



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA



GABRIEL D'ANNUNZIO GOMES JUNIOR

APRIMORAMENTO DO CLIMA DE ONDAS DO SMC COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO  
DA EROSÃO COSTEIRA NO LITORAL DE PERNAMBUCO

RECIFE

2015

GABRIEL D'ANNUZIO GOMES JUNIOR

APRIMORAMENTO DO CLIMA DE ONDAS DO SMC COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO  
DA EROSÃO COSTEIRA NO LITORAL DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de  
Pós-Graduação em Oceanografia, Centro de  
Tecnologia e Geociências da Universidade  
Federal de Pernambuco.

Orientador: Dr. Alex Costa da Silva

RECIFE

2015

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- G633a      Gomes Junior, Gabriel D'Annunzio.  
                Aprimoramento do clima de ondas do SMC como subsídio ao  
                estudo da erosão no litoral de Pernambuco / Gabriel D'Annunzio  
                Gomes Junior. - Recife: O Autor, 2015.  
                149 f., il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Alex Costa da Silva.  
                Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
                CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2015.  
                Inclui Referências.
1. Oceanografia. 2. Ondas. 3. Erosão Costeira. 4. Ondógrafo.  
                5. SMC. 6. Clima de Ondas. 7. Método de Particionamento.  
                I. Silva, Alex Costa da (Orientador). II. Título.

551.46 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2015-276

GABRIEL D'ANNUNZIO GOMES JUNIOR

APRIMORAMENTO DO CLIMA DE ONDAS DO SMC COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO  
DA EROSÃO COSTEIRA NO LITORAL DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de  
Pós-Graduação em Oceanografia, Centro de  
Tecnologia e Geociências da Universidade  
Federal de Pernambuco. Orientada pelo  
Professor Dr. Alex Costa da Silva.

Aprovada pela comissão examinadora em 26 de agosto de 2015.

---

Dr. Alex Costa da Silva

---

Dra. Carmen Medeiros Limongi

---

Dr. Valdir do Amaral Vaz Manso

RECIFE, 2015

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por ter me protegido e aberto os meus caminhos, e a Jesus Cristo o meu mestre e guia.

Aos meus pais, Gabriel D'Annunzio e Jadiceli Maria, minha esposa Ana Regina e minhas irmãs, Denise Nancy, Colette Dulce e Nicole Louise pelo apoio e incentivo à realização deste mestrado.

Ao professor Dr. Alex Silva pela orientação e por tornar possível a oportunidade de realizar este mestrado, além da confiança depositada em mim ao me permitir ser o guardião e manipulador dos dados do ondógrafo.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite e contribuírem da melhor forma para o enriquecimento deste trabalho.

A todos da minha família e demais pessoas que direta ou indiretamente me incentivaram e contribuíram para minha formação e realização deste trabalho.

Aos funcionários do departamento de oceanografia, em especial a André Cordeiro e Myrna Lins, pelo o apoio sem o qual não seria possível a realização deste mestrado.

Aos professores do departamento de oceanografia por todo o conhecimento que me foi passado.

Aos meus colegas estudantes de mestrado e doutorado do departamento, especialmente a Pedro, Patrícia e Leonardo do Lofec.

A todos os meus colegas de trabalho na Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura do Ipojuca (atual SEDEMA), especialmente aos meus chefes, Terezinha Uchôa e Vinícius Sales, pela paciência e cooperação que tiveram comigo durante o tempo que eu cursei este mestrado, bem como pelo companheirismo e amizade de todos no dia a dia do trabalho.

## RESUMO

Existe uma crescente atenção voltada para o tema erosão costeira, devido principalmente à mudança climática de causas antrópicas, que está induzindo ao lento e gradual aumento do nível dos oceanos de forma irreversível a curto prazo, de acordo com a grande maioria dos cientistas do clima. Outro fator que influencia no aumento do risco de erosão costeira é a ocupação antrópica desordenada da área de pós-praia, que serve como proteção natural, bem como reserva de sedimentos para a área de praia, e que está constantemente sendo modificada pela ação das ondas e da corrente costeira. Este trabalho possui dois focos principais que estão interconectados. O primeiro trata do estudo de um caso de intervenção antrópica numa área de praia altamente suscetível à erosão costeira, numa zona urbana densamente povoada no litoral da zona metropolitana do Recife. Esta intervenção consiste na construção de um quebra-mar, com a intenção de proteger esta área de praia resultou na transferência da problemática da erosão costeira para a praia ao Norte. Numa segunda tentativa de resolver o problema, foi adotada uma terceira configuração que aparentemente teve um impacto positivo na prevenção da erosão costeira. Estudou-se os três cenários de configuração deste quebra-mar, utilizando-se de um pacote de software de simulação de ondas, correntes costeiras e transporte de sedimento, com o objetivo específico de se estudar, testar e encontrar soluções que possam eliminar a erosão costeira. O segundo foco deste trabalho trata-se de estudar o clima de ondas da região, através de medições feitas por um ondógrafo direcional durante um período de três anos. Para esta finalidade, desenvolveu-se uma metodologia de classificação das ondas a partir do espectro direcional, obtido através das medições, de forma a se distinguir com mais clareza as características de cada sistema de ondas que fazia parte deste espectro. Após esta etapa foi feita uma comparação entre o clima de ondas obtido através das medições, com o clima de ondas que faz parte da base de dados que acompanha o pacote de software utilizado na primeira etapa deste trabalho, de forma a validar o uso do software como uma ferramenta confiável no estudo do impacto da erosão. O resultado da comparação foi que o software possui uma base de dados confiável, mas que precisa de alguns ajustes para obter uma melhor descrição do clima de ondas da região.

Palavras-chave: Ondas. Erosão Costeira. Ondógrafo. SMC. Clima de ondas. Particionamento.

## **ABSTRACT**

There is increasing attention on the coastal erosion issue, mainly due to anthropogenic causes, first on the climate change, which led to the slow and gradual sea level rise, and also by the irregular occupation of the post-beach area, which serves as a natural protection and a sediment reserve to the beach area, which is constantly being modified by wave action and coastal currents. This work has two main focuses which are interconnected. The first is the study of a human intervention case in a beach area highly susceptible to coastal erosion in a densely populated urban area on the coast of the metropolitan area of Recife. This intervention, made by installing a breakwater with the intention to protect this beach area, but resulted in the transfer of the coastal erosion problem to the northern beach. In a second attempt to solve this problem, it was adopted a third configuration that apparently had a positive impact on the prevention of the coastal erosion. These three different breakwater configuration scenarios were studied, using a software package that simulates waves, coastal currents and sediment transport, with the specific objectives of studying, testing and finding solutions in order to eliminate the coastal erosion. The second focus of this work is to study the wave climate of the region, through the measurements of a directional wave buoy over a period of three years. For this purpose it was developed a practical wave partitioning method to be applied on the measured directional spectra, in order to more clearly distinguish the characteristics of each wave system that is part of the spectrum. After this step, a comparison was made between the wave climate obtained through the buoy measurements, and the wave climate obtained through the software package, used in the first stage of this work, in order to validate the use of this software as a reliable tool in the study of the coastal erosion impact. The result of this comparison is that the software has a reliable database, but it needs some tweaking to get a better description of the region wave climate.

**Keywords:** Waves. Coastal erosion. Wave buoy. SMC. Wave climate. Partitioning.

## LISTA DE FIGURAS

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 -  | Área de estudo, abrangendo os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Ipojuca, no litoral Sul do estado de Pernambuco ( NE - Brasil ). Estão assinalados a praia de Candeias e o porto de Suape, ao largo do qual foi fundeado o ondógrafo UFPE01. Projeção UTM, zona 25S, datum horizontal: SIRGAS 2000 .....                                                                                                                                                                             | 24 |
| Figura 2.2 -  | Tábua de marés para o porto de Suape dos dias 23 a 31 de agosto de 2015 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 2.3 -  | (a) Série temporal e (b) histograma de maré astronômica, fornecido pelo módulo IH-Data, baseado nos dados de 60 anos do GOT ( <i>Global Ocean Tides</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 30 |
| Figura 2.4 -  | (a) Série de tempo e (b) histograma da maré meteorológica, fornecida pelo módulo IH-Data, baseado na reanálise de 60 anos que faz parte da base de dados do GOS ( <i>Global Ocean Surge</i> ..                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Figura 2.5 -  | Observações de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água obtida em uma estação de coleta realizadas no litoral de Pernambuco, durante duas campanha amostrais realizadas em (a) novembro/2010 e (b) maio/2011 .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 32 |
| Figura 3.1 -  | Esquema dos módulos e sub-módulos que compõem o pacote de software do SMC-Brasil .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 39 |
| Figura 3.2 -  | Caracterização do clima de ondas para o ponto de águas intermediárias (ponto DOW) utilizado como a fonte de energia de ondas a serem propagadas para a região costeira através do módulo SMC. (a) Série temporal de altura significativa das ondas $H_s$ . (b) Rosa direcional de $H_s$ . (c) Probabilidades de $H_s$ e valores de $H_s$ para cada porcentagem de probabilidade. (d) Probabilidade de não exceder $H_s$ . (e) Rosa direcional de $T_p$ . (f) Localização do ponto DOW..... | 41 |
| Figura 3.3 -  | (a) Função de densidade de probabilidade (FDP) conjunta ( $H_s$ e $T_p$ ) dos estados de mar no ponto DOW escolhido para o estudo. (b) Densidade de período de pico associada a $H_{S50\%}$ e (c) extremo $H_{S12}$ . (d) Altura significativa para o clima de ondas típico ( $H_{S50\%}$ ) e extremo ( $H_{S12}$ ). (e) Percentis de probabilidade de ondas para cada faixa de $H_s$ e $T_p$ das ondas .....                                                                              | 42 |
| Figura 3.4 -  | Probabilidades de valores de $H_s$ e $T_p$ para o ponto DOW escolhido para obter os dados a serem propagados para o litoral .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 43 |
| Figura 3.5 -  | Classificação dos estados de mar a serem propagados para se estimar o transporte anual de sedimentos. Cada hexágono representa um estado de mar com as suas características de $H_s$ , $T_p$ , direção média ( $\Theta$ ), além da probabilidade de ocorrência dos mesmos (de acordo com a escala vertical da esquerda) .....                                                                                                                                                              | 44 |
| Figura 3.6 -  | Simulação do transporte de sedimentos anual para cada perfil de praia no cenário atual da área de estudo. As setas em bege indicam a direção e o transporte médio, enquanto que a seta marrom indica a direção e a intensidade do fluxo médio de energia .....                                                                                                                                                                                                                             | 46 |
| Figura 3.7 -  | Comparação entre: (a) batimetria regenerada com os dados do MAI (pontos azuis na figura) e (b) os dados da Marinha (pontos em verde da figura) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 48 |
| Figura 3.8 -  | Exemplo do resultado da modelagem usando o Oluca para o regime de ondas típico na região, resultado para a (a) maré seca, (b) maré meia e (c) maré cheia .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 49 |
| Figura 3.9 -  | Discretização do espectro de ondas, a distribuição contínua do espectro é simulada através de várias componentes individuais na direção e na frequência (linhas verticais) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 50 |
| Figura 3.10 - | Foto de satélite da praia de Candeias, mostrando a posição de uma grande formação de arrecife de franja, ao Sul da área de estudo (B), observa-se também uma formação isolada de arrecife, conhecida como Abreus (A), e um canal profundo (C) por onde passam as ondas que atingem a área sob impacto da erosão .....                                                                                                                                                                      | 54 |
| Figura 3.11 - | Geometria da grade utilizada na propagação das ondas (retângulo com borda vermelha). A seta vermelha na borda externa da grade (águas profundas) indica a direção principal de propagação. A borda interna está sobre a costa, próxima à área de estudo. Os eixos X e Y estão indicados, a grade possui 220 linhas e 300 colunas .....                                                                                                                                                     | 55 |
| Figura 3.12 - | Espectros TMA com parâmetros constantes ( $H_s = 3$ m, $h = 20$ m, $f_p = 0.1$ Hz) variando apenas o parâmetro de alargamento ( $\gamma = 2, 6, 10, 15$ e $20$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 57 |
| Figura 3.13 - | Espectros TMA ( $H_s = 3$ m, $\gamma = 3.5$ , $f_p = 0.1$ Hz) para diferentes profundidades ( $h(m) = 10, 20, 40, 60, \infty$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 58 |
| Figura 3.14 - | Espectro direcional para diferentes larguras de espectro ( $\sigma_m = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ e $30^\circ$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 59 |
| Figura 3.15 - | Modos de simulação do EROS. No modo ESI (esquerda) o modelo considera as condições hidrodinâmicas como constantes durante toda a simulação. No modo MEM à direita o modelo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|               | calcula a variação das condições hidrodinâmicas para cada intervalo de tempo morfológico, atualizando as condições iniciais para o próximo passo de simulação .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 62 |
| Figura 3.16 - | Resultado das simulações de transporte de sedimentos através do modelo Eros no modo ESI, para o regime de ondas extremo ( $H_s = 2,29$ m; $T_p = 12,12$ s; $D_p = 112^\circ$ ) e maré alta (2,50 m) para os três cenários diferentes da área de estudo: (A) sem dique de proteção; (B) com dique contínuo; (C) com dique seccionado .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 63 |
| Figura 4.1 -  | Localização da área de estudo, no litoral do município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana do Recife, estado de Pernambuco. O retângulo azul delinea a área de estudo com o quebra-mar no formato antigo, o retângulo cinza é o contorno da grade de propagação utilizada no SMC .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 68 |
| Figura 4.2 -  | A praia de Candeias mostrando (A) o quebra-mar modificado na configuração atual, (B) o arrecife isolado conhecido como Abreus, (C) a barra dos Abreus e (D) a formação de arrecife de franja que protege a maior parte da praia .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 70 |
| Figura 4.3 -  | O litoral de Jaboatão dos Guararapes em 1997, mostrando (A) a Barra dos Abreus e (B) uma pequena área de pós-praia e diques de contenção para proteger os edifícios que invadiram a zona de praia .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 71 |
| Figura 4.4 -  | O litoral de Jaboatão dos Guararapes, mostrando a ocupação de alta densidade da área de estudo (A) o quebra-mar destacado, instalado na região em sua primeira configuração, (B) um pequeno espigão, (C) as áreas já esgotadas de sedimento protegidas por diques de contenção, (D) a saliência formada por sedimentos imobilizados e (e) a área erodida ao norte .....                                                                                                                                                                                                                            | 72 |
| Figura 4.5 -  | Configuração do quebra-mar em uma maré baixa de sizígia (31 de março de 2014) (A) três das seções restantes quebra-mar, (B) uma saliência (C) uma baía formada pelo sedimento rearranjado pelas ondas e correntes, apenas alguns meses depois da reconfiguração do quebra-mar .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 73 |
| Figura 4.6 -  | A rosa direcional de $H_s$ , calculada pelo componente Ameva .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 74 |
| Figura 4.7 -  | Caracterização maré astronômica (A) série histórica e (B) histograma .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 75 |
| Figura 4.8 -  | Caracterização da maré meteorológica: (A) série histórica e (B) histograma .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 75 |
| Figura 4.9 -  | As três configurações diferentes da área de estudo (A) sem quebra-mar, (B) antigo quebra-mar e (C) quebra-mar atual. Acima a batimetria, abaixo um perfil batimétrico com a profundidade exagerada ao longo do eixo do quebra-mar .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 76 |
| Figura 5.1 -  | Ondógrafo Waverider MKIII utilizado para o experimento .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 81 |
| Figura 5.2 -  | Localização do ondógrafo UFPE01, fundeado em frente ao porto de Suape, coordenadas em UTM, zona 25L .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 82 |
| Figura 5.3 -  | Perfil esquemático da rampa do fundo em frente ao ondógrafo. Escala vertical exagerada .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 83 |
| Figura 5.4 -  | Série de dados de alturas em metros, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 86 |
| Figura 5.5 -  | Série de dados de períodos de pico, em segundos, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 86 |
| Figura 5.6 -  | Série de dados de direção de pico, em graus, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 87 |
| Figura 5.7 -  | Representação gráfica da distribuição espectral para uma hora de amostragem de ondas que passaram pelo ponto de fundeio do ondógrafo. Os círculos concêntricos indicam os vários períodos de ondas, enquanto que as direções das ondas são indicadas por linhas que saem do círculo externo em direção ao ponto central. A energia relacionada a cada valor de direção e período de ondas é indicado pela escala de cores .....                                                                                                                                                                    | 88 |
| Figura 5.8 -  | Distribuição da energia das ondas no domínio das frequências (Hz), com os picos de máximos (em amarelo) e de mínimos (em verde) de energia encontrados na etapa 1 do processamento ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 91 |
| Figura 5.9 -  | Etapa 2 do processamento, que é o corte das frequências mais altas, correspondendo a cauda do espectro de energia, na frequência de cauda $f_T = 0.2$ Hz .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 92 |
| Figura 5.10 - | Em (A) com base na velocidade e na direção do vento (vetor vermelho), a frequência de pico inicial foi calculada (quadrado laranja), e uma frequência de corte inicial. Numa área delimitada pela frequência de corte inicial e pela frequência de cauda (linha laranja), é efetuada uma varredura pela nova frequência de pico das vagas (quadrado amarelo). Em (B) após determinar uma nova frequência de corte das vagas ( $f_c$ ) (arco laranja), o sistema de vagas (W) compreende toda a energia delimitada pela frequência de corte ( $f_c$ ). Determina-se então o pico do swell (S) ..... | 95 |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.11 - | Distribuição da energia das ondas no domínio das frequências após a execução de todos os processos. O pico em magenta é o de vagas, o pico em amarelo é o de swell, e a marca em laranja é a frequência de corte de vagas, que determina a separação entre a energia de vagas e de swell .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 96  |
| Figura 6.1 -  | Os resultados das simulações para a configuração inicial do quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas .....                                                                                                                                                                             | 100 |
| Figura 6.2 -  | Os resultados das simulações para a configuração atual do quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas .....                                                                                                                                                                               | 101 |
| Figura 6.3 -  | Os resultados das simulações para o cenário sem quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas .....                                                                                                                                                                                         | 102 |
| Figura 6.4 -  | O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração do quebra-mar antigo. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com uma seta magenta. Os transportes para o norte são negativos e representados em amarelo. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em $m^3/ano$ ) .....                                                                                        | 106 |
| Figura 6.5 -  | O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração do quebra-mar atual. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com uma seta magenta. Os transportes para o norte são negativos e representados em amarelo. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em $m^3/ano$ ) .....                                                                                         | 107 |
| Figura 6.6 -  | O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração sem o quebra-mar. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com uma seta magenta. Os transportes para o norte são negativos e representados em amarelo. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em $m^3/ano$ ) .....                                                                                            | 108 |
| Figura 6.7 -  | Nas figuras o arco laranja indica a frequência de corte, o quadrado amarelo o pico do sistema de swell, o quadrado vermelho é o pico do sistema de vagas calculado a partir da velocidade do vento. O quadrado ciano é o pico final do sistema de vagas, calculado pelo método de particionamento, e o quadrado laranja vazado é o pico fornecido pelo fabricante. Em (a) o pico calculado coincidiu com o pico do programa do fabricante. Em (b) o pico do programa do fabricante ficou muito distante do pico calculado pelo algoritmo, mais do que um desvio padrão de distância, esta amostra então foi descartada ..... | 110 |
| Figura 6.8 -  | Função de densidade de probabilidade (FDP), de altura significativa (m) para toda a série de dados e uma distribuição Gaussiana que se ajusta aos dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 111 |
| Figura 6.9 -  | FDP de período de pico (s) para toda a série de dados e sua respectiva probabilidade de ocorrência .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 112 |
| Figura 6.10 - | Rosa de distribuição das direções na altura significativa (HS) e no período de pico (TP) para o somatório a energia das ondas de toda a série de dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 113 |
| Figura 6.11 - | Média e desvio padrão da altura significativa e do período primário para as partições de vagas e swell, e para a energia espectral total .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 115 |
| Figura 6.12 - | Rosas direcionais de altura significativa e o período de pico, que representam a energia de vagas (a e b) e swell (c e d) para toda a série de dados. Quase um terço de toda a energia de vagas vem do quadrante sudeste, cerca de um quinto vem de leste-sudeste, e cerca de um décimo da energia vem do quadrante sul-sudeste. Quase todas as vagas tem períodos de pico de até 10 s, enquanto que as ondas de swell têm períodos de pico na sua maioria superiores a 10s, prevalecendo as                                                                                                                                 |     |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|               | ondas provenientes dos quadrantes sul e sul-sudeste, com até 1 metro de altura significativa .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 116 |
| Figura 6.13 - | FDP mostrando a porcentagem de energia relativa a soma de todas as componentes (linha contínua), bem como a porcentagem das componentes de vagas (linha pontilhada) e de <i>swell</i> (linha tracejada) de toda a série de dados em relação à frequência de pico das amostras. A linha vertical indica o ponto em que estatisticamente se dá a divisão entre a distribuição das energias de vagas e as de <i>swell</i> , que se situa aproximadamente em 0,1 Hz ..... | 120 |
| Figura 6.14 - | FDP mostrando a porcentagem de energia relativa a soma de todas as componentes (linha contínua), bem como a porcentagem das componentes de vagas (linha pontilhada) e de <i>swell</i> (linha tracejada) de toda a série de dados em relação à direção de pico das amostras. A linha vertical indica o ponto em que estatisticamente se dá a divisão entre a distribuição das energias de vagas e as de <i>swell</i> , que se situa aproximadamente em 150° .....      | 121 |
| Figura 6.15 - | Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do verão (janeiro a março) de toda a série de dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 123 |
| Figura 6.16 - | Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do outono (abril a junho) de toda a série de dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 124 |
| Figura 6.17 - | Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do inverno (julho a setembro) de toda a série de dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 126 |
| Figura 6.18 - | Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses de primavera (outubro a dezembro) de toda a série de dados .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 127 |
| Figura 6.19 - | Pontos DOW de previsão de ondas próximas à costa, que fazem parte da base de dados do SMC-Brasil. O ponto em destaque foi escolhido para se extrair os dados do clima de ondas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 130 |
| Figura 6.20 - | Comparação do histograma de $H_s$ do ondógrafo (linha laranja), com o histograma de $H_s$ fornecido pelo SMC-Brasil, as imagens estão superpostas e os valores de cada escala coincidem .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 131 |
| Figura 6.21 - | Comparação do histograma de $T_p$ do ondógrafo (linha laranja), com o histograma de $T_p$ fornecido pelo SMC-Brasil (barras azuis) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 132 |
| Figura 6.22 - | Função de Densidade de Probabilidade dos períodos de pico associados ao HS12 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 133 |
| Figura 6.23 - | Comparação do histograma de $D_p$ do ondógrafo (linha laranja), com o histograma de $D_p$ fornecido pelo SMC-Brasil (barras azuis) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 134 |
| Figura 6.24 - | Figura 6.24 - Resultado da simulação de um clima de ondas de <i>swell</i> com altura de 1,0 m; período de 12 s e direção de 158°. (a) Altura Significativa em m; (b) Correntes geradas pelas ondas, em m/s; (c) transporte de sedimentos resultante da interação das correntes com a arrebentação das ondas, em m <sup>3</sup> /dia .....                                                                                                                             | 137 |

