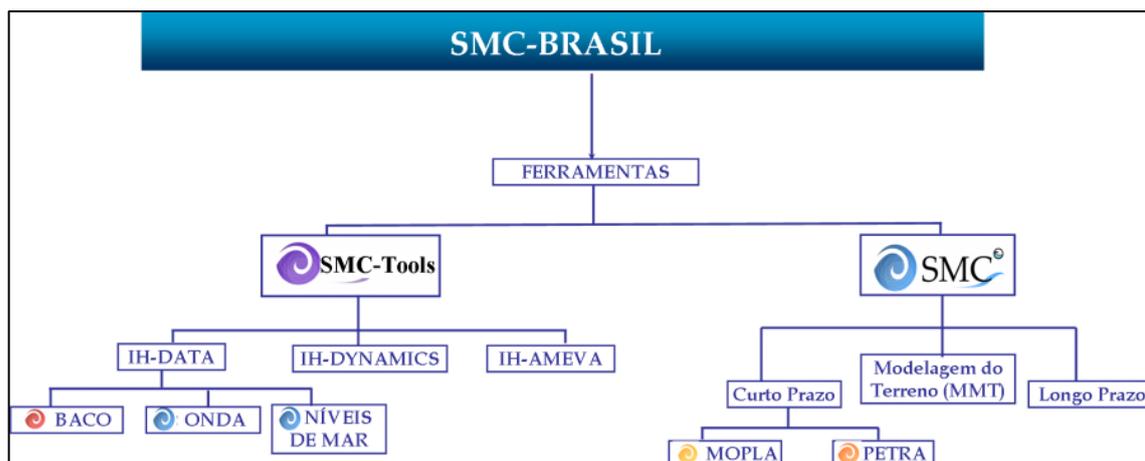
Figura 11 – Documentos temáticos presentes no SMC-Brasil



Fonte: Projeto SMC-Brasil (2017c).

As ferramentas do SMC-Brasil (FIGURA 12) estão presentes em dois módulos, onde os resultados adquiridos no SMC Tools apresentam dados de entrada para os modelos numéricos do SMC 3.0 e vice-versa.

Figura 12 – Ferramentas do SMC-Brasil



Fonte: Projeto SMC-Brasil (2017b).

De acordo com o González *et al.* (2014), a ferramenta SMC Tools se divide em três módulos que inclui uma base de dados de batimetria, ondas e nível do mar, e também contém duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais, e outra que permite realizar a transferência de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa, a saber:

- a) Módulo IH-DATA, inclui o banco de dados das cartas náuticas do litoral brasileiro, dados das ondas e dados dos níveis de mar (marés astronômica e meteorológica);
- b) Módulo IH-AMEVA, onde os dados de onda podem ser caracterizados através de uma análise estatística das variáveis ambientais que permite processar as séries temporais incluídas no IH-DATA;
- c) Módulo IH-DYNAMICS, possui três ferramentas: uma que permite realizar a transformação de ondas desde os pontos *Downscaled Ocean Waves* (DOW) até a costa; outra relacionada com a avaliação do transporte de sedimentos na costa e fluxos médios de energia; finalmente uma terceira associada à avaliação da cota de inundação na costa.

O SMC 3.0 consiste em três módulos principais que possibilitam analisar a estabilidade de uma praia. Estes são estruturados de acordo com as escalas espaciais e temporais de curto, médio e longo prazo. Também inclui um módulo de interpolação do terreno para a atualização da topografia e da batimetria (SPROVIERI; FONTOURA, 2012), a saber:

- a) Módulo de Análise de Curto Prazo de Praia (Acordes), tem como componentes os modelos de evolução MOPLA (Programa de Morfodinâmica de Praias) e

PETRA (Programa de Evolução do Perfil Transversal de Praias), que incluem vários modelos numéricos para analisar sistemas costeiros. O primeiro inclui três modelos numéricos distintos que simulam a evolução morfodinâmica de uma praia, isto é: o OLUCA modela a propagação e transformação das ondas; o COPLA calcula o sistema de correntes utilizando os tensores de radiação devido à propagação das ondas; o EROS calcula o transporte de sedimento e evolução batimétrica com base no campo de ondas e correntes (GONZÁLEZ *et al.*, 2007). Esses modelos são divididos em dois grupos: (1) MC, modelagem dos processos associados à propagação de um trem de ondas monocromáticas e; (2) SP, modelagem de propagação de um estado do mar representado por um espectro de energia de ondas (PROJETO SMC-BRASIL, 2017a). Os modelos OLUCA, COPLA e EROS trabalham sequencialmente, pois os dados de saída de um são utilizados como entrada para o próximo. O PETRA avalia o transporte de sedimento ao longo do perfil de praia (em curto prazo, 12 ou 24 horas) e calcula a conservação de sedimentos dentro do perfil. Permite determinar a resposta de um perfil à eventos de tempestade (GONZÁLEZ *et al.*, 2007);

- b) Módulo de Análise de Longo Prazo de Praia (Arpa), composto pelo Modelo de Praia em Equilíbrio onde é possível calcular o perfil de praia em equilíbrio e a forma em planta da praia (GONZÁLEZ *et al.*, 2014);
- c) Módulo de Modelagem do Terreno (MMT) que é um modulo de regeneração de terreno para atualização de topografia e batimetria, o qual é fundamental para avaliar diferentes cenários de um projeto de engenharia (GONZÁLEZ *et al.*, 2014).

A base de dados que está integrada ao SMC-Brasil é resultante de um processo de reanálise, as informações de estados de mar são distribuídas em forma de pontos ao longo de toda a costa brasileira, em uma série temporal de 60 anos (1948-2008) de medidas horárias e possuem calibração e validação por meio de boias e marégrafos (CAMUS; MENDES; MEDINA, 2011; CAMUS *et al.*, 2013).

3.1.1 Base de dados

A base de dados de batimetria e cartas náuticas da costa (BACO) é composta por informações de batimetria, linhas de costa e imagens das cartas náuticas. Dentro do BACO todas as informações de batimetria disponíveis se encontram referenciadas para o *Datum*

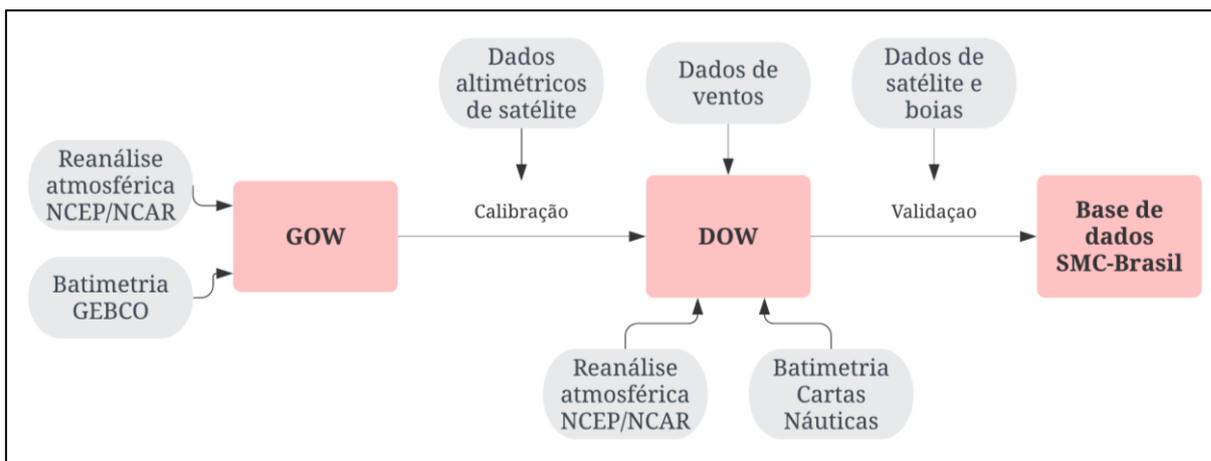
WGS84 pois é comum que, ao trabalhar com dados de várias fontes e resoluções espaciais diversos, os levantamentos topográficos e batimétricos tenham diferentes elipsoides ou superfícies de referência (FERREIRA; AMARO; SANTOS, 2014). Sendo assim, a ideia fundamental do BACO é fornecer informação das batimetrias das cartas náuticas do litoral brasileiro ao programa SMC para facilitar o trabalho de combinar as informações batimétricas provenientes de diversas fontes (DALINGHAUS *et al.*, 2018). As profundidades representadas nas cartas náuticas são reduzidas ao nível de redução da maré (nível que corresponde à média das baixa-mares de sizígia).

Nesse banco de dados de batimetria estão presentes as informações de profundidade dos oceanos extraídas das cartas náuticas do litoral brasileiro e disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Essa base de dados integra as informações de batimetria global da *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) e de outras fontes mais regionais como os dados fornecidos por instituições brasileiras que foram obtidos por pesquisas de navios pela Banco de Dados Ambientais para a Indústria de Petróleo (BAMPETRO), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), Universidade de São Paulo (USP) e Marinha do Brasil (BRASIL, 2018c).

As etapas para a geração da série de reanálise de ondas são apresentadas de forma resumida na Figura 13. Os dados modelados em profundidades indefinidas e intermediárias foram produzidos utilizando a série *Global Ocean Waves* (GOW), um conjunto de dados atualizados de cobertura global de um período de 60 anos que utiliza o modelo numérico *Wavewatch III* (WWIII), versão 2.2 (TOLMAN, 2002). Para simulação das séries globais de dados de onda GOW é utilizada como fonte a batimetria da GEBCO.

Os resultados da reanálise são uma série espectral de 60 anos de dados de estados de mar com medidas horárias dos parâmetros: Hs, Período médio de onda (T_m), T_p , Direção de pico da onda (θ_p), Direção da onda (θ), dispersão direcional e os espectros direcionais. A base de dados GOW foi calibrada e validada através de dados de altimetria de satélites das missões Jason 1, Jason 2, TOPEX, ERS-2, Envisat e GFO, bem como dados de 21 boias espalhadas em águas profundas nos oceanos Atlântico, Pacífico e no mar do Caribe (REGUERO *et al.*, 2012).

Figura 13 - Etapas da geração da base de dados de ondas do SMC-Brasil e sua propagação desde profundidades indefinidas até a costa



Fonte: Brasil (2018c).

A série GOW permite conhecer as características das ondas de forma global, para regiões marinhas profundas e apenas grandes feições são estudadas, portando, essa base de dados não é apropriada para realização de estudos próximos à costa. Para a solucionar esse problema foi realizado um *downscaling* desses dados, de modo a para conferir a eles características regionais (CAMUS *et al.*, 2013).

Como dito anteriormente o objetivo do *downscaling* é regionalizar as informações da série GOW. Para tanto, as transformações foram realizadas através de simulações executadas utilizando a batimetria das cartas náuticas brasileiras e da inclusão de características dos fatores climáticos locais, utilizando o modelo numérico *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) (BOOIJ; RIS; HOTHUIJSEN, 1999), o qual, assim como o modelo WWIII, também se fundamenta na conservação da ação de onda, mas demonstra resolver os fenômenos que as afetam em profundidades reduzidas. Além disso, como principal atrativo do SWAN, está a possibilidade de propagar as ondas em qualquer direção e também de incorporar fenômenos exclusivos de profundidades rasas, como a quebra das ondas e interações não lineares (BRASIL, 2018c). Os dados para calibração e validação foram os mesmos utilizados para a reanálise global e também foram validados com dados coletados *in situ* de boias brasileiras (CAMUS; MENDES; MEDINA, 2011; CAMUS *et al.*, 2013; GOMES DA SILVA *et al.*, 2015).

Além das bases de dados já descritas, o SMC-Brasil ainda possui outras duas bases de dados disponíveis, a de maré astronômica *Global Ocean Tides* (GOT) e a de maré meteorológica *Global Ocean Surges* (GOS); as duas também possuem informações a cada hora

de 60 anos (1948-2008). O nível de referência das bases de dados de nível, diferente do referencial da batimetria, são relativas ao nível médio do mar do local.

Para a obtenção dos dados de maré astronômica foram selecionados pontos com resoluções de 50 km no entorno da costa brasileira, as constantes harmônicas foram retiradas do modelo global de marés TPXO da Universidade do Oregon, onde os dados foram processados em cada ponto selecionado. A previsão das séries de maré astronômica foi feita por meio de ferramentas de processamento (*RomsTools*) desenvolvidas pelo *Institut de Recherche pour le Developpement* (IRD – França) e do modelo de análises harmônicas *t_tide* (BRASIL, 2018b). A base GOT inclui oito constantes harmônicas (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 e Q1) e duas componentes de longo prazo (Mf e Mm); foi validada com dados de marégrafos do Centro de Nível do Mar da Universidade do Havaí (UHSLC) e da Marinha do Brasil.

A base de maré meteorológica foi obtida a partir de dados de vento global de 10 m de altura e pela pressão do nível do mar, oriundas do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/ NCAR), que serviam como base de entrada para realizar a simulação pelo modelo tridimensional de circulação *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005). Obteve-se então os dados de marés meteorológicas regionalizadas que estão distribuídos na forma de 24 pontos em toda costa brasileira, com uma distância média entre si de 100 km (BRASIL, 2018b).

3.2 Ondas

As ondas podem ser consideradas basicamente como perturbações periódicas do estado de equilíbrio de um dado corpo, no caso, a superfície do mar, que se propagam através desse corpo por distâncias e tempos muito maiores que os comprimentos e períodos originais dessa onda (HOLTHUIJSEN, 2007).

As ondas de gravidade, cuja causa geradora é o vento, são as que mais ocorrem nos oceanos, e conseqüentemente, a principal forma de transmissão de energia no mar (YOUNG, 1999).

Para a formação de uma onda, é necessário que haja uma força sobre um fluido na tentativa de deformá-lo contra a ação da gravidade e a tensão superficial (HOLTHUIJSEN, 2007). As ondas são então formadas pelo atrito e arraste do vento na superfície da água; a velocidade do vento, sua duração e o comprimento da área afetada (*fetch*) influenciam proporcionalmente na altura e período das ondas formadas a partir da região de geração (KNAUSS, 1997). A agitação das ondas, o atrito com o fundo do mar, a mudança de declividade

de seu leito, são outros fatores que influenciam no crescimento da altura da onda e de sua declividade até a rebentação, nas regiões de profundidade intermediárias e rasas (KNAUSS, 1997).

Como dito anteriormente, a interação do vento com o oceano gera oscilações na superfície do mar, e estas oscilações que se deslocam por milhares de quilômetros a partir dos locais onde foram originadas são as responsáveis por gerar as ondas mais comuns nos oceanos, as chamadas *swell*. Uma de suas características é que ao se afastarem de seu local de origem tornam-se muito uniformes, com grandes comprimentos de onda e pequenas amplitudes, em oceano aberto, seu período situa-se em torno de 15 segundos (HOLTHUIJSEN, 2007).

Outro tipo de onda comum são as vagas, ou *sea*, são ondas encontradas nos locais de geração, ou seja, ainda estão sobre a influência direta do vento que as formou. Essas ondas têm característica de ser muito irregulares com diversos períodos e várias direções, principalmente por conta da forte influência da ação aleatória dos ventos e também pela presença de ondas com diferentes rumos de propagação (LONGUET-HIGGINS, 1952). As vagas são usualmente compostas por ondas mais esbeltas (maior relação entre a altura e o comprimento da onda), com períodos e comprimentos de ondas mais curtos (LONGUET-HIGGINS, 1975).

À medida que as ondas se movem para águas rasas elas começam a “sentir o fundo”, devido a essas interações com o fundo e outros obstáculos as ondas podem sofrer deformações (THE OPEN UNIVERSITY, 1999) através dos efeitos de fenômenos como a refração, difração, reflexão e o empinamento, que fazem com que as ondas sofram transformações na sua altura, período e direção de propagação.

A refração acontece devido à interação das ondas com o fundo do mar, e ocorre quando a onda encontra uma variação da profundidade, que não é ortogonal ao seu sentido de propagação, e assim a mesma frente de onda encontra profundidades diferentes. Ao se aproximarem da costa sua velocidade diminui, o que provoca mudança na direção da onda, pois a porção da onda que chega primeiro tem sua velocidade reduzida, enquanto a porção que ainda está em águas profundas continua com sua velocidade (BRASIL, 2018c) as cristas das ondas tendem então a se alinhar paralelamente com a batimetria, tornando a direção da onda perpendicular à linha de costa (APRH, 2007).

A difração é o fenômeno devido a uma atenuação da agitação em resposta a presença de algum obstáculo. É o giro das ondas para áreas com menores amplitudes devido a mudanças de amplitude ao longo das cristas das ondas. É o desvio ou espalhamento da onda ao

contornar ou transpor um obstáculo, sendo a difração mais intensa quanto menor for o comprimento da onda em relação ao tamanho do obstáculo (HOLTHUIJSEN, 2007).

A reflexão acontece quando as ondas propagadas encontram um obstáculo ou descontinuidade e parte de sua energia reflete, retornando em sentido oposto ao original (RAIZER, 2019).

O empinamento (*shoaling*) ocorre em costas abertas devido à diminuição da profundidade e às características batimétricas em direção à costa. Ocorre por conta da variação da direção de propagação das ondas, devido às alterações induzidas pela profundidade na velocidade de grupo. Essas mudanças, geralmente aumentam a amplitude da onda à medida que as ondas se propagam em águas mais rasas (a propagação da energia das ondas diminui, resultando em um agrupamento de energia). Próximo a costa, resulta em um aumento na altura da onda (HOLTHUIJSEN, 2007).

Outro fenômeno conhecido que ocorre próximo à costa é a arrebentação da onda. Próximo à costa, com a diminuição da profundidade, a onda perde sua estabilidade, quando seu comprimento diminui e, ao mesmo tempo em que a altura aumenta, tornando a onda cada vez mais esbelta até que o limite físico é alcançado e ela arrebenta (quebra) (KAMPHUIS, 2000).

Dos estudos de física ondulatória, os parâmetros definidos de uma onda simples e exibidos na Figura 14 são (KNAUSS, 1997):

L: Comprimento da onda. Distância horizontal entre duas cristas (ponto mais alto da onda) adjacentes, ou de duas cavas (ponto mais baixo da onda), medida na direção de propagação;

T: Período da onda. Tempo decorrente entre a passagem de duas cristas, ou cavas, com referência a um ponto fixo;

H: Altura da onda. É a distância vertical da altura da crista da onda e de sua cava;

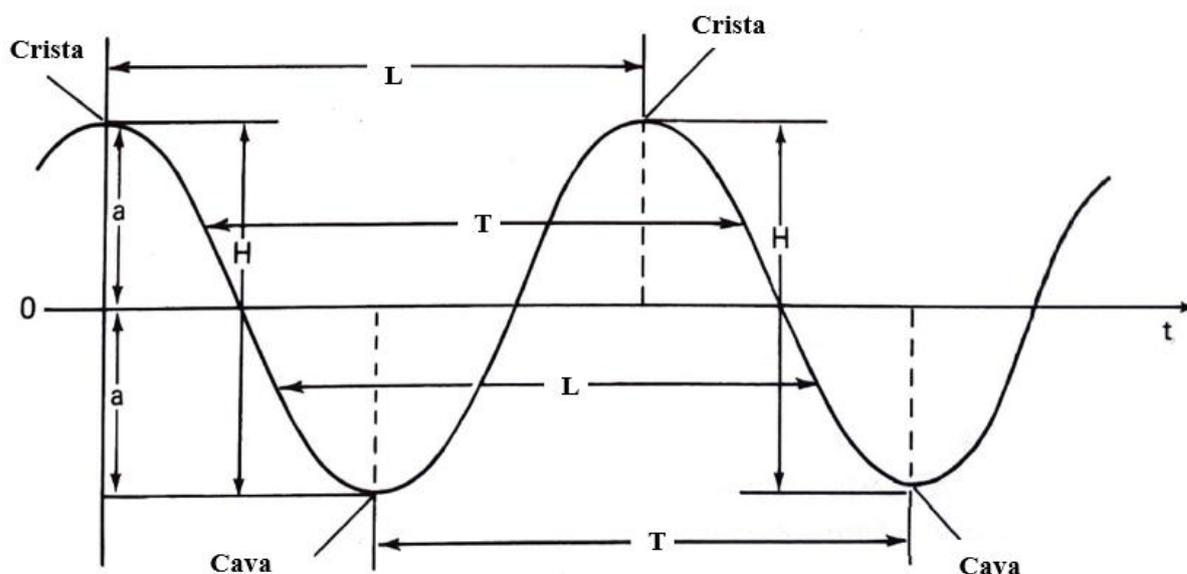
a: Amplitude da onda. É a distância vertical entre a altura da crista da onda (ou cava) com o nível médio do mar, ou seja, a metade da altura da onda ($a=H/2$).

Outros parâmetros importantes são:

F: Frequência, é o inverso do período ($1/T$), indica o número de cristas (ou cavas) que passam por um ponto fixo em um certo intervalo de tempo;

C: Celeridade da onda, é a velocidade de propagação da onda ($C=L/T$);

Figura 14 – Características físicas da onda. L: Comprimento da onda; T: Período da onda. H: Altura da onda. a: Amplitude da onda



Fonte: Adaptado de Knauss (1997).

Assim como as deformações anteriormente descritas que as ondas passam a sofrer pela interação com a batimetria, no oceano, existem 3 zonas bem diferenciadas, a definição destas zonas depende do comprimento da onda e da profundidade média da água (THE OPEN UNIVERSITY, 1999).

Em águas profundas as ondas não são afetadas pelo fundo, nesse momento, o comportamento das ondas nessas profundidades compreende trajetórias orbitais das partículas. A relação entre comprimento da onda e profundidade média da água é: $h > L/2$.

Quando as ondas chegam em águas intermediárias elas já começam a ser afetadas pelo fundo e se tornar elípticas. A relação L/h é: $L/2 \geq h \Rightarrow L/20$

Em águas rasas o movimento e as características das ondas passam a serem modificadas pela interação com a morfologia, são nessas profundidades que ocorre o transporte de sedimentos. Rasas: $h \leq L/20$

Para sintetizar as informações proporcionadas pelas séries de ondas do SMC-Brasil, foram calculados os parâmetros estatísticos capazes de resumir e ressaltar algumas das informações mais significativas presentes na base de dados de ondas (BRASIL, 2018c). A altura significativa, que corresponde à média de 1/3 das maiores ondas registadas durante o tempo considerado e o período de pico da onda, que corresponde a frequência da componente mais energética do espectro, associado ao sistema de ondas dominante.

Segundo a teoria linear das ondas, ao se propagarem sobre a superfície do oceano, as ondas não transportam massa, mas sim energia através do fluido. A energia da uma onda é a soma de duas energias: (1) cinética, que é a energia referente ao movimento orbital das partículas de água e a (2) potencial, energia das partículas como resultado do deslocamento de sua posição de equilíbrio já a taxa de transmissão de energia pelo fluido é denominada fluxo de energia (SILVEIRA; VARRIALE, 2005).

O fluxo de energia de onda é uma taxa de transferência de energia que é transmitida na direção de propagação das ondas através de um plano vertical perpendicular ao avanço da direção de onda e estendido por toda a profundidade. A direção do fluxo médio de energia coincide com o valor ortogonal do trem de ondas que é perpendicular à linha de costa e responsável, assim como as correntes induzidas pelas ondas, a quantidade e o tamanho dos sedimentos disponíveis, por definir a orientação da forma de uma praia em planta (GONZÁLEZ; MEDINA, 2001).

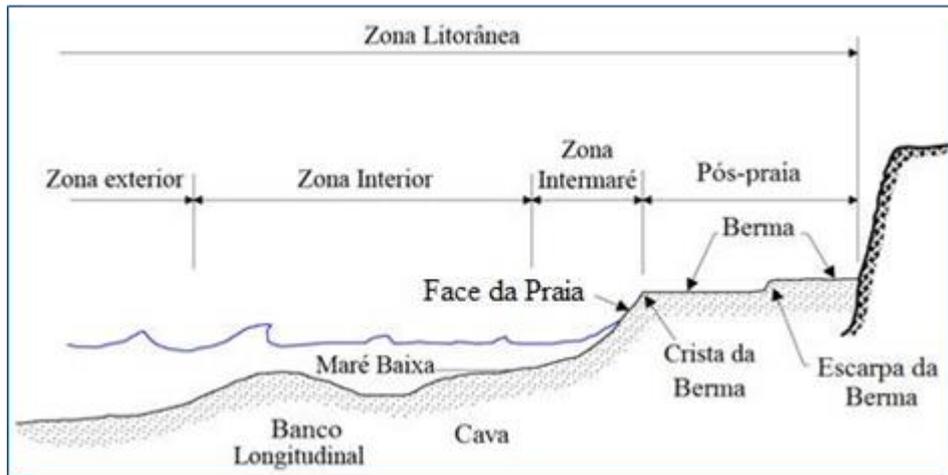
3.3 Morfologia da praia

As características morfológicas de uma praia juntamente com ondas, marés e características sedimentares, representam os principais agentes modificadores de uma praia. Os diferentes setores que caracterizam e que tem influência no comportamento morfodinâmico das praias definem seus compartimentos fisiográficos principais (SILVA *et al.*, 2004).

As praias fazem parte da Zona Costeira (Coastal Zone), que compreende a área da plataforma continental e da costa em que os processos morfodinâmicos são determinados pela dinâmica marinha (BRASIL, 2018d).

O perfil praial é definido como a variação da profundidade da água com a distância da linha de costa na direção normal a praia, limitado pela zona de máximo espraiamento da onda em direção a terra e pela profundidade de fechamento em direção ao mar (THE OPEN UNIVERSITY, 1999). Com o objetivo de padronizar as nomenclaturas utilizadas nesse trabalho, foram adotadas as definições e subdivisões dos documentos temáticos do SMC-Brasil (BRASIL, 2018d). Da terra para o mar, o perfil é dividido como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Zonação do perfil de praia e zona submersa adjacente em função da morfologia



Fonte: BRASIL (2018d).

A pós-praia é a zona do perfil de praia compreendida entre o limite de terra da praia (base da duna, falésia ou calçadão) e o início da face da praia. A face da praia é a seção que fica exposta à ação do fluxo ascendente e descendente da onda ou subida e descida da maré. A antepraia é a porção do nível atingido pela água na praia após a rebentação e que se estende até o limite da plataforma continental interna, nesse ponto, as ondas não mais atuam sobre os sedimentos de fundo (profundidade de fechamento). Dentre as diversas equações para se estimar a profundidade de fechamento, a calculada pelo SMC-Brasil e escolhida no presente trabalho foi a fórmula de Hallermeier (1981), que a define como a profundidade limite para além da qual, o perfil não se modifica em curta escala temporal.

$$h^* = 2,28H_{S_{12}} - 68,5 \left(\frac{H_{S_{12}}^2}{gT_p^2} \right) \text{ Hallermeier (1981)} \quad (1)$$

De forma hidrodinâmica o perfil também pode ser dividido em: zona de empinamento, onde a onda incidente se aproxima de águas mais rasas e, por conta da diminuição da profundidade, se deforma até a sua quebra; zona de surfe, é a porção em que são propagadas as ondas produzidas após a quebra; e zona de espriamento, onde a energia da onda é dissipada, ocorre a alternância de ascensão e declínio das ondas, ficando o fundo coberto e descoberto alternadamente pelas ondas.

3.4 Transporte de sedimentos

A combinação das ações oceânicas (de vários agentes forçantes, como as ondas, marés e correntes), definidas pelas correntes marítimas, pelas ondas incidentes, pelo movimento das marés, bem como, pela incidência dos ventos, conduzem um processo contínuo de transporte de sedimento ao longo da linha de costa capaz de estabelecer a evolução e mudanças morfológicas da região costeira (COWELL; THOM, 1994).

Segundo Suguio (2003) podem ser reconhecidos diferentes tipos de transporte sedimentar de acordo com os agentes envolvidos. Entre os principais estão os transportes por águas pluviais, fluviais e correntes litorâneas, ventos geleiras e movimento de massa. De acordo com Van Rijn (1993) o início da movimentação da partícula sedimentar irá ocorrer a partir do momento em que a força gerada pelo atrito for maior que a força de inércia da partícula, movimentando a mesma por rolamento, saltação ou suspensão.

Desse modo, a movimentação de sedimentos em ambientes costeiros resulta de processos de movimento do fluido, dentre os quais pode-se destacar aqueles induzidos pelas ondas que iniciam o movimento sedimentar e aqueles induzidos pelas correntes que transportam os sedimentos.

O primeiro é o transporte que se processa transversalmente às cotas batimétricas, responsável pelas alterações em perfil da praia como resultado da ação das ondas em ataque frontal, com o perfil se adaptando às condições climáticas existentes (KOMAR; MOORE 1983). Apesar de ter capacidade de mover grandes quantidades de sedimento, a resultante anual é praticamente nula e a praia oscila entre condições de alta a baixa energia de onda (FONTOURA, 2004).

O segundo tipo, o transporte longitudinal dos sedimentos, que ocorre paralelamente à costa, é devido fundamentalmente à arrebentação oblíqua das ondas (SUGUIO, 2003). Este transporte considera duas zonas distintas (FONTOURA, 2004), a saber:

- Zona de arrebentação até a linha de costa, sendo esta corrente longitudinal o principal agente transportador pois é nesta zona que a quebra da onda suspende novamente uma grande quantidade de sedimentos, sendo estes, suscetíveis ao transporte pelas correntes geradas por ondas;
- Zona de espraçamento, onde as partículas ficam restritas ao movimento oscilatório junto ao fundo por causa das correntes geradas pela flutuação dos campos de pressão da própria onda.

Como mencionado anteriormente, o movimento de sedimentos ao longo da costa causado pelas ondas e correntes (deriva litorânea) interfere diretamente na zona costeira provocando variações nos perfis da linha de costa. Quando essa dinâmica é interrompida, por causas naturais ou pela construção de obras costeiras, o equilíbrio existente em determinado ambiente é alterado e a linha de costa tende a se ajustar às novas condições e procurar uma nova configuração de equilíbrio principalmente através do balanço sedimentar (MUEHE, 2006; USACE, 1984).

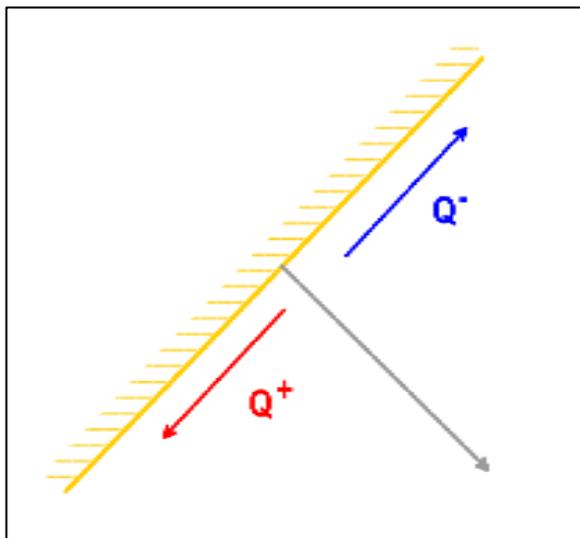
O cálculo do transporte de sedimentos em ambientes costeiros revela-se um desafio devido à complexidade da hidrodinâmica e à variedade dos fenômenos (ondas, correntes, marés) que governam esses ambientes. Além disso, esses parâmetros induzem diferentes tipos de transporte (carga no leito, carga suspensa e vazão da chapa). A maioria das fórmulas de transporte de sedimentos são funções da tensão de cisalhamento do leito e foram desenvolvidas e calibradas em conjuntos de dados específicos para determinadas condições (VAN RIJN, 1993).

As principais formulações desenvolvidas para o cálculo do transporte de sedimento levam em consideração os transportes em suspensão e o de fundo; isso se deve basicamente ao fato de que essas formulações terem sido desenvolvidas para praias arenosas (TOMASICCHIO *et al.*, 2013). Entre as diversas formulações, o módulo de transporte de sedimentos do SMC-Brasil possui três formulações que podem ser aplicadas: Bayram, Larson e Hanson (2007), *Coastal Engineering Research Center* – CERC (USACE, 1984) e Kamphuis (1991).

Segundo Tomasicchio (2013), a formulação a mais utilizada para o cálculo da taxa do transporte de sedimento longitudinal é a equação CERC; esta fórmula baseia-se no princípio de que a taxa de transporte longitudinal, sem distinção entre carga no leito e carga suspensa, é proporcional à potência das ondas de longa distância (USACE, 1984). Portanto, para o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos na praia do Pecém a formulação utilizada foi a proposta por USACE (1984).

O SMC-Brasil adota o padrão de Dean e Dalrymple (2004) para diferenciar os dois sentidos de transporte litorâneo ao longo da costa, que considera um observador que olha em direção ao mar, o transporte litorâneo positivo é (Q^+) quando o sedimento é transportado para a direita do observador, e é negativo (Q^-) quando o transporte se desenvolve para a esquerda do observador (FIGURA 16). O transporte litorâneo líquido (Q_a) é a soma do componente positivo e negativo, enquanto o transporte longitudinal bruto é a soma das magnitudes de ambos os componentes (soma em valor absoluto) (BRASIL, 2018c).

Figura 16 - Convenção dos sinais para o transporte longitudinal adotado no SMC-Brasil



Fonte: Brasil (2018c).

Todas as informações adicionais sobre as formulações inseridas no SMC podem ser encontradas no documento temático de ondas (BRASIL, 2018c).

4 METODOLOGIA

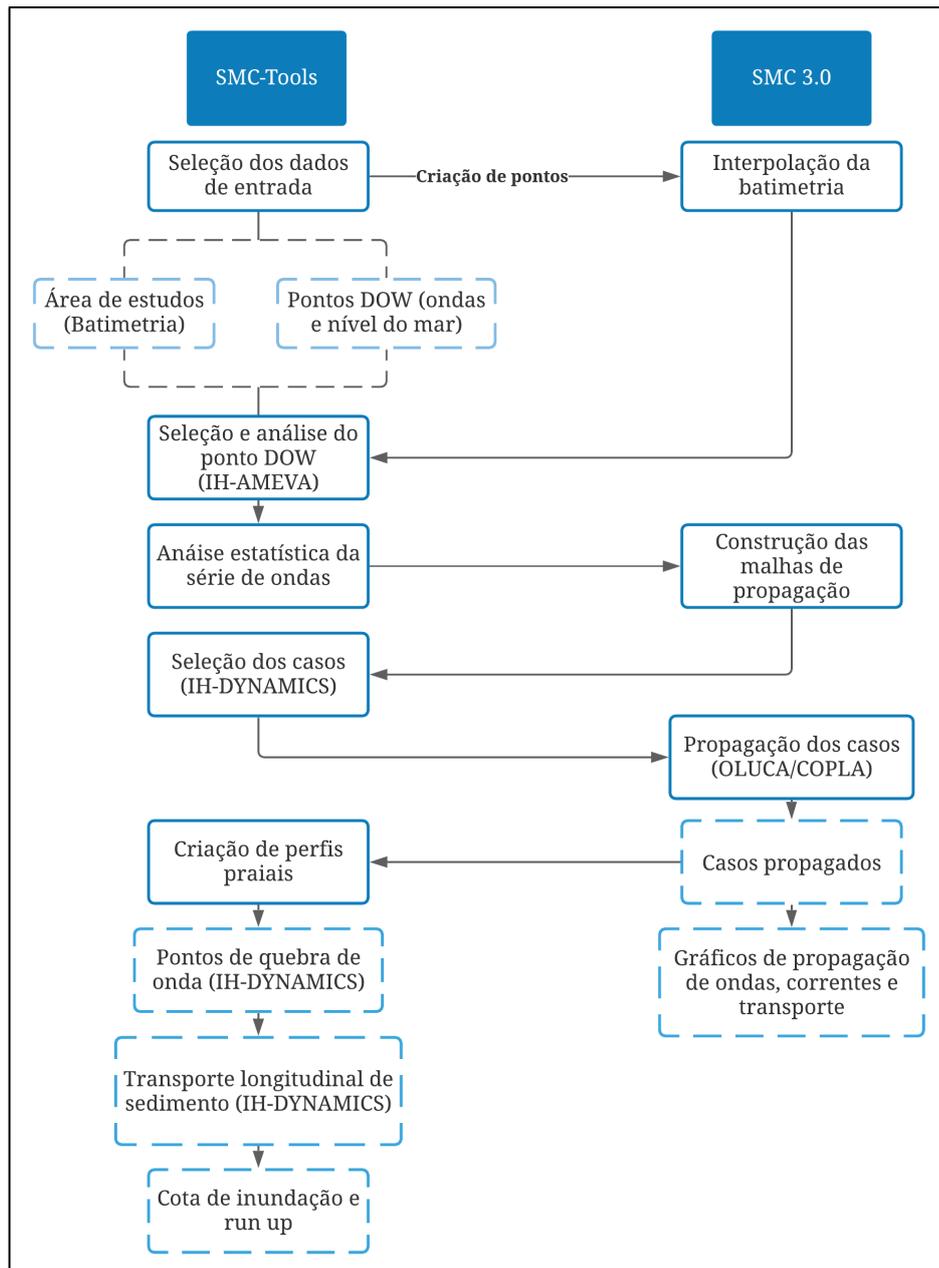
4.1 Levantamento bibliográfico

A primeira etapa consistiu em um levantamento de dados bibliográficos com objetivo de entender detalhadamente a área de estudo em seus aspectos geológicos, fisiográficos e socioambientais bem como da metodologia a ser aplicada. Essa etapa foi realizada através do levantamento de publicações (artigos científicos, livros, trabalhos acadêmicos) anteriormente realizados na área ou em outras regiões semelhantes para auxiliar na comparação e adequação da metodologia. Nessa etapa também foram levantadas a disponibilidade de materiais para a área como, cartas náuticas, imagens de satélite, parâmetros de onda e sedimentologia.

4.2 Aplicação do SMC - Brasil

Neste tópico serão apresentados os procedimentos metodológicos necessários para a aplicação do SMC-Brasil (versão 3.1, nov/2014) no qual cada etapa realizada depende do resultado da etapa anterior. Para melhor visualização da metodologia, a sequência das etapas se encontra no fluxograma da Figura 17. Utilizando a base de dados obtida do SMC-Brasil, foram adquiridas as informações sobre o comportamento da atuação dos processos hidrodinâmicos e as taxas de transporte de sedimento da região da Praia do Pecém.

Figura 17 – Fluxograma da metodologia do SMC-Brasil



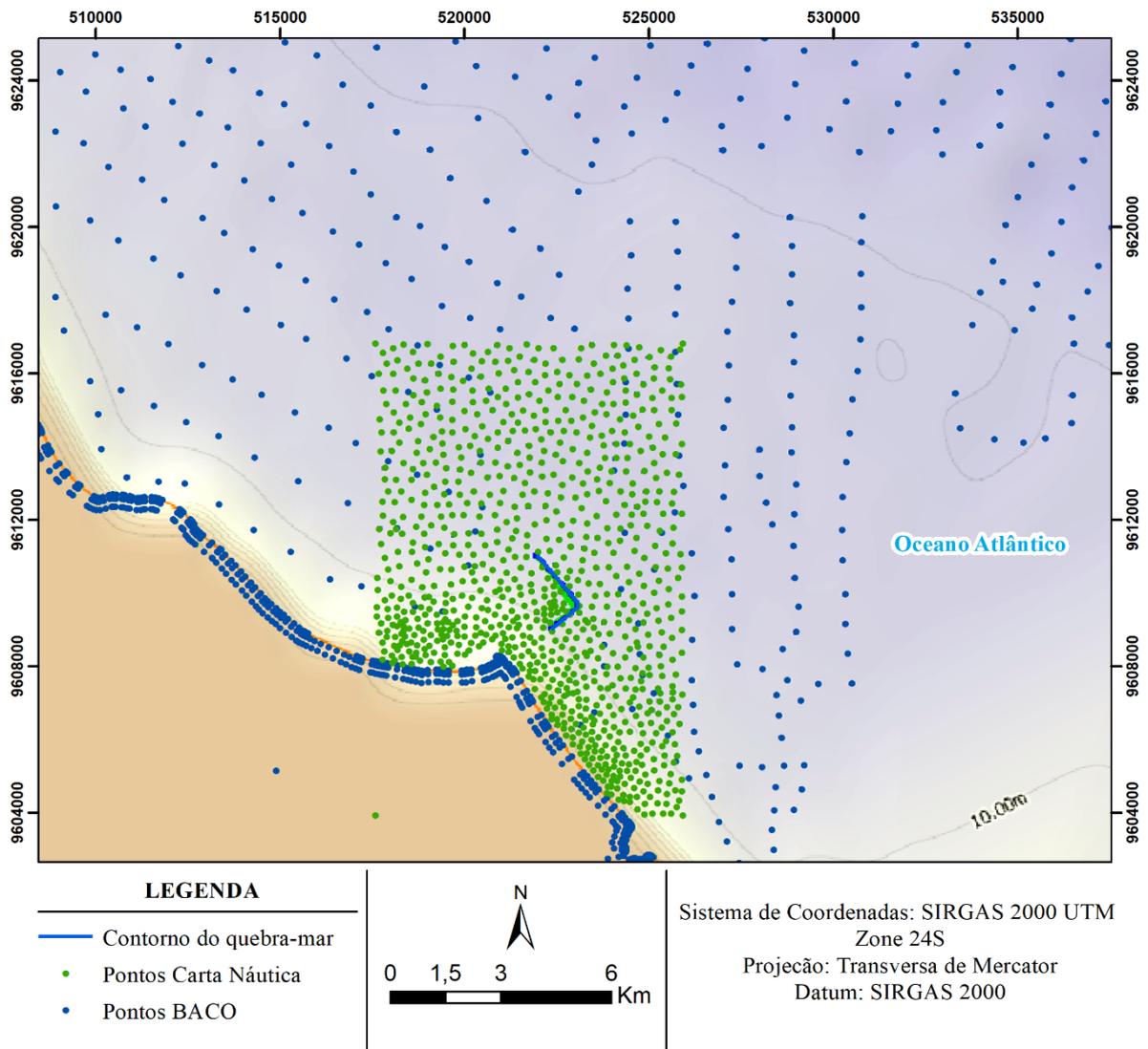
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Interpolação da batimetria

Como já mencionado, a base de dados do SMC – Brasil dispõe de dados de batimetria geral para a área de estudos, ainda assim, para completar a batimetria existente, também foram integrados ao projeto os dados de batimetria presentes na Carta Náutica 705 (escala 1:15.000). Para integração dos dados, as informações da carta náutica disponibilizada pela DHN, da Marinha do Brasil, foram digitalizadas e transformadas para WGS-84, o mesmo datum empregado pelo SMC-Brasil.

As informações foram então inseridas no SMC 3.0 e posteriormente interpoladas juntamente com a batimetria presente no banco de dados (FIGURA 18). A malha da batimetria digitalizada abrange, desde pontos em águas rasas, até águas profundas. Com o objetivo de integrar as duas bases da melhor forma, também foram melhorados os contornos dos polígonos das batimetrias para que nenhuma informação fosse perdida. Também nessa etapa, foi desenhado o contorno da estrutura de engenharia que existe na área, um quebra-mar de berma na forma de "L" com aproximadamente 2.770 m de extensão. Por último, a batimetria foi interpolada no Sub-Módulo de Modelagem do Terreno (MMT).

Figura 18 - Interpolação da batimetria com pontos da Carta Náutica 705 da Marinha do Brasil (verde) e da base de dados do SMC-Brasil (azul)



Fonte: Elaborado pela autora.

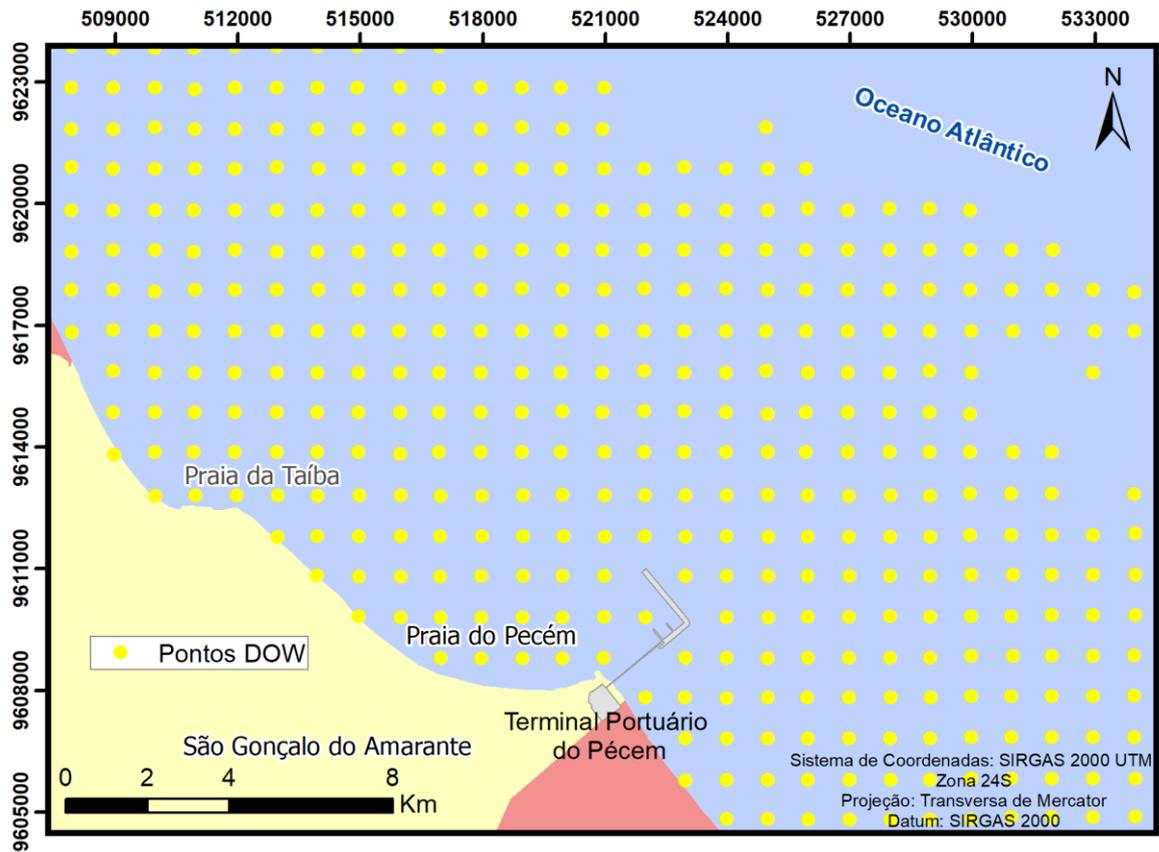
4.2.2 Seleção do Ponto DOW

Com o intuito de caracterizar o clima de ondas em águas profundas da praia em estudo foi preciso, primeiramente, escolher um ponto (FIGURA 19) mais representativo para posterior avaliação da base de dados de reanálise de 60 anos de dados de onda (DOW). A correta escolha e análise desse ponto é uma parte fundamental para a definição de parâmetros de entrada para as próximas etapas da metodologia.

Segundo Klein *et al.* (2016), em função das limitações do modelo SWAN é recomendada a escolha de pontos com a cota batimétrica entre 10 a 20 metros, a depender do comprimento de onda que chega na área de estudos e a que profundidade as ondas começaram a sentir as interações com o fundo oceânico, que ocorrem à medida que as ondas são deslocadas em direção a costa, como já mencionado no tópico 3.2.

Foram escolhidos 7 pontos em águas profundas, de acordo com as características da onda para a área de estudo, entre os pontos DOW disponíveis e em seguida os parâmetros H_s , T_p e Probabilidade de direção foram analisados estatisticamente por histogramas e regressão linear. Outros aspectos utilizados para seleção do ponto levaram em consideração: uma posição central da área a ser estudada, com a intenção de evitar a interferência das praias vizinhas e a similaridade com as características (H_s , T_p e direção de incidência das ondas) da área.

Figura 19 - Pontos DOW disponíveis para a área de estudo, oriundos da Malha M006 do SMC-Brasil

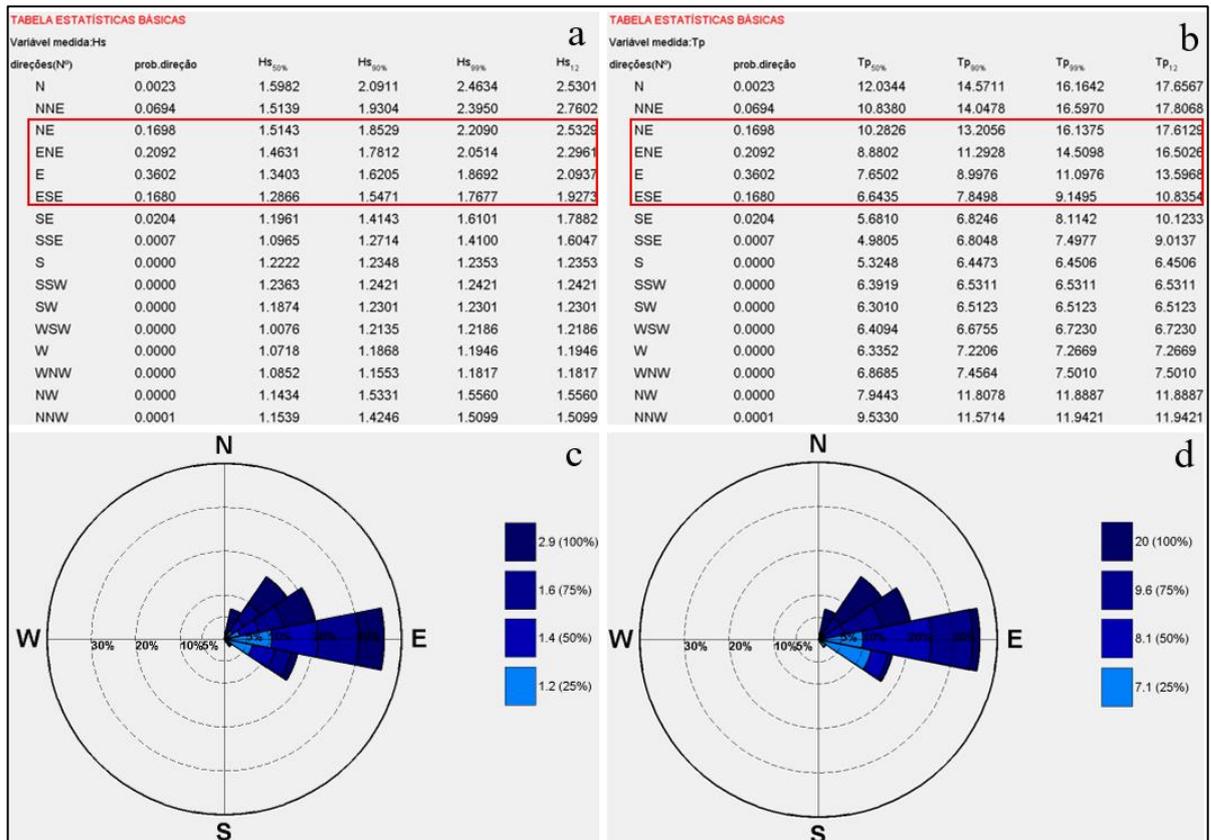


Fonte: Elaborado pela autora.

Após selecionado o ponto, foram gerados os gráficos pelo módulo IH-AMEVA e realizada uma primeira caracterização dos dados estatísticos, com o objetivo de analisar as principais direções de incidência de onda no ponto selecionado para posterior desenho das malhas.

Analisando os parâmetros de altura significativa de onda, período de pico e probabilidade de direção da onda, tanto nas tabelas de estatísticas básicas quanto das rosetas direcionais (FIGURA 20) observa-se que o regime de ondas chega principalmente de 4 direções (NE, ENE, E e ESE).

Figura 20 – Parâmetros de onda analisados no Ponto DOW de coordenadas (X:538951.02, Y:9629835.30) e profundidade de 27 m, da Malha M006 do SMC-Brasil



Fonte: Elaborado pela autora. a) tabela de estatísticas básicas de altura de onda (Hs), b) tabela de estatísticas básicas de período de pico (Tp), c) rosa direcional de altura de onda, d) rosa direcional de período de pico.

4.2.3 Construção das malhas de propagação

Uma vez selecionado o ponto DOW e caracterizado de forma inicial o clima de ondas da região, foram elaboradas as malhas de propagação das ondas de águas profundas para águas rasas. O desenho das malhas deve levar em consideração as principais direções de incidência de onda identificadas no tópico anterior.

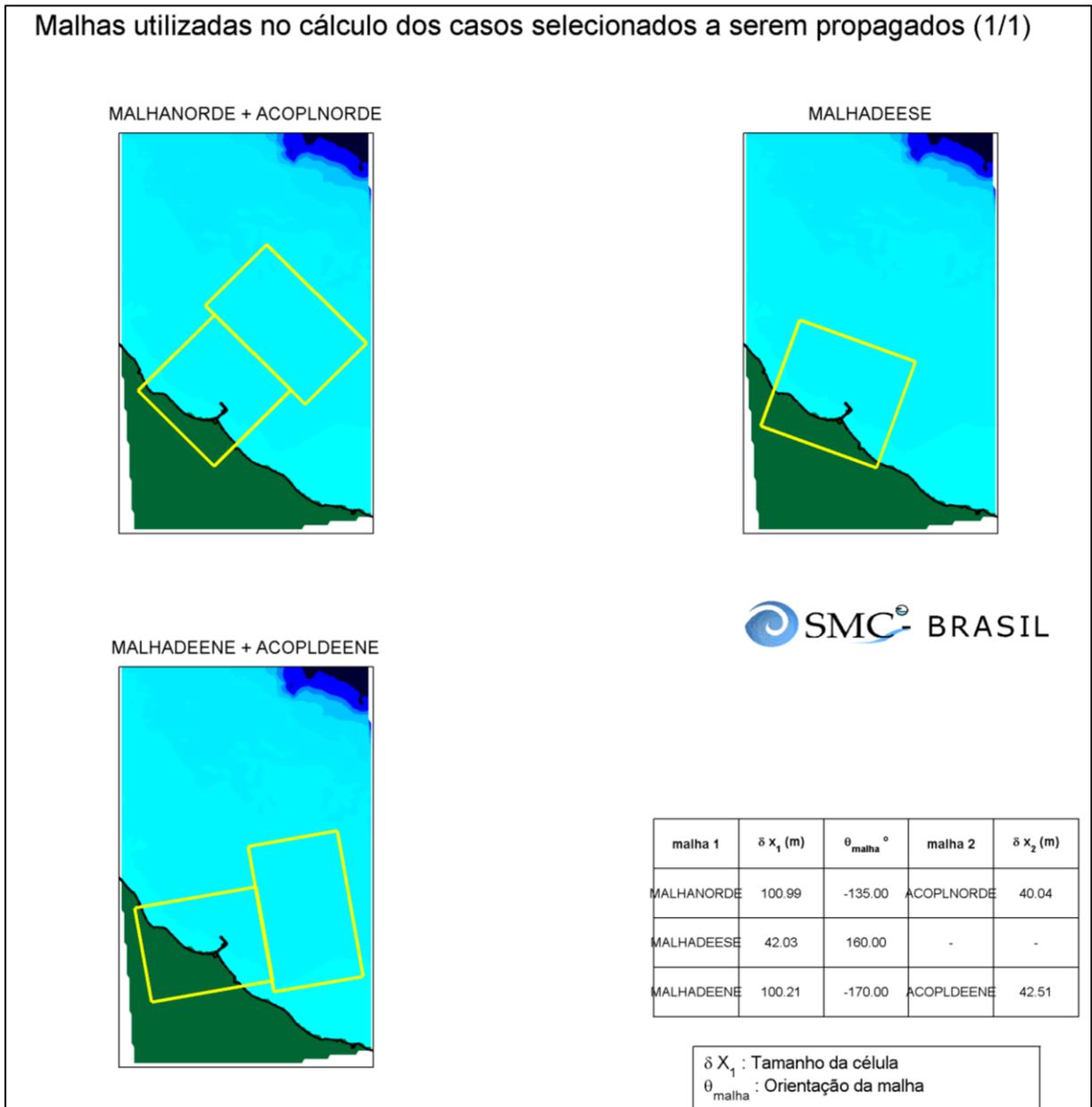
Devido às limitações do modelo parabólico de declividade suave, o ângulo de entrada não deve ultrapassar 50° em relação ao eixo X da malha (direção principal de propagação) e o espaçamento entre cada nó deve se adequar as estruturas naturais ou artificiais encontradas na área (KLEIN et al., 2016). Com o objetivo de não perder nenhuma informação da entrada de ondas, o limite foi limitado a 30°, como giro máximo para cada malha.