## LISTA DE TABELAS

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.1 -  | A probabilidade do clima de ondas calculado pelo componente Ameva. As ondas de ESE são predominantes com mais de 75% de probabilidade .....                                                                                                                          | 74  |
| Tabela 4.2 -  | Cenários simulados da área de estudo .....                                                                                                                                                                                                                           | 77  |
| Tabela 6.1 -  | Valores de transporte de sedimentos, calculados para a configuração atual do quebra-mar e o cenário sem o quebra-mar, para os perfis de praia dispostos em uma ordem de norte para sul, medido em 1.000 m <sup>3</sup> por ano (valores arredondados) .....          | 104 |
| Tabela 6.2 -  | Valores extremos e valores estatísticos da média (med.) e desvio padrão (desvp.) dos principais parâmetros de ondas: Altura significativa (HS), período de pico (TP) e direção de pico (DP), listados para cada ano de medição e para todo o conjunto de dados ..... | 111 |
| Tabela 6.3 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para toda a série de dados .....                                                                                                                         | 114 |
| Tabela 6.4 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para toda a série de dados .....                                                                                                                               | 114 |
| Tabela 6.5 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para as vagas em toda a série de dados .....                                                                                                             | 117 |
| Tabela 6.6 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para as vagas em toda a série de dados .....                                                                                                                   | 117 |
| Tabela 6.7 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para os swells em toda a série de dados .....                                                                                                            | 118 |
| Tabela 6.8 -  | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para os swells em toda a série de dados .....                                                                                                                  | 118 |
| Tabela 6.9 -  | Média (med.) e desvio padrão (desvp.) para os valores de altura significativa (HS), período de pico (TP) e direção de pico (DP) para os sistemas de vagas e de swell, computados para toda a série de dados .....                                                    | 119 |
| Tabela 6.10 - | Média (med.) e desvio padrão (desvp.) para os valores de altura significativa (HS), período de pico (TP) e direção de pico (DP) para o somatório de energias computados para cada estação do ano .....                                                               | 119 |
| Tabela 6.11 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o verão .....                                                                                                                                       | 122 |
| Tabela 6.12 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o verão .....                                                                                                                                             | 122 |
| Tabela 6.13 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o outono .....                                                                                                                                      | 123 |
| Tabela 6.14 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o outono .....                                                                                                                                            | 124 |
| Tabela 6.15 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o inverno .....                                                                                                                                     | 125 |
| Tabela 6.16 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o inverno .....                                                                                                                                           | 125 |
| Tabela 6.17 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para a primavera .....                                                                                                                                   | 126 |
| Tabela 6.18 - | Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para a primavera .....                                                                                                                                         | 127 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Parâmetros de ondas

$C$  : Celeridade da onda

$C_g$  : Celeridade do grupo

$D(\Theta)$  : Dispersão direcional

$\eta$  : Perfil da onda

$E(f, \Theta)$  : Espectro frequencial distribuído nas dimensões das frequências e função das direções

$E_{JON}$  : Espectro Jonswap

$E_{TMA}$  : Espectro TMA (BOUWS *et al.*, 1985)

$D_p$  : Direção de Pico das Ondas

$\gamma$  : Fator de alargamento do pico

$k$  : Número de onda

$\Theta$  : Direção média das ondas

$\Theta_m$  : Direção média das ondas

$f$  : Frequência linear

$f_c$  : Frequência de corte do espectro

$f_T$  : Frequência da cauda do espectro

$f_p$  : Frequência de pico das ondas

$H_s$  : Altura significativa das ondas

$H_{Sp}$  : Altura significativa de uma partição do espectro de ondas

$H_{S50\%}$  : Altura significativa para o clima de ondas típico que ocorre por pelo menos metade (50 %) do ano

$H_{S12}$  : Altura significativa para o clima de ondas extremo que ocorre durante 12 horas no ano

$\sigma$  : Frequência angular

$\sigma_m$  : Largura do espectro (graus)

$S(f, \Theta)$  : Espectro direcional distribuído nas dimensões das frequências e das direções

TMA : TEXEL storm, MARSEN, ARSLOE (BOUWS *et al.*, 1985)

$T_p$  : Período de Pico das Ondas

$T_{p50\%}$  : Período de pico para o clima de ondas típico que ocorre por pelo menos metade (50 %) do ano

$T_{p12}$  : Período de pico para o clima de ondas extremo que ocorre durante 12 horas no ano

$U_{10}$  : Velocidade do vento a 10 metros de altitude

$W_h$  : Frequência angular normalizada para a profundidade  $h$

### Relativos ao SMC-Brasil

Ameva : Análise Matemática Estatística de Variáveis Ambientais

AECID : Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento

Copla : Modelo de corrente de praias

D<sub>50</sub> : Tamanho médio do grão de sedimento

DOW : Downscaling Ocean Waves

Eros : Modelo de erosão costeira

g : Aceleração da gravidade

GOS : Global Ocean Surge

GOT : Global Ocean Tides

GOW : Global Ocean Waves

h : Profundidade

IH-Data : Base de dados do Instituto de Hidráulica da Cantabria

MaxDiss : Técnica de máxima similaridade

MMT : Módulo de Modelagem do Terreno

MOPLA : Módulo de morfodinâmica de praias

MRF : Modelo que resolve a fase

MSLW : Maré baixa média de sizígia

Oluca : Modelo de ondas costeiras

Q+ : Transporte anual médio de sedimento para a direita de um observador posicionado na praia, olhando para o oceano

Q- : Transporte anual médio de sedimento para a esquerda de um observador posicionado na praia, olhando para o oceano

SMC : Sistema de Modelagem Costeira

SMC-3 : Sistema de Modelagem Costeira versão 3

SMC-Brasil : Sistema de Modelagem Costeira adaptado a costa brasileira

SMC-Tools : Módulo de Ferramentas do Sistema de Modelagem Costeira

SWAN : Simulating Waves Nearshore

## **Outras abreviaturas**

1D : Uma dimensão

2D : Duas dimensões

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

ASAS : Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul

BHI : Organização Hidrográfica Internacional

CIRM : Comissão Interministerial para os Recursos do Mar

CNPq : Conselho Nacional de Pesquisas

CPRH : Agência Estadual de Meio Ambiente

ESE : Este-Sudeste

DAAD : German Academic Exchange Service

DHN : Diretoria de Hidrografia e Navegação

desvp. : Desvio padrão da amostra

EXCEED : Excellence Center for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries

FDP : Função de Densidade de Probabilidade

GFS : Global Forecast System

GOOS/Brasil : Global Ocean Observing System - Brasil

GPS : Global Positioning System

GT : Grupo de Trabalho

HF : High Frequency

MAI : Monitoramento Ambiental Integrado

MCONDAS/NE : Monitoramento do Clima de Ondas da Costa Nordeste Brasileira

med. : Média da amostra

MMA : Ministério do Meio Ambiente

NE : Nordeste

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NR : Nível de Redução

ROMS : Regional Ocean Modeling System

SEMAS : Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do estado de Pernambuco

SPU : Secretaria do Patrimônio da União

TSM : Temperatura da Superfície do mar

UFPE : Universidade Federal de Pernambuco

UFSC : Universidade Federal de Santa Catarina

USP : Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1.....                                         | 18 |
| INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....                            | 18 |
| 1.1 INTRODUÇÃO .....                                    | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS .....                                     | 22 |
| 1.2.1 Objetivos Gerais .....                            | 22 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....                       | 22 |
| Capítulo 2.....                                         | 23 |
| CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....                  | 23 |
| 2.1 ÁREA DE ESTUDO .....                                | 23 |
| 2.2 GEOLOGIA.....                                       | 24 |
| 2.3 CLIMA .....                                         | 27 |
| 2.4 VENTOS.....                                         | 27 |
| 2.5 MARÉS .....                                         | 28 |
| 2.5 Maré astronômica .....                              | 28 |
| 2.5.2 Maré meteorológica.....                           | 30 |
| 2.6 PROPRIEDADES TERMOHALINAS .....                     | 31 |
| 2.7 DINÂMICA COSTEIRA .....                             | 32 |
| 2.7.1 Correntes .....                                   | 32 |
| 2.7.2 Ondas.....                                        | 33 |
| 2.8 EROÇÃO COSTEIRA.....                                | 35 |
| Capítulo 3.....                                         | 38 |
| EMBASAMENTO TEÓRICO DO SMC-BRASIL .....                 | 38 |
| 3.1 DESCRIÇÃO DO SMC-BRASIL .....                       | 38 |
| 3.2 O MÓDULO SMC-TOOLS .....                            | 39 |
| 3.2.1 Sub-módulo de pré-processo .....                  | 39 |
| 3.2.2. Sub-módulo de pós-processo.....                  | 43 |
| 3.3 MÓDULO SMC .....                                    | 46 |
| 3.3.1 Sub-módulo de Modelagem do Terreno(MMT) .....     | 47 |
| 3.3.2 Programa de morfodinâmica de praias (MOPLA) ..... | 48 |
| 3.4 MODELO OLUCA .....                                  | 49 |
| 3.4.1 Equação da pendente suave.....                    | 51 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.2 Arrebentação das ondas .....                                                                                                 | 53  |
| 3.4.3 Áreas com arrecifes .....                                                                                                    | 54  |
| 3.4.4 Espectro bidimensional de entrada .....                                                                                      | 55  |
| 3.4.5. Parâmetros de entrada do espectro bidimensional .....                                                                       | 56  |
| 3.5 MODELO COPLA .....                                                                                                             | 59  |
| 3.6 MODELO EROS .....                                                                                                              | 61  |
| CAPÍTULO 4.....                                                                                                                    | 66  |
| ESTUDO DE CASO DE EROSÃO COSTEIRA EM CANDEIAS, JABOATÃO DOS<br>GUARARAPES - PE .....                                               | 66  |
| 4.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                               | 66  |
| 4.2 A PRAIA DE CANDEIAS .....                                                                                                      | 67  |
| 4.2.1 Proteção natural dos arrecifes.....                                                                                          | 69  |
| 4.2.2 Invasão do Litoral.....                                                                                                      | 70  |
| 4.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO REGIONAL .....                                                                                         | 73  |
| 4.3.1 Clima de Ondas .....                                                                                                         | 73  |
| 4.3.2 Caracterização do Nível do Mar.....                                                                                          | 74  |
| 4.3.3 Características dos sedimentos.....                                                                                          | 76  |
| 4.3.4 Dados de topografia.....                                                                                                     | 76  |
| CAPÍTULO 5.....                                                                                                                    | 78  |
| DADOS OBSERVACIONAIS - ONDÓGRAFO DIRECIONAL.....                                                                                   | 78  |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                               | 78  |
| 5.2 LOCALIZAÇÃO.....                                                                                                               | 81  |
| 5.3 MEDIÇÃO DE ONDAS .....                                                                                                         | 83  |
| 5.4 SÉRIE DE DADOS .....                                                                                                           | 85  |
| 5.5 PARTICIONAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL .....                                                                                | 87  |
| CAPÍTULO 6.....                                                                                                                    | 97  |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                                                                      | 97  |
| 6.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO ESTUDO DE CASO<br>DE EROSÃO COSTEIRA EM CANDEIAS, JABOATÃO DOS GUARARAPES -<br>PE ..... | 97  |
| 6.1.1 Resultados das ondas, correntes e transporte de sedimentos.....                                                              | 97  |
| 6.1.2. Média anual de transporte de sedimentos.....                                                                                | 99  |
| 6.1.2 Discussão.....                                                                                                               | 108 |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2 RESULTADOS DO MÉTODO DE PARTICIONAMENTO E DA COMPARAÇÃO ENTRE OS CLIMAS DE ONDAS DO ONDÓGRAFO E DO SMC..... | 109 |
| 6.2.1 Eficácia do Método de Particionamento Modificado.....                                                     | 109 |
| 6.2.2 Caracterização Geral do Clima de Ondas.....                                                               | 110 |
| 6.2.3 Caracterização do Swell e das Vagas .....                                                                 | 114 |
| 6.2.4 Comparação entre os Climas de Ondas do Ondógrafo e do SMC .....                                           | 128 |
| 6.2.5 Simulação do Clima de Ondas Extremo de Swell.....                                                         | 135 |
| 6.2.6 Discussão.....                                                                                            | 137 |
| CAPÍTULO 7.....                                                                                                 | 140 |
| CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                                                                            | 140 |
| 7.1 CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA A EROSÃO COSTEIRA EM JABOATÃO DOS GUARARAPES.....                  | 140 |
| 7.2 CONCLUSÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE OS CLIMAS DE ONDAS.....                                                       | 141 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                               | 144 |

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

#### 1.1 INTRODUÇÃO

O litoral do estado de Pernambuco, situado no leste da região nordeste do Brasil, conhecido como Saliente Nordestino, é caracterizado por planícies costeiras de baixas altitudes, apresentando inclusive em vários pontos cotas inferiores ao nível da preamar. Na maior parte este litoral é composto de praias arenosas de declive suave, alternadas com zonas estuarinas. Na zona submarina a presença de arenitos em algumas áreas servem como barreira de proteção natural contra a ação erosiva das ondas, contudo a plataforma continental é relativamente curta (aproximadamente 35 km de largura) (KEMPF, 1969; MANSO; CORREA; GUERRA, 2003), acarretando em pouca dissipação da energia das ondas oceânicas antes de atingirem a zona de arrebentação.

As ondas aqui referidas são as ondas geradas pelos ventos que sopram sobre a superfície do oceano, cuja principal força restauradora é a força gravitacional terrestre, denominadas de ondas superficiais de gravidade (WRIGHT; COLLING; PARK, 1999). No litoral, estas ondas são a principal força motora das correntes costeiras, fator que, em conjunto com a suspensão dos sedimentos provocado pela arrebentação das ondas, resulta no deslocamento destes sedimentos em suspensão na direção da corrente resultante (VIDAL; LOSADA; MEDINA, 1995).

As praias têm grande valor como áreas de lazer, contudo o seu principal valor numa perspectiva geológica, é de um sistema de defesa natural para a costa, que está diretamente exposta a um constante risco de erosão devido à ação das ondas e marés. Problemas de erosão

costeira são recorrentes nesta região, como resultado do desenvolvimento costeiro não planejado, que não impediu a ocupação de dunas que servem como reserva de sedimentos para o dinâmico sistema praial, combinado com as características meteo-oceanográficas locais (MANSO *et al.*, 2006).

Nos últimos anos o contínuo aquecimento global, detectado pelos cientistas que se dedicam a estudar o clima, sendo que uma absoluta maioria deles já está convencida de que este aquecimento é causado por ações antrópicas. Em 2012 o Instituto Goddard de Estudos Espaciais publicou o estudo “CMIP5 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*” (2012), concluindo que não somente a emissão de gás carbônico na atmosfera tem uma forte correlação com o aquecimento global, mas também que o processo de aquecimento é contínuo e sua reversão não acontecerá simplesmente com o corte das atuais emissões. Dentre os principais efeitos do aquecimento global estão o aumento da quantidade e da intensidade das tempestades, bem como o derretimento do gelo encontrado nas geleiras e nas calotas polares, provocando o lento e gradual aumento do nível de todos os oceanos, que já está sendo observado em todo o mundo.

O aquecimento global tende a piorar o risco da erosão costeira, à medida que há um aumento da quantidade e da intensidade das tempestades, e o mar avança em direção ao continente, fazendo com que as formações de arenito comuns no litoral de Pernambuco, que funcionam como barreiras naturais de proteção da praia, fiquem mais tempo submersas a uma profundidade cada vez maior, permitindo que cada vez mais energia de ondas ultrapasse esta barreira natural e dissipe cada vez mais energia na praia (COSTA; MALLMANN, 2010).

Num esforço para tentar minimizar os impactos da erosão costeira, bem como propor soluções a curto, médio e longo prazo, o Governo Federal em 2011 criou o projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira

(GONZALEZ, 2011d), baseado em metodologias e ferramentas numéricas desenvolvidas pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantábria, na Espanha, e transferidas para o Ministério do Meio Ambiente. Este projeto tem como principal ferramenta o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) adaptado para o litoral do Brasil, que é um pacote de software desenvolvido para realizar simulações numéricas em diferentes cenários e condições temporais e espaciais, com o objetivo de propor alternativas de prevenção e redução do impacto da erosão costeira.

O SMC contém uma base de dados do clima de ondas para a costa brasileira, com séries temporais de 60 anos (1948-2008), usada para as suas simulações numéricas, que foi concebida com modelagem numérica, porém sabe-se que a calibração com dados coletados *in situ* são de grande importância para se conseguir uma melhor precisão nas simulações numéricas (REGUERO *et al.*, 2012).

Apesar dos avanços recentes na modelagem matemática das ondas oceânicas, medições de campo confiáveis e precisas continuam sendo a fonte primordial de informação sobre o estado do mar. No Brasil, lamentavelmente, existe ainda uma enorme escassez de dados no que concerne à medição de ondas, assim o conhecimento sobre o regime de ondas que afeta a costa neste país é insuficiente, de acesso restrito, e limitado a pontos isolados do litoral. Estudos de clima de ondas na costa brasileira efetuados com ondógrafos direcionais ainda são raros.

Recentemente, porém, houve a implantação da primeira Rede Nacional de Monitoramento de Propagação de Ondas em Águas Rasas, ou simplesmente “Rede de Propagação de Ondas em Águas Rasas”, como consta da Resolução no 7/07/CIRM, que instituiu um Grupo de Trabalho (GT) para elaborar seu plano de implantação. Esta iniciativa, criada no contexto do *Global Ocean Observing System* (GOOS/Brasil), encontra-se em

desenvolvimento e proporcionará, pela primeira vez no Brasil, a implantação de uma rede de monitoramento de ondas próximo a costa de caráter abrangente. Dentro deste projeto em Pernambuco, a UFPE está conduzindo desde setembro de 2011 uma campanha de monitoramento – denominada “Monitoramento do Clima de Ondas no NE do Brasil” (MC-ONDAS/NE) - usando um ondógrafo direcional flutuante modelo Waverider MKIII (Boia UFPE01), fundeado em frente ao porto de Suape, com capacidade de transmissão de dados em tempo real. O programa MC-ONDAS/NE, financiado por projetos de pesquisa do CNPq, foi a única campanha de monitoramento costeiro de ondas na costa do NE do Brasil, concebida para disponibilizar os dados medidos ao público via internet, em tempo real e de forma continuada. Os dados estão sendo disponibilizados através de um site: <http://www.ondasne.com.br>.

Com o intuito de se estudar o clima de ondas na região, utilizou-se os dados deste ondógrafo direcional flutuante, coletados durante um período de 3 anos (outubro/2011 – novembro/2014). O estudo desta base de dados levou ao desenvolvimento de um método operacional de particionamento do espectro direcional de ondas, após o estudo de vários métodos de particionamento descritos em vários artigos (FRANCO; FILHO, 2005; PORTILLA et al., 2009; RODRÍGUEZ; GUEDES SOARES, 1999; WANG; HWANG, 2001), optou-se por desenvolver um método prático e confiável que pudesse ser implementado na linguagem de programação Java, que posteriormente foi testado, comparando-se parcialmente os seus resultados com o único máximo obtido por um programa fornecido pelo fabricante do ondógrafo, o que resultou em uma eficiência de mais de 70% das amostras corretamente particionadas.

Este estudo foi organizado em Capítulos, abordando-se progressivamente os objetivos abaixo descritos. Dessa forma, o Capítulo 2 traz uma descrição da região com base nos

estudos pretéritos realizados, enfatizando-se as forçantes e características meteorológicas e oceanográficas da região. O Capítulo 3 descreve o embasamento teórico do SMC-Brasil. No Capítulo 4 apresento o estudo de caso, realizado com o SMC-Brasil, sobre uma área da praia de Candeias, localizada em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, suscetível à erosão costeira, na qual foram realizadas obras para conter a erosão. No Capítulo 5 são descritas as características do ondógrafo direcional utilizado na coleta de dados de ondas, apresentando o artigo que descreve o método de particionamento do espectro direcional de ondas, utilizado para a caracterização do clima de ondas na região, de acordo com os dados medidos pelo ondógrafo UFPE01. No Capítulo 6 é feita uma comparação do clima de ondas calculado através das medições do ondógrafo UFPE01, com o clima de ondas da reanálise de 60 anos que faz parte do banco de dados do SMC-Brasil. Finalmente no Capítulo 7 é dada uma conclusão ao trabalho, e são apresentados trabalhos futuros.

## 1.2 OBJETIVOS

### *1.2.1 Objetivos Gerais*

Este trabalho de pesquisa tem dois objetivos principais: 1) O uso do software SMC-Brasil para um estudo de caso de erosão costeira no litoral de Pernambuco (Jaboatão do Guararapes); 2) Caracterizar o clima de ondas na região do litoral sul de Pernambuco, através de medições feitas por um ondógrafo direcional durante um período de três anos.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

Usar o modelo numérico SMC-Brasil em três diferentes cenários em uma área do litoral da região metropolitana do Recife que sofreu intervenções antrópicas para evitar a erosão costeira;

Desenvolver um método de particionamento para sistemas de ondas, com o objetivo de particionar amostras de espectro de ondas obtidos por um ondógrafo direcional.

Descrever o clima de ondas a partir de uma base de dados de 3 anos de amostragens do ondógrafo UFPE01, particionadas através do método de particionamento desenvolvido neste estudo.

Realizar uma análise temporal das principais características físicas das ondas do tipo vagas (*wind seas*, em inglês) e marulhos (*swell*, em inglês), (altura significativa –  $H_s$ , período de pico –  $T_p$ , direção de pico –  $D_p$ ) das ondas que atingem o litoral.

Comparar o clima de ondas de reanálise de 60 anos do modelo SMC-Brasil com o clima de ondas obtido *in situ* pelo ondógrafo UFPE01.

## Capítulo 2

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

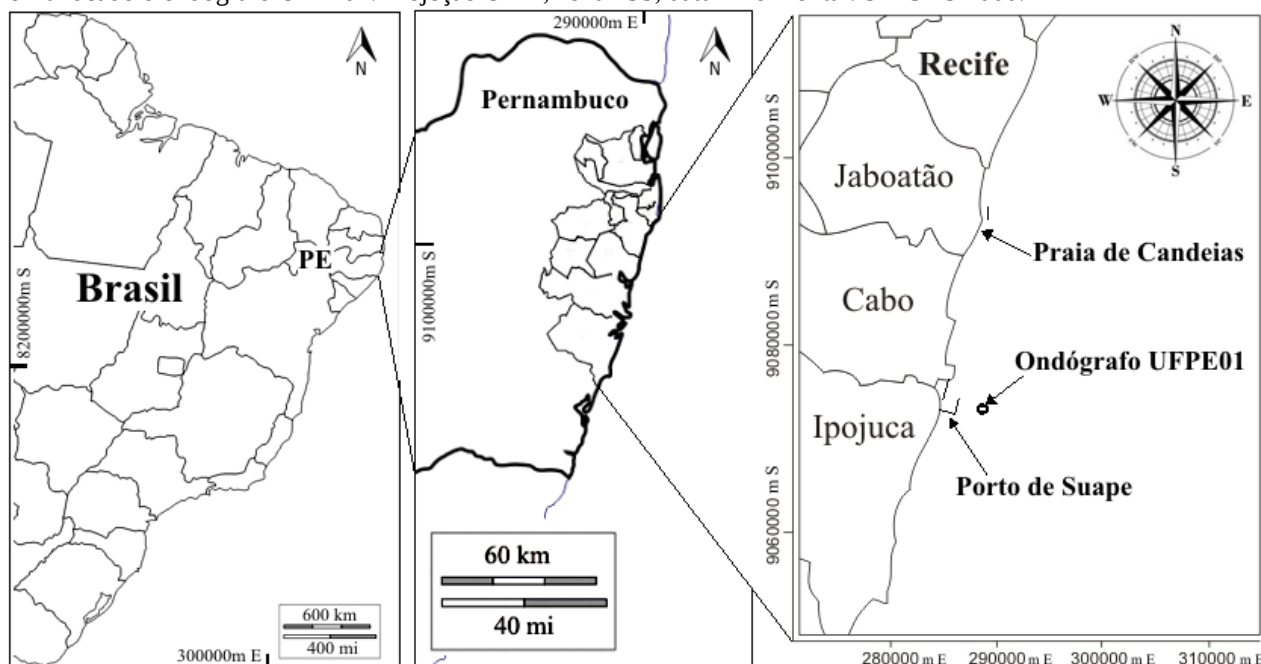
#### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no litoral Sul do estado de Pernambuco, nos municípios de Jaboatão dos Guararapes e Ipojuca (Figura 2.1). Em Jaboatão dos Guararapes situa-se a praia de Candeias, aonde foi realizado o estudo de caso de erosão costeira. No município de Ipojuca situa-se o porto de Suape, ao largo do qual foi fundeado o ondógrafo UFPE01, utilizado nas

medições de espectro de ondas, que foram utilizados na caracterização do clima de ondas da região.

O ponto de fundeio do ondógrafo UFPE01 fica a aproximadamente 23 km do local do estudo de caso de erosão costeira, na praia de candeias.

Figura 2.1 - Área de estudo, abrangendo os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Ipojuca, no litoral Sul do estado de Pernambuco ( NE - Brasil ). Estão assinalados a praia de Candeias e o porto de Suape, ao largo do qual foi fundeado o ondógrafo UFPE01. Projeção UTM, zona 25S, datum horizontal: SIRGAS 2000.



Fonte: o autor.

## 2.2 GEOLOGIA

De acordo com Quinamo (2013), a área de estudo faz parte da Bacia Pernambuco, que é composta por uma sequência de depósitos de sedimentos de idade Mesozóica e Cenozóica, sobre uma base de rochas de idade pré-cambriana.

A sedimentação costeira é composta por terraços marinhos, arrecifes de arenitos e coralgaís (compostos por corais e algas calcárias), depósitos de praias atuais, de mangues, de dunas e flúvio-lagunares (FINEP/UFPE, 2009).

Os terraços marinhos são depósitos sedimentares de origem marinha situados acima do nível médio do mar (GUERRA, A. J. T., 2009). Existem dois conjuntos de terraços arenosos marinhos com características sedimentológicas e geomorfológicas distintas, são os terraços marinhos do período geológico Quaternário (Pleistocênicos e Holocênicos).

Os terraços marinhos Pleistocênicos estão associados à denominada “penúltima transgressão”. O topo desses terraços possuem em torno de 8 a 10 m de altitude e ocorrem na parte mais interna da planície costeira, parcialmente paralelos à linha de costa, com largura variando entre 0,5 a 1,0 km. São constituídos em sua maior parte de areias quartzosas e não apresentam de conchas de moluscos, já dissolvidas por ácidos húmicos, mas possuem estruturas sedimentares e tubos fósseis que confirmam a origem marinha dessas areias (FINEP/UFPE, 2009).

Os terraços marinhos holocênicos são mais recentes, pois se originaram na “última transgressão”. Têm formatos alongados e contínuos, paralelos à linha de costa e de largura média de 1 km, e altitudes em torno de 4 m, ocupando a porção externa da planície costeira (MORAIS *et al.*, 2006). São compostos por areias quartzosas e podem conter conchas de moluscos em bom estado de conservação.

Os terraços marinhos holocênicos são separados dos terraços marinhos pleistocênicos por zonas húmidas e riachos retos e estreitos (GUERRA, N. C., 1991). Esta é a unidade geológica que caracteriza a região litorânea da área de estudo.

Já na área do infra-litoral existem grandes formações de rochas de praia, também conhecidas como *beachrocks*. Estas rochas são formadas através de um processo de litificação de sedimentos, com a composição semelhante a dos sedimentos das praias aonde ocorrem (GUERRA, A. J. T., 2009).

De acordo com Projeto MAI (FINEP/UFPE, 2009), a origem dos arenitos de praia está relacionada às flutuações do nível do mar, durante a última transgressão e a regressão que se seguiu. Estas formações constituem os arrecifes, que são característicos do litoral pernambucano.

Os arrecifes de arenito geralmente formam linhas paralelas ao litoral, sendo um substrato propício ao desenvolvimento de organismos bentônicos que necessitam de algum substrato consolidado para o seu desenvolvimento, como as algas e os corais, e possuem um papel importante na defesa da costa contra a ação erosiva das ondas.

Os arrecifes de corais e de algas são resultantes da acumulação de esqueletos de corais e fragmentos de algas calcárias, as quais desenvolvem estruturas composta por carbonato de cálcio, estas estruturas acabam por sedimentar quando estas algas morrem, e se fundem quimicamente com os esqueletos de corais, formando uma estrutura rígida. Os corais e as algas se desenvolvem sobre o substrato de arenito recifal, formando a camada superior sobre esta base de arenito.

Estes arrecifes se apresentam como formações calcárias alongadas e descontínuas, seu eixo maior é paralelo à linha de costa. Suas dimensões individuais variam de uma centena de metros até cerca de 10 km de comprimento, são exemplos de recifes coralgaís as formações da praia de Candeias.

Os depósitos das praias atuais são compostos por areias quartzosas, com um percentual de minerais pesados e material calcário, que são constituído principalmente por fragmentos de algas calcárias, conchas, corais, briozoários, equinodermos e foraminíferos bentônicos e planctônicos. Esses sedimentos encontram-se depositados entre a linha de baixamar e os terraços holocênicos, tendo pequena inclinação no sentido do mar (FINEP/UFPE,

2009). Eles formam a faixa da atual zona de praia, que representa a porção mais externa da planície costeira.

### 2.3 CLIMA

A área de estudo apresenta um clima tropical de monção (Ams'), de acordo com a classificação climática de Koeppen (1948). Apresentando dois períodos distintos de regime pluviométrico, uma estação seca entre os meses de setembro a fevereiro (primavera-verão) e uma chuvosa entre os meses de março a agosto (outono-inverno). A temperatura média anual é de 25,5°C, sem variações expressivas, com amplitude térmica anual em torno dos 5°C (ANDRADE; LINS, 1971).

Hounsou-gbo *et al.* (2015) indicam que as interações do sistema oceano-atmosfera do Atlântico tropical influenciam a precipitação na região leste do NE do Brasil para escalas de tempo sazonais e interanuais. As chuvas nesta região são influenciadas, principalmente, pelo modo zonal das interações oceano-atmosfera no Atlântico tropical sul.

### 2.4 VENTOS

O regime de ventos é bastante regular e sazonal na região costeira, governados pelo padrão geral de distribuição da pressão atmosférica no Oceano Atlântico Sul, influenciado principalmente pelo centro de alta pressão subtropical (ASAS), que tem a sua posição e intensidade variando ao longo do ano (MANSO *et al.*, 2006).

Dados históricos observacionais indicam que durante o período de fevereiro a setembro predominam ventos de SE com velocidades médias de 2,6 a 4,0 m·s<sup>-1</sup>, com ventos mais intensos nos meses de junho a setembro, observando valores acima de 10,0 m·s<sup>-1</sup>, com

direção preferencialmente de S-SE. Ventos de E-NE e menos intensos, com velocidade em média de 2,0 a 2,1 m·s<sup>-1</sup>, ocorrem com mais frequência nos meses de novembro e dezembro (BEZERRA, 2013; FINEP/UFPE, 2009; ROLLNIC, 2008).

De acordo com Bastos e Ferreira (2008), durante o verão austral o vento é fraco e predominantemente de Leste, devido ao anticiclone apresentar menor intensidade e se situar mais próximo da costa Africana, eventualmente a direção do vento pode mudar para Nordeste por alguns dias, devido à influência de um centro de baixa pressão posicionado no litoral Sul do país. Durante os meses de inverno a ASAS tende a se deslocar para mais perto do litoral do Brasil e se intensificar, devido ao desenvolvimento da Zona de Baixa Pressão Antártica, intensificando os ventos de Sudeste que atingem a área de estudo.

## 2.5 MARÉS

### *2.5 Maré astronômica*

As marés registradas na área são classificadas como semi-diurnas, devido ao fato de terem um período médio de 12 horas e 24 minutos (744 minutos), apresentando duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar (CRAIK, 2004).

Dados de previsão da maré astronômica são disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (DNH, 2015). O nível de referência de uma maré é o Nível de Redução (NR), definido segundo a Organização Hidrográfica Internacional (BHI) como um plano de referência tão baixo que a maré não fique abaixo dele em condições normais. As tábuas de marés são portanto calculadas em relação a este referencial (NR).

As marés atuantes na costa de Pernambuco são do tipo forte mesomaré, variando entre -0,2 m até 2,6 m, amplitude semelhante a esta foi de fato prevista para os meses de fevereiro e março de 2015, nas marés de sizígia que coincidiram com a lua em seu Perigeu (ponto da órbita lunar onde a Lua se aproxima mais da Terra), de acordo com a tábua de marés publicada pelo DNH para o porto de Suape (Figura 2.2).

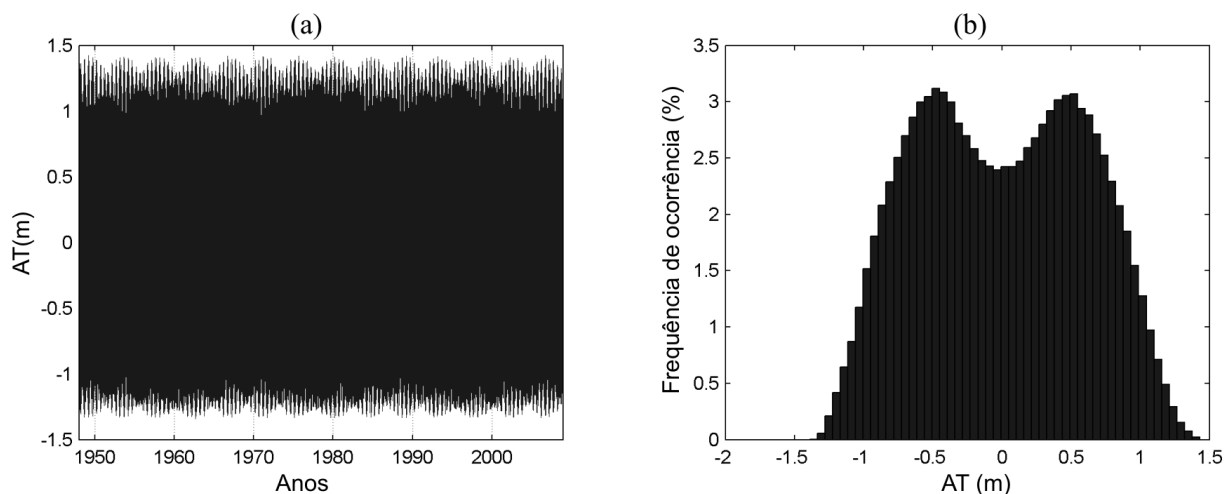
Figura 2.2 - Tábua de marés para o porto de Suape dos dias 23 a 31 de agosto de 2015.

|                       |       |     |
|-----------------------|-------|-----|
| <b>DOM 23/08/2015</b> | 03:41 | 0.8 |
|                       | 10:00 | 1.7 |
|                       | 16:19 | 0.8 |
|                       | 22:41 | 1.8 |
| <b>SEG 24/08/2015</b> | 05:04 | 0.7 |
|                       | 11:21 | 1.8 |
|                       | 17:36 | 0.7 |
|                       | 23:53 | 1.9 |
| <b>TER 25/08/2015</b> | 06:11 | 0.6 |
|                       | 12:28 | 1.9 |
|                       | 18:38 | 0.6 |
| <b>QUA 26/08/2015</b> | 00:51 | 2.0 |
|                       | 07:08 | 0.4 |
|                       | 13:21 | 2.1 |
|                       | 19:28 | 0.4 |
| <b>QUI 27/08/2015</b> | 01:39 | 2.2 |
|                       | 07:56 | 0.2 |
|                       | 14:08 | 2.2 |
|                       | 20:13 | 0.2 |
| <b>SEX 28/08/2015</b> | 02:24 | 2.4 |
|                       | 08:41 | 0.1 |
|                       | 14:53 | 2.3 |
|                       | 20:58 | 0.1 |
| <b>SÁB 29/08/2015</b> | 03:08 | 2.5 |
|                       | 09:24 | 0.0 |
|                       | 15:36 | 2.4 |
|                       | 21:43 | 0.1 |
| <b>DOM 30/08/2015</b> | 03:54 | 2.5 |
|                       | 10:08 | 0.0 |
|                       | 16:17 | 2.4 |
|                       | 22:26 | 0.0 |
| <b>SEG 31/08/2015</b> | 04:38 | 2.5 |
|                       | 10:53 | 0.0 |
|                       | 17:02 | 2.4 |
|                       | 23:09 | 0.1 |

Fonte: DNH (2015).

Dados extraídos da base de dados GOT (*Global Ocean Tides*) do SMC, pelo módulo IH-Data, encontraram variações de maré de  $\pm 1,3$  m (Figura 2.3).

Figura 2.3 - (a) Série temporal e (b) histograma de maré astronômica, fornecido pelo módulo IH-Data, baseado nos dados de 60 anos do GOT (*Global Ocean Tides*).



Fonte: SMC-Tools.

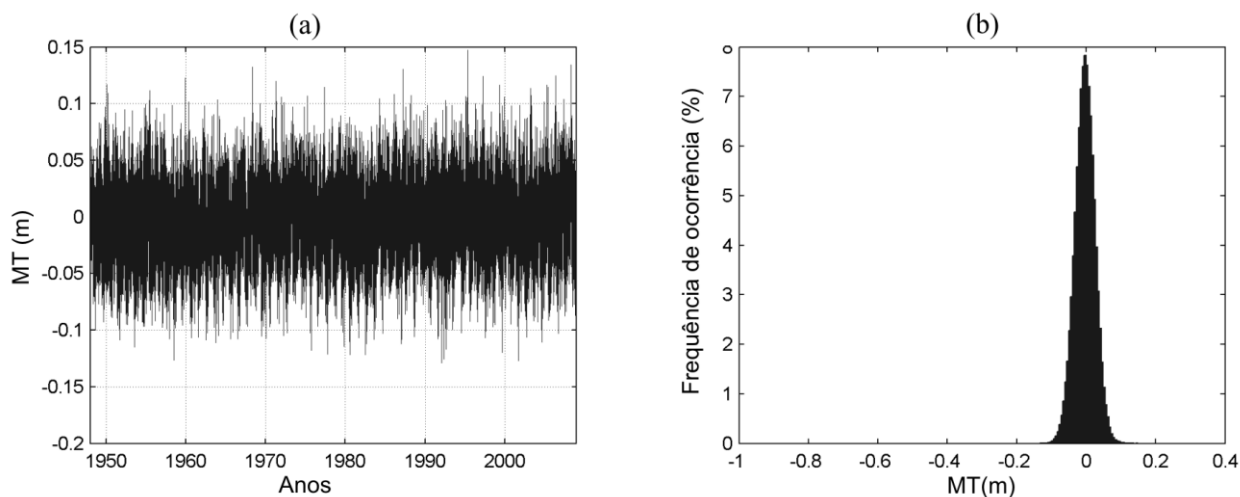
### 2.5.2 Maré meteorológica

A sobre-elevação do nível do mar de causa meteorológica, ou maré meteorológica (*storm surge*, em inglês), é uma variação do nível do mar produzida por causas climáticas, principalmente pelo atrito do vento com a superfície do mar e variações da pressão atmosférica (PARISE; CALLIARI; KRUSCHE, 2009), a duração destas oscilação geralmente varia entre alguns minutos até alguns dias. A importância da maré meteorológica é que, somada com a elevação da maré astronômica e das ondas de ressaca, ela pode produzir inundações significativas na zona costeira. Os maiores eventos de marés meteorológicas estão associados a eventos climáticos, assim coincidem com os eventos de maiores ondas.