Por conta das limitações inerentes aos modelos, foi necessária a utilização de mais de uma malha para a região, para permitir que todas as direções de ondas que exercem influência

sobre a área fossem contempladas. Para a praia do Pecém foram geradas 3 malhas de propagação, duas delas com malhas acopladas. A primeira malha, com orientação azimutal de 045° Az, para a entrada das ondas de nordeste, a segunda com orientação 070° Az para a entrada das ondas de leste e a terceira com orientação de 100° Az para a entrada de ondas de leste-sudeste, respeitando assim as limitações do método (FIGURA 21).

O espaçamento entre os nós das malhas deve levar em consideração os comprimentos de onda que incidem na região. É ideal que o comprimento da onda passe por três nós da malha. O menor período de pico observado na Figura 20, de 6,64 s, tem um comprimento de onda de aproximadamente 70 m necessitando de uma malha com espaçamento de no máximo 23 m. No entanto, propagar uma malha com esse espaçamento exigiria uma capacidade computacional maior do que a do computador utilizado nesse trabalho. Por conta dessas limitações o valor para a malha de direção 070° Az foi de 42 m, para as outras malhas gerais o espaçamento foi estabelecido como 100 m e para as acopladas 40 m (malha de direção 045° Az) e 42 m (malha de direção 100° Az).

Figura 21 – Área de trabalho com malhas de propagação (amarelo) de ondas empregadas para simulação no SMC-Brasil



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Seleção dos casos

A série temporal de reanálise presente no SMC-Brasil contém 60 anos de medidas horárias de dados de ondas, isso corresponde a mais de 500.000 estados de mar. O custo computacional para propagar todos os estados de mar na simulação seria muito grande e levaria muito tempo para ser executado. Por esse motivo, utilizam-se métodos de seleção de casos, a fim de escolher os estados de mar mais representativos do clima de ondas de toda a série de

dados para a região. Posteriormente, através de técnicas de interpolação, toda a série de dados é reconstruída (CAMUS; MENDES; MEDINA, 2011).

A técnica utilizada no SMC-Brasil é a de máxima dissimilaridade (MaxDiss) que permite identificar para cada malha os casos mais representativos sem que seja perdida a variabilidade de toda a série. Camus, Mendes e Medina (2011) concluíram, ao realizar testes com tamanhos diferentes de casos, que após um “M” amostral igual a 100, os erros na estimativa dos parâmetros das ondas em águas rasas são quase desprezíveis.

O mesmo ponto DOW utilizado na primeira análise do clima de ondas foi utilizado nessa parte da metodologia para as propagações de águas profundas para águas rasas. Os 100 casos então foram selecionados para propagação entre as direções 020° e 120° Az, correspondentes as direções de onda que chegam a região de estudo. Cada caso é então propagado em condições de preamar e baixamar, totalizando 200 estados de mar simulados.

4.2.5 Propagação dos casos

Com o ponto DOW selecionado, as malhas desenhadas e os casos reconstruídos, os espectros de ondas são então propagados utilizando o Modelo de Propagação de Ondas Espectrais (OLUCA-SP) e a atuação das correntes são calculados utilizando Modelo de Correntes Induzidas pela Quebra de Onda Espectral (COPLA). Estes dois modelos inseridos no SMC-Brasil (ferramenta SMC Tools) trabalham conectados, onde os dados de saída de um são utilizados como dados de entrada para o cálculo do modelo seguinte. Os resultados são disponibilizados em mapas executados automaticamente em segundo plano do SMC-Brasil para o *software* Surfer.

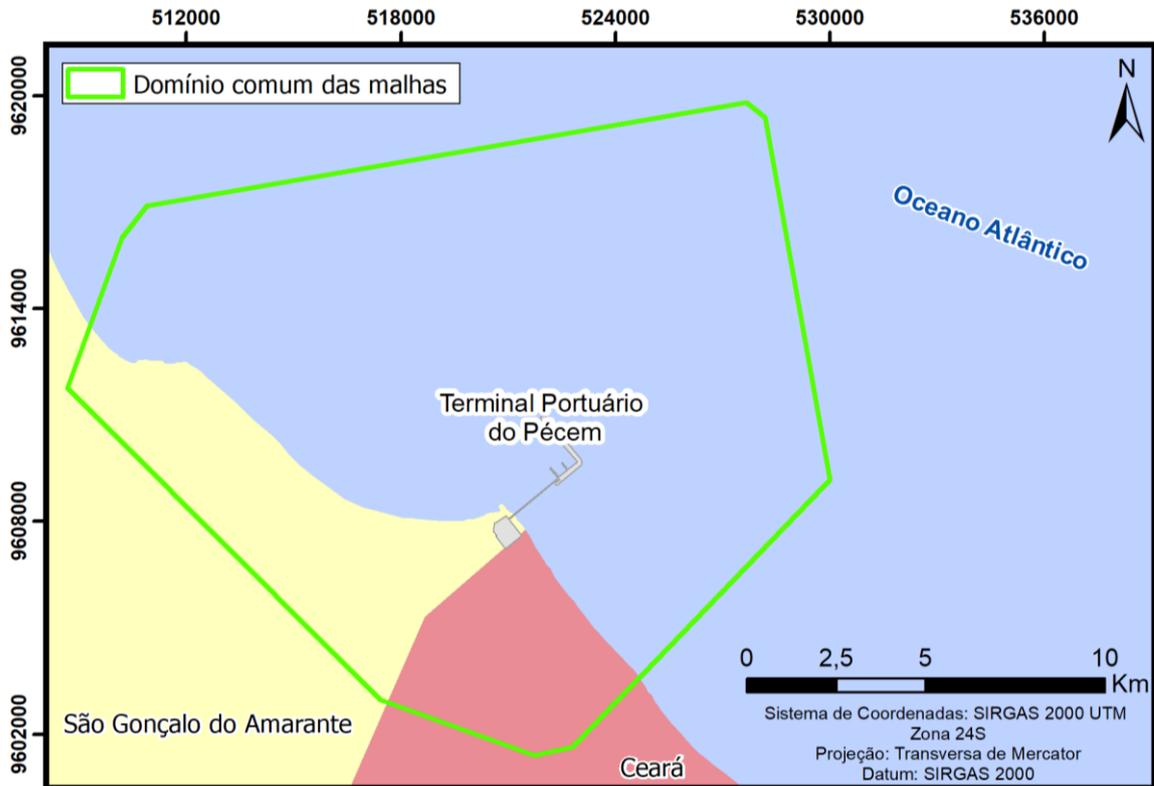
4.2.6 Etapas de Pós-processo

Após a propagação dos casos de ondas mais representativos até a costa se inicia o módulo de pós-processo. Nessa etapa, com a informação dos parâmetros espectrais dentro do domínio em comum a todas as malhas (FIGURA 22), pode-se reconstruir as séries de estados de mar em qualquer ponto do domínio.

No módulo IH-DYNAMICS foram calculados os seguintes parâmetros:

- a) ponto de quebra das ondas de um perfil;
- b) transporte litorâneo de sedimento;
- c) fluxo médio de energia das ondas.

Figura 22 – Região de domínio das malhas no SMC-Brasil

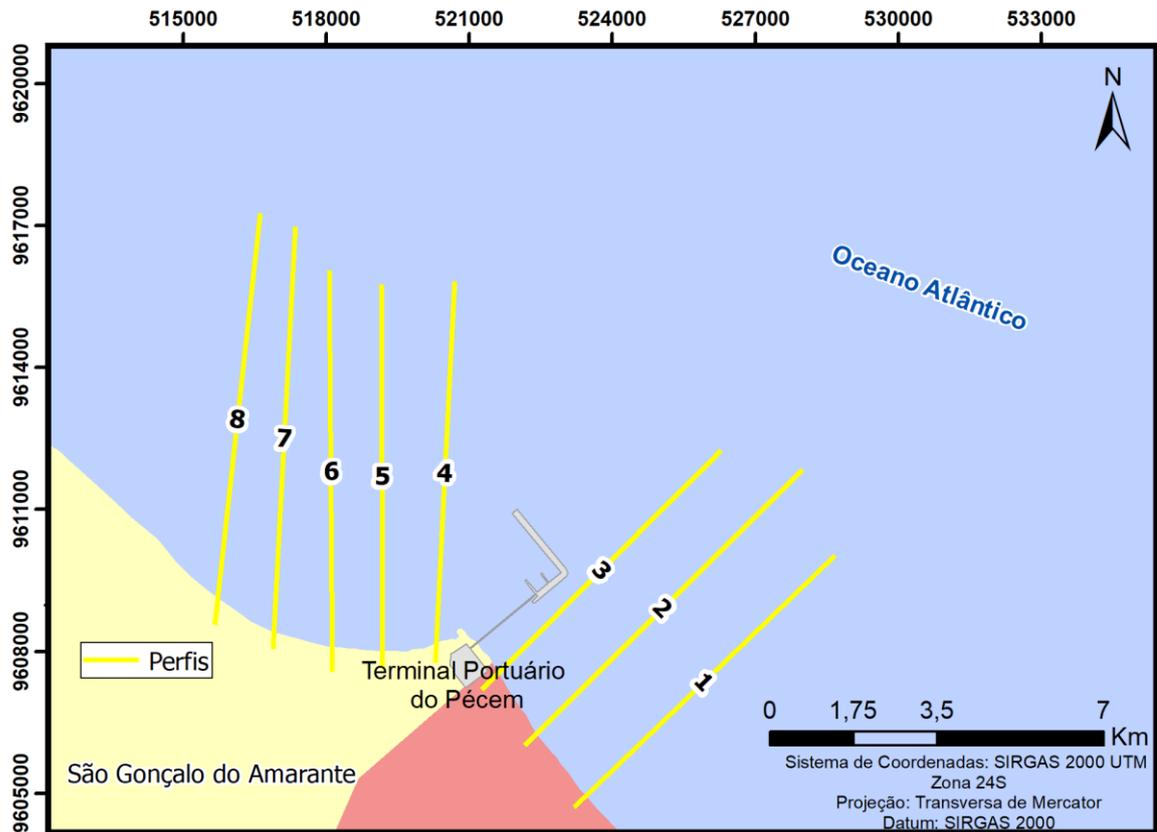


Fonte: Elaborado pela autora.

Os perfis foram estabelecidos no entorno do porto do Pécém tomando uma extensão de linha de costa de aproximadamente 8 km (FIGURA 23), contemplando tanto a parte leste quanto a parte oeste da ponta do Pécém. Os perfis foram distribuídos de forma a melhor se adequar a estudos realizado *in situ*, para posterior comparação dos resultados. Dessa forma, os perfis, sendo 3 perfis localizados a leste do promontório e 5 a oeste, foram distribuídos ao longo da linha de costa com direção o mais perpendicular possível da mesma e foram estendidos até a profundidade de aproximadamente 20 m, profundidade na qual o ondógrafo está situado, uma vez que a escolha da posição ideal para instalação de ondógrafos e marégrafos deve considerar a profundidade de fechamento.

Nesse momento, os parâmetros dos sedimentos (tamanho médio, peso específico) podem ser modificados. Porém, como o trabalho tem como objetivo testar o banco de dados da ferramenta, os parâmetros determinados pelo banco de dados do SMC foram mantidos.

Figura 23 - Localização dos perfis de praia dispostos perpendicularmente a linha de costa da Praia do Pecém



Perfil	Id	x_0 (m)	y_0 (m)	θ_{costa} (°)	D50 (mm)	$\tan\beta$
1	profile01	523216.63	9604714.17	45.88	0.20	0.02
2	profile02	522171.86	9606000.54	45.00	0.20	0.01
3	profile03	521279.50	9607203.65	44.83	0.20	0.02
4	profile04	520301.09	9607732.74	2.94	0.20	0.01
5	profile05	519192.49	9607663.45	0.00	0.20	0.01
6	profile06	518153.17	9607594.16	359.53	0.20	0.01
7	profile07	516905.99	9608009.89	3.08	0.20	0.01
8	profile08	515658.81	9608564.19	6.34	0.20	0.01

Fonte: Elaborado pela autora.

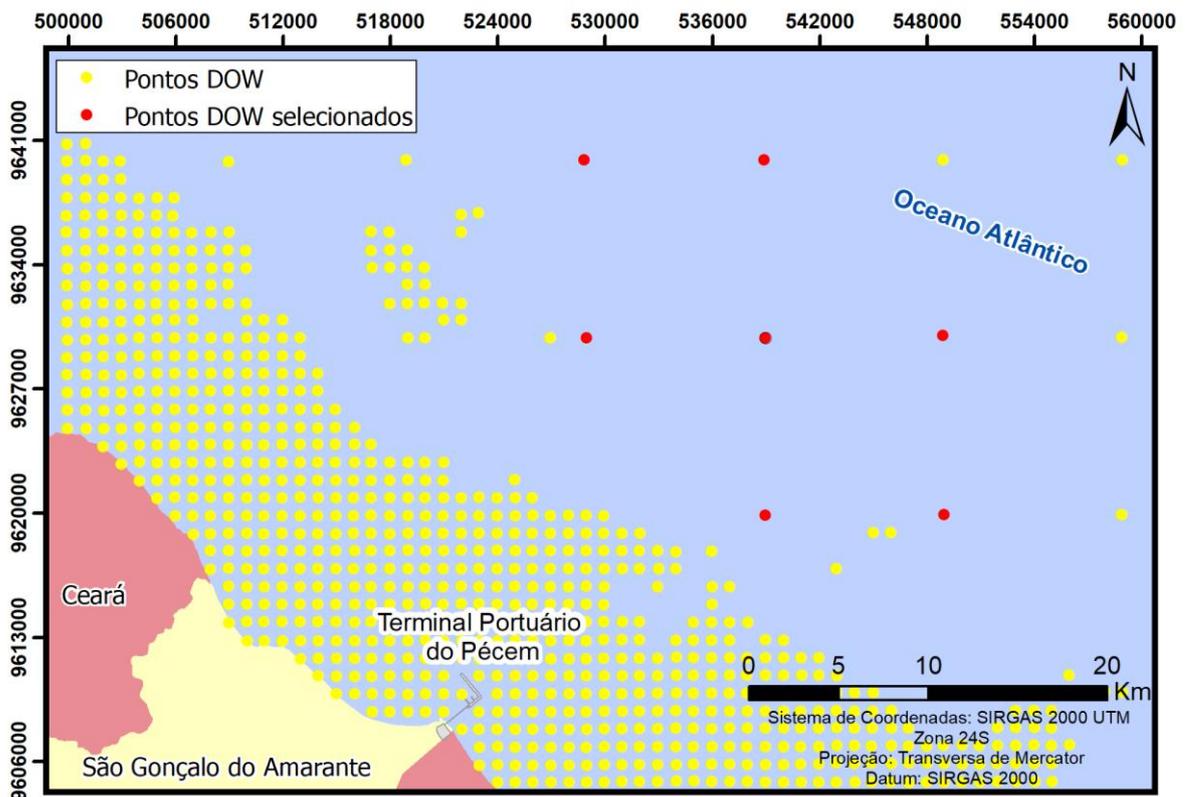
Após o desenho dos perfis, o ponto de quebra de onda nos perfis e o fluxo médio das ondas são calculados para então estimar as taxas de transporte litorâneo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Seleção do ponto de propagação

Os 7 pontos DOW selecionados (FIGURA 24) encontram-se entre as cotas de 20 e 30 metros, visto que para os comprimentos de onda que chegam na região as ondas começam a sentir o fundo a uma profundidade de aproximadamente 30 m.

Figura 24 - Pontos DOW da malha M006 do SMC-Brasil selecionados para comparação

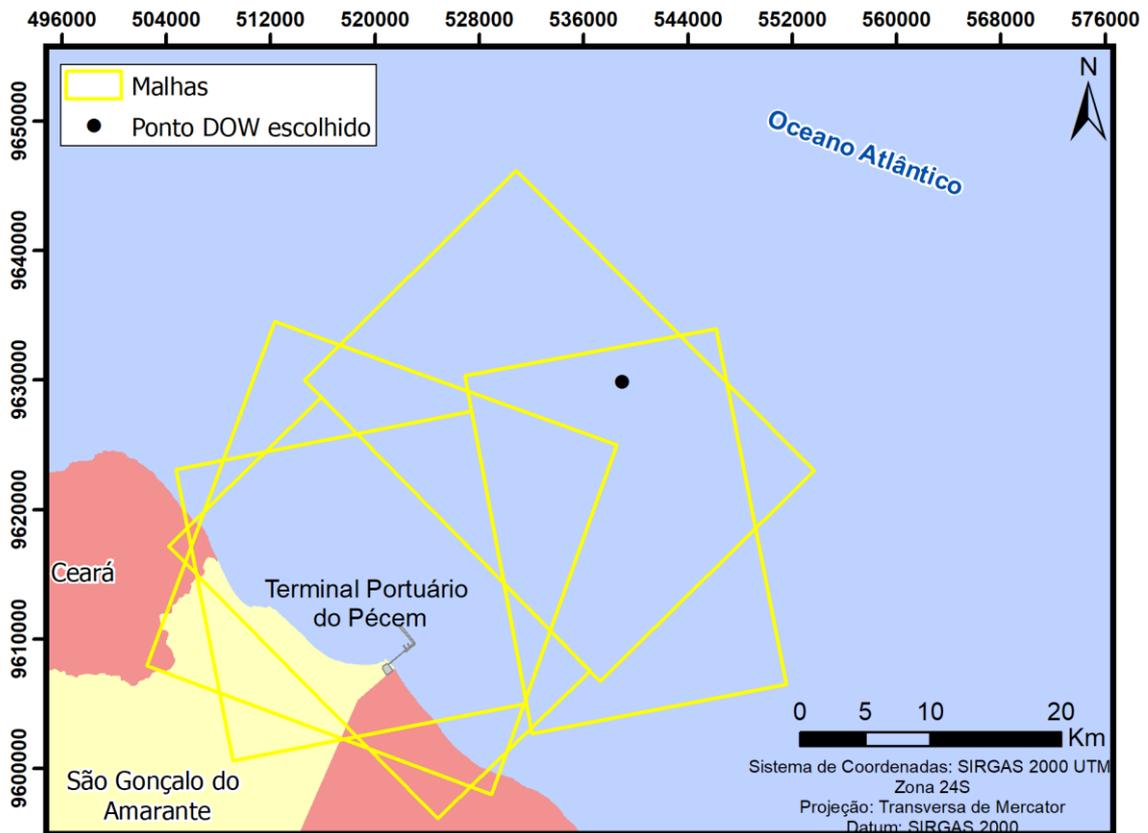


Fonte: Elaborado pela autora.

Os pontos escolhidos apresentaram uma semelhança significativa em relação aos coeficientes de correlação por regressão linear entre as características analisadas de cada ponto e a média aritmética geral dos pontos analisados. Esse resultado é indicativo que qualquer um dos pontos pode representar o clima marítimo da região. Então, para selecionar o ponto DOW mais representativo foi escolhido o ponto que combinou outros critérios importantes, como os maiores valores de H_s e menores de T_p , com o objetivo de escolher a situação mais extrema para as propagações, assim como, a posição geográfica em relação a área a ser estudada e a similaridade com as características de incidência das ondas na região. O ponto selecionado

como mais representativo se encontra na Figura 25, coordenadas UTM (X:538951.02, Y:9629835.30) à uma profundidade de 27 m.

Figura 25 - Ponto DOW escolhido (coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m) e malhas de propagação



Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto DOW que guiou o desenho das malhas foi o mesmo selecionado para as propagações de águas profundas para águas rasas e seu clima de ondas será descrito utilizando os dados gerados da base de dados de 60 anos do SMC-Brasil (1948-2008).

5.2 Clima de ondas

Primeiramente, para a caracterização do clima de ondas, pode-se observar que quatro direções principais de onda atuam sobre a dinâmica da região, aquelas provenientes de E com probabilidade de ocorrência de 36,02%, seguidas pelas provenientes de ENE, NE e as de ESE com probabilidade de ocorrência de 20,92%; 16,98%; 16,80% respectivamente, que juntas representam mais de 90% das ondas incidentes neste ponto (TABELA 2).

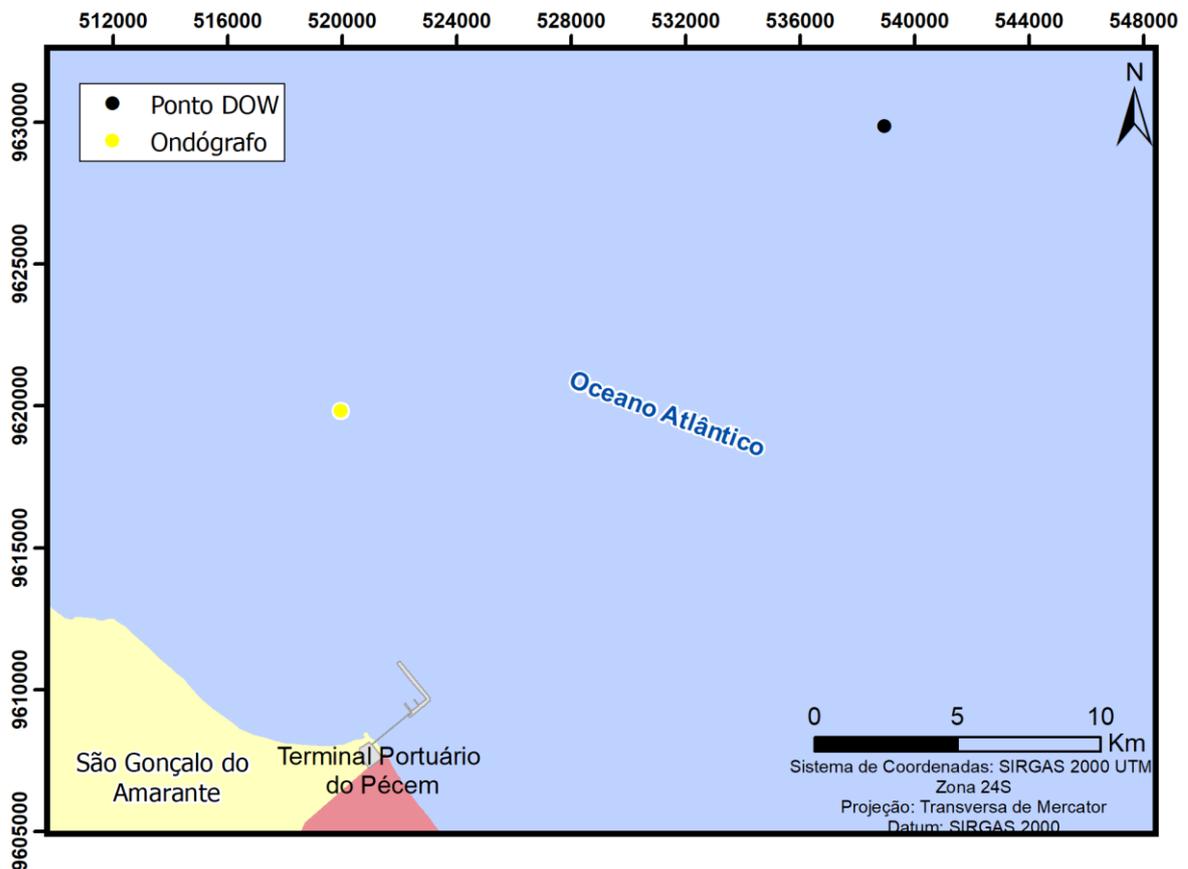
Tabela 2 - Tabela de estatísticas básicas de Hs e Tp do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m, oriundo das bases de dados do SMC-Brasil

Direções (N°)	Prob. direção	Hs50%	Hs12	Tp50%	Tp12
NE	0,1698	1,5143	2,5329	10,2826	17,6129
ENE	0,2092	1,4631	2,2961	8,8802	16,5026
E	0,3602	1,3403	2,0937	7,6502	13,5968
ESE	0,1680	1,2866	1,9273	6,6435	10,8354

Fonte: Elaborado pela autora.

Dados de ondas coletados com *waverider* no porto do Pecém (FIGURA 26) durante os anos de 1997, 2000 e 2001 analisados por Silva *et al.* (2011) apresentam características semelhantes. Os autores analisaram que 62,5% das direções de ondas se apresentaram no quadrante de 090°-120° Az, com cerca de 18,75% no quadrante de 045°-060° Az e 18,75% no quadrante de 020°-040° Az.

Figura 26 – Ondógrafo *Waverider* (cota 20 m) do Porto do Pecém e ponto DOW (cota 27 m) escolhido para as propagações



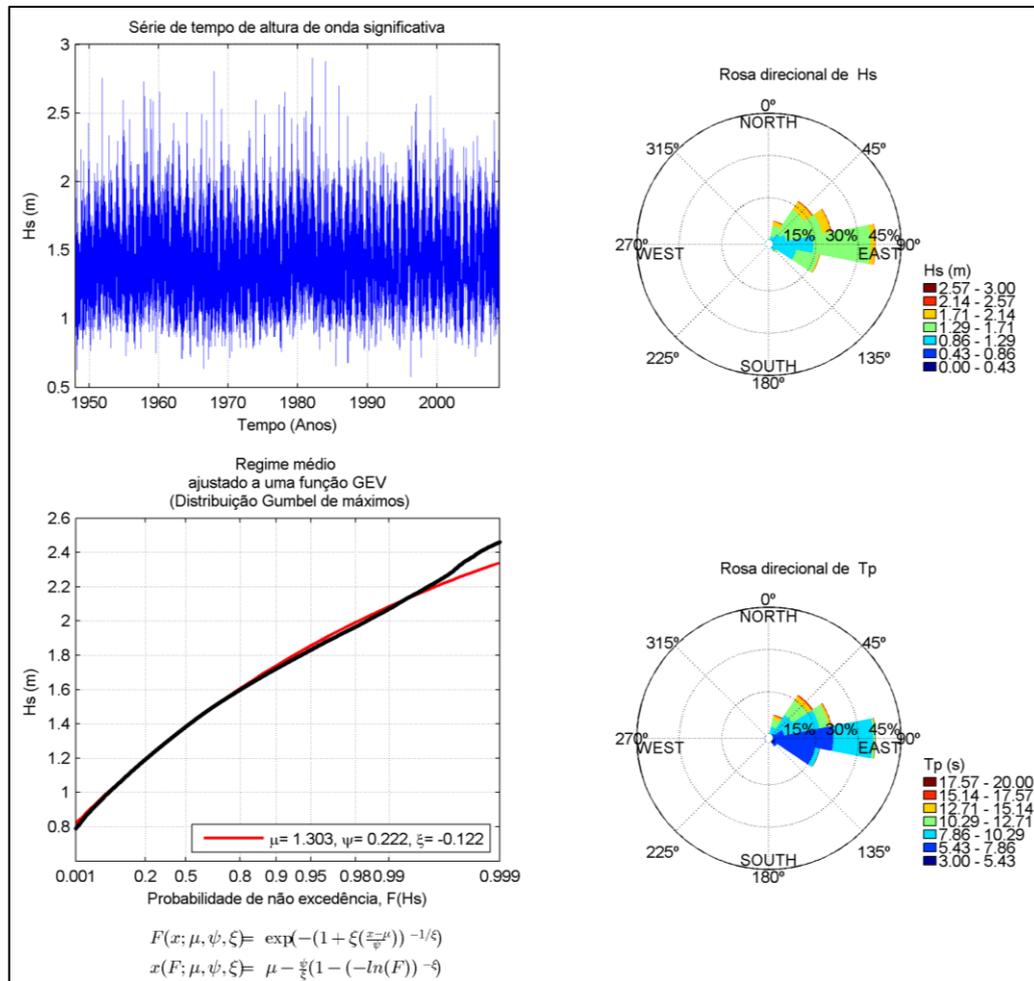
Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda na Tabela 2, pode-se avaliar as estatísticas básicas das séries temporais de altura significativa de onda mediana ($H_{s50\%}$) e de tempestade (H_{s12}), do período de pico em condições medianas ($T_{p50\%}$) e do período de pico para as condições de tempestade (T_{p12}) para as quatro direções principais, e verificou-se que, para $H_{s50\%}$ e $T_{p50\%}$ a altura de onda varia entre 1,29 m e 1,51 m e para o período de pico ocorreu uma variação entre 6,64 s e 10,28 s. Em relação às condições de tempestade (H_{s12} e T_{p12}), as ondas alcançaram entre 1,92 m e 2,53 m e os períodos de pico variaram entre 10,83 s e 17,61 s.

Na Figura 27, estão representados os diagramas de rosetas direcionais de ondas de H_s e T_p para o ponto DOW escolhido, onde é possível notar que a região possui dois componentes de ondas principais, um formado por ondas de *swell* e outro formado por ondas *sea*. A maior probabilidade de chegada de ondas são as de leste (mais de 30%), assim como comentado anteriormente, e alturas variando entre 1,29 e 1,71 m; os componentes de nordeste e leste-sudeste, aparecem com menor probabilidade, em torno de 20% cada um. Em geral, os

maiores valores de T_p estão compreendidos entre as direções 20° e 60° , caracterizando as ondas *swell*. E os menores valores de T_p as direções de 80° a 120° , mostrando o padrão das ondas *sea* da área.

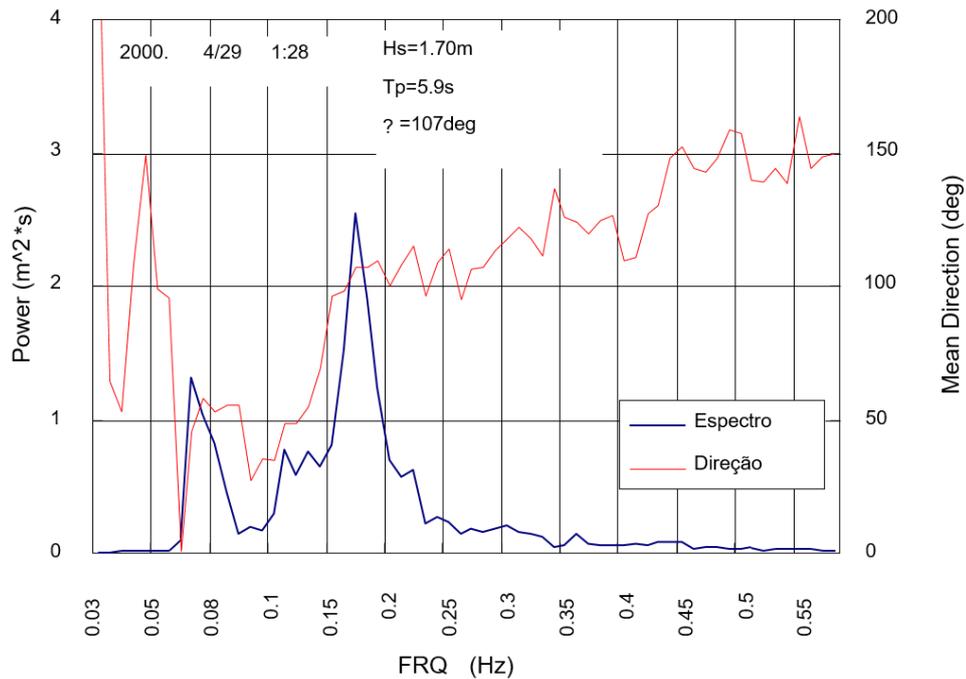
Figura 27 – Caracterização do clima de ondas para o ponto DOW, oriundo do projeto de simulação no SMC-Brasil



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos espectros de onda elaborados pelo JICA (2006) com os dados do ondógrafo do Pecém, identifica-se dois picos de frequência (FIGURA 28), um em 0,07 Hz, que corresponde ao período de 14s e outro em 0,14 Hz correspondendo ao período de 7s. As ondas de longo período são as ondas *swell* e as de período mais curto são as ondas *sea*. Também na Figura 28 percebe-se que o primeiro pico ocorre em uma direção média de 050° Az e o segundo com aproximadamente 100° Az, condizente com os dados do SMC-Brasil.

Figura 28 – Espectro de ondas de abril/2000, processados pelo grupo JICA a partir dos dados do ondógrafo do Pecém



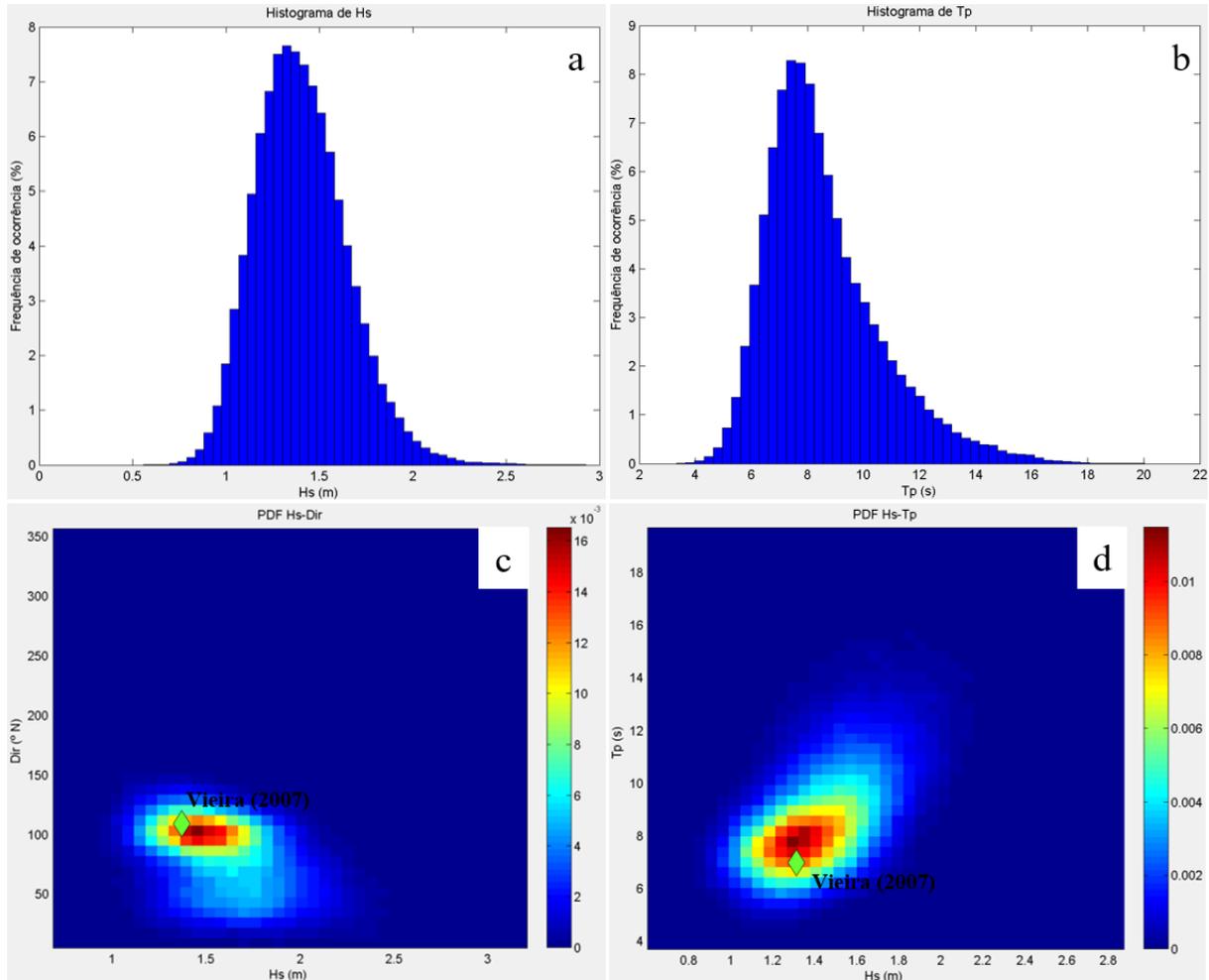
Fonte: Modificado de JICA (2006).

Analisando os histogramas do ponto DOW, apresentados na Figura 29 (a, b) H_s varia principalmente entre 0,8 a 2,3 m, chegando a um valor máximo de 2,8 m. Já o seu período de pico varia entre 4 s e 16 s, chegando a máximos de 18,1 s.

As relações entre H_s , T_p e direção de propagação das ondas incidentes podem ser observadas nas funções de distribuição conjunta de H_s - T_p e H_s -Dir (FIGURA 29 c, d) e demonstram que as ondas mais frequentes no ponto DOW são H_s entre 1,3 m e 1,5 m, com T_p de cerca de 8 s e direção de ondas provenientes de 100° Az.

Nas tabelas de distribuições de frequências de ondas elaboradas por Vieira (2007) com dados diários do ondógrafo do Pecém, no período de março/1997 a outubro/2001, a classe de H_s mais frequente foi de 1,3 m a 1,4 m, com período de pico de 6 a 7 s e direção de 100 a 110 ° (FIGURA 29 c, d). Mostrando também a alta correspondência com os dados obtidos pelo SMC-Brasil.

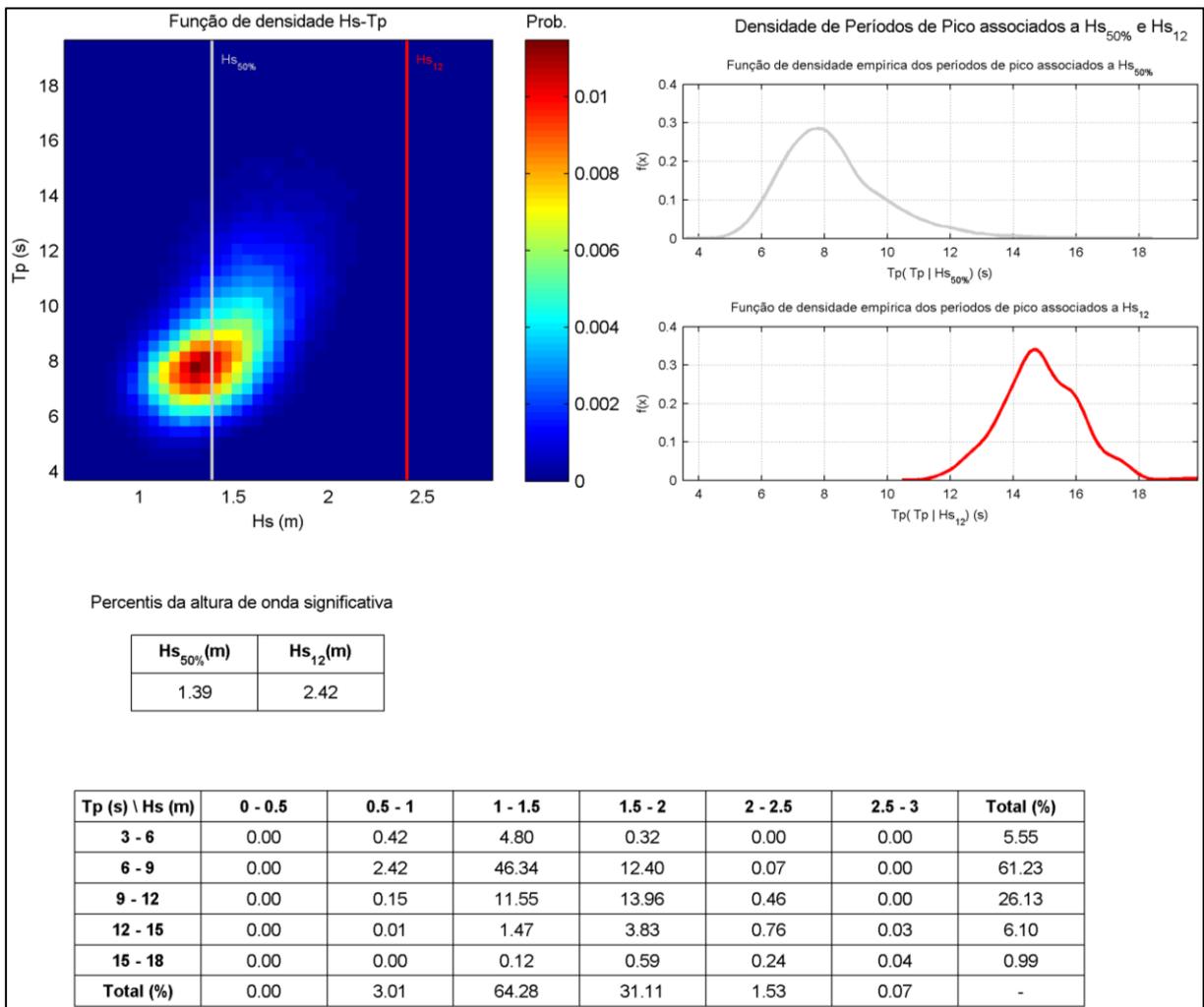
Figura 29 – Estatísticas descritivas de altura significativa e período de pico da onda do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m, oriundo das bases de dados do SMC-Brasil



Fonte: Elaborado pela autora. a) histograma de Hs, b) histograma de Tp, c) distribuição conjunta de Hs e direção, d) distribuição conjunta de Hs e Tp, losango mostra dados mais frequentes de ondas encontrados por Vieira (2007).

Como observado no relatório gerado para a caracterização da onda (FIGURA 30), pode-se observar novamente a variação da altura significativa e do período de pico através da tabela de probabilidade de ocorrência Hs-Tp onde verificou-se que para Hs as ondas ocorrem entre os intervalos de 0,5 – 1,0 m e 2,5 – 3,0 m, sendo que 67,29% dos valores exibem números inferiores a 1,5 m e em 98,4% dos estados de mar apresentam ondas inferiores a 2,0 m. O Tp varia entre os intervalos 3 – 6 s e 15 – 18 s, sendo que 66,78% dos estados de mar apresentam valores inferiores a 9 s e mais de 20% estão entre 9 s e 18 s. Também foi possível perceber que ondas mais frequentes tem Hs entre 1,0 m e 1,5 m e Tp em torno de 6 s e 9 s, acontecendo em 46,34% dos casos.

Figura 30 – Caracterização 2D da onda, mostrando função de densidade conjunta de Hs e Tp do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m



Fonte: Elaborado pela autora.

Comparando novamente os dados obtidos no SMC-Brasil com os dados coletados *in situ* e publicados por diversos autores como JICA (2006), Silva *et al.* (2011) e Vieira (2007), verificou-se uma boa concordância. A frequência acumulada de altura de onda que não excede 1,5 m é de 66,3% e 2,0 m é de 96,8%. Nos períodos de pico, observou-se que aproximadamente 20% estão compreendidos entre 10 e 20 s, indicando ondas do tipo *swell*. E a maioria dos períodos de pico ocorre entre 4 e 9 s, relacionados com as ondas do tipo *sea* (FIGURA 31).

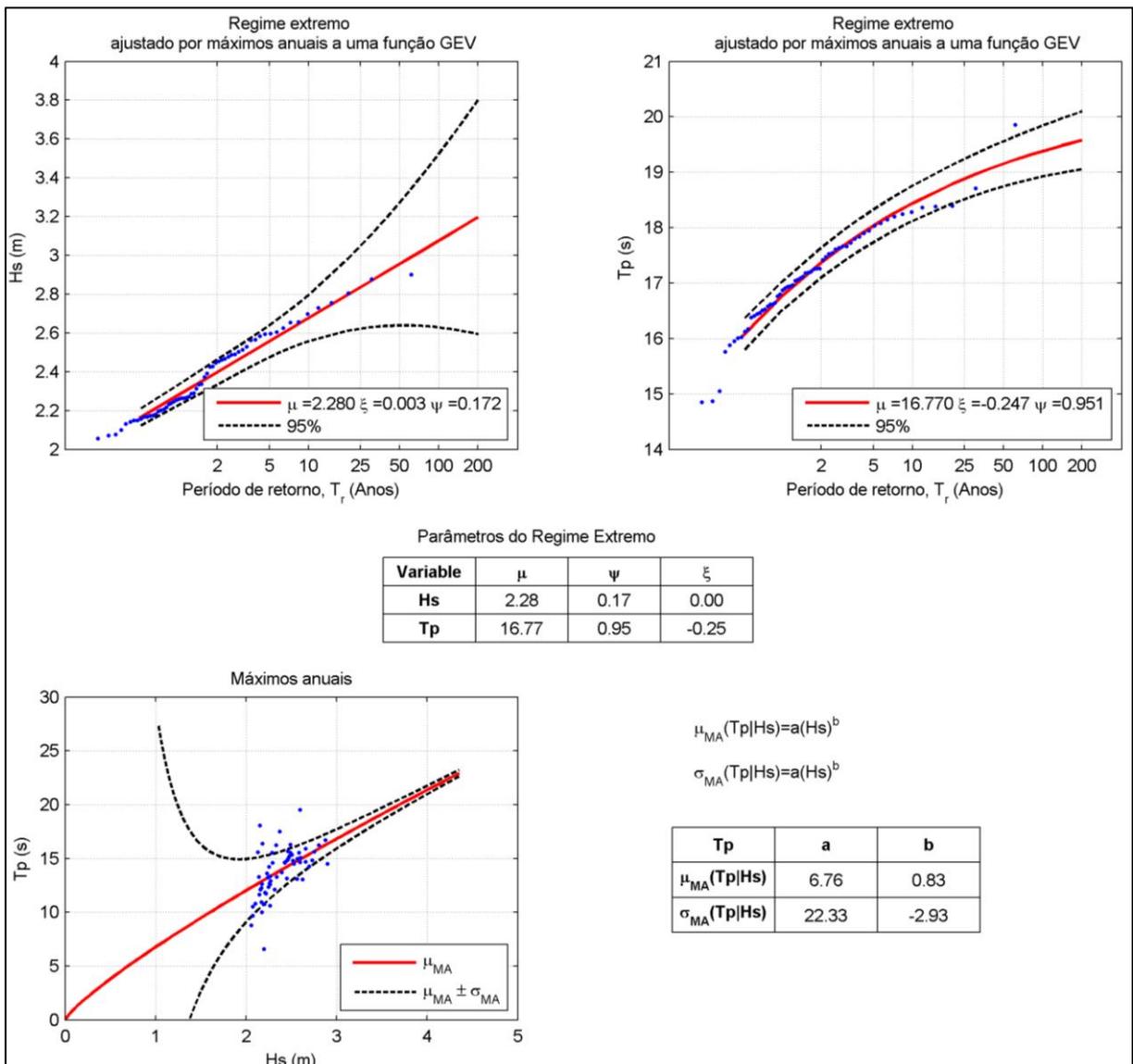
Figura 31 – Distribuição de frequência de Hs e Tp, dados do ondógrafo do Pecém no período de março/1997 a dezembro/2000

Hs (m)/ Tp (s)	~0.5	0.5-0.75	0.75-1.0	1.0-1.25	1.25-1.5	1.50-1.75	1.75-2.00	2.00-2.25	2.25-2.5	Total
3 - 4			0.00%	0.10%	0.00%	0.00%				0.10%
4 - 5			0.50%	2.50%	1.90%	0.40%	0.00%	0.00%		5.40%
5 - 6		0.00%	0.60%	6.20%	12.70%	7.00%	1.10%	0.00%		27.60%
6 - 7			0.30%	1.90%	7.50%	8.00%	3.00%	0.40%	0.00%	21.10%
7 - 8			1.10%	3.40%	2.80%	2.30%	1.30%	0.50%	0.20%	11.60%
8 - 9		0.10%	0.90%	2.60%	1.20%	0.10%	0.00%			4.90%
9 - 10		0.00%	1.00%	3.40%	2.60%	0.60%	0.00%			7.50%
10 - 11		0.00%	0.10%	0.90%	1.00%	0.20%	0.00%			2.20%
11 - 12		0.10%	0.40%	1.80%	1.30%	0.30%	0.00%			3.90%
12 - 13		0.10%	0.20%	1.10%	1.30%	0.30%	0.00%			3.00%
13 - 14		0.00%	0.30%	1.20%	1.70%	0.40%	0.00%			3.70%
14 - 15		0.00%	0.20%	1.20%	2.10%	0.60%	0.10%			4.20%
15 ~			0.10%	1.30%	2.60%	0.70%	0.10%			4.70%
Total		0.30%	5.90%	27.50%	38.80%	20.80%	5.70%	0.90%	0.20%	100%

Fonte: JICA (2000).

Utilizando a Distribuição de Valores Extremos Generalizados (GEV) gerada pelo AMEVA (FIGURA 32) pode-se verificar que para um período de retorno de 10, 25 e 50 anos a altura de onda significativa no ponto DOW selecionado foi de, respectivamente, 2,7 m, 2,8 m e 2,9 m. Para um período de retorno de 10 anos o período de pico foi de aproximadamente 18,4 s, já para 25 e 50 anos, os valores de período de pico são de 18,9 s e 19,2 s, respectivamente. Esse parâmetro é primordial para o planejamento territorial dos espaços costeiros, tanto em termos do seu uso e cobertura, ocupação, para mensurar a carga energética na instalação e manutenção de obras de engenharia próximas à linha de costa. Essa agitação marítima que atinge o ponto DOW será propagada e exercerá pressões sobre os instrumentos instalados na orla, nessas proporções, pelo menos a cada 10 anos.

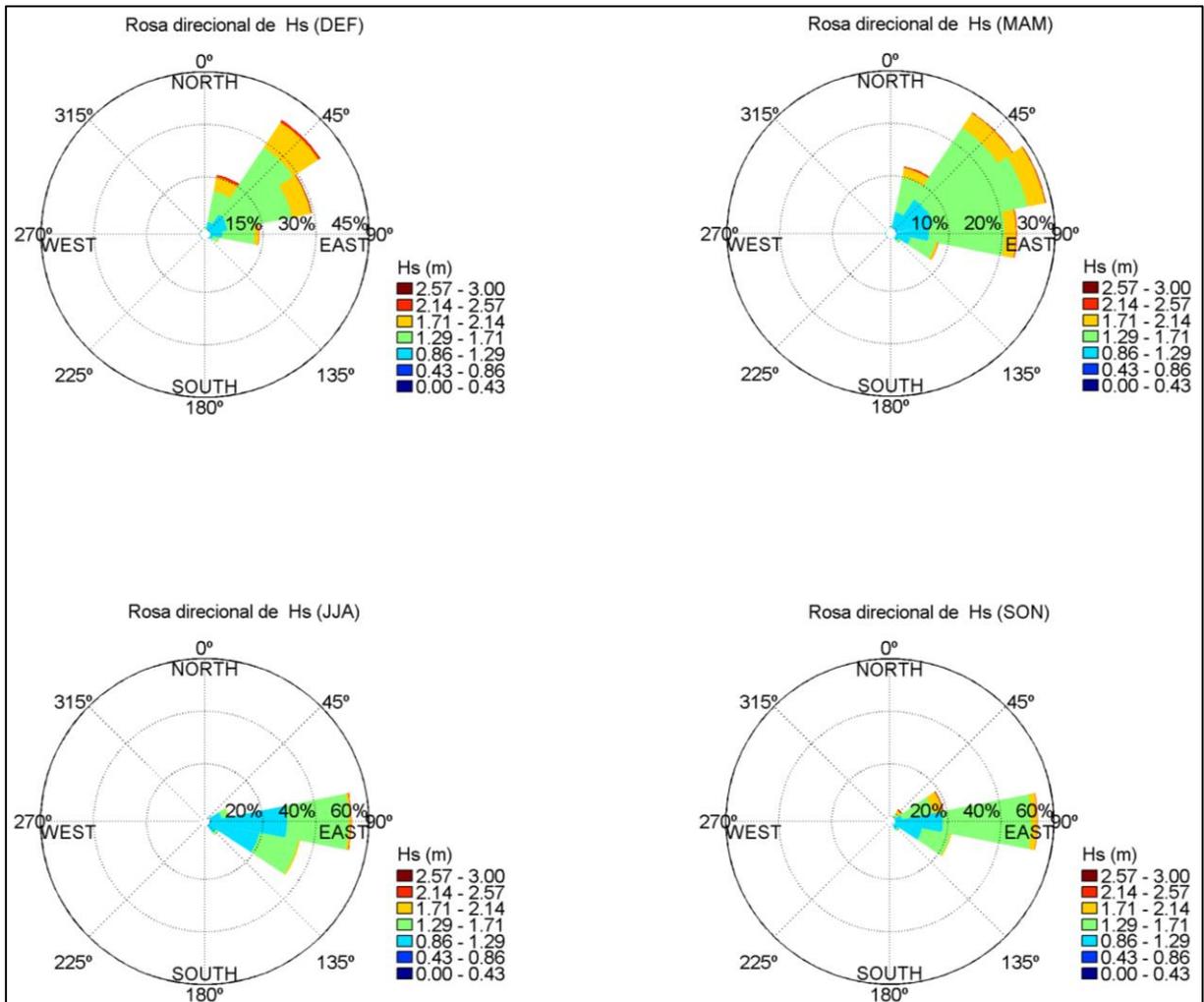
Figura 32 – Regime extremo de altura de onda significativa, Hs e Tp do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 33, estão representados os diagramas de rosetas direcionais de ondas que demonstram graficamente a dominância da chegada de ondas para cada estação do ano. Verificou-se que a incidência de ondas com menor Hs ocorrem no inverno (junho, julho e agosto - JJA) e na primavera (setembro, outubro e novembro - SON), períodos em que as ondulações que chegam à costa são provenientes de leste-sudeste, as ondas de leste chegando com uma frequência maior que 50%. Casos de maior Hs provenientes de nordeste ocorrem no verão (dezembro, janeiro e fevereiro - DEF) e outono (MAM) com alguma participação das ondas de leste.

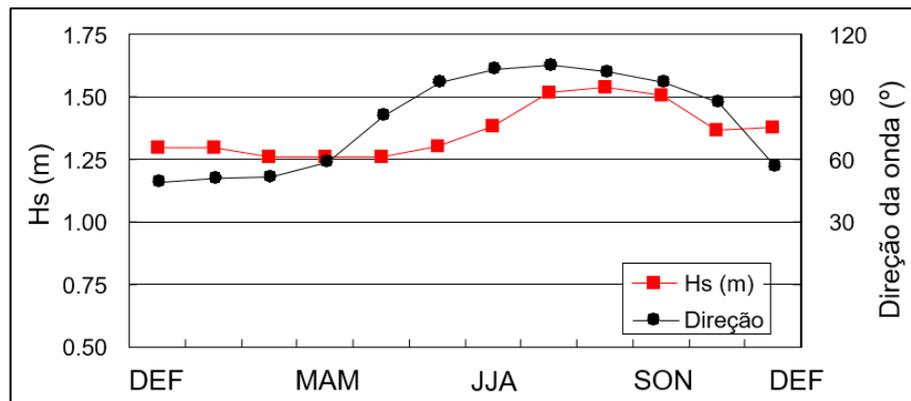
Figura 33 – Relatório de rosetas direcionais de Hs do ponto DOW, coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m



Fonte: Elaborado pela autora. DEF: Dezembro, Janeiro e Fevereiro, MAM: Março, Abril e Maio, JJA: Junho, Julho e Agosto, SON: Setembro, Outubro e Novembro.