O SMC-Brasil vem com uma reanálise global de marés meteorológicas (GOS - *Global Ocean Surge*), esta base de dados contém séries temporais de 60 anos (1948-2008), simuladas numericamente com o modelo de fluxo tridimensional *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) desenvolvido pelo Grupo de Modelagem de Oceano da Universidade Rutgers (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005). Estas simulações detectaram variações máximas de  $\pm 0,1$  m no nível do mar de causas meteorológicas (Figura 2.4), ou seja, insignificantes em

relação às variações de causas astronômicas. As maiores elevações ocorrem em áreas com grandes plataformas continentais, o que não é o caso da região estudada.

Figura 2.4 - (a) Série de tempo e (b) histograma da maré meteorológica, fornecida pelo módulo IH-Data, baseado na reanálise de 60 anos que faz parte da base de dados do GOS (Global Ocean Surge).



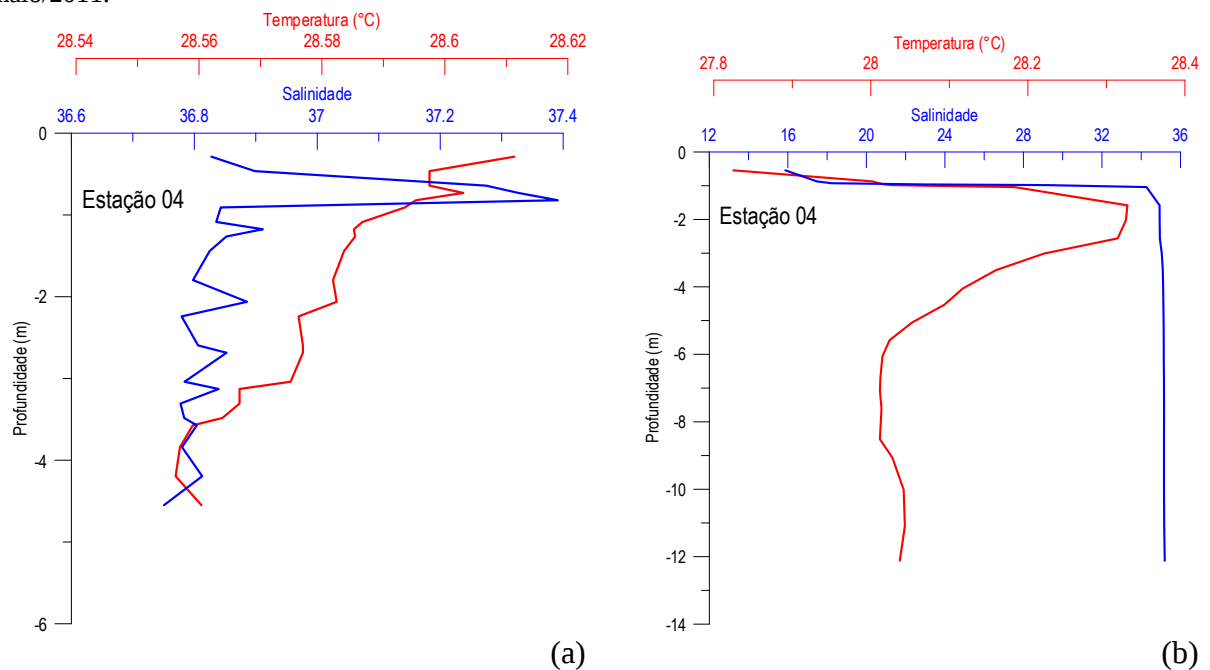
Fonte: SMC-Tools.

## 2.6 PROPRIEDADES TERMOHALINAS

Segundo Otsuka *et al.* (2015) os valores de Temperatura da Superfície do Mar na região costeira do litoral de Pernambuco, durante o período seco representado pelos meses de novembro de 2010 (Figura 2.5-a), fevereiro de 2011, março de 2011 (Figura 2.5-b), e setembro de 2011, apresentou uma temperatura média da água de  $28,76^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,93^{\circ}\text{C}$ ), e no período chuvoso representado pelos meses de maio de 2010, julho de 2010, maio 2011 e julho de 2011 foi registrado uma temperatura média de  $27,29^{\circ}\text{C}$ . O máximo valor de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) foi observado em março de 2011 ( $30,58^{\circ}\text{C}$ ), e o valor mínimo foi observado em maio de 2011 ( $26,54^{\circ}\text{C}$ ). A TSM na região não apresentou uma diferença sazonal significativa em determinados pontos de coletas localizados em regiões mais distantes da costa.

Na mesma região de estudo a salinidade apresentou um ciclo sazonal bem definido em determinadas estações, variando entre 10,77 e 36,09 próximo à costa. Esses valores de salinidade e da temperatura, porém, possuem variações devidas principalmente ao aporte das águas dos rios, que por sua vez, têm as suas vazões controladas pelas precipitações em suas respectivas bacias.

Figura 2.5 - Observações de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água obtida em uma estação de coleta realizadas no litoral de Pernambuco, durante duas campanha amostrais realizadas em (a) novembro/2010 e (b) maio/2011.



Fonte: prof. Alex Costa.

## 2.7 DINÂMICA COSTEIRA

### 2.7.1 Correntes

Os sistemas de correntes que afetam a morfologia da costa são as correntes de marés, correntes fluviais e as correntes costeiras, estas últimas têm a sua intensidade modulada pela intensidade das ondas que atingem o litoral.

As correntes de maré são muito influentes no modelamento das zonas costeiras, principalmente durante as marés de sizígia, associadas a eventos significativos de ondas e ventos, esta associação resulta em processo erosivo intenso na zona costeira de um modo geral (VIDAL; LOSADA; MEDINA, 1995).

Segundo Borba e Manso (1999), Manso *et al.* (2006) e Rollnic (2008), as velocidades das corrente correntes obtidas *in situ* no litoral de Pernambuco, indicam uma direção preferencial no sentido norte-sul, bem como velocidades de até  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ . Resultados de corrente próximo da costa no litoral de Pernambuco (Boa Viagem), obtidas através do radar WAMOS II, mostram uma tendência de máximos e mínimos de correntes, seguindo o período de ventos mais intensos e menos intensos, respectivamente, além de direções preferenciais para ESE (BEZERRA, 2013). É importante afirmar que até o presente, não existem dados observacionais das correntes de deriva costeira nesta região que abranjam um período longo de tempo, mas medições pontuais feitas com período máximo de 15 dias.

Neste trabalho, porém foi utilizado a ferramenta SMC-Brasil, para calcular as correntes costeiras geradas pelos eventos de ondas, associadas a eventos de marés, utilizando os dados de reanálise contidos no banco de dados IH-Data, para calcular a corrente costeira na área de estudo.

### 2.7.2 Ondas

Devido à sua localização geográfica, este litoral está primariamente sujeito à atuação de um regime de ondas de ventos alísios que sopram numa vasta pista oceânica sobre o Atlântico tropical (INNOCENTINI *et al.*, 2005). Denominadas de vagas, este tipo de onda predomina incessante durante todo o ano, variando apenas a sua intensidade de acordo com a

intensidade dos ventos alísios que as acionam, sujeitos à intensidade e posicionamento da ASAS (BASTOS; FERREIRA, 2008).

Um regime de ondas secundário também atua neste litoral, sendo que de maneira inconstante, denominadas de *swell*, estas ondas são formadas por eventos meteorológicos situados a uma grande distância, no Atlântico sul subtropical e temperado. Os *swells* se propagam por longas distâncias com pouca atenuação, devido ao fato de não haver praticamente nenhuma interação dessas ondas com a atmosfera, ou com outras ondas (RESIO; BRATOS; THOMPSON, 2003) e estão presentes com menor intensidade e frequência (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010).

Segundo Bezerra (2013), através de análise da dados de ondas obtido através de Radar WAMOS II, durante um período de 13 meses de coletas, foi observada a presença de ondas do tipo vagas, com altura significativa predominante entre 1,0 m e 1,5 m, com as maiores alturas observadas em períodos de maior velocidade do vento, entre os meses de julho a outubro de 2010, principalmente, e menores valores em períodos de menor velocidade do vento, nos meses entre dezembro de 2010 a março de 2011. Estas ondas apresentaram direção preferencial de ESE, e período predominante entre 7 s e 8 s. O mesmo autor identificou a presença de ondas do tipo *swell*, com ocorrência bastante expressiva nos meses de maio, junho, outubro e dezembro de 2010 e em janeiro, fevereiro e março de 2011. Estas ondas apresentaram período predominante entre 10 s e 13 s, e altura significativa predominante baixa, variando de 0,5 m a 0,7 m, porém havendo registro de ondas provenientes do Oceano Atlântico Norte (*swell* de norte 6,97% e *swell* de nordeste 4,38%). Neste período foi registrado a altura máxima de onda que predominando entre 1,2 e 2,1 m.

Uma descrição do clima de ondas da zona de estudo é um dos objetivos deste trabalho, o que será desenvolvido com mais detalhes no capítulo 5. Sendo assim, este item expõe

apenas o embasamento teórico, obtido em trabalhos anteriores, sobre o clima de ondas da região.

## 2.8 EROSÃO COSTEIRA

Segundo Soares Jr. (2014) toda a costa do estado de Pernambuco é caracterizada pela transgressão e por uma plataforma continental estreita, possui um grande número de estuários, sendo que na maioria deles existe a presença de manguezais. Outra característica marcante é a presença dos arrecifes, tanto de natureza arenítica, como os coralgais. O tipo de sedimentos encontrados nas praias é o carbonático, porém o fornecimento de sedimentos pelos rios é de pequeno volume, e as dunas estão em grande parte ausentes nos pós-praia, o que faz com que esta costa seja muito vulnerável à erosão. Estas características são agravadas pelas intervenções antrópicas desordenadas, que são as maiores responsáveis pelos graves problemas de erosão costeira no estado, porque estas aceleram os processo erosivos, não permitindo que a dinâmica natural dos sedimentos alcancem um equilíbrio.

Segundo Manso *et al.* (2006), a erosão costeira foi registrada em aproximadamente um terço das praias do estado de Pernambuco. Tendo como fatores principais as intervenções antrópicas, seja por ocupação desordenada das áreas de pós-praia e até da área de praia, impermeabilizando os cordões marinhos arenosos do holoceno, com a construção de estruturas artificiais de proteção contra o processo erosivo, sem nenhum estudo técnico que oriente estas construções de forma a não prejudicar a dinâmica de sedimentos costeiros.

O estado possui uma zona costeira que representa apenas 4% do seu território, mas onde se concentra cerca de 44% da população. A zona costeira apresentou crescimento demográfico exponencial, acompanhado por atividades turísticas exploradas de forma desordenada, o que acelerou a descaracterização desta zona, sendo que esta descaracterização

já está consolidada de forma irreversível nos litorais de grande parte dos municípios costeiros do estado.

Este é o caso específico da área de estudo, situada num município com uma das maiores densidades populacionais do estado, com 2.491,82 hab/km<sup>2</sup>, de acordo com o IBGE (2010), sendo que a maior parte desta população está concentrada no litoral do município, o que significa que a densidade populacional da zona de praia é ainda maior. Esta alta concentração populacional resultou numa pressão imobiliária enorme, induzindo à construção desordenada de edifícios na área de praia, acabando por invadir as dunas praias, que servem de reserva de sedimentos para a faixa altamente dinâmica da praia, e precedeu a construção de muros de contenção na área de praia para evitar a que a erosão costeira destrua estas construções.

Um fator importante para a instalação do processo erosivo na área de estudo foi a ausência de recifes de arenitos ou algálicos na plataforma continental interna, adjacente à área de praia em que foi realizado o estudo, estas barreiras naturais contra a erosão provocada pelas ondas estão presentes na maior parte da praia de Candeias, contudo uma abertura natural nesta proteção, exatamente em frente ao local de estudo, permitiu que esta zona fosse submetida às forças causadoras da erosão costeira com a sua maior intensidade.

Outra causa que pode ser citada para instalação do processo erosivo nesta praia foi a alteração do suprimento sedimentar da praia, este também foi devido a intervenções antrópicas realizadas no principal rio fornecedor de sedimentos para esta região, que é o rio Jaboatão, situado ao sul da praia de Candeias. Este rio sofreu um processo fechamento de um dos seus braços de sua foz, por uma intervenção antrópica que ocorreu há décadas, no intuito de conectar uma ilha, que ficava entre os seus dois braços. Posteriormente a esta intervenção, o aumento na vazão na foz do rio provocou a erosão acentuada em um terreno situado na

margem norte. A construção irregular de um espigão de pedras para conter esta erosão acarretou o estreitamento da calha do rio, como a vazão do rio continuou a mesma, em seguida a velocidade da água do rio em sua foz aumentou consideravelmente, provocando um efeito de jato, ou seja, o sedimento que este rio traz, e que normalmente iria alimentar as praias situadas ao norte da foz do rio, agora está sendo direcionado para as águas mais profundas da plataforma continental, acarretando um déficit de sedimentos destas praias, dentre elas a praia de Candeias.

Na praia de Candeias, onde foi realizado parte deste estudo, ocorreram obras emergenciais de engenharia para proteção dos imóveis, elaborado de acordo com um estudo técnico-científico, que contudo não foi seguido da maneira correta, acabando por transferir o problema para uma área adjacente. Assim, a erosão costeira na praia de Candeias foi classificada como intensa, ocorrendo a retrogradação da linha de costa, com rebaixamento do perfil praia com transferência de sedimentos da praia para a plataforma interna adjacente.

## Capítulo 3

### EMBASAMENTO TEÓRICO DO SMC-BRASIL

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO SMC-BRASIL

O Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) é um conjunto de programas, bancos de dados e metodologias adaptadas ao litoral brasileiro através do projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira” do Ministério do Meio-Ambiente, Secretaria do Patrimônio da União (SPU), Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (GONZALEZ, 2011d).

O projeto foi desenvolvido com a colaboração da Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID) e do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantábria, aonde o SMC foi originalmente desenvolvido. A versão brasileira do SMC é uma versão mais avançada e prática do sistema desenvolvido para outros países, incluindo avanços científicos recentes na engenharia costeira e na informática.

Recentemente a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) e a Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS), firmaram um convênio (nº 74/2013) com vista à implementação do projeto "Estudo de caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileiro (SMC-Brasil) em Pernambuco".

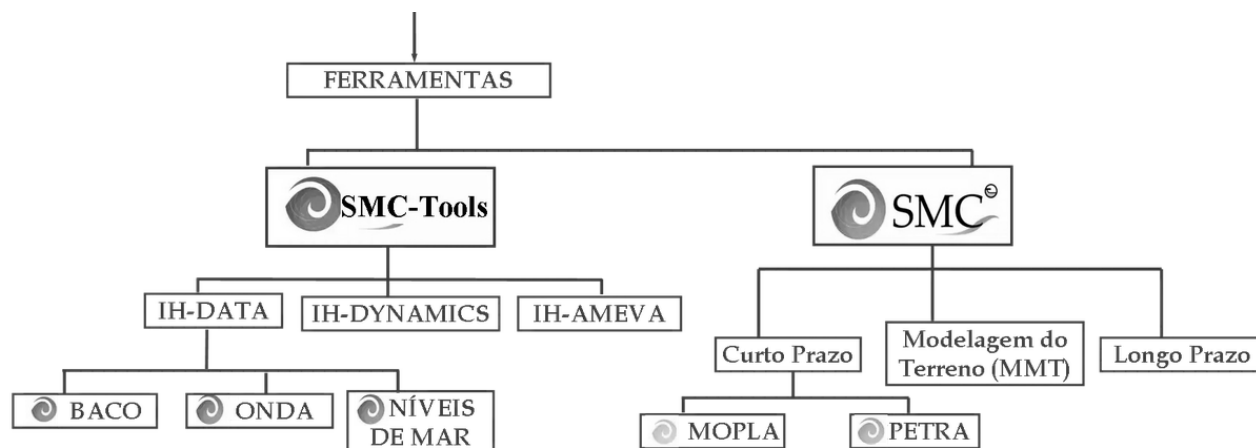
O sistema foi estruturado para trabalhar com várias escalas espaciais e temporais das diversas dinâmicas que influem na morfologia da costa, de modo a facilitar a elaboração de estudos de casos, usando as metodologias descritas nos documentos temáticos incluídos no pacote. Dessa forma, utilizando critérios técnicos padronizados e organizados de forma

sistemática, pode-se utilizar os modelos numéricos mais rápida e eficientemente, aumentando a produtividade e a confiabilidade das decisões.

Os SMC-Brasil é composto de dois módulos principais, o SMC-Tools é um módulo de ferramentas que inclui uma base de dados de batimetria, ondas, marés, etc. Este realiza o processamento desses dados, faz uma análise estatística das variáveis ambientais, e propaga uma série de ondas de profundidades indefinidas para pontos na costa (*downscaling*).

Já o Módulo SMC propriamente dito integra os vários modelos numéricos (de ondas, de correntes e de transporte de sedimentos), facilitando a aplicação da metodologia de trabalho descrita nos Documentos Temáticos (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Esquema dos módulos e sub-módulos que compõem o pacote de software do SMC-Brasil.



Fonte: Gonzalez (2011d).

## 3.2 O MÓDULO SMC-TOOLS

O módulo SMC-Tools é dividido em dois grandes sub-módulos: O Sub-módulo de Pré-processo que inclui o IH-Data e IH-Ameva, e o sub-módulo de Pós-processo que inclui o IH-Dynamics.

### 3.2.1 Sub-módulo de pré-processo

O sub-módulo de Pré-processo é a ferramenta que dá acesso às bases de dados do IH-Data, constituída por uma base de dados de batimetria georreferenciada, digitalizada de cartas náuticas de toda a costa brasileira, além das bases de dados de reanálise de ondas (DOW - *Downscaling Ocean Waves*) e marés meteorológicas (GOT - *Global Ocean Tides*) e astronômicas (GOS - *Global Ocean Surge*). Estas bases podem ser processadas e em seguida enviadas para o módulo IH-Ameva.

O Módulo IH-Ameva (Análise Matemática Estatística de Variáveis Ambientais) tem a finalidade de pré-processar estatisticamente os dados de ondas e níveis de maré do IH-Data, fornecendo os vários parâmetros necessários para a operação do módulo SMC.

A principal finalidade do sub-módulo de pré-processo é obter os dados de entrada necessários para a execução das modelagens numéricas do módulo principal SMC, definindo uma série de condições iniciais para os modelos numéricos, como:

- Definir a batimetria inicial de um projeto.
- Gerar uma análise estatística e espectral que caracterize o clima de ondas em um ponto em águas profundas próximo ao local de estudo, que servirá para ser propagada até a costa utilizando-se o modelo de águas rasas, denominado Oluca.
- Classificar a série temporal de ondas para posteriormente ser propagada.
- Gerar os casos relevantes de estados de mar para serem propagados até a costa com o SMC.

A Figura 3.2 mostra a caracterização do clima de ondas para um ponto em águas profundas, esta figura foi gerada através do sub-módulo de pré-processo do SMC. Observa-se as rosas direcionais de altura significativa ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ), indicam uma direção predominante das ondas é de Leste-Sudeste ( $115^\circ$ ), com 72% de probabilidade, como é

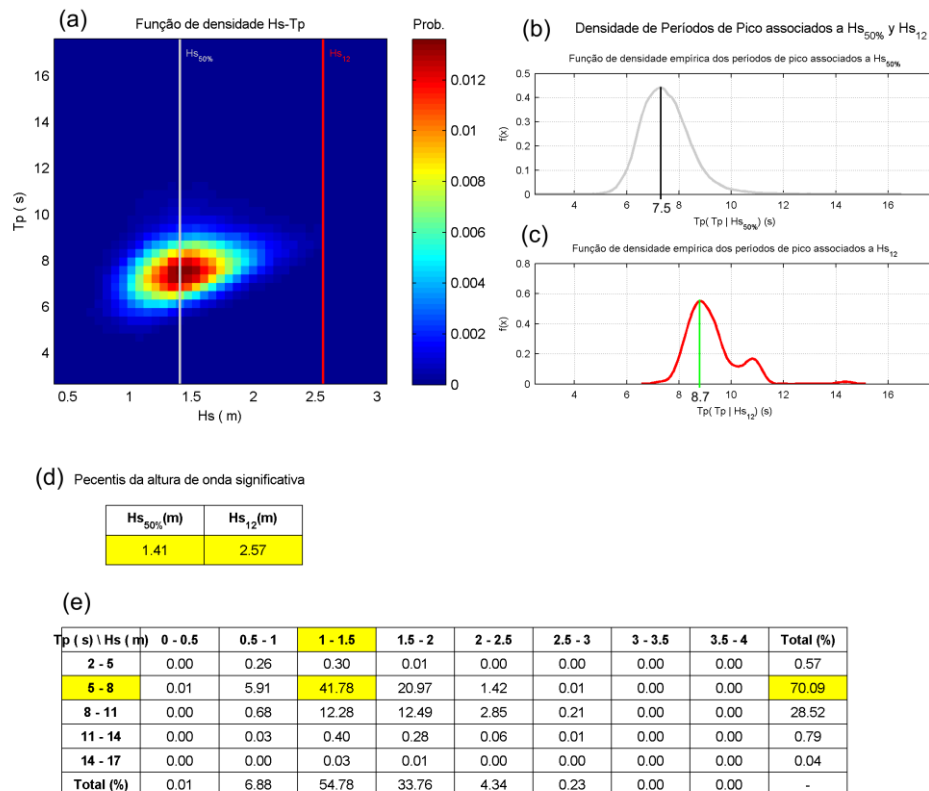


Na Figura 3.3 estão expostas as funções de densidade de probabilidade (FDP) conjunta para  $H_S \times T_P$  (Figura 3.3-a), bem como as FDP para  $T_P$  associado ao  $H_{S50\%}$ , que é o regime de ondas que ocorre durante a metade do ano (regime típico) (Figura 3.3-b), e para o  $H_{S12}$ , que é o regime de ondas que ocorre durante 12 horas do ano (regime extremo de ondas) (Figura 3.3-c).