Com base no monitoramento realizado no período de 1997 a 2005 pelo INPH com os dados do ondógrafo direcional do Pecém (FIGURA 26), e analisados em JICA (2006), durante o período de dezembro a abril, o período da estação chuvosa (corresponde ao verão e outono), a direção de onda dominante é principalmente nordeste, esse período contém as menores alturas de onda. Durante o período de junho a novembro, o período da estação seca, a direção de onda muda de nordeste para leste-sudeste e a onda fica mais alta que a da estação chuvosa (FIGURA 34).

Figura 34 - Variação mensal da altura de onda, dados do ondógrafo do Pecém no período de março de 1997 a dezembro de 2000



Fonte: Adaptado de JICA (2006). DEF: Dezembro, Janeiro e Fevereiro, MAM: Março, Abril e Maio, JJA: Junho, Julho e Agosto, SON: Setembro, Outubro e Novembro.

Pode-se observar que os dados coletados *in situ* mostram resultados equivalentes aos do SMC-Brasil apenas em relação à direção de incidência das ondas, porém ocorre uma superestimação nos valores de altura de onda do SMC-Brasil nas estações de verão e outono, pois, como mostra a Figura 34 com os dados coletados pelo ondógrafo do Pecém, essas estações possuem as menores alturas de onda, em torno de 1,25 m.

Esses resultados retratam a atuação dos ventos alísios e o deslocamento anual da ZCIT (que também controla as chuvas do Nordeste do Brasil), com ramos de nordeste atuando mais intensamente durante os meses de verão e primavera, ao largo da área de estudo - posição climatológica mais ao sul da faixa de convergência. Durante os meses de inverno, a ZCIT se desloca para o Atlântico Norte, promovendo a atuação predominante dos alísios de sudeste no contexto da área de estudo.

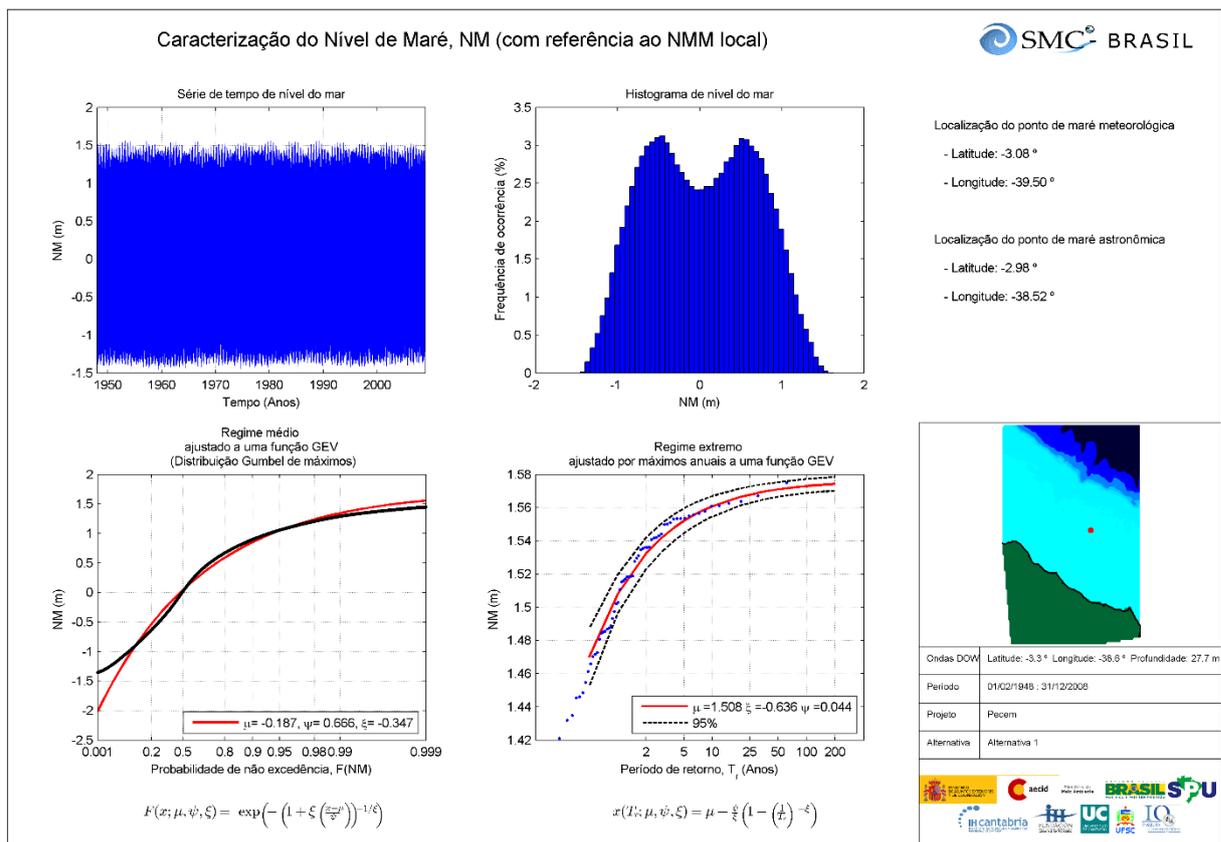
5.3 Caracterização do nível do mar

Como já mencionado, para as marés astronômicas, foi utilizada a base de dados GOT, e para as marés meteorológicas a base de dados GOS. Os resultados mostram que a série histórica representativa do nível médio de maré apresenta histogramas com picos de +1,5 m em sua preamar e -1,4 m em sua baixa-mar (FIGURA 35), também se observou que o regime de oscilação do nível do mar foi principalmente governado pela maré astronômica. Na série de tempo de maré astronômica da figura (FIGURA 36) as oscilações se apresentam variáveis entre

-1,4 m e +1,5 m. Assim como já mencionado do tópico 3.1.1, da base de dados, o nível zero da base de dado de maré e nível do mar são relativas ao nível médio do mar do local.

De acordo com os dados de nível de água coletados pelo INPH e apresentados no relatório da JICA (2006), a variação da maré foi da ordem de 3 m o que também pode observado nos dados do SMC-Brasil. Esse valor a caracteriza como mesomaré, característica da região nordeste do Brasil. Os histogramas nas figuras mostram a bimodalidade da maré, classificada como semidiurna.

Figura 35 – Relatório de caracterização do nível de maré

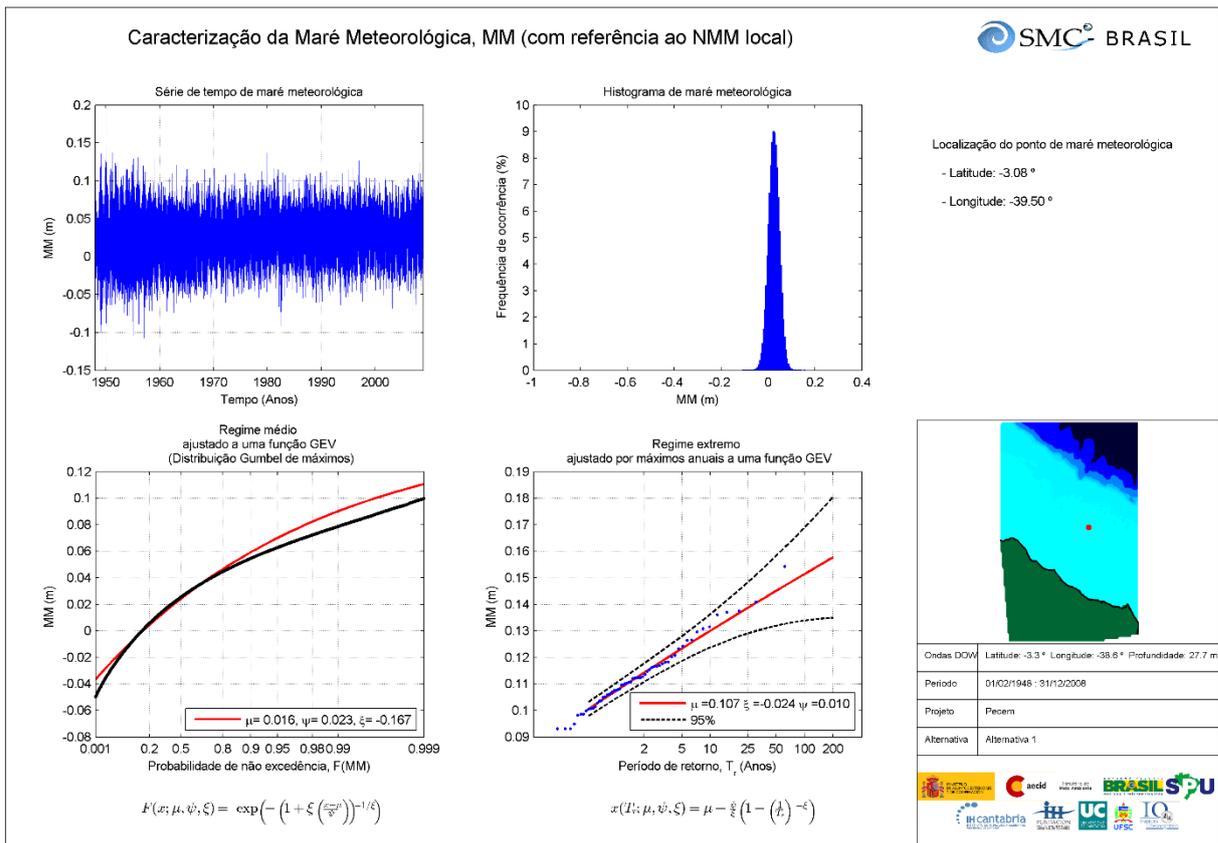


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 37 mostra a série temporal da maré meteorológica com oscilações entre os períodos -0,05 m e +0,1 m.

Para se determinar o regime escalar extremo desses parâmetros, foi aplicada a distribuição dos extremos generalizada que superam 99,5% das frequências. Para um período de retorno de 10, 25 e 50 anos no ponto DOW, a maré meteorológica é de, respectivamente 0,13 m, 0,14 m e 0,145 m e a maré astronômica de 1,50 m, 1,50 m e 1,51 m (FIGURAS 36 e 37).

Figura 37 – Relatório de caracterização de maré meteorológica

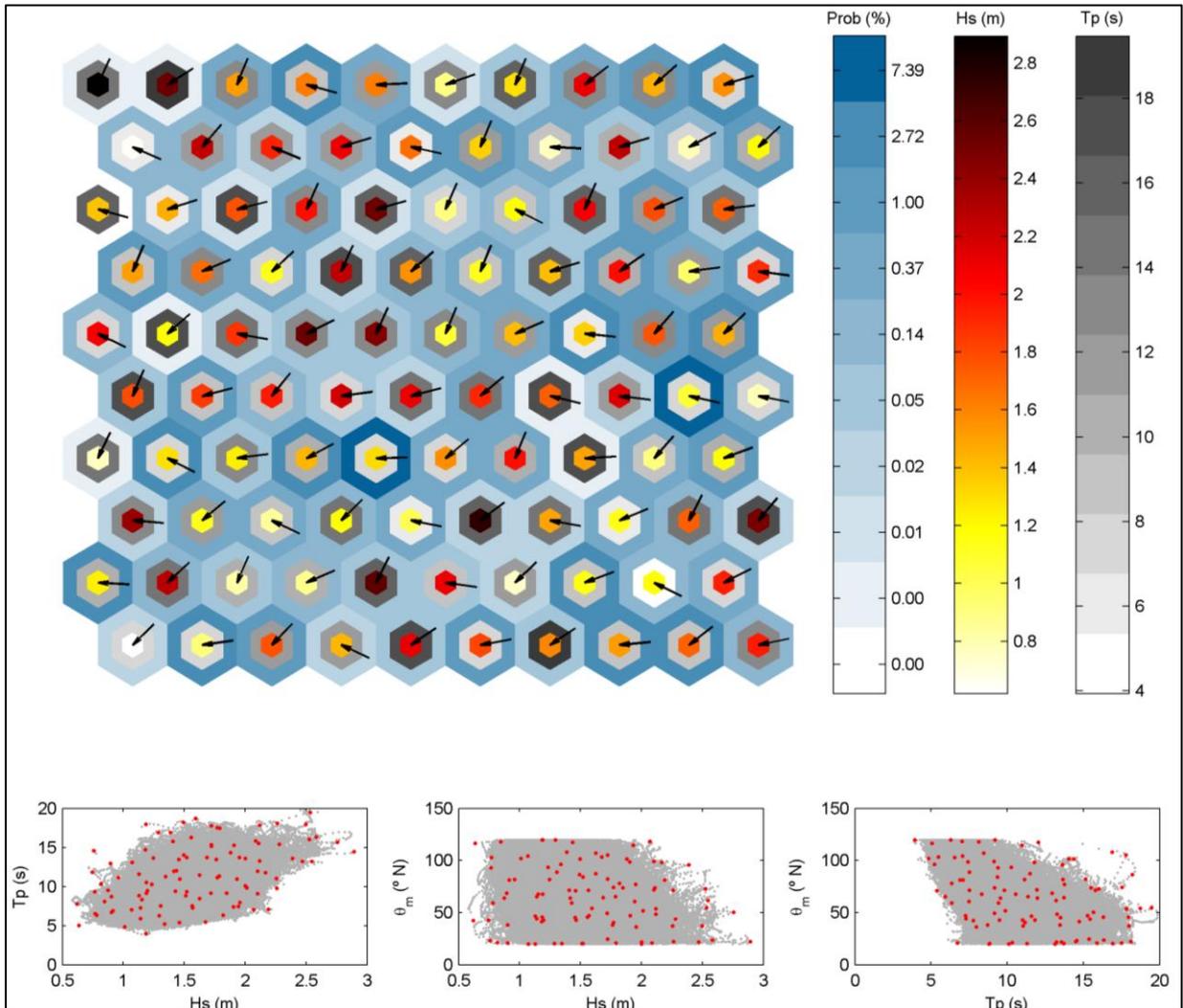


Fonte: Elaborado pela autora.

5.4 Propagação dos casos

A partir dos 100 casos propagados escolhidos através da técnica de MaxDiss, foram realizadas 200 execuções de estados de mar (preamar de 2,93 m e baixa-mar de 0,00 m, com referência ao nível de redução da carta náutica 705) para cada uma das malhas desenhadas. A Figura 38 mostra o relatório que exhibe as combinações, geradas automaticamente, dos casos propagados, suas alturas de onda significativa, período de pico, os vetores de direção média e a probabilidade de ocorrência. O caráter aleatório das redes neurais hexagonais auto-organizadas (SOM - *Self-Organizing Maps*) e a distribuição dos pontos selecionados nas nuvens de dados ilustram a boa distribuição calculada pelo algoritmo MaxDiss.

Figura 38 – Representação gráfica da classificação de máxima dissimilaridade dos casos selecionados a serem propagados no ponto DOW (seta indica direção de incidência das ondas), coordenadas: X:538951.02, Y:9629835.30, Z:27 m



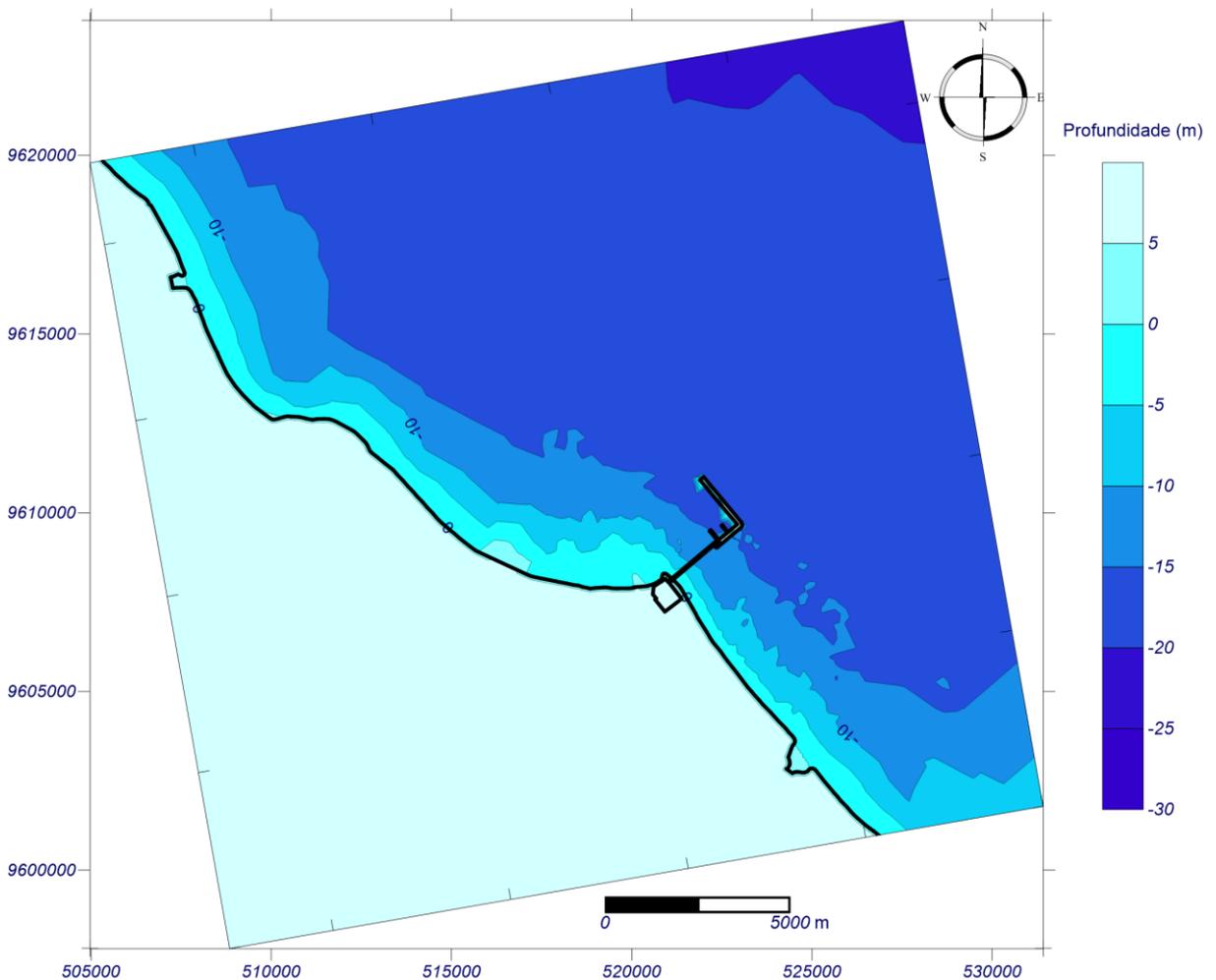
Fonte: Elaborado pela autora.

Para melhor compreender os resultados apresentados a seguir é importante destacar algumas características das feições de fundo da região, cuja batimetria da área está ilustrada na Figura 39, onde observa-se que, na parte leste do porto, os contornos do fundo são mais regulares, orientados paralelamente a linha de costa e a profundidade de 15 m é alcançada a aproximadamente 2000 m da mesma. Na porção logo a oeste do promontório do Pecém, a batimetria se apresenta mais irregular, não acompanhando a orientação da linha de costa, as profundidades de 15 m são atingidas a uma distância de mais de 2500 m.

Segundo INPH (1997), no lado oriental da ponta do Pecém, onde a batimetria é regular, o perfil costeiro é predominantemente arenoso, enquanto que a oeste é dominado por

uma grande área de rocha submersa. Relatórios mais recentes (JICA, 2006) revelam que em ambos os lados do porto a predominância é de rochas cobertas por areia e silte, onde a espessura da camada de sedimento varia com a profundidade, em batimetria de até 10 m a camada de areia é fina, nas cotas de 10 a 16 m a presença de rocha é dominante e nas profundidades maiores que 16 m o fundo está coberto pela camada de sedimentos.

Figura 39 – Batimetria da região interpolada no SMC-Brasil com dados do BACO e da carta náutica 705 (linha de costa de baixa-mar de sizígia)



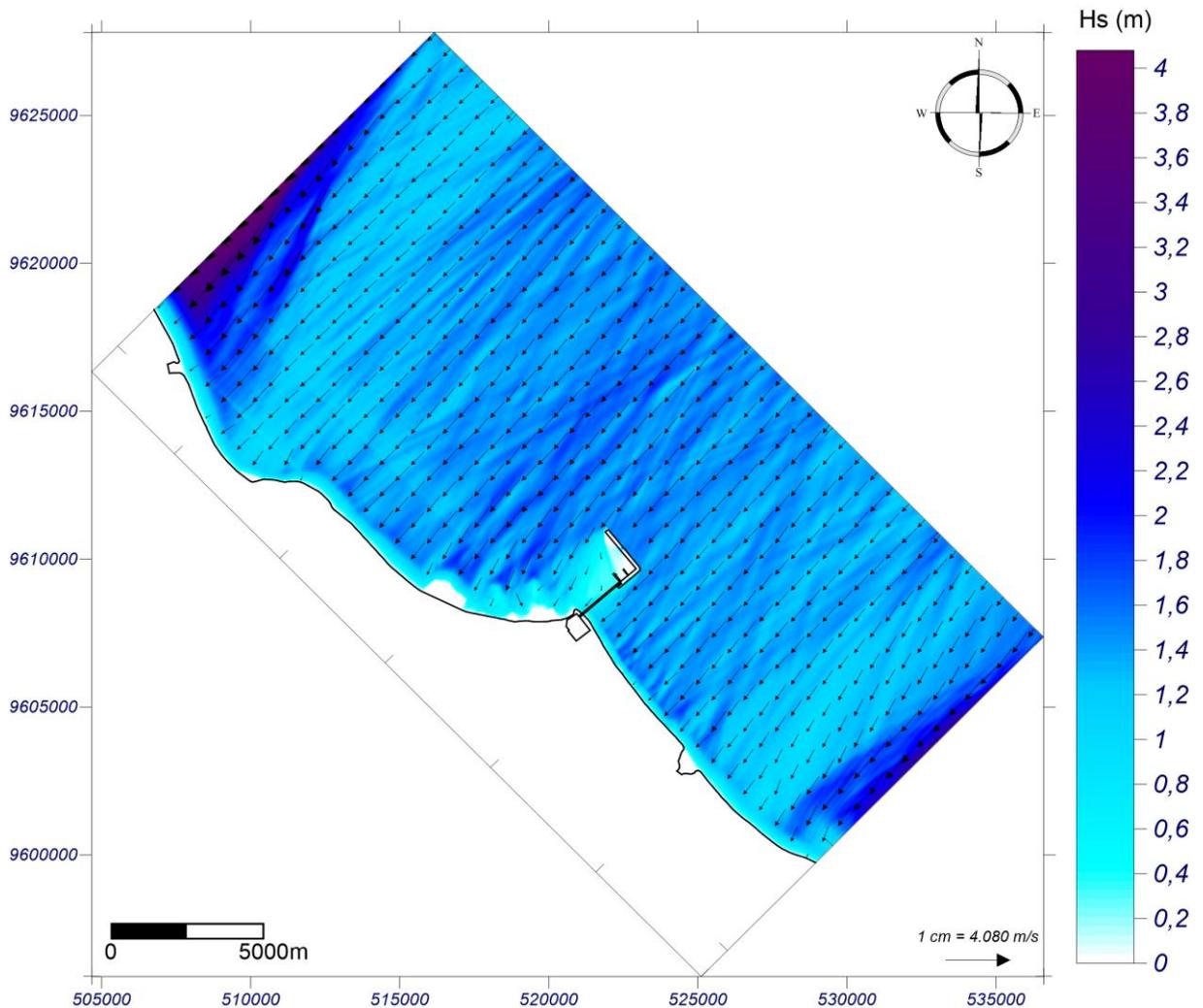
Fonte: Elaborado pela autora.

Para cada resultado obtido na propagação de ondas para a praia do Pecém, foi adquirida uma série de gráficos gerados em mapas, originados pelo SMC-Brasil no *software* Surfer. As áreas para propagação foram extrapoladas tanto a leste como a oeste com a intenção de evitar que os efeitos de borda interferissem nos resultados da área.

Nesse trabalho, serão apresentados os mapas de vetores e magnitude, produzidos no SMC 3.0 para cada uma das 4 principais direções (Tabela 2), associados a condições médias de mar ($H_s50\%$ e $T_p50\%$) em situações de baixa-mar pois as simulações encontradas na literatura apresentam essas condições, além disso, os mapas de eventos de tempestades, contém informações muito parecidas aos eventos de condições médias, diferindo apenas por serem levemente mais energéticos. Quanto à chegada das ondas, as características dos vetores também foram similares nos casos de eventos médios e extremos tanto em preamar quanto em baixa-mar.

Para os casos de ondas que incidem de nordeste (FIGURA 40), a direção de incidência das ondas acontece praticamente perpendicular a batimetria na porção a leste do quebra-mar. A onda chega então com direção paralela a linha de costa e com alturas aproximadas de 1,2 m a 1,6 m. Na porção a oeste do quebra-mar foi possível notar o processo de refração devido a mudança na direção dos contornos batimétricos, o que ocasiona a diminuição do tamanho de onda que chega a costa, sendo que, nesses casos, as ondas chegam com no máximo 1 m. Também foi verificado o efeito da difração no quebra-mar, que também diminui a velocidade e a altura de onda que chega no promontório (Ponta do Pecém) e na porção a oeste.

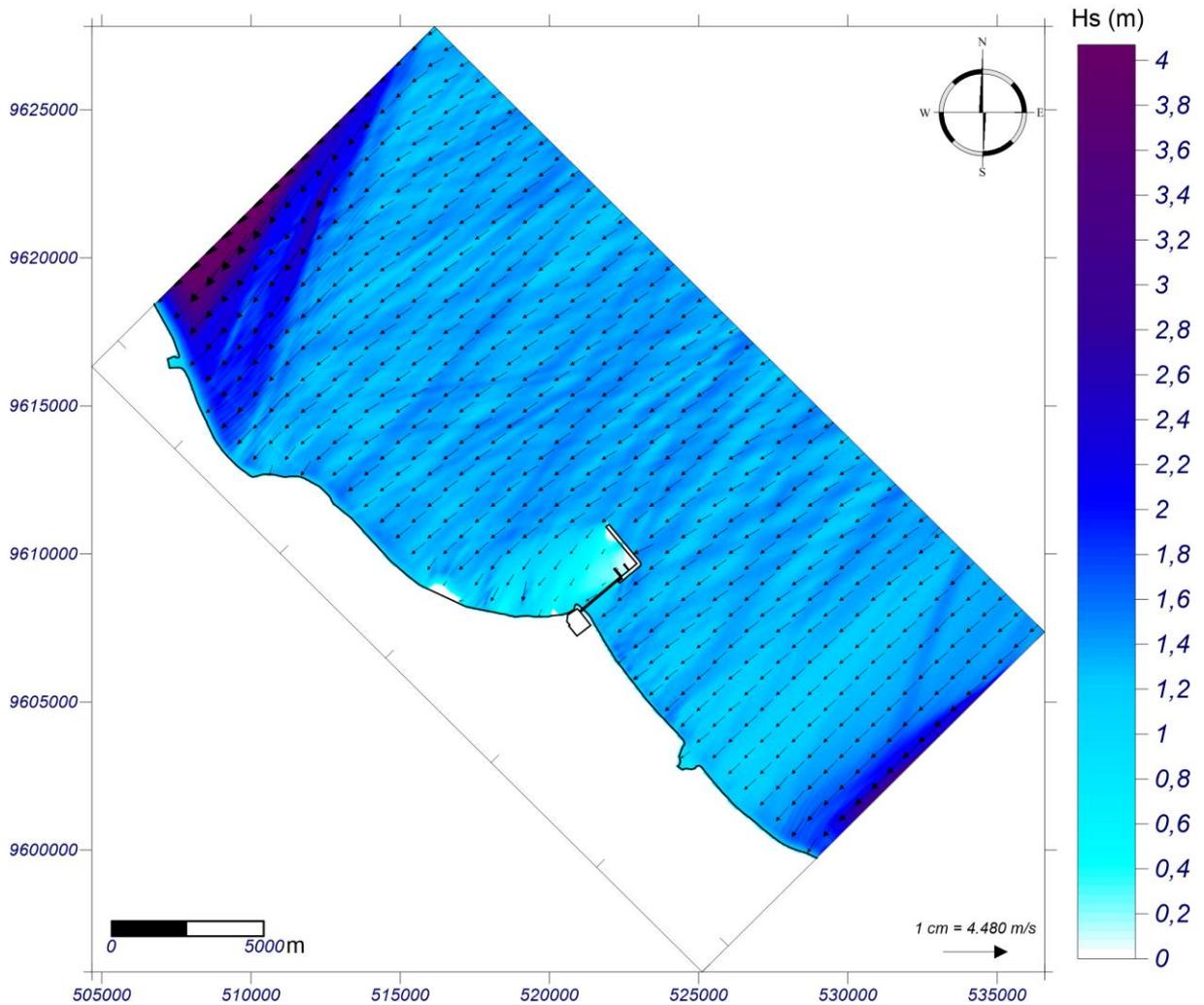
Figura 40 - Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,46 m, Tp: 10,99 s, dir: 043° Az , nível de maré: 0 m (baixa-mar).