A tabela central mostra a  $H_S$  característica para um clima de ondas típico e extremo (Figura 3.3-d), e a tabela inferior mostra os percentis de  $H_S$  e  $T_P$  para várias faixas de altura e período de ondas (Figura 3.3-e). Observa-se que a faixa de estado de mar típico é de ondas com  $H_S$  de 1,0m a 1,5m e  $T_P$  entre 5s a 8s, com 41,78% de probabilidade de ocorrência.

Figura 3.3 - (a) Função de densidade de probabilidade (FDP) conjunta ( $H_S$  e  $T_P$ ) dos estados de mar no ponto DOW escolhido para o estudo. (b) Densidade de período de pico associada a  $H_{S50\%}$  e (c) extremo  $H_{S12}$ . (d) Altura significativa para o clima de ondas típico ( $H_{S50\%}$ ) e extremo ( $H_{S12}$ ). (e) Percentis de probabilidade de ondas para cada faixa de  $H_S$  e  $T_P$  das ondas.

Função de densidade conjunta da Altura Significativa e Período de Pico,  $H_S$ - $T_P$ : Ponto DOW



Fonte: SMC-Tools.

A Figura possui uma tabela de probabilidades fornecida pelo SMC-Tools com o resumo dos valores de  $H_s$  e  $T_p$  na área de estudo, relativas ao ponto DOW escolhido em águas profundas, de onde foram propagadas as ondas até águas rasas. Observa-se que as ondas se concentram entre os quadrantes Leste a Sul-Sudeste, em destaque estão os valores para o clima de ondas típico ( $H_s = 1,37$  m;  $T_p = 7,45$  s), e para o clima de ondas extremo ( $H_s = 2,59$  m;  $T_p = 12,12$  s), que foram utilizados nas simulações do SMC para a área de estudo (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Probabilidades de valores de  $H_s$  e  $T_p$  para o ponto DOW escolhido para obter os dados a serem propagados para o litoral.

| Measured variable $H_s$ |             |                |                |                |              | Measured variable $T_p$ |             |                |                |                |              |
|-------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------|-------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Direction               | probability | $H_{s_{50\%}}$ | $H_{s_{90\%}}$ | $H_{s_{99\%}}$ | $H_{s_{12}}$ | Direction               | probability | $T_{p_{50\%}}$ | $T_{p_{90\%}}$ | $T_{p_{99\%}}$ | $T_{p_{12}}$ |
| N                       | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       | N                       | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       |
| NNE                     | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       | NNE                     | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       |
| NE                      | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       | NE                      | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       |
| ENE                     | 0.0000      | 1.1098         | 1.1334         | 1.1347         | 1.1347       | ENE                     | 0.0000      | 9.5065         | 10.6659        | 10.9752        | 10.9752      |
| E                       | 0.0055      | 0.9004         | 1.1224         | 1.5607         | 1.7806       | E                       | 0.0055      | 7.0622         | 8.4745         | 10.2497        | 10.9703      |
| ESE                     | 0.7525      | 1.3724         | 1.8171         | 2.2577         | 2.5924       | ESE                     | 0.7525      | 7.4576         | 8.8184         | 10.2655        | 12.1165      |
| SE                      | 0.2411      | 1.3676         | 1.7409         | 2.1890         | 2.4761       | SE                      | 0.2411      | 6.6545         | 8.4054         | 11.8379        | 14.8816      |
| SSE                     | 0.0008      | 1.2459         | 1.5019         | 1.8156         | 1.8636       | SSE                     | 0.0008      | 5.3603         | 7.4740         | 10.8447        | 11.0428      |
| S                       | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       | S                       | 0.0000      | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000         | 0.0000       |

Fonte: SMC-Tools.

### 3.2.2. Sub-módulo de pós-processo

Após a propagação das ondas até a costa ter sido realizada no módulo principal do SMC, o que será explicado no próximo item, então usa-se o sub-módulo de pós-processo do SMC-Tools, o que permite:

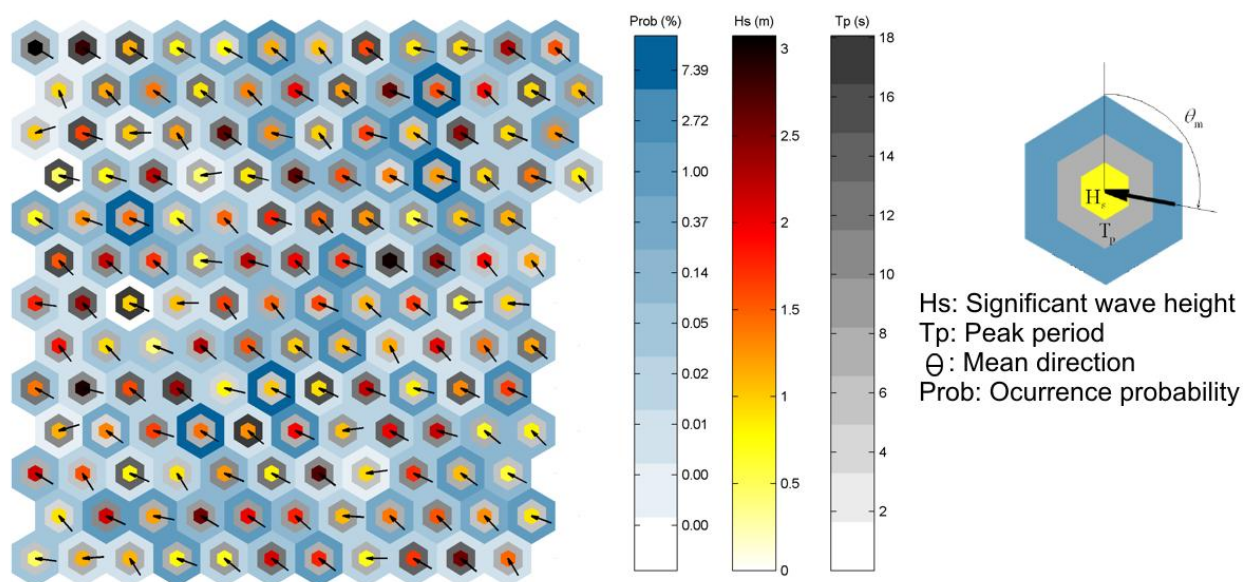
- Reconstruir a série temporal de ondas em ponto próximos à costa, para onde foi feita a propagação das ondas, a partir de um ponto de águas profundas;
- Fazer uma análise estatística e espectral das ondas neste ponto próximo à costa.

Além destas operações, pode-se também traçar vários perfis de praia perpendiculares à linha de costa, nos quais se pode calcular:

- O ponto do perfil aonde ocorre a arrebentação da onda;
- O transporte lateral de sedimentos através deste perfil;
- A direção média e o fluxo médio de energia;
- O regime médio e extremo da cota de inundação.

Desta forma o sub-módulo de pós-processo do SMC-Tools é a ferramenta de análise que complementa os modelos numéricos do SMC, permitindo obter as principais características da dinâmica de transporte de sedimentos em uma praia, além da cota de inundação, causada principalmente por marés meteorológicas e regimes extremos de ondas.

Figura 3.5 - Classificação dos estados de mar a serem propagados para se estimar o transporte anual de sedimentos. Cada hexágono representa um estado de mar com as suas características de  $H_s$ ,  $T_p$ , direção média ( $\Theta$ ), além da probabilidade de ocorrência dos mesmos (de acordo com a escala vertical da esquerda).



Fonte: SMC-Tools.

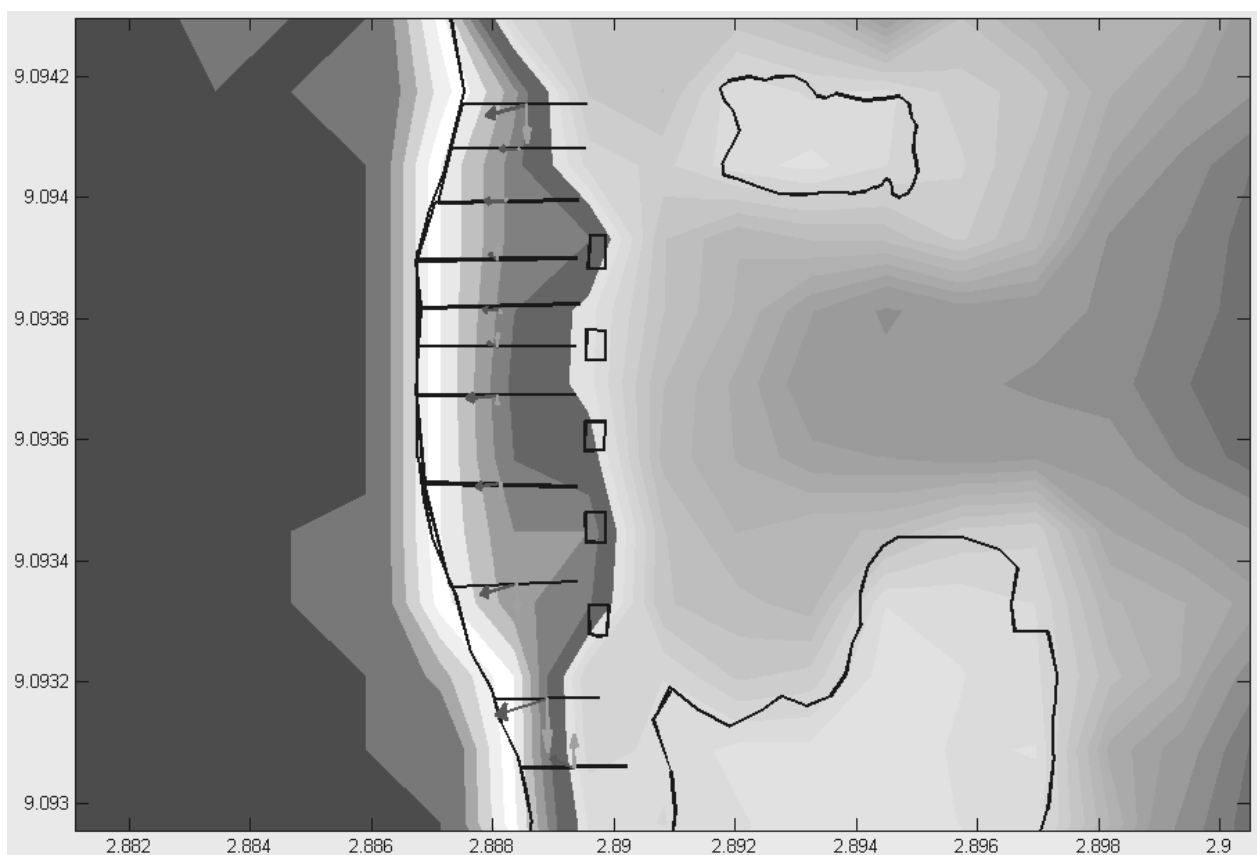
Como existem mais de 60 anos de estados de mar armazenados na base de dados, seria praticamente impossível se utilizar todos os estados de mar na simulação, então utiliza-se uma técnica chamada de máxima similaridade (MaxDiss) para escolher os estados de mar que são

os mais representativos do clima de ondas no ponto DOW, os quais podem ser visualizados através do esquema da Figura 3.5. Após serem feitas as propagações dos estados de mar representativos, as séries de estados de mar então são reconstruídas através de uma técnica de interpolação (CAMUS *et al.*, 2011).

A Figura 3.6 representa o resultado da simulação do transporte anual de sedimentos para um dos cenários estudados (cenário atual), utilizando o sub-módulo de pós-processo do SMC-Tools. As setas bege indicam a direção e a intensidade do transporte anual médio para cada perfil de praia traçado (linhas pretas perpendiculares à praia), esta simulação leva em conta os 150 estados de mar significativos, que foram escolhidos para serem propagados para o litoral (Figura 3.5), simulados para três níveis de maré distintos (marés baixa, média e alta). Desta forma é possível se avaliar a tendência para cada cenário estudado.

Observa-se que o transporte de sedimentos é mais intenso na zona Sul da área de estudo, sendo que há um ponto de convergência entre os dois últimos perfis do lado Sul, aonde o sedimento tende a se acumular ao longo do ano. Na região central da figura o transporte de sedimentos é insignificante, o que pode indicar que a configuração atual do dique de proteção da praia (seccionado em cinco partes, ver item 4.1), é uma solução que deve mitigar o efeito da erosão costeira provocada pelas ondas nesta área.

Figura 3.6 - Simulação do transporte de sedimentos anual para cada perfil de praia no cenário atual da área de estudo. As setas claras, paralelas ao litoral, indicam a direção e o transporte médio, enquanto que a seta escura indica a direção e a intensidade do fluxo médio de energia.



Fonte: o autor.

### 3.3 MÓDULO SMC

O módulo principal do pacote SMC-Brasil possui um sub-módulo de análise de praia de curto prazo chamado de Mopla, que foi utilizado nesta pesquisa, esta sigla se refere a Morfodinâmica de Praias, ou seja, o estudo da dinâmica da morfologia das praias.

O SMC também faz uso de outro sub-módulo denominado “Módulo de Modelagem do Terreno” (MMT), fundamental para facilitar a edição da batimetria de um projeto, utilizando para isso uma série de ferramentas gráficas e de desenho que fazem parte da interface do SMC.

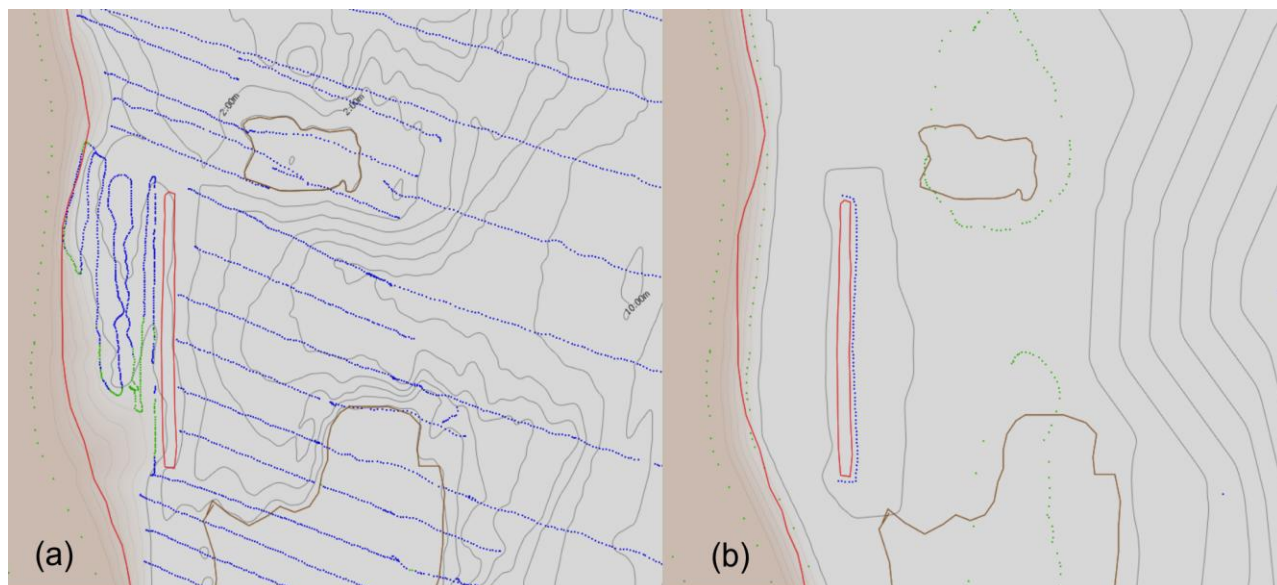
### 3.3.1 Sub-módulo de Modelagem do Terreno(MMT)

Fundamental para a edição da batimetria de um projeto, este módulo permite incluir dados de batimetria de alta resolução sobre a batimetria de baixa resolução padrão, fornecida pela digitalização das cartas náuticas da marinha, obtida através dos sub-módulos de pré-processo do SMC-Tools, descrito no item 3.2.1. Dessa forma é possível se ter uma melhor resposta da modelagem das ondas, ao se incluir uma batimetria que foi obtida por outra fonte de medição do fundo do mar na área de estudo.

Outras possibilidades do MMT são a edição de contornos rígidos como: diques, espigões, cais, muros de contenção, etc., bem como de contornos dinâmicos como: dragagem, engordamentos, etc. Além dos elementos modificadores da batimetria, existe a ferramenta de regeneração de batimetria, que faz automaticamente uma interpolação para preencher os espaços entre os pontos de medição das batimetrias.

No caso específico deste estudo, uma batimetria de alta resolução foi incluída no projeto sobre a batimetria da marinha. Trata-se da batimetria fornecida pelo projeto MAI (FINEP/UFPE, 2009), que inclui pontos de batimetria a uma distância de 10 m, medidos em faixas perpendiculares à praia, distantes cerca de 200 m entre si (pontos azuis da Figura 3.7-a), com isso obteve-se uma resposta da modelagem de ondas bem mais realista do que se fosse usada apenas a batimetria da marinha.

Figura 3.7 - Comparação entre: (a) batimetria regenerada com os dados do MAI (pontos azuis na figura) e (b) os dados da Marinha (pontos em verde da figura).



Fonte: o autor.

### 3.3.2 Programa de morfodinâmica de praias (MOPLA)

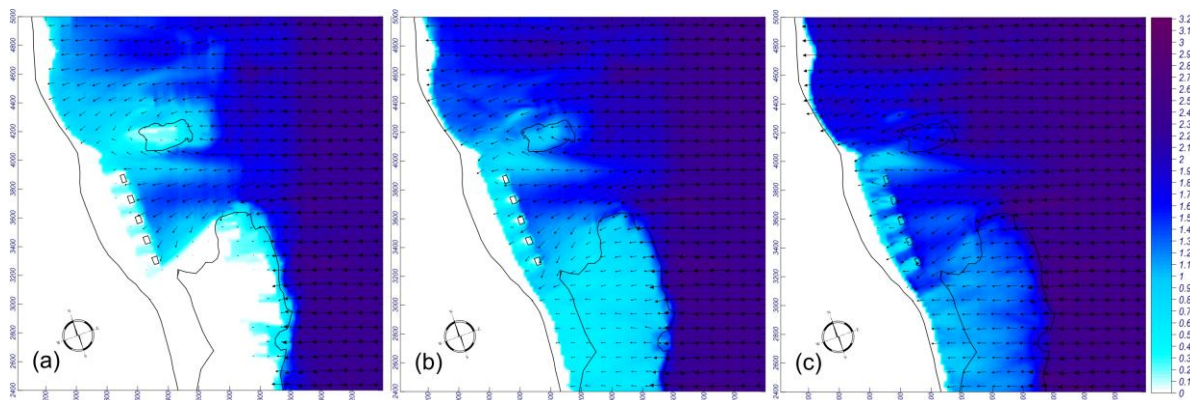
O MOPLA é o programa inserido no módulo SMC que realiza todas as modelagens numéricas, utilizadas para se estudar o comportamento dinâmico da morfologia das praias a curto prazo. Composto por seis modelos numéricos que simulam a propagação das ondas, o sistema de correntes induzido pela arrebentação das ondas, o transporte de sedimentos e a evolução da batimetria. Os modelos são organizados em dois grupos: os que simulam os efeitos de um trem de ondas, e os que simulam a propagação de um espectro de energia de ondas. Para este projeto utilizamos apenas a modelagem baseada em espectros de ondas, porque este tipo de modelagem resulta em uma maior precisão no cálculo de alturas de ondas, ideal para estudos de diques, como foi o caso. Os modelos que compõem este grupo são:

- Oluca: Modelo parabólico de propagação de movimento de um espectro de ondas.

- Copla: Modelo de correntes de praia induzidas pela arrebentação de uma distribuição espectral das ondas.
- Eros: Modelo de erosão, sedimentação e evolução da batimetria de praias causadas por uma distribuição espectral das ondas.

Estas simulações de curto prazo podem ser feitas em sequência para vários estados de mar (espectros de ondas), através do programa Mopla, e seus resultados individuais poderão ser analisados visualmente utilizando-se a ferramenta auxiliar de edição gráfica (Figura 3.8), bem como são armazenados para uma análise estatística posterior, através do sub-módulo de pós-processo do SMC-Tools, descrito no item 3.2.2, assim é possível fazer uma análise estatística das simulações de todos os estados do mar, bem como empregá-los no cálculo do transporte anual de sedimentos através dos perfis transversais.

Figura 3.8 - Exemplo do resultado da modelagem usando o Oluca para o regime de ondas típico na região, resultado para a (a) maré seca, (b) maré meia e (c) maré cheia.



Fonte: o autor.

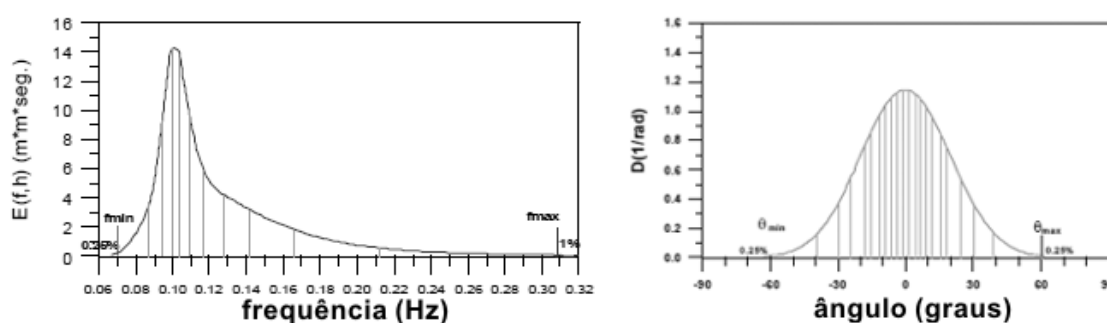
### 3.4 MODELO OLUCA

Para o cálculo da propagação das ondas desde as águas profundas para as águas costeiras, é necessário se conhecer com a melhor precisão possível a batimetria do fundo.

Porque os efeitos de fundo, como refração, empinamento, dissipação de energia e difração, dentre outras transformações, são interações que acontecem nesta área de transição. Nos últimos anos estudos aprofundaram o conhecimento desses efeitos, que puderam assim ser incorporados nos modelos numéricos de propagação de ondas.

O Oluca (GONZALEZ, 2011c) é um modelo que resolve a fase (MRF) com base nas equações de balanço de quantidade de movimento e fluxo de massa, e que não é dispersivo na frequência, ou seja, discretiza o espectro de entrada em águas profundas, em um número de componentes de energia com amplitude, frequência e direção distintos (Figura 3.9). A propagação de cada componente de energia é feita separadamente, obtendo-se em seguida o espectro de ondas em cada ponto da área de estudo, através de uma superposição linear do resultado da propagação de cada componente do espectro inicial discretizado, desta forma eles podem ser executados de uma maneira muito mais rápida, porém não dão resultados muito precisos cujo erro em relação a um modelo mais elaborado podem ser desprezados para uso de engenharia (O'REILLY, 1991).

Figura 3.9 - Discretização do espectro de ondas, a distribuição contínua do espectro é simulada através de várias componentes individuais na direção e na frequência (linhas verticais).



Fonte: Gonzalez (2011c).

Durante a propagação de cada uma das componentes do espectro discretizado, utiliza-se uma aproximação parabólica, que inclui os efeitos de refração e difração, com interação das ondas com as correntes (KIRBY; DALRYMPLE, 1986). Para o cálculo das perdas de

energia resultantes da arrebentação das ondas utiliza-se o modelo estatístico de dissipação de Thornton e Guza (1983).

#### 3.4.1 Equação da pendente suave

A definição da propagação das ondas sobre uma batimetria irregular é um problema tridimensional, que envolve condições de contorno não lineares muito complexas, existem muito poucas soluções, todas elas são para fundos planos horizontais. Para a simplificação do problema tridimensional, Berkhoff (1972), entre outros, notaram que a maior parte das propriedades das ondas progressivas lineares poderiam ser previstas através de um modelo considerado integrado verticalmente. A equação encontrada é conhecida com o nome de equação da pendente suave (*mild slope equation*) (BERKHOFF, 1972), porque considera ondas de pequena amplitude se propagando sobre um fundo com uma leve inclinação (pendente suave).

Berkhoff (1972) fez uma comparação com um modelo numérico exato, concluindo que os resultados da equação da pendente suave são iguais ao modelo exato para inclinações de fundo de até 1:3. A equação da pendente suave pode ser escrita em função do deslocamento da superfície livre,  $\eta(x, y)$ , usando um operador de gradiente horizontal como:

$$\vec{\nabla} \left( C \cdot C_g \cdot \vec{\nabla} \eta \right) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0$$

Onde:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_j} \quad j = 1, 2$$

Sendo  $C$  = celeridade da onda, dada por:

$$C = \sqrt{\left(\frac{g}{k}\right) \tanh kh}$$

$C_g$  = celeridade do grupo, dada por:

$$C_g = C \frac{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)}{2}$$

$h(x, y)$  = profundidade local,  $g$  = aceleração da gravidade,  $k(x, y)$  = número de onda, relacionado com a frequência angular  $\sigma$ , e a profundidade  $h$ , mediante a relação de dispersão linear:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh$$

$\eta$  = perfil da onda:

$$\eta = A(x, y) \cdot e^{i\sigma t}$$

Onde,  $A(x, y)$  é a amplitude complexa com informação sobre a fase e a amplitude real da onda.

Uma aproximação parabólica (RADDER, 1979) que tem várias vantagens sobre a forma elíptica apresentada por Berkhoff (1972), que permite técnicas de resolução muito eficientes por meio de um modelo de diferenças finitas. Para isso utilizou-se uma técnica de divisão de matrizes que separa o campo de ondas em duas: uma se propagando adiante e outra retornando, que é desprezada. Contudo é imposta uma restrição a este modelo parabólico, devido à aproximação para as derivadas transversais na direção normal a de propagação feita por Radder (1979), a imposição é que as ondas só devem ser propagadas dentro de uma faixa de  $\pm 45^\circ$  ao redor da direção principal de propagação.

Booij (1981) desenvolveu um método que inclui mais termos na aproximação das derivadas transversais, o que permite ao modelo parabólico aceitar ondas dentro da faixa de  $\pm 50^\circ$  ao redor da direção de propagação principal, e que foi utilizado no modelo espectral Oluca.

### 3.4.2 Arrebentação das ondas

Este é um dos fenômenos mais importantes que ocorrem na costa, porque está associado a vários processos naturais, sendo que os principais são as correntes costeiras e o transporte de sedimentos (SMITH, 2003). A arrebentação das ondas normalmente acontece na zona de surf, a partir de uma certa profundidade mínima, porém também acontece em águas profundas quando a onda se torna muito íngreme, sendo um fenômeno não linear e dissipativo. A modelagem correta da arrebentação é muito importante, sendo utilizado para calcular a perda de energia. Neste estudo utilizou-se um modelo de dissipação associado à propagação de degraus de ondas (THORTON, E.B.; GUZA, 1986).

Ao se aproximar da zona de arrebentação, ocorrem fenômenos de interação das ondas com o fundo, como o empinamento, refração e a dissipação provocada pelo atrito da parte submersa da onda com o fundo e por causa da percolação através da areia. A crista da onda conserva a sua velocidade, enquanto que a sua parte submersa freia cada vez mais por causa dos efeitos de fundo, até que a onda se torna instável e arrebenta. Como cada onda tem as suas próprias características de altura, período, fase, etc., cada onda irá arrebentar em um ponto específico, sendo assim, para um conjunto de ondas de uma distribuição espectral, haverá uma zona de arrebentação mais ou menos definida, onde as ondas irão dissipar a sua energia através da turbulência gerada pelo colapso da onda.

A fração da dissipação de energia das ondas de uma distribuição espectral está ligada às propriedades estatísticas do estado do mar em um certo ponto ( $H_s$ ,  $T_p$ ). O Oluka calcula, a cada passo de propagação, todos os componentes de energia, que são recompostos linearmente para obter a altura significativa em cada ponto, essa informação é utilizada como

entrada no modelo de dissipação de energia por arrebentação da onda, assim não se considera cada onda individualmente mas uma aproximação espectral do processo de arrebentação.

### 3.4.3 Áreas com arrecifes

Neste estudo existem grandes áreas com arrecifes (Figura 3.10), que interrompem a superfície livre, para estas áreas usa-se a técnica da película fina (DALRYMPLE; KIRBY; HWANG, 1984), que considera os arrecifes, quando estes se encontram emersos nas marés mais baixas, como tendo uma profundidade muito rasa (1 mm de profundidade) para efetuar o cálculo das alturas de onda, assim, a energia que resulta da passagem das ondas por cima dos arrecifes para as componentes de energia discretizadas é insignificante. O Oluca-SP portanto processa os arrecifes como áreas de muito pouca profundidade, mesmo que eles estejam completamente fora da água na maré seca, isso permite que eles sejam tratados da mesma maneira que as outras áreas mais profundas, facilitando o processamento.

Figura 3.10 - Foto de satélite da praia de Candeias, mostrando a posição de uma grande formação de arrecife de franja, ao Sul da área de estudo (B), observa-se também uma formação isolada de arrecife, conhecida como Abreus (A), e um canal profundo (C) por onde passam as ondas que atingem a área sob impacto da erosão.

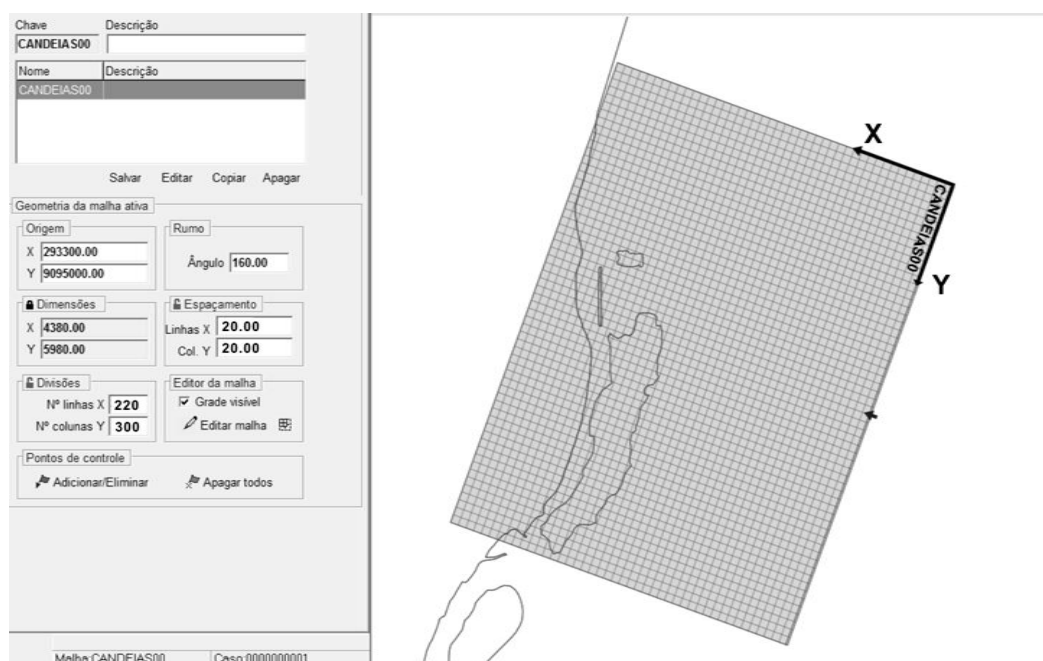


Fonte: Google Earth.

### 3.4.4 Espectro bidimensional de entrada

Ao iniciar o estudo de uma área, o usuário do SMC deve desenhar uma grade aonde serão propagadas as ondas de águas profundas para águas rasas. Esta grade retangular (Figura 3.11), definida por dois eixos: x e y, deve ser desenhada de forma que a direção de propagação principal das ondas coincida com o eixo x. A grade tem duas bordas laterais, paralelas ao eixo x, uma borda externa, paralela ao eixo y, aonde as ondas entrarão na área de propagação, também chamada de domínio, e uma borda interna, próxima ou sobre a costa, aonde finalizará a propagação das ondas. A grade foi desenhada de maneira que as bordas laterais estejam longe da região de estudo, para evitar o efeito de reflexão de ondas nas bordas, comum em modelos de propagação de ondas. A grade foi desenhada com células espaçadas  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  entre si, possuindo 220 linhas e 300 colunas.

Figura 3.11 - Geometria da grade utilizada na propagação das ondas (retângulo com borda vermelha). A seta vermelha na borda externa da grade (águas profundas) indica a direção principal de propagação. A borda interna está sobre a costa, próxima à área de estudo. Os eixos X e Y estão indicados, a grade possui 220 linhas e 300 colunas.



Fonte: o autor.

Ao se propagar um espectro de entrada para dentro do domínio, as ondas associadas a este estado de mar são definidas a partir de um espectro bidimensional ( $S$ ), na borda externa da grade (águas profundas). O espectro é definido por um espectro frequencial ( $E$ ) e por uma função de dispersão direcional ( $D$ ):

$$S(f, \Theta) = E(f, \Theta) \cdot D(\Theta)$$

O modelo Oluca-SP permite definir o espectro frequencial a partir de um espectro TMA (BOUWS *et al.*, 1985), que é um espectro aplicado em áreas de profundidades relativamente pequenas e existe interação das ondas com o fundo.

O espectro TMA ( $E_{TMA}$ ) é definido a partir de um espectro Jonswap ( $E_{JON}$ ) (HASSELMANN *et al.*, 1973) pela seguinte relação:

$$E_{TMA}(f, h) = E_{JON}(f) \cdot \Phi_k(\omega_h)$$

Onde:

$\omega_h$  é a frequência angular normalizada pela profundidade da água ( $h$ ), definida como:

$\omega_h = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{h/g}$ , onde  $f$  = frequência (Hz),  $g$  = aceleração da gravidade.

$$\Phi_k = \begin{cases} 0,5 \cdot \omega_h^2 & \omega_h \leq 1 \\ 1,0 & \omega_h \geq 2 \\ 1 - 0,5 \cdot (2 - \omega_h)^2 & 1 < \omega_h < 2 \end{cases}$$

Quando  $\omega_h \geq 2$  o espectro TMA se iguala a um espectro Jonswap, esta condição é satisfeita em locais de grandes profundidades.

### 3.4.5. Parâmetros de entrada do espectro bidimensional

Pode-se definir a distribuição na frequência do espectro TMA de entrada fornecendo os seguintes parâmetros:

$h$  = profundidade (m);

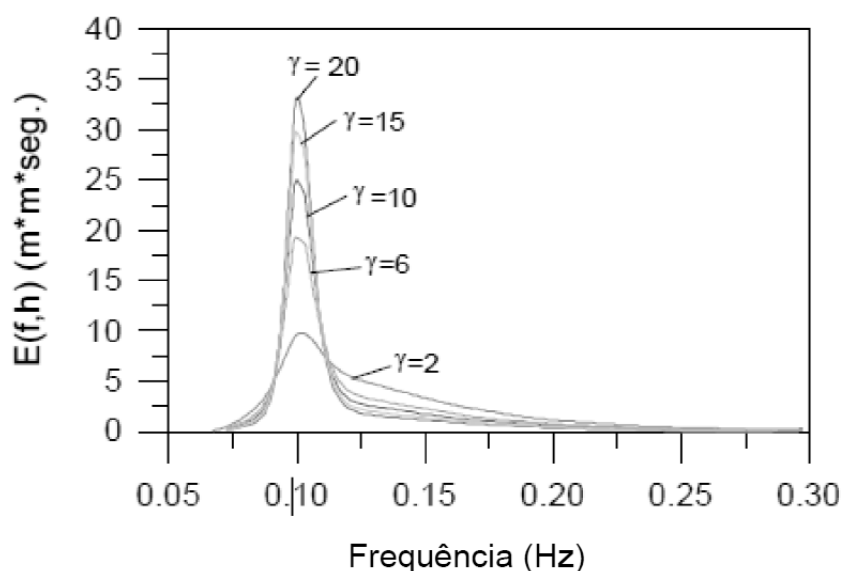
$H_s$  = altura significativa (m);

$f_p$  = frequência de pico (Hz);

$\gamma$  = fator de alargamento do pico.

Na Figura 3.12 observa-se como o formato do espectro TMA varia de acordo com os valores do fator de alargamento do pico ( $\gamma$ ) mantendo os outros parâmetros constantes ( $H_s = 3$  m,  $h = 20$  m e  $f_p = 0,1$  Hz), ou seja com a mesma energia espectral, assim percebe-se que o espectro se estreita mais à medida que  $\gamma$  aumenta.

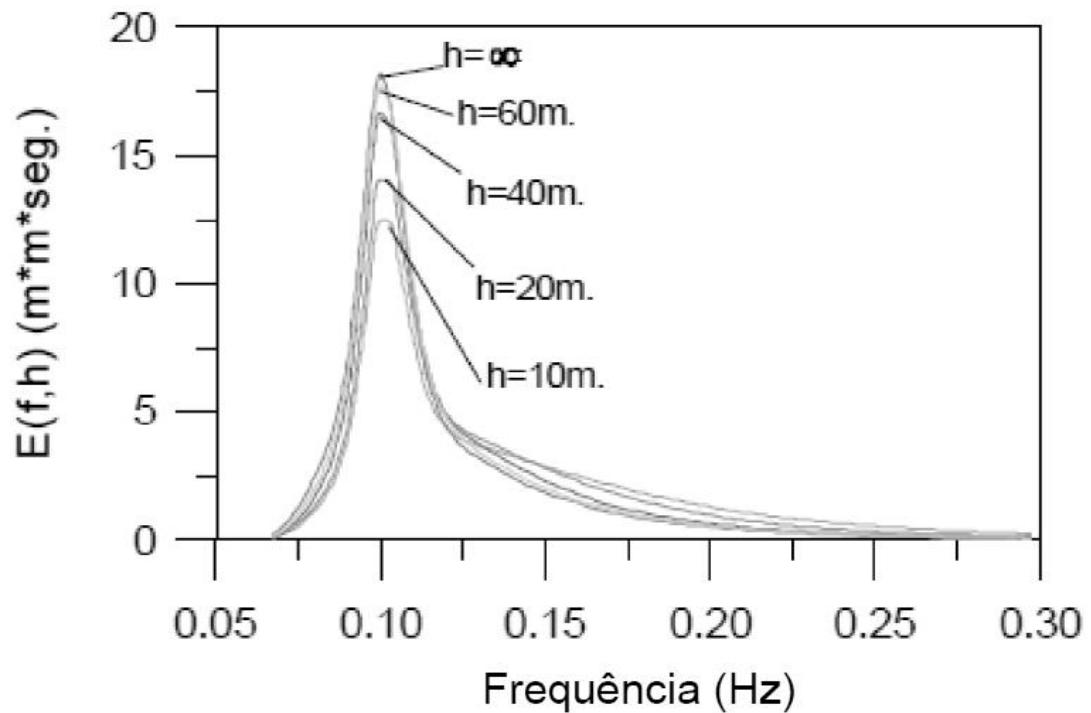
Figura 3.12 - Espectros TMA com parâmetros constantes ( $H_s = 3$  m,  $h = 20$  m,  $f_p = 0.1$  Hz) variando apenas o parâmetro de alargamento ( $\gamma = 2, 6, 10, 15$  e  $20$ ).



Fonte: Gonzalez (2011c).

Na Figura 3.13 observa-se a variação do espectro TMA de acordo com a profundidade, mantendo os parâmetros de onda constantes ( $H_s = 3$  m,  $\gamma = 3.5$ ,  $f_p = 0.1$  Hz), o que corresponde à mesma energia espectral. Note como a energia é redistribuída das frequências mais baixas para frequências mais altas quando a profundidade diminui gradualmente.

Figura 3.13 - Espectros TMA ( $H_s = 3$  m,  $\gamma = 3.5$ ,  $f_p = 0.1$  Hz) para diferentes profundidades ( $h(m) = 10, 20, 40, 60, \infty$ ).



Fonte: Gonzalez (2011c).