Semelhante aos casos de nordeste, as ondas que incidem de leste-nordeste também sofrem difração ao chegar no quebra-mar e refração a oeste da mesma estrutura. A direção de onda tende a ficar perpendicular à batimetria, esses efeitos diminuem a energia e a altura de ondas que chegam à praia. Na porção a leste do quebra-mar as ondas sofrem leve refração e chegam paralelas à praia sem sofrer grandes mudanças em sua velocidade; alcançam a costa com alturas que variam de 1,4 a 1,8 m em situação de baixa-mar (FIGURA 41). Ainda foi possível observar que para essas direções, o promontório também age atenuando a energia nas ondas que chegam a oeste da feição.

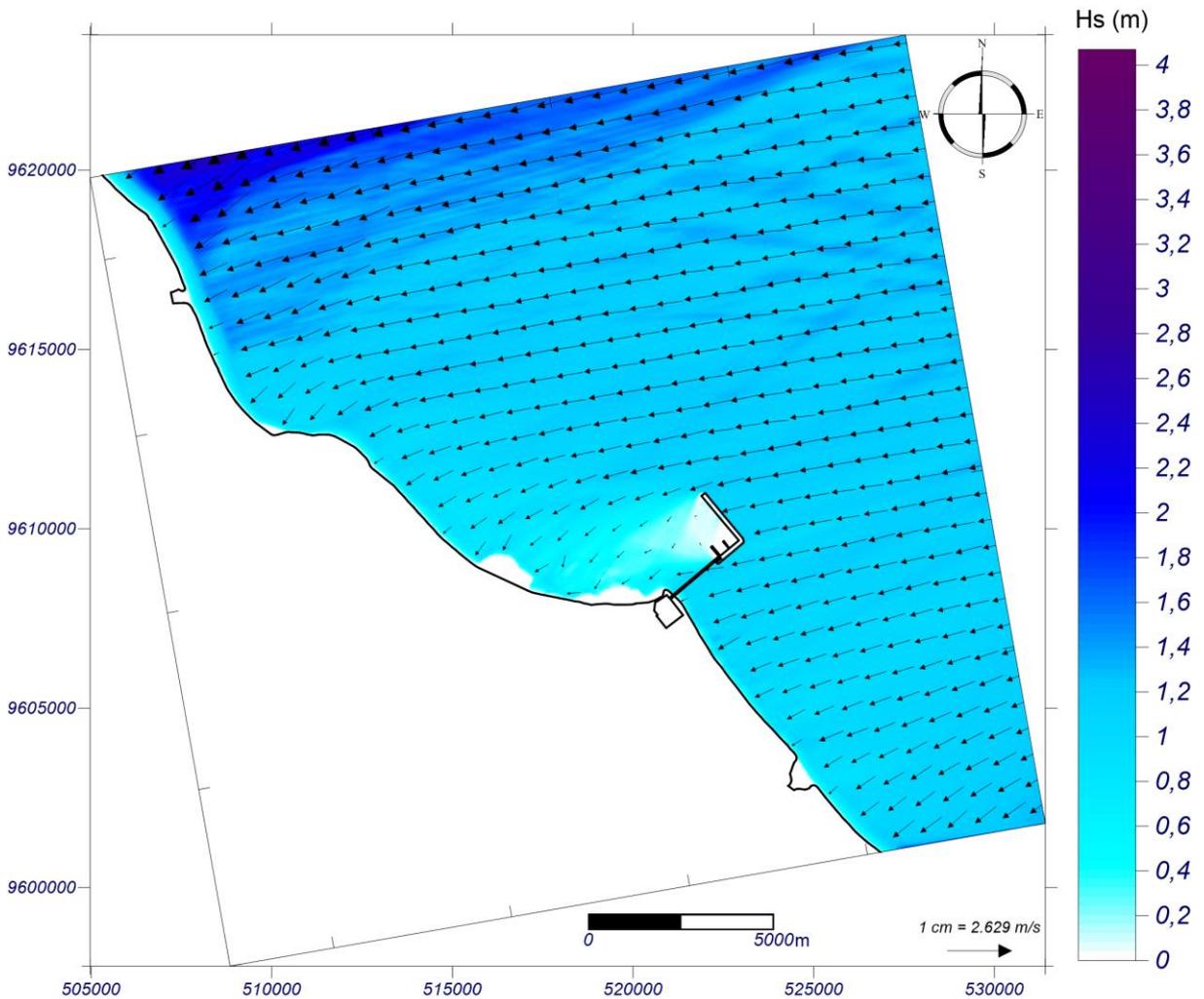
Figura 41 - Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de leste-nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,43 m, Tp: 9,42 s, dir: 059° Az, nível de maré: 0 m (baixa-mar).

As ondas que chegam de leste (FIGURA 42) são as mais frequentes (36,02%) para a região e dentro dos 100 casos propagados, são os de maior probabilidade de ocorrência (12,45%). A leste do quebra mar, as ondas sofrem leve refração devido ao fundo oceânico, e chegam paralelas à linha de costa. Assim como nas direções já descritas também percebeu-se os efeitos da refração e difração a oeste do promontório.

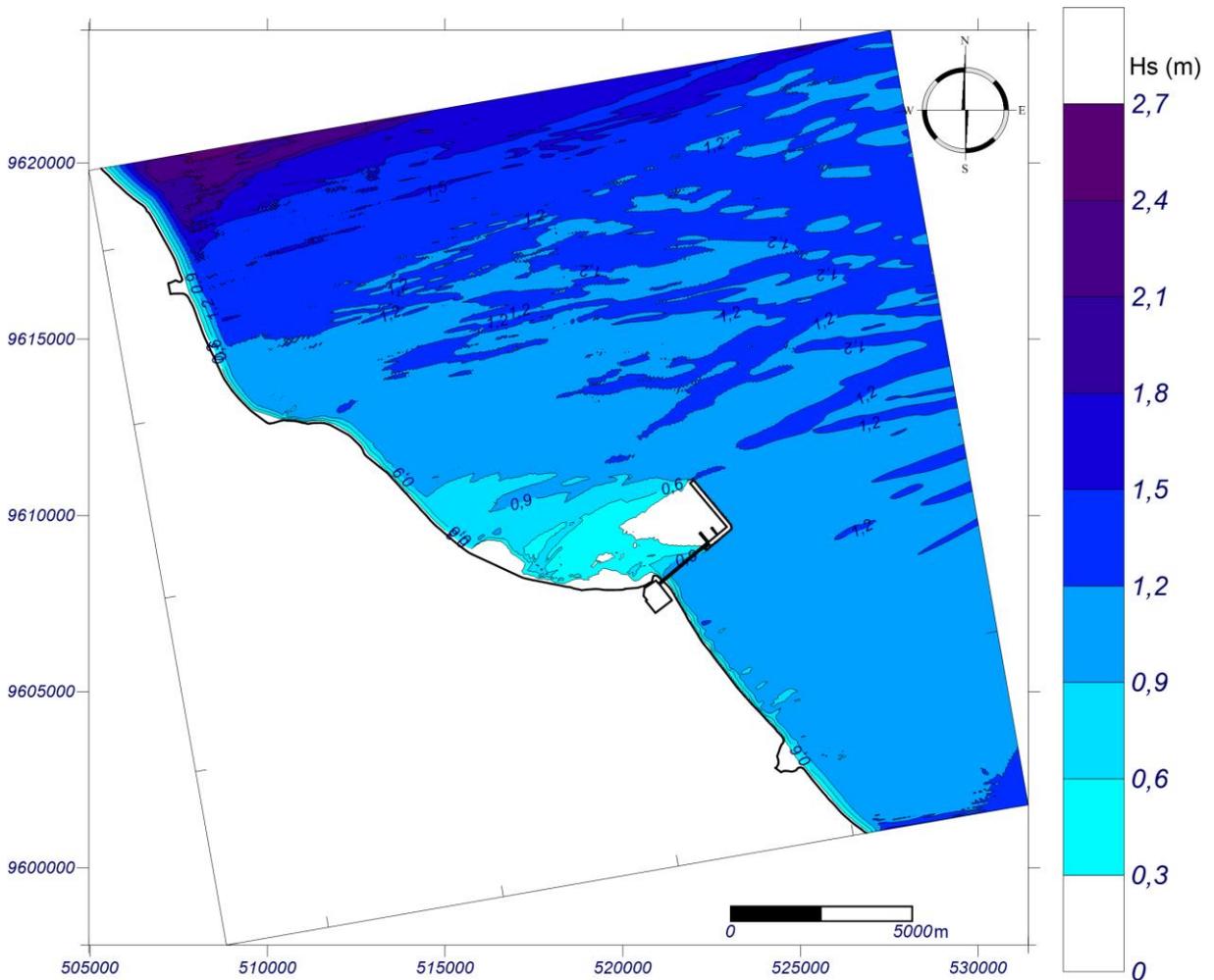
Figura 42 - Vetores de Hs + Magnitude de ondas vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,30 m, Tp: 7,50 s, dir: 088° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

No gráfico de isolinhas (FIGURA 43) foi possível verificar que as ondas chegam à costa de forma homogênea com altura de aproximadamente 1,0 m. Além disso, o efeito de proteção do quebra-mar atenua a chegada das ondas nas áreas a oeste do promontório, o que é essencial para que as atividades inerentes à navegação, manobras, atracação, carga e descarga do Porto sejam realizadas com segurança. Qualquer alteração da dinâmica e/ou da morfologia de leito nessa área, poderá comprometer as praias adjacentes e o próprio funcionamento do Porto do Pecém.

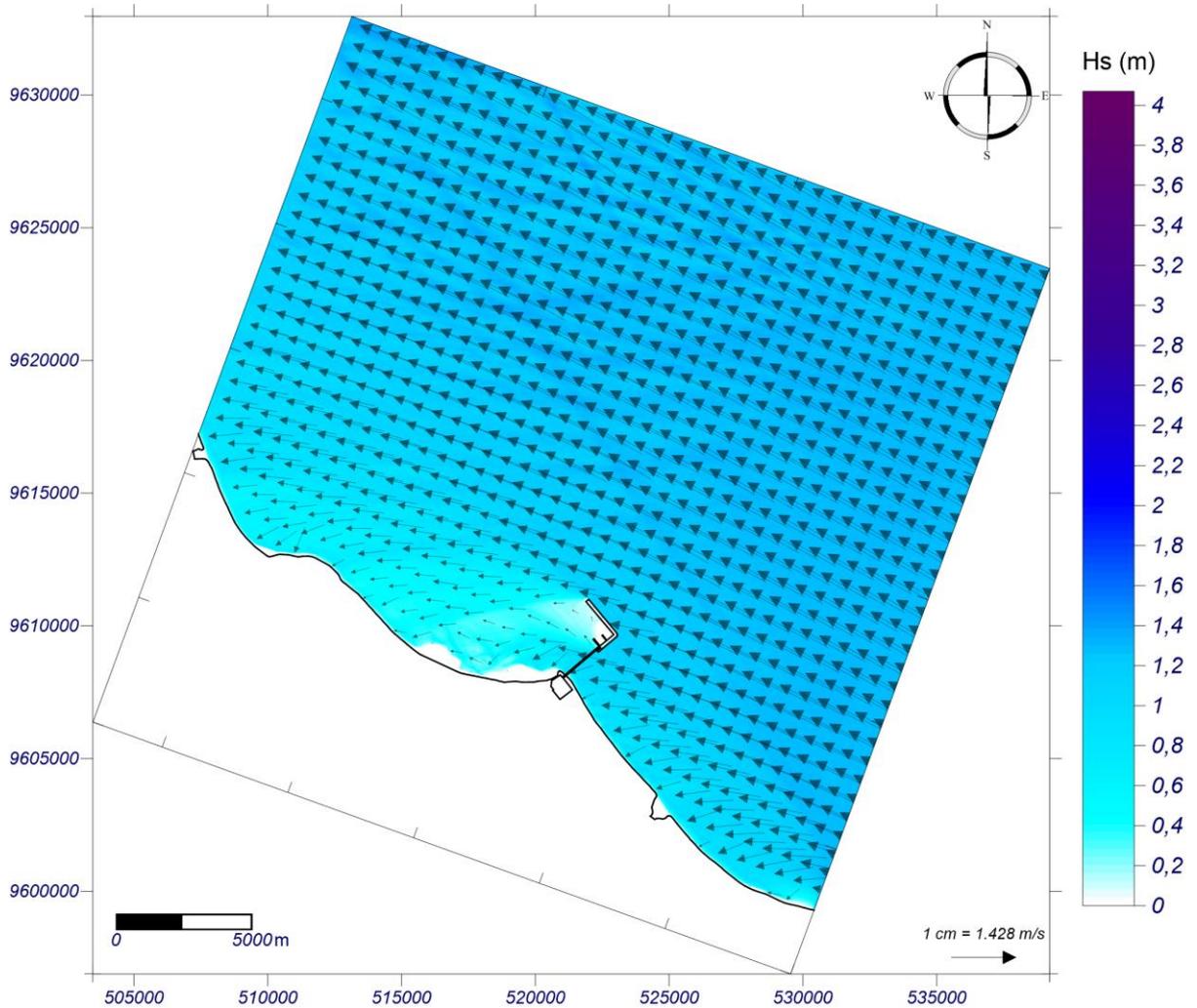
Figura 43 - Gráfico de isolinhas de Hs vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,30 m, Tp: 7,50 s, dir: 088° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

Assim como nos casos anteriores, as ondas de leste-sudeste (FIGURA 44) também sofrem difração ao encontrar o quebra-mar, a energia incidente na praia é minimizada, o efeito de abrigo do quebra-mar forma uma grande área de sobra que se estende até a ponta da praia de Taíba. A leste do quebra-mar, as ondas sofrem refração, mas não o suficiente para deixá-las paralelas à linha de costa. Ainda se observou que as ondas incidentes se propagam de forma homogênea até a linha de costa, chegando na porção leste a alturas de 1 m e na porção oeste com alturas de 0,4 a 0,6 m.

Figura 44 - Gráfico de vetores e magnitude de Hs vindas de leste-sudeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,29 m, Tp: 6,27 s, dir: 119° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

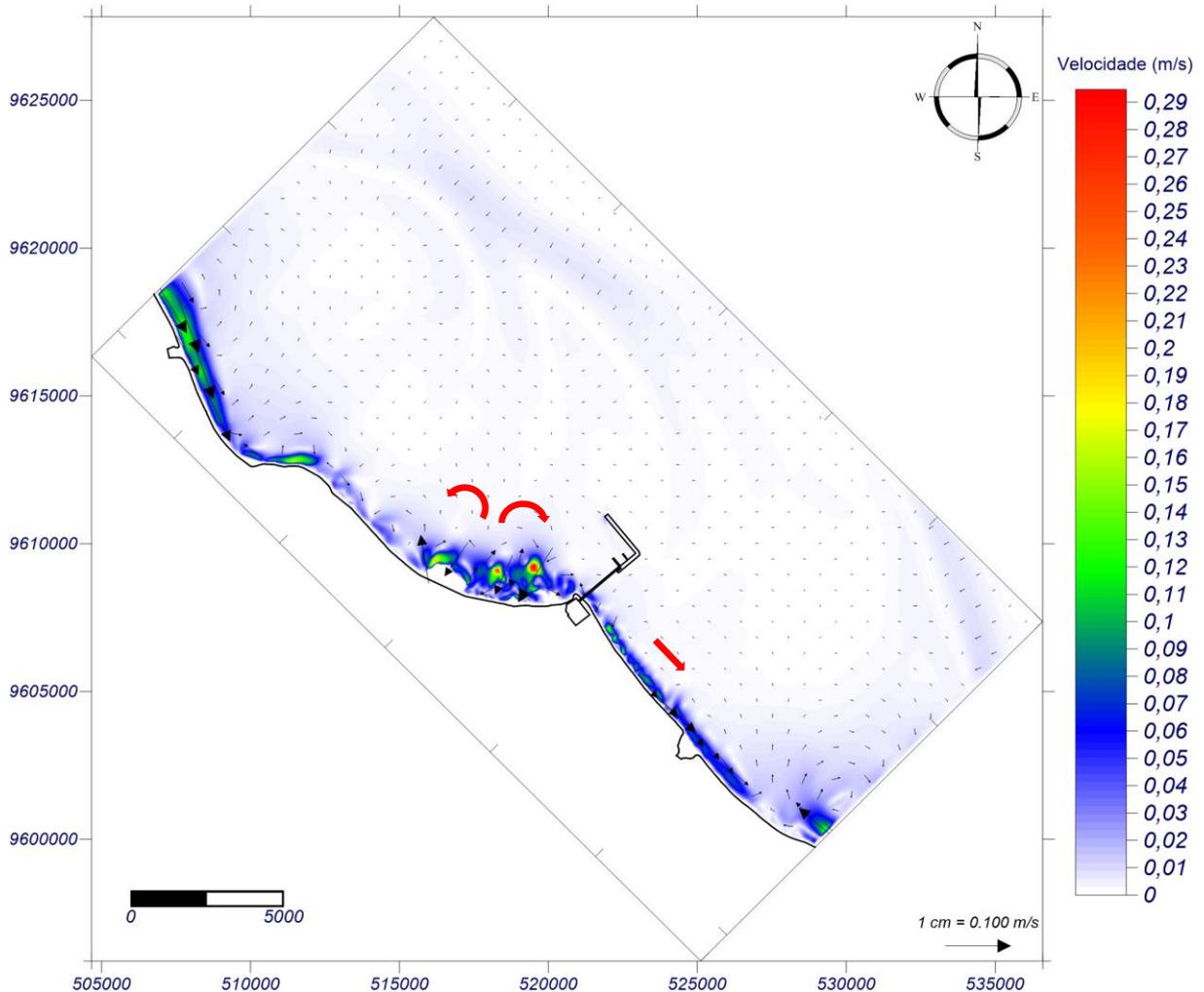
Autores como Bensi (2006) e Vieira (2007) citam tanto o fenômeno da refração quanto o da difração ao analisar o clima de ondas para a região do Pecém com campo de ondas simulados, com o módulo PMS do *software* MIKE 21 chegando a resultados similares aos encontrados no SMC-Brasil.

As estimativas de correntes nesse estudo foram geradas utilizando o modelo COPLA-SP. Para cada direção predominante de incidência será apresentado um caso propagado analisando os gráficos de corrente e magnitude gerados na ferramenta SMC 3.0. As condições mais parecidas com as encontradas na literatura foram utilizadas para melhor comparar os resultados das simulações. Outro ponto importante é citar as condições mais propícias dos

processos erosivos (condições extremas e de preamar), onde não se verificou uma grande diferença em relação ao comportamento dos vetores, no entanto a magnitude nessas condições ficaram em torno de 0,30 m/s.

As correntes geradas por ondas que se propagam de nordeste (FIGURA 45) geram na porção a oeste do promontório uma corrente de retorno, os valores mais energéticos de corrente são observados no momento em que a onda quebra ao sentir o fundo, na cota batimétrica de 10 m com valores que podem chegar a 0,29 m/s. A leste do promontório as correntes divergem e tem seu sentido de deriva para o leste com velocidades entre 0,05 e 0,14 m/s. Essa configuração das correntes geradas por onda propicia alívio das pressões hidrodinâmicas em relação às ondas de nordeste, favorecendo a estabilidade dinâmica da linha de costa nesse setor. Entretanto, é necessário analisar todo o espectro de ondas representativo.

Figura 45 – Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



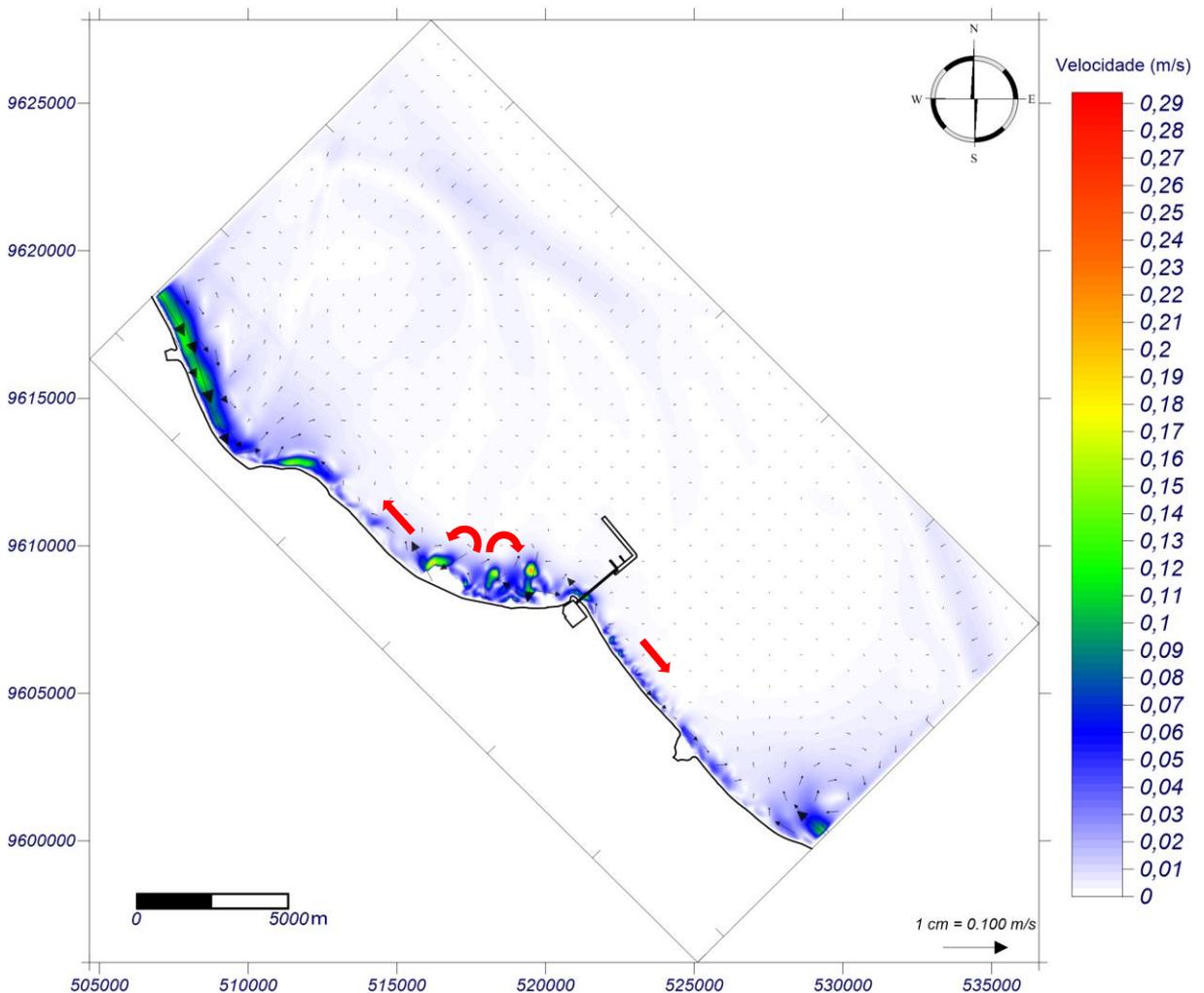
Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: H_s : 1,46 m, T_p : 10,99 s, dir: 043° Az, nível de mar: 0 m (baixamar).

Nas simulações realizadas por Elfrink *et al.* (1998) com condições de onda: $H_s = 0,5$ m, $T_p = 14$ s, Direção = 30° , os autores observaram que o fluxo das correntes foi direcionado para longe do promontório, ou seja, existem duas correntes que divergem no promontório, uma de leste para a oeste e outra de oeste para leste, assim como observado nas simulações realizadas pelo SMC-Brasil.

Os casos com correntes geradas por ondas providas de leste-nordeste (FIGURA 46) geram correntes orientadas predominantemente para oeste-noroeste. A oeste da Ponta do Pecém também é possível ver a formação de correntes de retorno. Nesses casos as correntes ganham magnitude devido à presença de obstáculos, como bancos areias e o promontório,

nesses cenários as simulações mostram valores de até 0,21 m/s. A leste do promontório ainda conseguiu-se notar uma leve corrente para sudeste. Correntes com obliquidade em relação à linha de costa mais próximas do ângulo crítico de transporte de sedimentos inconsolidados, estão relacionadas com a retirada de grãos da praia para a deriva litorânea, gerando balanço sedimentar negativo e tendência erosiva no trecho afetado.

Figura 46 – Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste-nordeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,43 m, Tp: 9,42 s, dir: 059° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

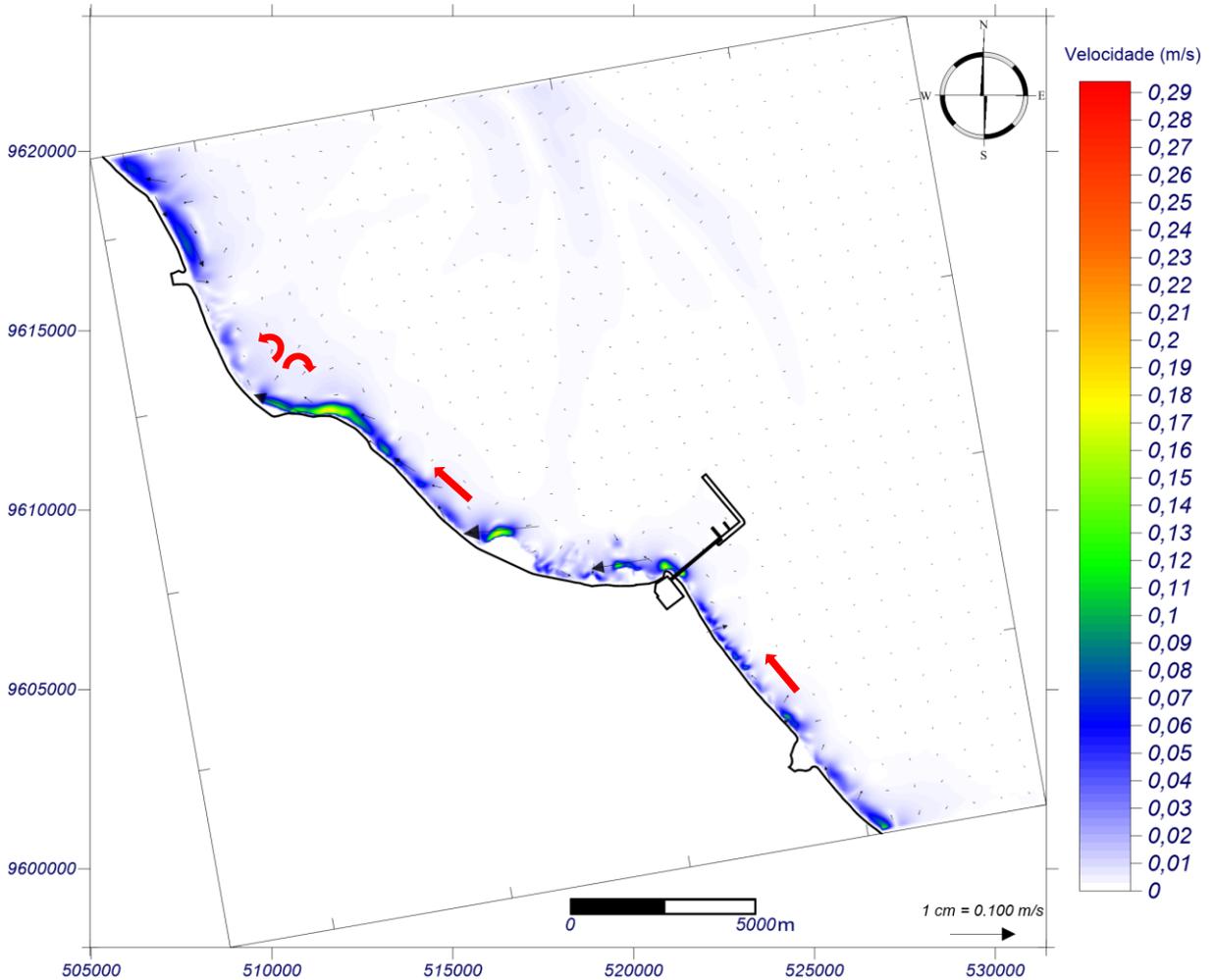
Carvalho, Maia e Dominguez (2007) descrevem que, as ondas de direção 60°, com períodos de 5 e 6,5 s, desenvolvem uma deriva predominantemente no sentido de noroeste e há

inversão no sentido da deriva no início do promontório, como também foi observado nos resultados acima descritos de nordeste e leste-nordeste.

Para casos de onda de direção leste (FIGURA 47), as correntes têm direção predominante para noroeste. As correntes são mais fracas e seus valores máximos acontecem em poucos pontos da costa, com destaque para a praia de Taíba onde, no promontório, as correntes podem chegar a 0,19 m/s, também é possível notar uma corrente de retorno a oeste da ponta. A incidência perpendicular da onda pode explicar os menores valores de corrente, pois não há gradiente de altura de onda quando essas incidem perpendicularmente.

Apesar das menores velocidades de corrente, as ondas de leste são as de maior frequência e probabilidade de ocorrência na região e, portanto, suas correntes resultantes podem gerar pressões erosivas mais constantes nas pontas do Pecém e da Taíba. Esse resultado sugere a importância do monitoramento costeiro hidrossedimentar na região, pela sua relevância socioeconômica.

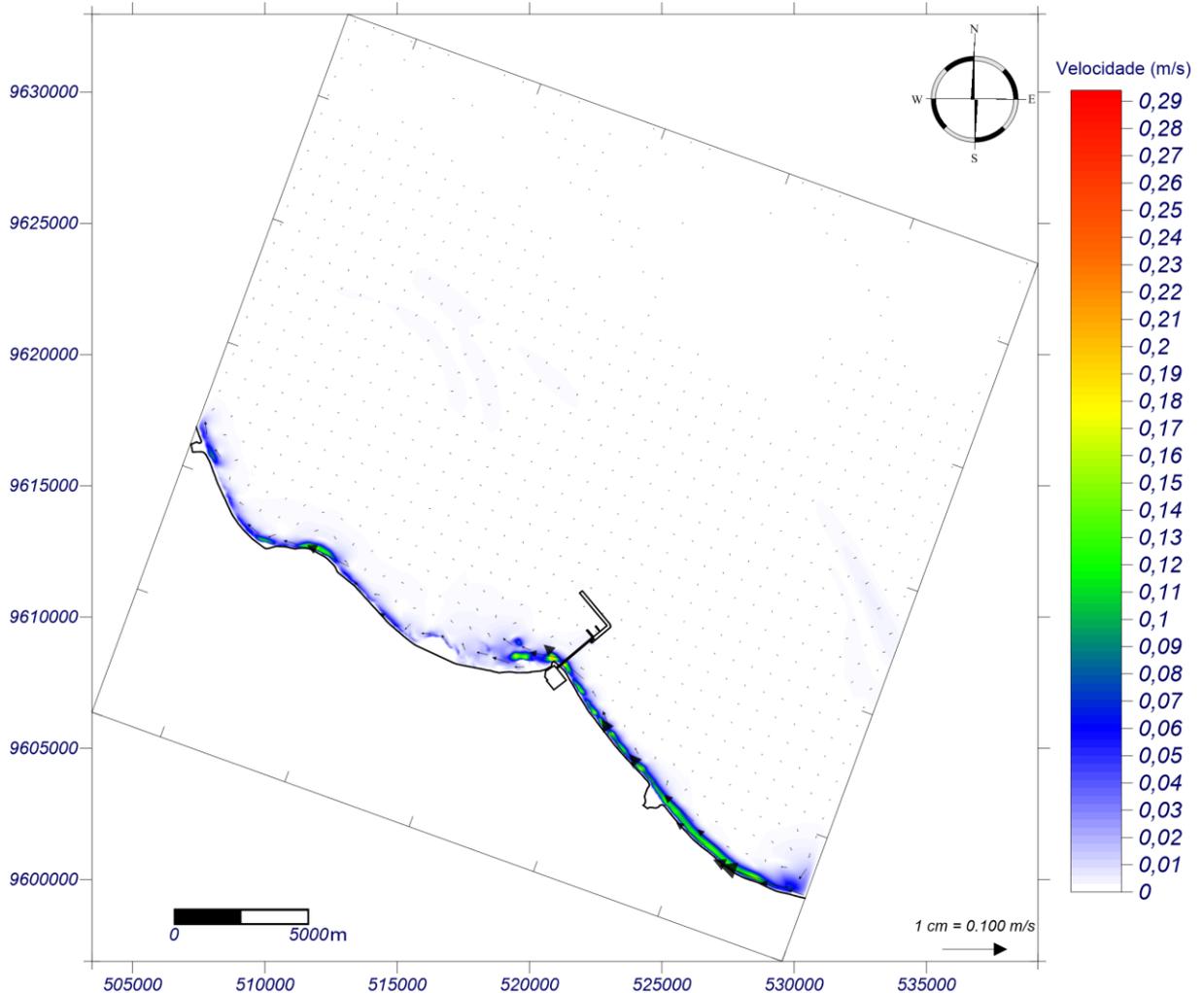
Figura 47 – Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,30 m, Tp: 7,50 s, dir: 088° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

Para os casos de leste-sudeste as correntes ganham magnitude a leste da Ponta do Pecém com velocidades aproximadas de 0,12 m/s. No promontório, a corrente atinge valor máximo de 0,21 m/s e a oeste da ponta atingem valores quase nulos até aumentar novamente na ponta da praia de Taíba. Sua direção predominante continua para noroeste (FIGURA 48). Do ponto de vista hidrossedimentar, a dinâmica é similar ao que acontece com as ondas de leste. Porém, as ondas de leste-sudeste estão em terceiro lugar em termos de probabilidade de ocorrência no espectro.

Figura 48 – Vetores e magnitude de correntes geradas por ondas. Caso de ondas vindas de leste-sudeste, simuladas pelo SMC-Brasil nas proximidades da Ponta do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante/CE



Fonte: Elaborado pela autora. Característica da Simulação: Hs: 1,29 m, Tp: 6,27 s, dir: 119° Az, nível de maré: 0 m (baixamar).

Para uma simulação realizada com condições de onda: $H_s = 1,75$ m, $T_p = 7$ s, Direção = 82,5°, Elfrink *et al.* (1998) observou que as correntes induzidas pela quebra de onda são mais fortes no lado leste da Ponta do Pecém, onde a corrente segue a linha de costa até atingir o promontório, e próximo a sua ponta o fluxo acelera ligeiramente devido a convergência dos contornos de profundidade. Os autores também comentam sobre o desenvolvimento de padrões complexos de correntes na frente do Pecém, devido às irregularidades na batimetria e a formação de um redemoinho a oeste da Ponta do Pecém, feições que já foram discutidas nos itens anteriores dos resultados obtidos pelo SMC-Brasil.

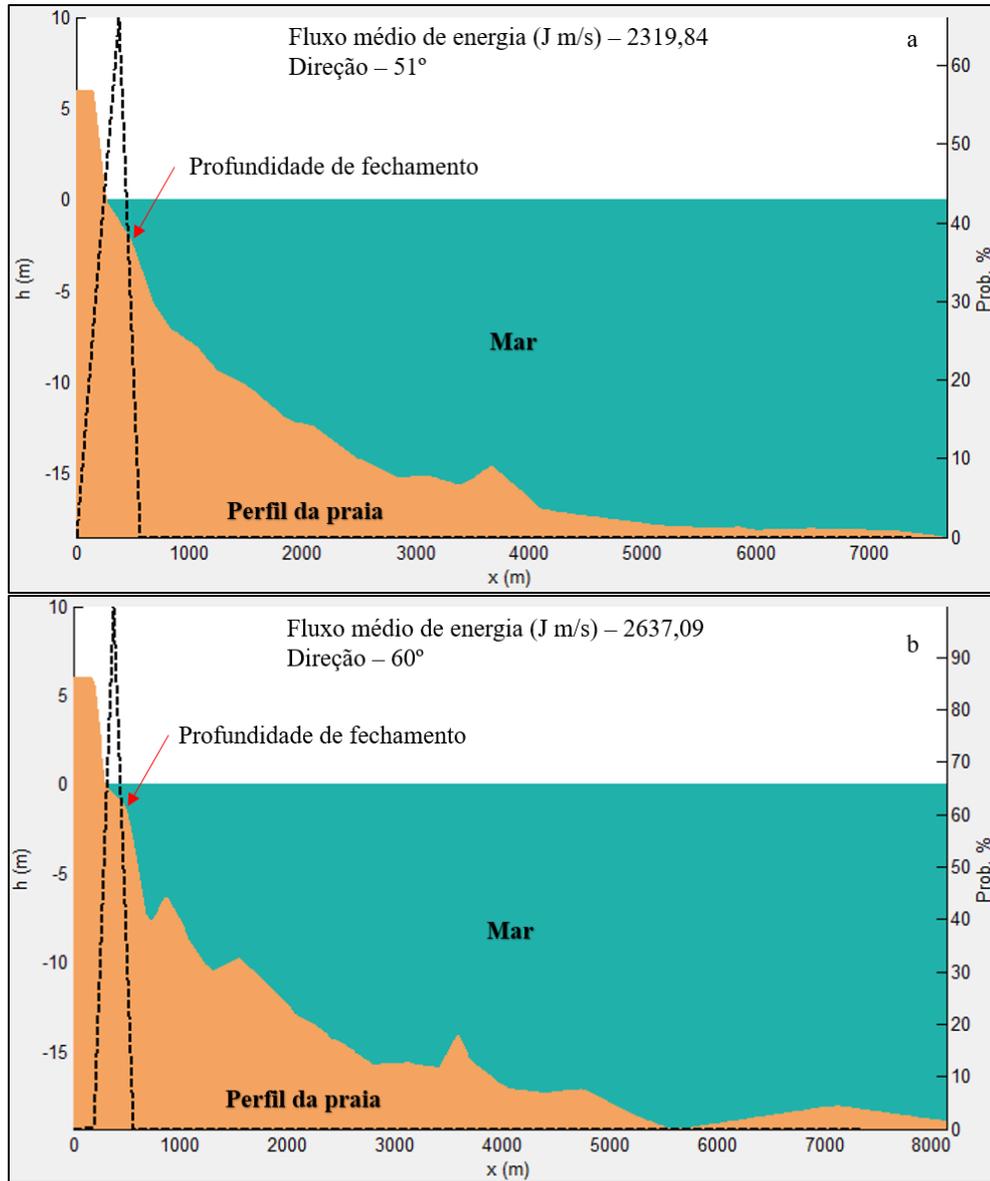
5.5 Perfis de Praia

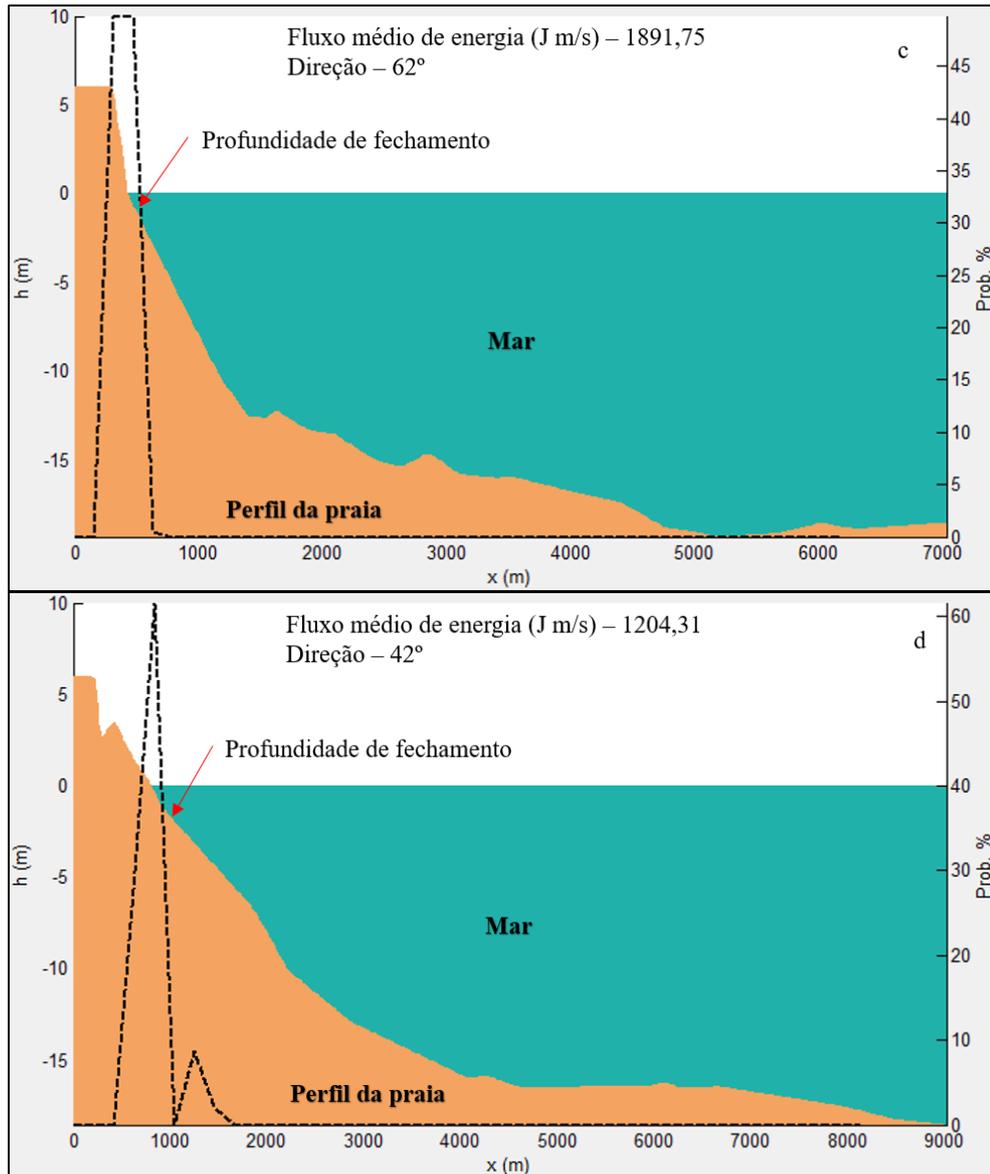
Como já comentando no tópico de Fundamentação Teórica, o referencial altimétrico dos resultados seguintes são da Carta Náutica, ou seja, do nível de redução (nível da baixa-mar média de sizígia). Outro ponto importante a mencionar é que último levantamento na região interna da plataforma continental data de 2001. Dessa forma, um levantamento de topobatimetria rasa atualizado pode aumentar a acurácia e a precisão dos resultados doravante apresentados. Entretanto, a análise com dados de carta náutica permite identificar aspectos importantes da dinâmica costeira local para fases iniciais de planejamento e pré-projetos de engenharia e/ou intervenções próximas à linha de costa na área de estudo.

Os perfis de probabilidade de quebra de onda mostram, de modo geral, duas classes de arrebentação nos perfis desenhados. A primeira se refere aos perfis 1, 2, 3 e 7, que exibem probabilidade de quebra na face de praia ou muito próxima a ela (FIGURA 49), suspendendo os sedimentos dessas zonas e os tornando suscetíveis ao transporte pelas correntes geradas pelas ondas.

Os máximos valores de fluxo de energia para a área são observados nos perfis a leste do porto (FIGURA 49 a, b, c), e no perfil 8 (FIGURA 50 d) indicando um maior potencial ao transporte de sedimento. A direção do fluxo médio de energia, que define a orientação da forma em planta da praia se apresenta orientada paralela a linha de costa em todos os perfis, exceto no perfil 4 (FIGURA 50 a). A construção de uma obra como um porto pode gerar a barlamar uma modificação na linha de costa quando o fluxo de sedimento que sai pela seção passa a ser próximo de zero, por influência do abrigo do porto, e o fluxo de sedimento que entra pela seção é similar ao que aporta no sistema, gerando uma situação de acúmulo, assim como já apontado por diversos autores Duarte *et al.* (2018), Magalhães e Maia (2003), Magini, Martins e Pitombeira (2013), Vieira (2007), entre outros.

Figura 49 - Histograma de arrebatção dos perfis 1, 2, 3 e 7, a linha preta pontilhada mostra a probabilidade de quebra ao longo do perfil, período de mare baixa

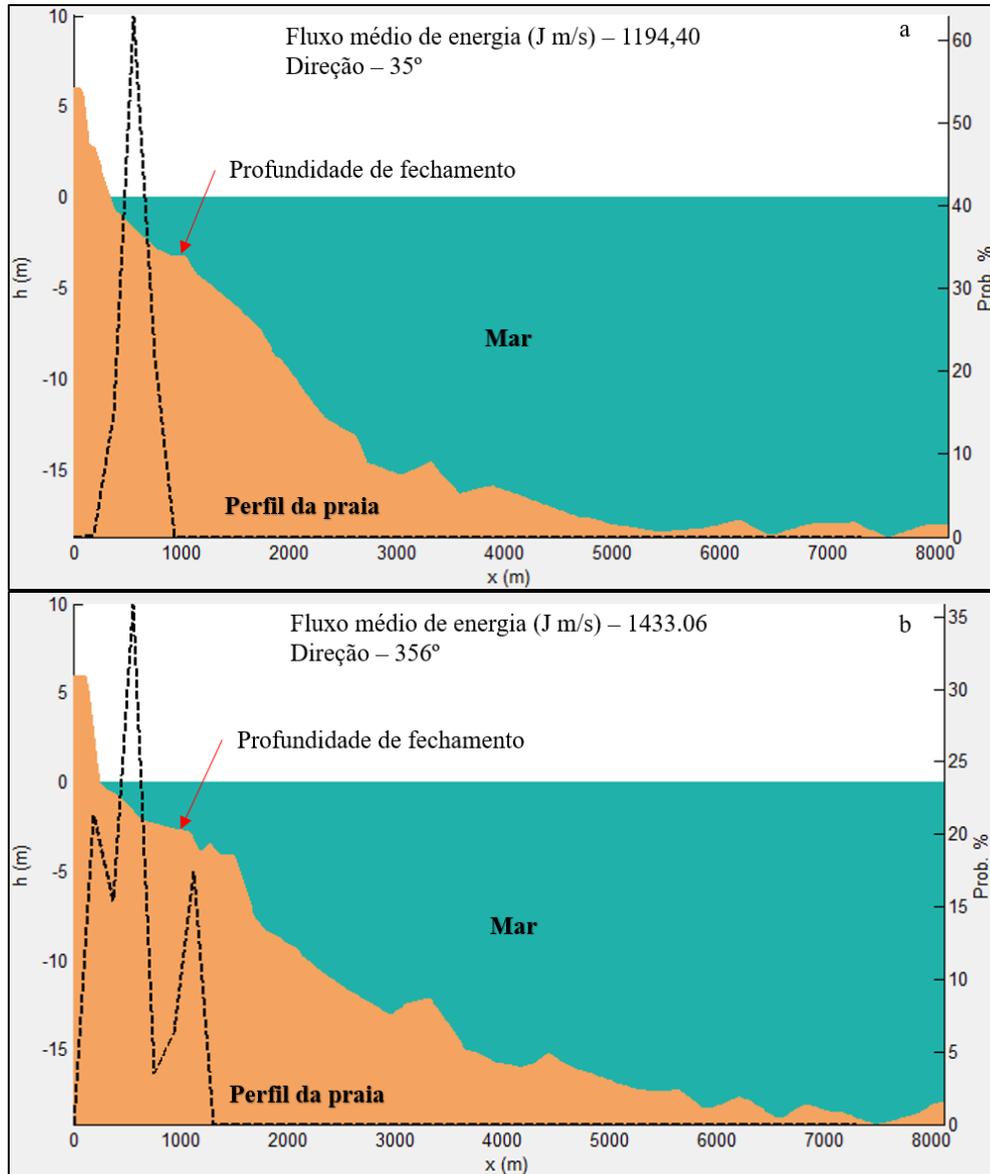


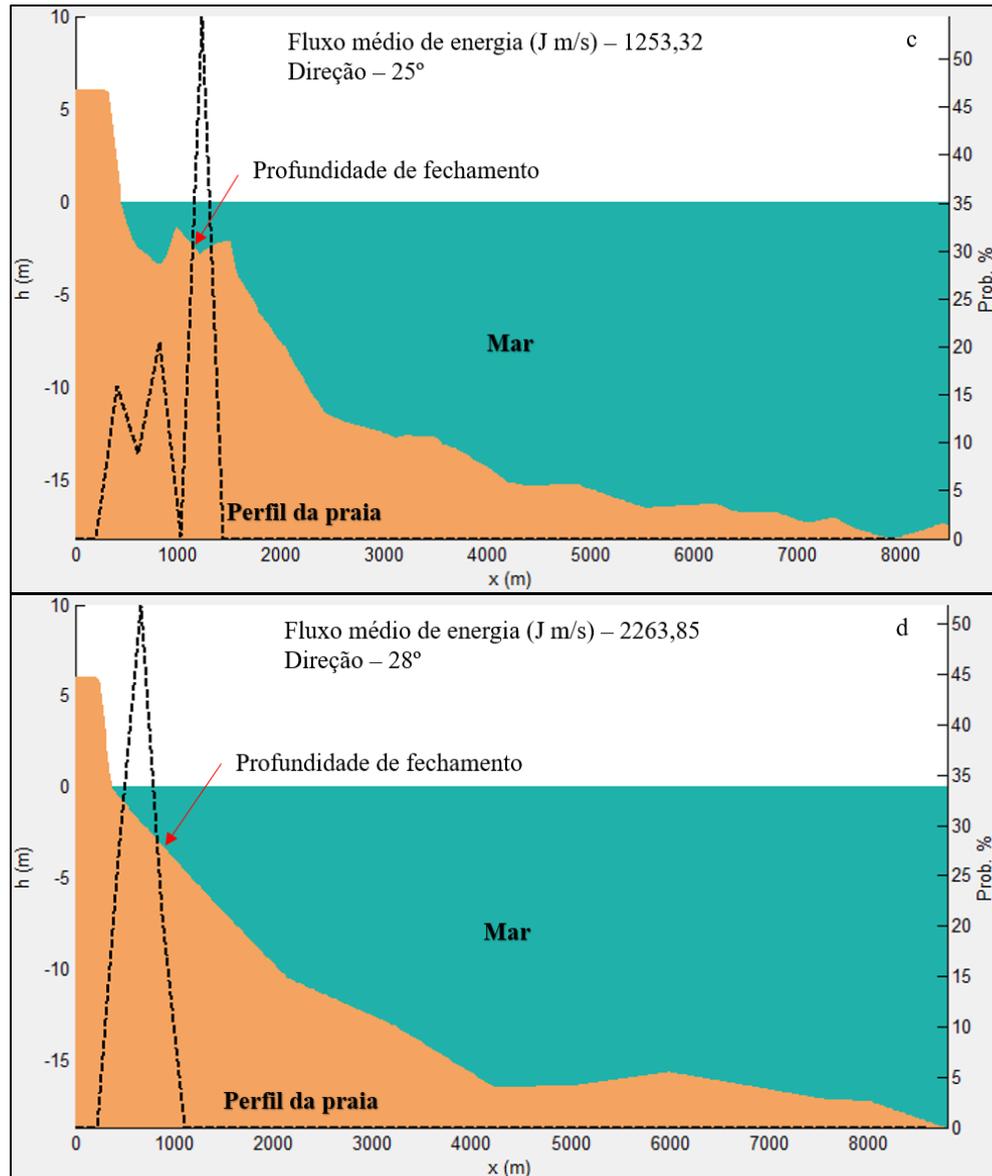


Fonte: Elaborado pela autora. a) perfil 1, b) perfil 2, c) perfil 3, d) perfil 7.

A segunda classe (perfis 4, 5, 6 e 8), onde a quebra da onda acontece ao longo do perfil, a maior probabilidade de quebra ocorre a mais de 500 m da faixa de praia, podendo chegar, no perfil 6, a mais de 1000 m (FIGURA 50 c). Essa quebra pode ocorrer por conta das irregularidades do fundo oceânico a oeste do porto, que contém uma maior quantidade de rochas aflorando.

Figura 50 - Histograma de arrebentação dos perfis 4, 5, 6 e 8, a linha preta pontilhada mostra a probabilidade de quebra ao longo do perfil, período de mare baixa





Fonte: Elaborado pela autora. a) perfil 4, b) perfil 5, c) perfil 6, d) perfil 8.

Nas Figuras 49 e 50, também estão indicadas as profundidades de fechamento (seta vermelha) estimadas nos perfis, onde pode-se observar que ela ocorre bem próxima às maiores probabilidades de arrebanção, dissipando energia com potencial hidráulico suficiente para a mobilização de sedimentos. Os perfis onde a profundidade de fechamento ocorreu longe da zona de arrebanção podem ser explicados pois a profundidade de fechamento de Hallermeier depende principalmente da altura das ondas, nesses perfis a praia está mais protegida das ações das ondas pela ação do quebra mar, então o seu perfil ativo deve ser menor do que o calculado.