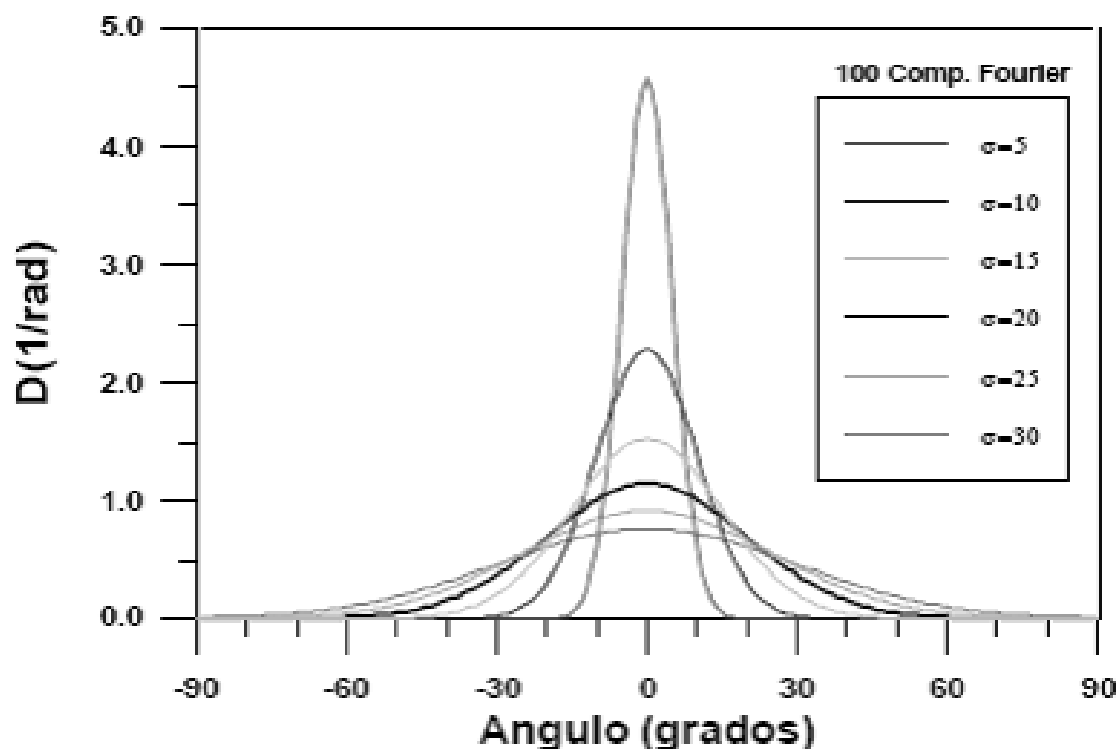
Para se definir a distribuição na direção do espectro TMA usa-se a direção média ( $\Theta_m$ ) e um parâmetro que indica a dispersão direcional ( $\sigma_m$ ):

$\Theta_m$  = direção média das ondas (graus),

$\sigma_m$  = largura do espectro (graus).

Dado que define a forma do espectro direcional, como exemplos são mostrados na Figura 3.14 diferentes funções de dispersão direcional, variando e mantendo constante a direção média das ondas em  $0^\circ$  (ondas vindas do quadrante Norte).

Figura 3.14 - Espectro direcional para diferentes larguras de espectro ( $\sigma_m = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  e  $30^\circ$ ).



Fonte: Gonzalez (2011c).

### 3.5 MODELO COPLA

As correntes geradas na costa pela ação das ondas são os principais fatores que influenciam na morfologia da costa, contudo na maioria das vezes estes sistemas de correntes são altamente complexos (SMITH, 2003). A modelagem do sistema de correntes na zona de arrebentação é imprescindível para se calcular o transporte de sedimentos, bem como para se entender a dinâmica da morfologia da costa. Estes modelos são baseados em equações que podem ser resolvidas com vários graus de complexidade, dependendo das expressões utilizadas para as tensões tangenciais e turbulentas.

O modelo de correntes mais completo é o que resolve as equações em uma malha tridimensional, ou seja, que utiliza todos os parâmetros do sistema circulatório na coluna d'água, em toda a zona de arrebentação, porém é um modelo extremamente complexo, possuindo um custo computacional alto, bem como de difícil calibração. Em aplicações práticas, como no caso do Copla (GONZALEZ, 2011a), utiliza-se os modelos bidimensionais, bem mais fáceis de serem computados.

Um dos grandes avanços no estudo das correntes induzidas pelas ondas se deu com o conceito de tensão de radiação (LONGUET-HIGGINS; STEWART, 1964). Este conceito basicamente afirma que, no momento em que uma onda arrebenta, a grande quantidade de movimento (denominada de tensor de radiação), devido ao excesso de massa de água injetado na zona de arrebentação, é o que gera as correntes de praia. Dessa forma são aceitas algumas hipóteses para se construir o modelo de circulação costeira, dentre elas:

- A velocidade de corrente praticamente horizontal e independente da profundidade.
- Cada trem de ondas que arrebenta na praia cria o seu próprio sistema de correntes, e cria movimentos médios associados apenas a esse trem de ondas, sendo que após a passagem desse trem de ondas o movimento é desprezível.
- Os efeitos de viscosidade molecular são fracos, exceto nos contornos, podendo assim ser admitido que o movimento oscilatório é essencialmente irrotacional.
- As flutuações turbulentas devidas às ondas são desprezíveis.
- A força de Coriolis é desconsiderada.
- A interação do trem de ondas com as correntes é desprezível.

Assim, o Copla é um modelo bidimensional de correntes de praia deduzido a partir das equações de Navier-Stokes (FLÓREZ-ORREGO, 2012). Estas equações são integradas na

profundidade e calculadas em um período médio de tempo num sistema de coordenadas ao nível médio do mar.

### 3.6 MODELO EROS

Os modelos morfodinâmicos para a zona de arrebentação são utilizados para simular o comportamento em curto prazo (horas ou dias) de uma praia submetida à ação de um estado de mar, com características definidas ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ , duração).

Estes modelos utilizam o resultado da modelagem dos processos físicos que atuam no litoral, além das características dos sedimentos da praia para resolver o fluxo de sedimentos na zona de arrebentação, tendo como resultado o transporte de sedimentos e a variação da batimetria resultantes destes processos físicos atuantes.

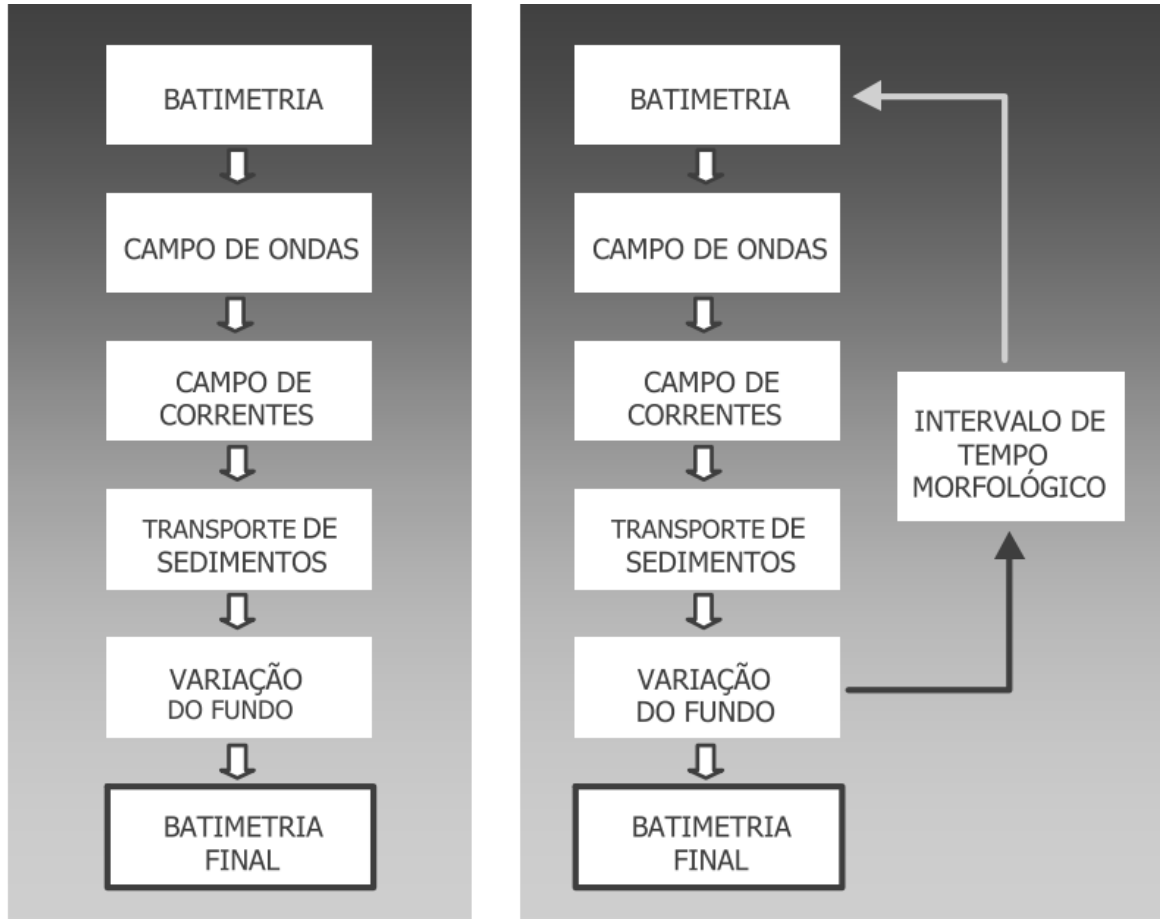
O modelo Eros (GONZALEZ, 2011b) utiliza as fornecidas pela saída do modelo Oluca (item 3.4) e do modelo Copla (item 3.5), além das características do sedimento da praia e a batimetria para realizar os cálculos. A partir dos fluxos de transporte é obtida a taxa de tempo de variação do fundo.

As simulação podem ser feitas em dois modos diferentes (Figura 3.15): no modo de erosão-sedimentação inicial (ESI) e simulação no modo de evolução morfodinâmica (MEM). No modo ESI a equação de conservação do sedimento é resolvida supondo que as condições hidrodinâmicas (ondas, correntes de praia, sedimentos, batimetria) não variam no intervalo de duração da simulação.

No modo MEM o Eros leva em conta a interação entre a variação do fundo e as condições hidrodinâmicas. No início da simulação considera-se algumas condições hidrodinâmicas estacionárias durante um certo intervalo de tempo. Com a variação do fundo

resultante são recalculadas as condições hidrodinâmicas e os fluxos de transporte, continuando esse ciclo até o final da simulação.

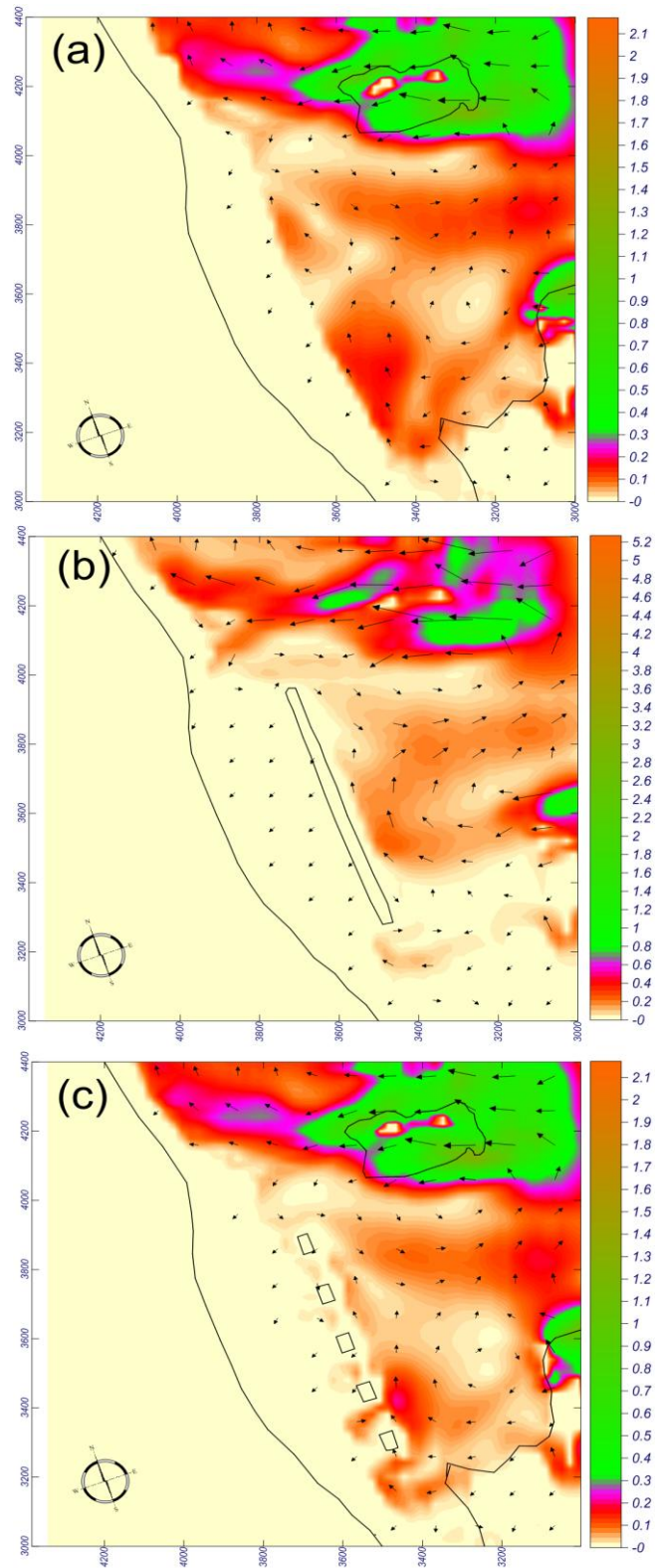
Figura 3.15 - Modos de simulação do EROS. No modo ESI (esquerda) o modelo considera as condições hidrodinâmicas como constantes durante toda a simulação. No modo MEM à direita o modelo calcula a variação das condições hidrodinâmicas para cada intervalo de tempo morfológico, atualizando as condições iniciais para o próximo passo de simulação.



Fonte: Gonzalez (2011b).

No estudo de caso realizado com o SMC em Candeias, utilizou-se o modo ESI para simular o transporte de sedimentos para os três cenários estudados (Figura 4.4). Para a simulação feita considerando-se o regime de ondas extremo ( $H_s = 2,29$  m;  $T_p = 12,12$  s;  $D_p = 112^\circ$ ) e maré alta (2,50 m), durante 12 horas, verificou-se que para cada cenário o transporte de sedimentos respondia de forma diferente (Figura 3.16).

Figura 3.16 - Resultado das simulações de transporte de sedimentos através do modelo Eros no modo ESI, para o regime de ondas extremo ( $H_s = 2,29$  m;  $T_p = 12,12$  s;  $D_p = 112^\circ$ ) e maré alta (2,50 m) para os três cenários diferentes da área de estudo: (A) sem dique de proteção; (B) com dique contínuo; (C) com dique seccionado.



Fonte: o autor.

Para o cenário aonde não existe um dique de proteção (Figura 3.16 - A) verificou-se a existência de um intenso transporte de sedimento da praia em direção ao fundo, o que caracteriza uma tendência forte à erosão da praia, e que foi verificado na prática. Para o caso do dique seccionado em 5 partes, que representa a configuração atual da área de estudo (Figura 3.16 - C), a tendência à erosão se manteve apenas em uma pequena seção na área ao Sul do dique e com bem menor intensidade, o que indica que o dique seccionado é uma solução que permite mitigar o efeito erosivo das ondas na área de estudo, não se tratando, entretanto, da solução ideal.

Assim o SMC demonstrou ser uma ferramenta muito útil para estudar a morfodinâmica de uma praia e a sua resposta a várias configurações e climas de ondas, de forma rápida e prática, economizando tempo computacional e investimento em diferentes ferramentas computacionais, de forma a agilizar a tomada de decisões dos gestores, evitando assim um maior prejuízo na área de estudo devido a erosão costeira.

Este estudo investiga a dinâmica de sedimentos em uma área de praia de Candeias, localizada na região metropolitana de Recife, estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 2.1), após uma estrutura rígida (quebra-mar) ter sido instalada originalmente para prevenir a erosão costeira, e recentemente ter sido modificada para tentar melhorar o transporte de sedimentos.

Na região de estudo, a ocupação descontrolada do litoral e da falta de informações sobre a dinâmica costeira, levaram a crescentes problemas de erosão costeira. Há uma tendência geral de recuo litoral nesta região, causada principalmente pela elevação do nível do mar, bem como o aumento do número de eventos significativos de tempestade registrados.

A morfologia da praia da área de estudo foi completamente modificada após uma estrutura dura, conhecida como quebra-mar, com um comprimento total de 750 m, sendo

colocada a cerca de 200 m da praia e paralelo a esta, com o propósito de evitar a erosão da área. No entanto, esta estrutura gerou modificação no sistema de transporte de sedimentos, causando erosão ao norte da estrutura, onde os problemas de erosão não haviam sido registrados antes.

Quebra-mares são geralmente construídos para proteger a linha costeira da erosão causada pela ação das ondas, mas a sua utilização está frequentemente associada a uma mudança na dinâmica costeira da região, com implicações de erosão em áreas adjacentes. Fato que ocorreu na área de estudo, onde a instalação do quebra-mar provocou novos problemas de erosão fora da área protegida.

Poucos anos depois do quebra-mar ter sido construído, o acúmulo de sedimentos na área da praia sombreada pelo quebra-mar se transformou em uma saliência, o que levou a uma parada quase completa no transporte de sedimentos pela corrente litorânea. Como resultado, os sedimentos que deveriam ter sido transportados para o norte do quebra-mar, foram provavelmente desviados para águas profundas.

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO DE EROSÃO COSTEIRA EM CANDEIAS, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE

Este estudo de caso foi publicado como um artigo com o título "*Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil)*", no periódico *Journal of Coastal Research* em 2014, na edição especial nº 71, esta edição da revista teve o título "*Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases*", que, como o título diz, reuniu estudos de casos selecionados sobre erosão costeira em países em desenvolvimento, e compilou o resultado dos trabalhos do encontro internacional que ocorreu em Tamandaré, Pernambuco, entre os dias 9 e 21 de setembro de 2013, chamado de "CEMSAC - *Coastal Erosion and Management for Safer Coasts in a Changing Climate*", e reuniu especialistas sobre erosão costeira de todo o mundo, além de estudantes de vários países em desenvolvimento.

Este capítulo está organizado da mesma forma do artigo, com introdução, resultados e conclusões. As figuras e tabelas foram renumeradas para seguir a sequência da dissertação.

#### 4.1 INTRODUÇÃO

As praias são de grande importância como áreas de lazer, porém numa perspectiva geológica, as praias têm um valor como um sistema de defesa natural da costa, a qual está exposta ao risco constante de erosão, devido à ação das ondas e marés.

Problemas de erosão costeira tornaram-se predominantes no nordeste do Brasil como resultado do desenvolvimento costeiro não planejado. A urbanização, em conjunto com um histórico de ocupação e utilização do solo, incluindo o aterro de áreas de mangue, a prática da impermeabilização do solo (que impede a drenagem), combinado com as características meteo-oceanográficas locais, causaram um problema de erosão crescente e têm contribuído para a redução da resiliência das praias.

Este estudo investiga a dinâmica de sedimentos em uma área da praia de Candeias, localizada na região metropolitana do Recife, estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil

(Figura 2.1), onde uma estrutura rígida (quebra-mar) foi originalmente instalada para evitar a erosão costeira e, mais recentemente, foi modificada para tratar o aprisionamento de sedimentos na área protegida pelo quebra-mar, bem como a erosão costeira resultante na praia ao lado.

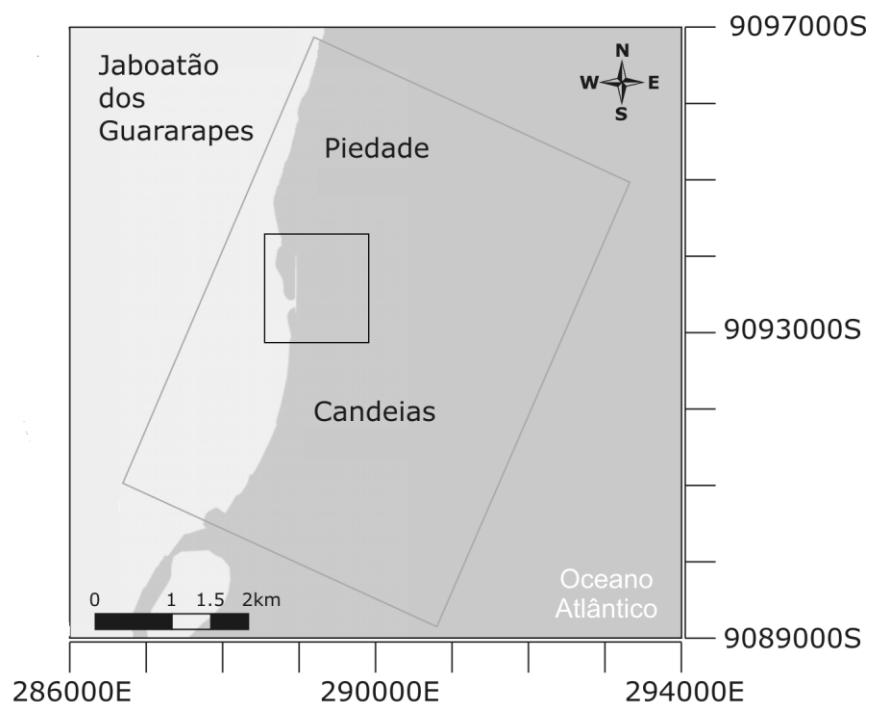
O principal objetivo deste estudo é analisar e comparar as dinâmicas costeiras de diferentes configurações do quebra-mar, bem como a criação de um cenário de simulação sem o quebra-mar, utilizando a modelagem numérica para determinar qual delas minimiza o impacto da erosão na área.

Primeiro, a área de estudo será descrita e o problema da erosão de praia na área é apresentado. Em segundo lugar, a estrutura rígida é detalhada, bem como os módulos e ferramentas numéricas incluídas no pacote de software Sistema de Modelagem Costeira (SMC) são descritas. A terceira parte resume uma discussão da configuração do modelo regional. E, finalmente, os resultados da simulação são apresentados. A conclusão avalia a aplicação de software e discute as perspectivas futuras da erosão costeira na área de estudo.