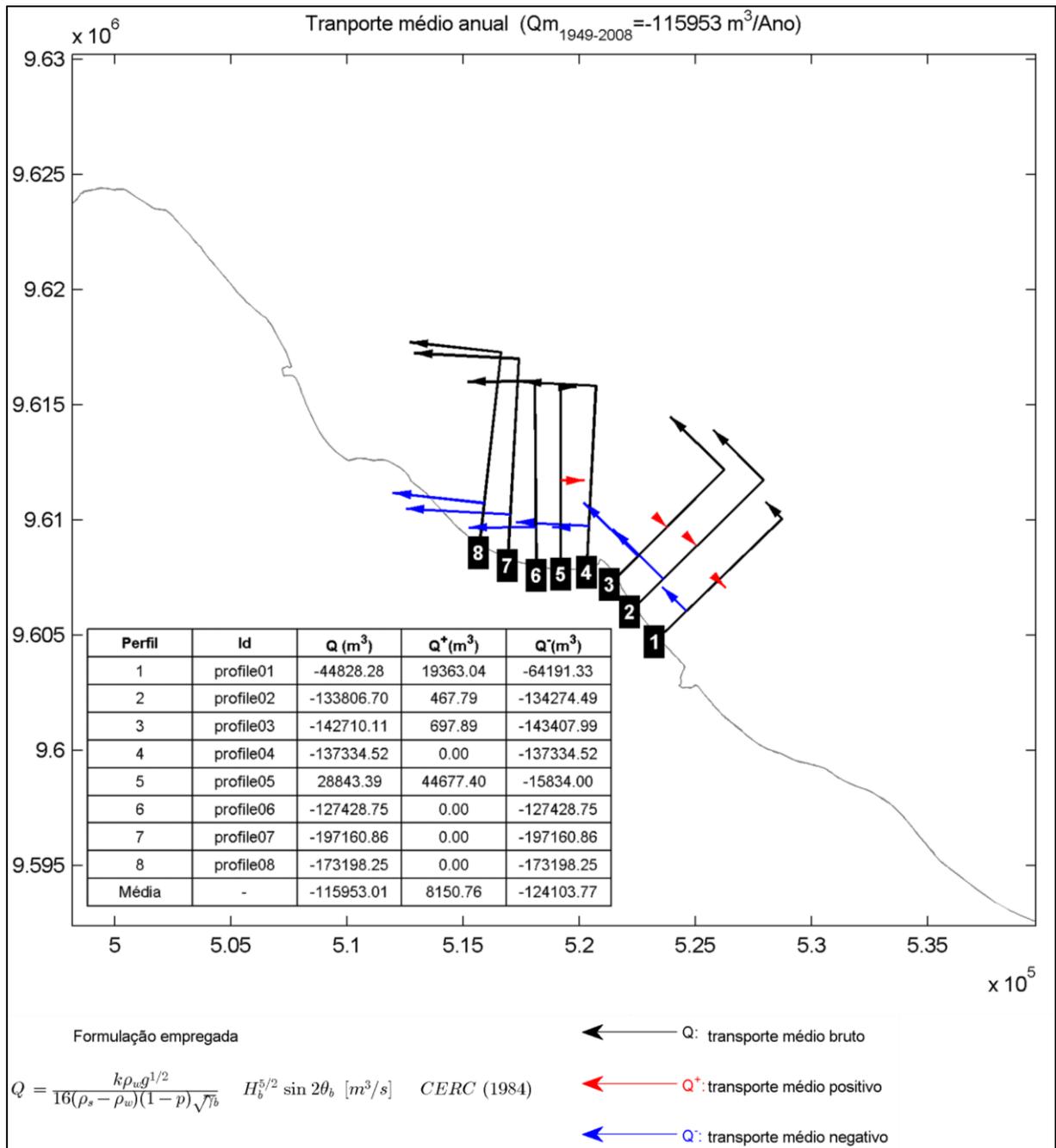
Analisando os resultados dos perfis desenhados, foi possível determinar as taxas médias anuais de transporte potencial longitudinal no trecho escolhido e também o seu volume

estimado. O período analisado contemplou toda a base de dados do SMC, de 1948 a 2008, utilizando a equação de CERC (USACE, 1984).

Em geral, o transporte acontece de leste para oeste, acompanhando o sentido da deriva litorânea (FIGURA 51). O único perfil que apresentou transporte contrário à deriva (de oeste para leste) foi o perfil 5, localizado logo a oeste do promontório. Essa característica pode ser explicada pelos efeitos de refração e difração causados pela influência combinada da batimetria, da estrutura de engenharia *hard* porto e do promontório, ocasionando um ponto de vórtice que transporta o sedimento de oeste para leste. Outra característica da área foi evidenciada por Duarte *et al.* (2018), que observaram em imagens de satélite, o vórtice que promove a movimentação oposta à deriva litorânea referente ao resultado do perfil 5 criado no SMC-Brasil.

O transporte médio geral para o oeste na formulação de CERC foi estimado em 115.953,01 m³/ano (FIGURA 51), que corresponde à carga de areia de 7.247 caminhões caçamba sendo carregada daquele trecho de praia submersa, por ano (considerando capacidade nominal de carga de 16 m³). Caso essa quantidade de sedimentos não seja resposta durante os períodos construtivos da praia, oriundos de outros trechos da costa ou do aporte fluvial à montante, causará um processo erosivo na praia do Pecém, que afetará altamente todas as atividades ali instaladas. Novamente, os resultados reforçam a importância do monitoramento costeiro preventivo a impactos ambientais dessa natureza.

Figura 51 - Transporte médio de sedimentos, formulação de CERC



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos corroboram com o sentido de deriva litorânea predominante da área, segundo literatura científica. Quando se compara os resultados dos perfis realizados por Pitombeira (2004) com os valores oriundos do SMC-Brasil, pode-se ver uma semelhança. Ao relacionar a movimentação entre os perfis 2 e 3 do SMC aos perfis relativos, S2E a S10E, de Pitombeira (2004), os valores se apresentaram semelhantes, com uma média de transporte para o oeste de 138.258,405 m³/ano do SMC versus 117.360,00 m³/ano do autor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou utilizar a ferramenta SMC-Brasil para analisar e comparar qualitativamente a dinâmica costeira da praia do Pecém com dados coletados *in situ* por diversos autores ao longo dos anos.

A caracterização do clima de ondas para o entorno da praia do Pecém mostrou que o predomínio das direções de incidência de ondas são de NE, ENE, E e ESE, totalizando mais 90% das incidências de onda para a região. Os valores médios de Hs variaram de 1,3 m a 1,5 m e de T_p em torno de 8 s.

A maré astronômica é a principal responsável por governar o regime de oscilação do nível do mar, sua amplitude é da ordem de 3 m e é classificada como meso-maré, seus valores de baixa-mar e preamar de variam entre -1,4 m e +1,5 m. Os valores da maré meteorológica oscilam entre -0,1 m e +0,2 m, o que pouco influencia no regime de oscilação do nível do mar.

Considerando os casos propagados de ondas e correntes, pode-se observar de forma clara os efeitos de transformação de ondas para a região, como a refração e a difração provocada pelas feições naturais como o promontório, e artificiais como o quebra mar do porto do Pecém. A modelagem também delineou claramente os efeitos causados pela diminuição da batimetria e mudança na orientação da linha de costa, exibindo também as regiões mais protegidas e mais vulneráveis por conta dessas feições e do abrigo do porto. A predominância da corrente de deriva litorânea é de leste para oeste exceto quando as ondas incidem de nordeste, onde duas correntes são formadas, uma a leste e outra a oeste do promontório. Esse comportamento pode ser explicado pela pouca obliquidade da chegada das ondas no trecho leste da costa e o efeito causado pela ponta do Pecém.

A quebra da onda nos perfis desenhados se divide em duas classes, uma onde a maior probabilidade de quebra é diretamente sobre a linha de costa e a outra com maiores probabilidades de quebra ao longo do perfil, não excedendo a distância da ordem de 1000 m da linha de costa, essas características se relacionam aos resultados do fluxo médio de energia e de profundidade de fechamento.

O transporte longitudinal médio de sedimentos é concordante com a deriva litorânea e tem sua resultante de leste para oeste com volume estimado em 115.953,01 m³/ano.

De forma geral, os resultados obtidos a partir do SMC-Brasil foram compatíveis aos dados reais obtidos para a área da Praia do Pecém, com algumas exceções, a saber: a superestimação pelo modelo das alturas da onda *swell* e a subestimação dos valores de sedimento transportados a oeste do promontório.

A partir disso, conclui-se que a utilização do SMC-Brasil na praia do Pecém, litoral do Ceará se mostrou uma boa ferramenta para auxiliar na compreensão dos processos costeiros da região, auxiliando na redução da carência de dados obtidos *in situ* no Brasil. Outro ponto positivo do SMC-Brasil é a facilidade de sua utilização e a quantidade de ferramentas com recursos diversos disponíveis em um único *software* de distribuição gratuita. Apesar disso, a utilização da ferramenta tem as limitações características de qualquer outro *software* de modelagem, pois as dinâmicas desses ambientes são altamente complexas e imprevisíveis, além de ser composta de dados modelados e não medidos. Dito isso, devem ser tomados todos os cuidados durante a execução e interpretação dos resultados e sua utilização é recomendada para uma análise inicial do ambiente, para fins de planejamento espacial e pré-projetos de engenharia costeira.

Sugere-se que em trabalhos futuros se realizem análises estatísticas com os dados de onda obtidos a partir dos dados do ondógrafo direcional do Pecém para validar e calibrar a base de dados de reanálise DOW. Também é aconselhável avançar em outras análises que o SMC-Brasil oferece, tais como o equilíbrio dinâmico da praia em planta, os perfis de tempestade e simulação de alternativas de intervenção.

REFERÊNCIAS

ALHEIROS, Margareth Mascarenhas; LIMA FILHO, Mário Ferreira; MONTEIRO, Francisco de Assis Jordão; OLIVEIRA FILHO, José Souto. Sistemas Depositionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988, p. 753-760.

ALMEIDA, Laura Ribas de; AMARO, Venerando Eustáquio; MARCELINO, Ana Maria Teixeira; SCUDELARI, Ada Cristina. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 135-151, 2015.

ÁLVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ALVES, Rodolfo Teixeira. **Estudo da deriva litorânea em Fortaleza/CE: análise quantitativa do transporte longitudinal para gestão costeira e portuária**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

AMARANTE, Odilon A. Camargo; BROWER, Michael; ZACK, John; SÁ, Antonio Leite. Atlas do potencial eólico brasileiro. MME/Eletróbrás: Brasília, 2001.

APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. **Glossário sobre as Zonas Costeiras**. 2007. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>. Acesso em: 15 set. 2021.

AZENHA, Catia; PEQUENO, Luis Renato Bezerra. O porto do Pecém – CE e as suas relações com o Brasil: definição de uma hinterlândia. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 29, p. 44-62, 2016.

BAYRAM, Atila; LARSON, Magnus; HANSON, Hans. A new formula for the total longshore sediment transport rate. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 54, n. 9, p. 700-710, 2007.

BENSI, Manuel. **Aplicação do correntômetro acústico ADCP em ambientes marinhos e estuarinos do Ceará e Paraíba - Nordeste do Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BIRD, Erick Charles Frederick. **Coastal Geomorphology: an introduction**. 2. ed. England: Wiley, 2008.

BITTENCOURT, Abílio Carlos da Silva Pinto; DOMINGUEZ, José Maria Landim; MARTIN, Louis; SILVA, Iracema Reimão. Uma aproximação de primeira ordem entre o clima de ondas e a localização, de longa duração, de regiões de acumulação flúvio-marinha e de erosão na costa norte do Brasil. **Rev. Bras. de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 159-166, 2003.

BOOIJ, Nico; RIS, Roeland C.; HOTHUIJSEN, Leo H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.

BRANDÃO, Ricardo de Lima (org). **Projeto SINFOR: Índice das informações cartográficas da região metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 1994.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mudanças do clima em praias**: documento temático. Brasília, DF: MMA, 2018a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Níveis e cota de inundação**: documento temático. Brasília, DF: MMA, 2018b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Ondas**: documento temático. Brasília, DF: MMA, 2018c.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Recuperação de praias**: documento temático. Brasília, DF: MMA, 2018d.

CAMUS, Paula; MENDEZ, Fernando J.; MEDINA, Raúl. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 58, p. 851-862, 2011.

CAMUS, Paula; MENDEZ, Fernando.J.; MEDINA, Raúl; TOMAS, Antonio; IZAGUIRRE, Cristina. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal áreas. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 72, p. 56-68, 2013.

CARVALHO, Alexandre Medeiros; MAIA, Luís Parente; DOMINGUEZ, José Maria Landim. A deriva e o transporte litorâneo de sedimentos no trecho entre Cumbuco e Matões – Costa Noroeste do Estado do Ceará. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, n. 40, v. 1, p. 43 – 51, 2007.

CAVALCANTE, José Carvalho; VASCONCELOS, Antonio Maurilio; MEDEIROS, Marcelo de Freitas; PAIVA, Iaponira Gomes; GOMES, Francisco Edson Mendonça; CAVALCANTE, Selêucis Nogueira; CAVALCANTE, José Emilson; MELO, Antônio Celso R. de; DUARTE NETO, Vicente Calixto; BENEVIDES, Homero Coelho. **Mapa geológico do estado do Ceará**. Fortaleza: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2003, 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

CEARÁ. **Plano de desenvolvimento sustentável do governo Tasso Jereissati (1995- 1998)**. Fortaleza: Governo do Estado, 1995.

COWELL, Peter J.; THOM, Bruce G. Morphodynamics of coastal evolution. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, Colin D. (org). **Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

DALINGHAUS, Charline. **Análise da estabilidade da forma em planta e perfil nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, Florianópolis - SC: aplicações em análise de perigos costeiros**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DALINGHAUS, Charline; ALMEIDA, Laura Ribas; GONZÁLEZ, Mauricio; KLEIN, Antônio Henrique Fontoura (org.). **Sistema de modelagem costeira do Brasil**: estudos de caso. Florianópolis: Editora da UFSC, 2018.

DALINGHAUS, Charline; OLIVEIRA, Márcia; GONZÁLEZ, Mauricio; KLEIN, Antônio H.F. **Projeto SMC – Brasil: Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira**. 2016. Trabalho apresentado no II Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais, 2016, Florianópolis.

DEAN, Robert G.; DALRYMPLE, Robert A. **Coastal processes with engineering applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DUARTE, Cynthia Romariz; MIRANDA, Fernando Pellon de; LANDAU, Luiz; SOUTO, Michael Vandesteem Silva; SABADIA, José Antônio Beltrão; SILVA NETO, Cláudio Ângelo da; RODRIGUES, Linara Ivina de Castro; DAMASCENO, Aline Moreira. Short time Analysis of Shoreline Based on RapidEye Satellite Images in the Terminal Area of Pecém Port, Ceará, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 39, n. 13, p. 4376-4389, 2018.

ELFRINK, Berry; ACCETTA, Domenico; VARGAS, Motta Vargas; DIAS, Wagner Santos Scisínio. Littoral Transport under Complex Wave Fields: Pecém, Northeast Brazil. In: **Coastal Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 1 n. 26, p. 2353-2367, 1998.

FERREIRA, Anderson Targino da Silva; AMARO, Venerando Eustáquio; SANTOS, Marcelo Soares Teles. Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 1, n. 66, p. 167-184, 2014.

FONTOURA, José Antônio Scotti. **Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil**: aplicação às praias do Cassino, Mar Grosso e adjacências dos Molhes Leste e Oeste da embocadura do estuário da Lagoa dos Patos. 2004. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GOMES DA SIVA, Paula; KLEIN, Antônio Henrique da Fontoura; GONZÁLEZ, Mauricio; GUTIERREZ, Omar; ESPEJO, Antônio. Performance assessment of the database downscaled ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 87, n. 2, p. 623-634, 2015.

GOMES JUNIOR, Gabriel D'Annuzio. **Aprimoramento do clima de ondas do SMC como subsídio ao estudo da erosão costeira no litoral de Pernambuco**. 2015. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

GOMES, Abílio Soares. **Ondas Marinhas**. 2003. 18 f. Notas de Aula. Notas de aula do curso Bacharelado em Biologia Marinha.

GOMES, Gabriel; SILVA, Alex Costa da. Nearshore wave analysis in the Brazilian Northeast based on observations and numerical models. **Journal of Operational Oceanography**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 44-53, 2018.

GONÇALVES, Alysson Daniel Ribeiro. **Sobre a ocorrência de ondas extremas (rogue waves) no litoral do Ceará com base nos dados do ondógrafo do Pecém**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

GONZÁLEZ, Mauricio; GUTIERREZ, Omar; CANOVAS, Verónica; KAKEK, Nabil; MEDINA, Raúl; ESPEJO, Antonio; MENDEZ, Fernando; ABASCAL, Ana; CASTANEDO, Sonia; MARTÍNEZ, Cynthia; KLEIN, Antonio Henrique Fontoura; GOMES, Paula; DALINGHAUS, Charline; GONZALES, Moyses; RODACHESKI, Carlos; BRELINGER, Clarissa The new coastal modelling system SMC-Brazil and its application to the erosional problem in the Massaguaçu beach (São Paulo, Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 2014, Seoul. **Anais...** Seoul, 2014, v. 1, n. 34.

GONZÁLEZ, Mauricio; MEDINA, Raúl; GONZALEZ-ONDINA, Jose; OSORIO, Andrés Fernando; MENDEZ, Fernando J.; GÁRCÍA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computers & Geosciences**, [s. l.], v. 33, p. 916–931, 2007.

GONZÁLEZ, Mauricio; MEDINA, Raúl. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 43, p. 209-225, 2001.

HALLERMEIER, Robert J. A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 4, p. 253-277, 1981.

HOLTHUIJSEN, Leo H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

INPH - Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. **Avaliação dos impactos na morfologia costeira, através de modelagem numérica, proveniente da implantação do porto do PÉCEM-CE**. Fortaleza: INPH, 1997.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Ceará em números. Fortaleza: IPECE, 2018.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Perfil das Regiões de Planejamento: Grande Fortaleza – 2017. Fortaleza: IPECE, 2017a.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Perfil Municipal 2017: São Gonçalo do Amarante. Fortaleza: IPECE, 2017b.

JICA - Japan International Cooperation Agency. **Plano de Desenvolvimento do Complexo Industrial e Portuário do Pecém na República Federativa do Brasil**. Japan: International Development System, 2006.

KAMPHUIS, J. William. Alongshore sediment transport rate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, Reston, v. 117, n. 6, p. 624–640, 1991.

KAMPHUIS, J. William. **Introduction to Coastal Engineering and Management**. 3. ed. Singapura: World Scientific, 2000.

KLEIN, Antonio Henrique da Fontoura; PRADO, Michel Franco Volpato; DALINGHAUS, Charline; DE CAMARGO, José Maurício. **Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras**: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno. Brasília: MMA, 2016.

KNAUSS, John A. **Introducion to Physical Oceanography**. 2. ed. New Jersey: Prenice Hall, 1997.

KOMAR, Paul D.; MOORE, J. Robert (ed.). **Handbook of Coastal Processes and Erosion**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1983.

LONGUET-HIGGINS, Michael Selwyn. On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 80, n. 18, p. 2688–2694, 1975.

LONGUET-HIGGINS, Michael Selwyn. On the statistical distribution of the height of sea waves. **Journal of Marine Research**, New Haven, v. 11, n. 3, p. 245–266, 1952.

MAGALHÃES, Silviana Helena Oliveira; MAIA, Luís Parente. Caracterização morfológica a curto prazo das praias dos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, Estado do Ceará, Brasil. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, v.36, p. 77-87, 2003.

MAGINI, Christiano; MARTINS, Antonio Harildes Oliveira; PITOMBEIRA, Erasmo da Silva. A Infraestrutura Portuária e suas Influências na Sedimentação Costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 532-546, 2013.

MAIA, Glacianne Gonçalves de Oliveira; FONSECA, Márcio Roberto de Paula da; NETO, Luis de Carvalho Feitosa; FERNANDES, Lucas Barbosa; TAVARES, Vitória Lima. A Engenharia Ambiental no estudo da erosão de praias associados aos impactos das construções na zona costeira no Estado do Ceará, Brasil. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 14002-14010, 2020.

MAIA, Luis Parente. **Procesos y balance sedimentário a ló largo de Fortaleza (NE-Brasil)**: implicaciones para uma gestión adecuada de La zona litoral. 1998. Tese (Doutorado em Ciencias del Mar) – Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 1998.

MATOS, Maria Odete Moreira. **Transporte de sedimentos na costa do Estado do Ceará, Brasil**. 1978. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de pesca) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1978.

MEDEIROS, Marcelo Freitas; CAVALCANTE, José Carvalho; SOUZA, Ebenézer Moreno de (Org.). **Catarina: folha SB. 24-Y-B-II**: estado do Ceará. Brasília: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 1993.

MORAIS, Jáder Onofre de; FREIRE, George Satander Sá; PINHEIRO, Lidriana; SOUZA, Marcos José Nogueira de; CARVALHO, Alexandre Medeiros de; PESSOA, Paulo Roberto; OLIVEIRA, Sylvania H. Magalhães. Ceará. In: MUEHE, Dieter (org). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006.

MORAIS, Jáder Onofre. **Aspectos de geologia ambiental costeira do município de Fortaleza (Estado do Ceara)**. 1980. Tese (Professor titular) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 1980.

MOURA, Pâmela. **Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MUEHE, Dieter. (ed.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

PAMPLONA, Hilda de Castro. Impactos ambientais do Complexo Industrial e Portuário do Pecém. **Revista de tecnologia de Fortaleza**, Fortaleza, n. 19, p. 68-72. 1998.

PITOMBEIRA, Erasmo da Silva. **Levantamento dos Perfis de Praia para avaliação do Impacto Ambiental do Terminal Portuário do PECÉM, no Período de 1996 a 2004 - Relatório Técnico**. 2004.

Porto do Pecém – Complexo Industrial e Portuário do Pecém. **Relatório de Sustentabilidade 2019**. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2021/01/Relatorio-de-Sustentabilidade-Ed.-2019.pdf> Acesso em: 18 out. 2021.

Projeto SMC-Brasil. **Manual de Referência** – Modelo de Correntes por Quebra em Praias (COPLA MC/SP). Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017a. Disponível em: <https://smcbrasil.ihcantabria.com/wp-content/uploads/2019/01/Manual-de-Refer%C3%Aancia-do-COPLA.pdf>. Acesso em: 02 set 2019.

Projeto SMC-Brasil. **Manual do Usuário** – SMC 3.0. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017b. Disponível em: <https://smcbrasil.ihcantabria.com/wp-content/uploads/2019/01/Manual-do-Usu%C3%A1rio-do-SMC-3.0.pdf>. Acesso em: 02 set 2019.

Projeto SMC-Brasil. **Manual do Usuário** – SMC Tools. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017c. Disponível em: <https://smcbrasil.ihcantabria.com/wp-content/uploads/2019/01/Manual-do-Usu%C3%A1rio-do-SMC-Tools.pdf>. Acesso em: 02 set 2019.

QUEIROZ, Liana Rodrigues. **As praias arenosas do estado do Ceará: Relação entre ambiente físico e a estrutura de comunidade em um ambiente tropical**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

QUETZALCÓATL, Omar; GONZÁLEZ, Mauricio, CÁNOVAS, Verônica; MEDINA, Raúl; ESPEJO, Antonio; KLEIN, Antonio Henrique da Fontoura; TESSLER, Moysés Gonzalez; ALMEIDA, Laura Ribas; JARAMILLO, Camilo; GARNIER, Roland; KAKEH, Nabil; GONZÁLEZ-ONDINA, Jose. SMCε, a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast. **Environ. Model. Softw.**, [s. l.], v. 116, p. 131–152, 2019.

RAIZER, Victor. **Optical remote sensing of ocean hydrodynamics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

REBOITA, Michelle Simões; KRUSCHE, Nisia; AMBRIZZI, Tércio; ROCHA, Rosmeri Porfírio da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didática**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

REGUERO, Borja G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, Fernando J.; MÍNGUEZ, Roberto Solana; LOSADA, Iñigo J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 65, p. 38-55, 2012.

RODRIGUES, Tais Kalil; DOMINGUEZ, José Maria Landim. Utilização do Sistema de Modelagem Costeira (SMC - Brasil) no estudo da dinâmica do litoral do Município de Aracaju – Sergipe. **Revista GeoNordeste**, São Cristóvão, ano 28, n. 2, p. 95-116, 2017.

SEP/PR - Secretaria de Portos da Presidência da República. **Plano Mestre - Terminal Portuário do Pecém**. Florianópolis. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/se36-pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

SHCHEPETKIN, Alexander F.; MCWILLIAMS, James C. The regional oceanic modeling system (ROMS) a split-explicit, free-surface, topography following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

SILVA NETO, Cláudio Ângelo da; DUARTE, Cynthia Romariz; SOUTO, Michael Vandesteen Silva; FREIRES, Eduardo Viana; SOUSA, Willamys Rangel Nunes de; SILVA, Maykon Targino da. Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, n. 1, p. 143-155, 2020.

SILVA, Alex Costa da; FAÇANHA, Patrícia; BEZERRA, Cristiane; ARAUJO, Aluisio; PITOMBEIRAS, Erasmo. Características das ondas “Sea” and “Swell” observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography**, Recife, v. 39, n. 2, p. 123–132, 2011.

SILVA, Cleverson Guizan; PATCHINEELAM, Soraya Maia; BAPTISTA NETO, José Antônio; PONZI, Vera Regina Abelin. Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na Linha de Costa. In: BAPTISTA NETO, José Antônio; PONZI, Vera Regina Abelin; SICHEL, Susanna Eleonora (org). **Introdução à Geologia Marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

SILVA, Iracema Reimão; GUIMARÃES, Júnia Kacenenbogen; BITTENCOURT, Abílio Carlos da Silva Pinto; RODRIGUES, Tais Kalil; NETO, Gerson Fernandino de Andrade. Modelagens de clima de ondas e transporte sedimentar utilizando o SMC-Brasil: aplicações para a praia do Forte, litoral norte do estado da Bahia. **Rev. Bras. Geomorfol.**, São Paulo, v. 17, n. 4, p.743-761, 2016.

SILVA, Iracema Reimão; GUIMARÃES, Júnia Kacenenbogen; BITTENCOURT, Abílio Carlos da Silva Pinto; RODRIGUES, Tais Kalil; FERNANDINO, Gerson de Andrade Neto. Avaliação da dinâmica litorânea da região de Baixio/Barra do Itariri, litoral norte do Estado da Bahia, utilizando o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil). **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 44, n. 2, p. 221-234, 2017.

SILVA, Maykon Targino da; LOPES, Débora Nogueira; REBOUÇAS, Iago Silva; FREIRES, Eduardo Viana; SILVA NETO, Cláudio Ângelo da; DUARTE, Cynthia Romariz; SOUTO, Michael Vandesteem Silva. Variação da linha de costa no litoral cearense (1984-2018). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 7, p. 2551-2579, 2019.

SILVA, Paula Gomes. **Exposição à Inundação Costeira nas praias dos Ingleses, Moçambique e Barra da Lagoa, Florianópolis, SC**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SILVEIRA, Fernando Lang; VARRIALE, Maria Cristina. Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis. **Cad. Brás. Ens. Fís.**, Florianópolis, v. 22, n. 2, p. 190-208, 2005.

SOUZA, Cassiano Dias de; SILVA, Rayssa Magdyelli Nogueira da; RODRIGUES, Linara Ivina de Castro; MORORÓ, Emanuel Andrade Albuquerque; DUARTE, Cynthia Romariz; SOUTO, Michael Vandesteem Silva; SABADIA, José Antônio Beltrão. Emprego de Imagens Landsat na Análise Temporal da Linha de Costa da Porção Oeste do Estado do Ceará. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 29, n. 2, p. 181-194, 2016.

SPROVIERI, Felipe Caetano; FONTOURA, José Antonio Scotti. Modelagem Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e no Entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), utilizando o Modelo SMC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n 3, p. 187-195, 2012.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia Sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2003.

SUGUIO, Kenitiro; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 461-479, 1999.

THE OPEN UNIVERSITY. **Waves, Tides and Shallow-Water Processes**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

TOLMAN, Hendrik L. Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. **Parallel Computing**, [s. l.], v. 28, p. 35-52, 2002.

TOMASICCHIO, Giuseppe Roberto; D'ALESSANDO, Felipe; BARBARO, Giuseppe; MALARA, Giovanni. General Longshore Transport Model. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 71, p. 28-36, 2013.

USACE - US Army Corps of Engineers. **Shore Protection Manual**. 4. ed. Washington, DC: USACE, 1984.

UVO, Cíntia Regina Bertacchi; BERNDTSSON, Ronny. Regionalization and Spatial Properties of Ceará State Rainfall in Northeast Brazil. **J. Geoph. Res.**, Singapore, v. 101, p. 4221-4233, 1996.

UVO, Cíntia Regina Bertacchi; NOBRE, Carlos Afonso. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. **Climanálise**, Cachoeira Paulista, v. 4, n. 7, p. 34-40, 1989.

VAN RIJN, Leo C. **Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas**. 1. ed. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.

VIEIRA, Luiz Alberto de Almeida. **Verificação e comprovação das modelagens hidrodinâmica e de transporte de sedimentos na área costeira do porto do Pecém**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

YOUNG, Ian R. **Wind Generated Ocean Waves**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 1999.