## 4.2 A PRAIA DE CANDEIAS

A praia de Candeias é conhecida como uma das melhores praias no nordeste do Brasil, com cerca de 3 km de extensão e uma elevada densidade populacional (Figuras 4.1 e 4.2). Em 2013, a densidade populacional registrada no município de Jaboatão dos Guararapes foi de 2.491,82 habitantes por quilômetro quadrado (fonte: <http://cod.ibge.gov.br/A62>), com uma concentração ainda maior na zona costeira, que é a área preferida para se morar.

Figura 4.1 - Localização da área de estudo, no litoral do município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana do Recife, estado de Pernambuco. O retângulo escuro delinea a área de estudo com o quebra-mar no formato antigo, o retângulo claro é o contorno da grade de propagação utilizada no SMC.



Fonte: o autor.

Existem algumas características geográficas da região que a tornam altamente suscetíveis à ação do mar, incluindo: baixas altitudes (entre 2,0 m e 4,0 m acima do nível médio do mar - NMM); áreas planas, rodeadas por planícies costeiras; grande drenagem superficial com a presença de rios, córregos e lagos e áreas de inundação permanente, devido ao nível raso do lençol freático (FINEP/UFPE, 2009).

Há também uma tendência geral de retrogradação do litoral nesta região, causada principalmente pela elevação do nível do mar, bem como o aumento do número de eventos de tempestade significativa registradas (NEVES; MUEHE, 1995).

Essa tendência prevalece ao longo de vários trechos da costa de Pernambuco, e é sentida principalmente nos municípios da região metropolitana do Recife, devido à sua elevada densidade populacional e consequente pressão sobre o setor imobiliário na zona costeira (FINEP/UFPE, 2009; MARRONI; ASMUS, 2005).

#### 4.2.1 *Proteção natural dos arrecifes*

As formações de arrecifes naturais, quando existem, contêm a tendência de erosão costeira na região e são abundantes nas águas rasas da costa do nordeste brasileiro (MAIDA; FERREIRA, 1997).

Ao gerar mudanças bruscas das características das ondas e a consequente redução de sua energia, as formações de arrecifes naturais, como os arrecifes de corais e arrecifes de arenito, agem como barreiras submersas contra as ondas, assim, protegendo contra a erosão costeira (DALLY; DEAN; DALRYMPLE, 1985; KENCH; BRANDER, 2006; ROBERTS; MURRAY; SUHAYDA, 1975; SALLENGER; HOLMAN, 1985).

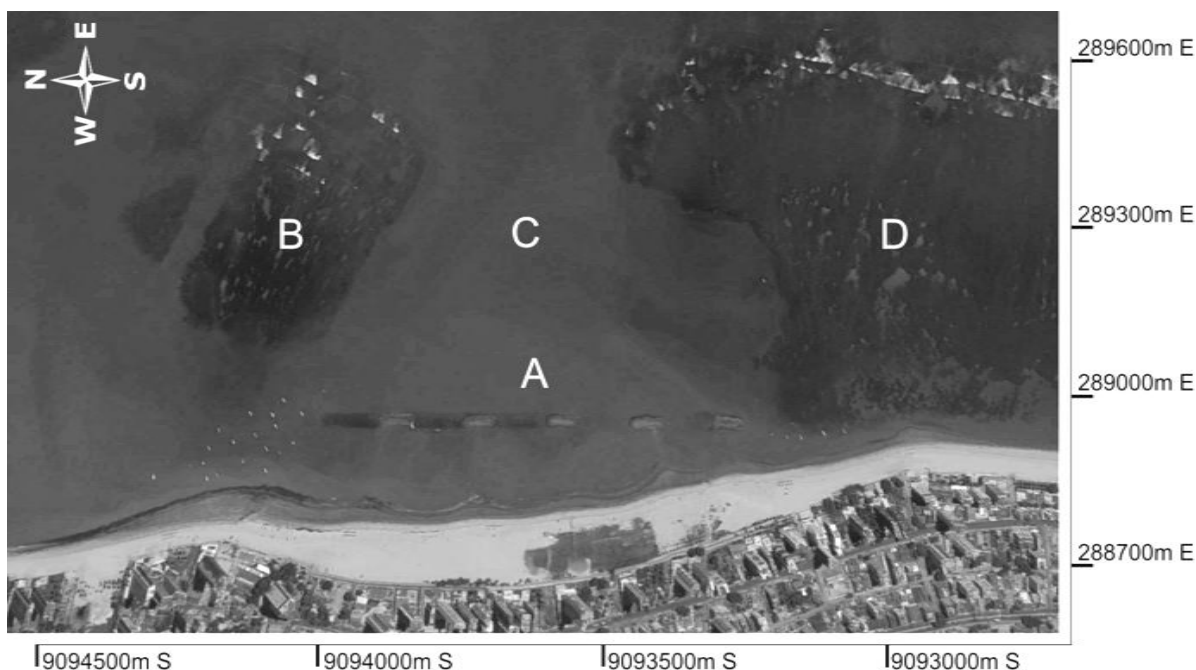
Em algumas áreas do litoral da região metropolitana do Recife, a energia das ondas é dissipada na maior parte ao longo dos arrecifes, consequentemente, criando correntes fracas induzidas por ondas nas águas rasas perto das praias (LONGUET-HIGGINS, 1970). No entanto, em outras áreas, onde o topo dos arrecifes não são rasos o suficiente, ou esta proteção natural dos arrecifes não existe, a energia das ondas que atinge a praia é quase a mesma registrada em águas mais profundas (COSTA, 2010).

Nestas áreas não protegidas, os eventos de ondas extremas criam fortes correntes induzidas por ondas que, consequentemente, transportam maiores quantidades de sedimentos. Nestas áreas as dunas arenosas do pós-praia funcionam como uma reserva natural para evitar o esgotamento dos sedimentos, do contrário, o alto índice de transporte de sedimentos pode causar a erosão da praia.

Enquanto a praia de Candeias está quase que totalmente protegida dos eventos de ondas extremas por uma grande formação de arrecife de franja (Figura 4.2), na zona norte desta praia existe uma lacuna natural conhecida como "Barra dos Abreus" (Figura 4.2-C). Este canal de águas profundas está localizado entre a grande formação de arrecife de franja para o sul (Figura 4.2-D), e um arrecife isolado ao norte, conhecido como "Abreus" (Figura 4.2-A).

Devido à alta profundidade do canal da Barra dos Abreus (Figura 4.2), a energia de onda de águas profundas pode se propagar quase sem qualquer obstáculo para a costa. O empinamento das ondas e o atrito com o fundo dissipa apenas uma pequena fração da energia das ondas, expondo assim a área da praia em frente à Barra dos Abreus a um nível elevado de transporte de sedimentos provocado pela energia das ondas e das correntes.

Figura 4.2 - A praia de Candeias mostrando (A) o quebra-mar modificado na configuração atual, (B) o arrecife isolado conhecido como Abreus, (C) a barra dos Abreus e (D) a formação de arrecife de franja que protege a maior parte da praia.



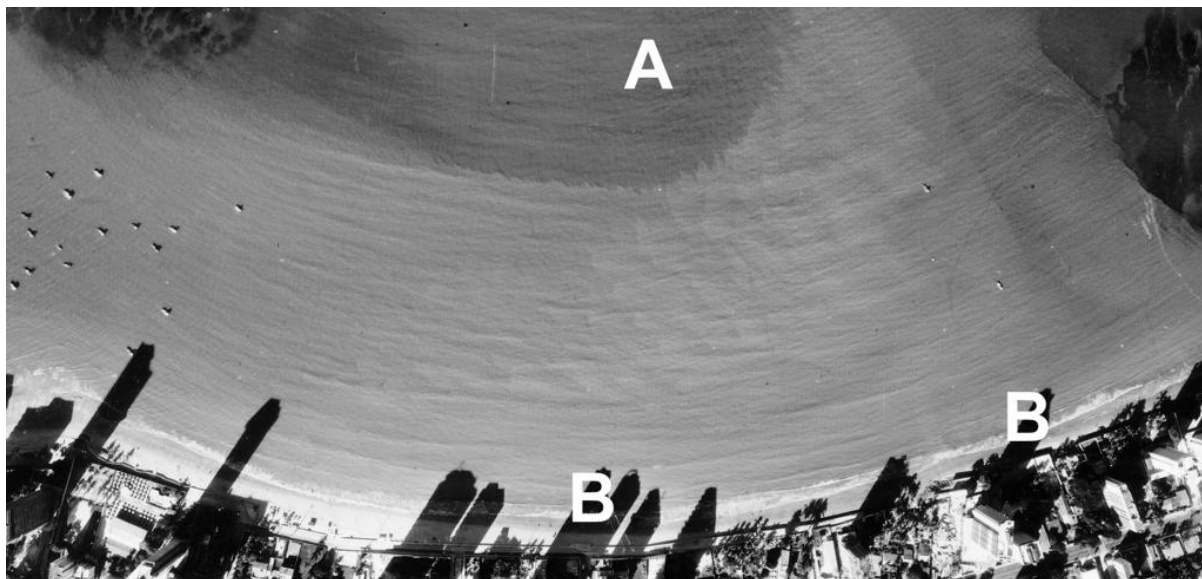
Fonte: Google Earth.

#### 4.2.2 Invasão do Litoral

A morfologia das praias é afetada por construções humanas instaladas na área de pós-praia, porque essas construções tendem a estabilizar a areia que poderia servir como uma reserva natural de sedimentos para o sistema altamente dinâmico das praias. A crescente pressão imobiliária e uma gestão não-integrada da urbanização costeira (MUEHE, 2004), permitiu que os edifícios avançassem dentro da área de praia na direção do mar (Figura 4.3), muitas dunas costeiras de areia foram destruídas, com a urbanização chegando cada vez mais perto da linha de preamar (BORBA; MANSO, 1999).

Além da invasão da praia por construções urbanas, estruturas rígidas como espigões e diques de contenção foram instalados. Estas estruturas costeiras foram implementadas sem qualquer conhecimento aprofundado da dinâmica costeira local (FINEP/UFPE, 2009) e normalmente transferem a problemática da erosão para a praia adjacente, como consequência da interrupção do equilíbrio dinâmico do transporte de sedimentos na área.

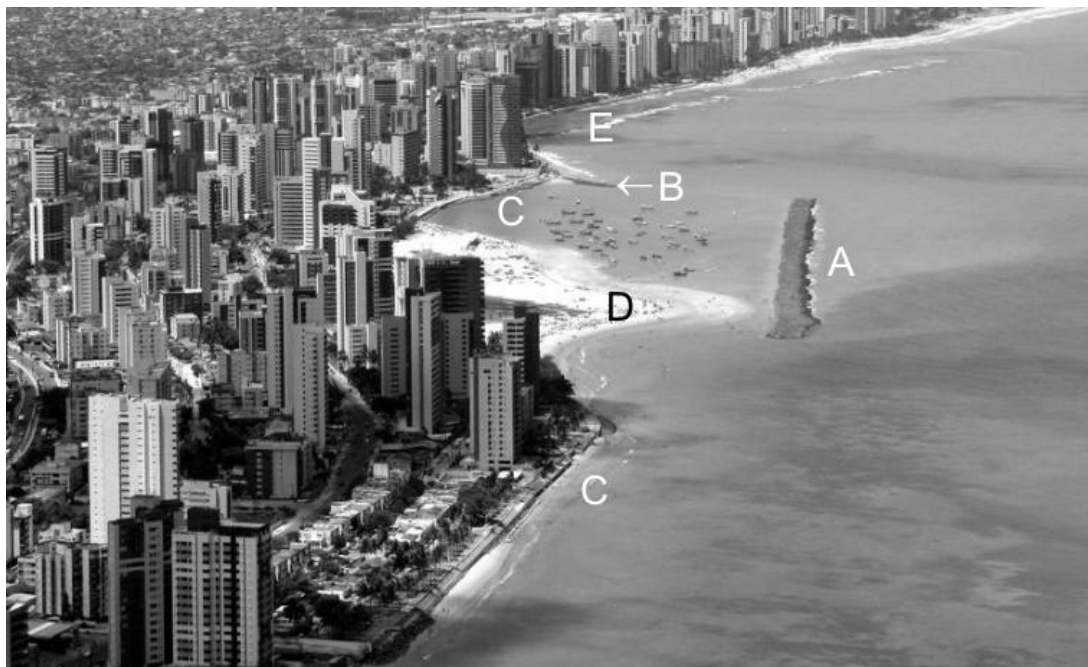
Figura 4.3 - O litoral de Jaboatão dos Guararapes em 1997, mostrando (A) a Barra dos Abreus e (B) uma pequena área de pós-praia e diques de contenção para proteger os edifícios que invadiram a zona de praia.



Fonte: Fidem.

Em 2004 um quebra-mar destacado, medindo 700 m de comprimento foi instalado a 20 m da praia em uma área exposta à ação das ondas (Figura 4.4-A). Apesar dos quebra-mares destacados serem geralmente construídos como forma de proteger a linha costeira da erosão causada pela ação das ondas, a sua instalação, mesmo com um estudo prévio e simulações da dinâmica costeira, pode acarretar na erosão em áreas adjacentes (EDWARDS; NAMIKAS, 2011), isto ocorreu na área de estudo.

Figura 4.4 - O litoral de Jaboatão dos Guararapes, mostrando a ocupação de alta densidade da área de estudo (A) o quebra-mar destacado, instalado na região em sua primeira configuração, (B) um pequeno espigão, (C) as áreas já esgotadas de sedimento protegidas por diques de contenção, (D) a saliência formada por sedimentos imobilizados e (e) a área erodida ao norte.



Fonte: Roberto Angelo.

Em 2013, nove anos após a instalação do quebra-mar, ele foi modificado para sua configuração atual, abrindo quatro lacunas de 100 m cada, ao longo do seu comprimento, mantendo no lugar cinco seções menores do quebra-mar original (Figuras 4.2-A e 4.5-A).

Essa reconfiguração planejada do quebra-mar, foi executada em conjunto com uma engorda ao longo de toda a praia de Candeias, num esforço para restabelecer a morfologia típica da praia. As últimas observações mostram que as correntes induzidas por ondas têm promovido um rearranjo de sedimentos no local (Figura 4.5), mas como esta nova configuração tem ainda de enfrentar as correntes mais intensas do inverno, nenhuma conclusão pode ser feita sobre o impacto resultante das ondas extremas na morfologia da praia, além de realizar simulações.

Figura 4.5 - Configuração do quebra-mar em uma maré baixa de sizígia (31 de março de 2014) (A) três das seções restantes quebra-mar, (B) uma saliência (C) uma baía formada pelo sedimento rearranjado pelas ondas e correntes, apenas alguns meses depois da reconfiguração do quebra-mar.



Fonte: o autor.

### 4.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO REGIONAL

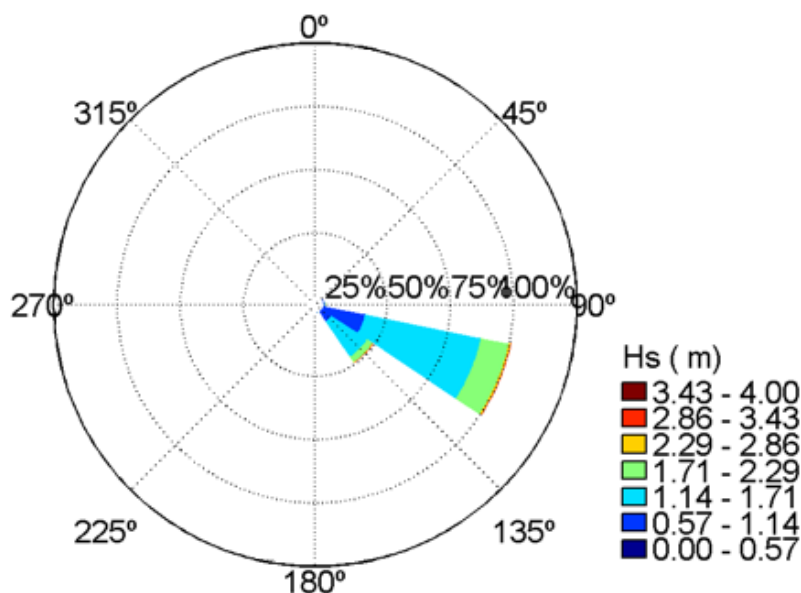
#### 4.3.1 *Clima de Ondas*

O clima de ondas nesta área é descrito usando o IH-Ameva, a ferramenta de análise estatística do módulo SMC-Tools. Um ponto DOW em uma profundidade de 15,6 m na baixa-mar média de sizígia (MLWS), localizado nas coordenadas 290687E e 9093096S, foi utilizado como referência para extrair os dados da base de dados do IH-Data, e também foi utilizado para se calcular a série de estados de mar mais representativos, utilizando a técnica da máxima similaridade, para serem propagados até a costa.

O clima de ondas no ponto DOW (Tabela 4.1 e Figura 4.6) mostra mais de 75% de probabilidade de ondas provenientes da direção Leste-Sudeste, e ondas de Sudeste com 24% de probabilidade. Outros 0,5% das ondas chegam de direção Leste e uma porcentagem insignificante vêm de Sul-Sudeste (0,08%).

Uma vez que as ondas incidentes Leste-Sudeste predominam, essas ondas são as únicas a serem consideradas para se descrever o clima de ondas nesta região.

Figura 4.6 - A rosa direcional de  $H_s$ , calculada pelo componente Ameva.



Fonte: o autor.

A tabela estatística das ondas mostra a altura significativa média das ondas (ou típica), que são as ondas registradas em 50% do tempo ( $H_{S50\%}$ ), e a altura das ondas de tempestade (ou extrema), que são as ondas registradas em um evento extremo que ocorre durante 12 horas por ano ( $H_{S12}$ ), bem como os valores do período das ondas típico e extremo (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. A probabilidade do clima de ondas calculado pelo componente Ameva. As ondas de ESE são predominantes com mais de 75% de probabilidade.

| Direção | Probabilidade | $H_{S50\%}$ | $H_{S12}$ | $T_{P50\%}$ | $T_{P12}$ |
|---------|---------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|         | (%)           | (m)         | (m)       | (s)         | (s)       |
| ENE     | 0.00          | 1.11        | 1.13      | 9.51        | 10.98     |
| E       | 0.55          | 0.90        | 1.78      | 7.06        | 10.97     |
| ESE     | 75.25         | 1.37        | 2.59      | 7.46        | 12.12     |
| SE      | 24.11         | 1.37        | 2.48      | 6.65        | 8.41      |
| SSE     | 0.08          | 1.25        | 1.86      | 5.36        | 11.04     |

Fonte: o autor.

#### 4.3.2 Caracterização do Nível do Mar

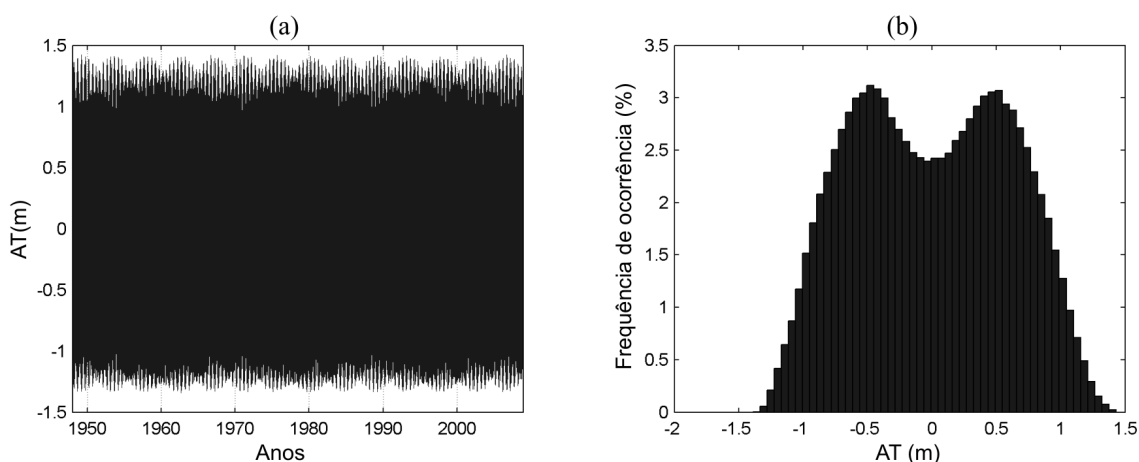
O regime de marés na região é do tipo semi-diurna, com um número de forma  $F = 0,09$  e uma média de 12,42 horas de período, apresentando duas marés altas e duas marés baixas

por dia lunar, com pequena desigualdade diurna. De acordo com a classificação de Hayes (1979), as marés do estado de Pernambuco são do tipo forte mesomaré, variando de -0,2 m até 2,6 m.

Para caracterizar as marés astronômicas, foram utilizados os dados da base GOT, no ponto de coordenadas 332466E 9118711S, e para as marés meteorológicas um ponto da base de dados GOS com coordenadas 307266E 9082111S.

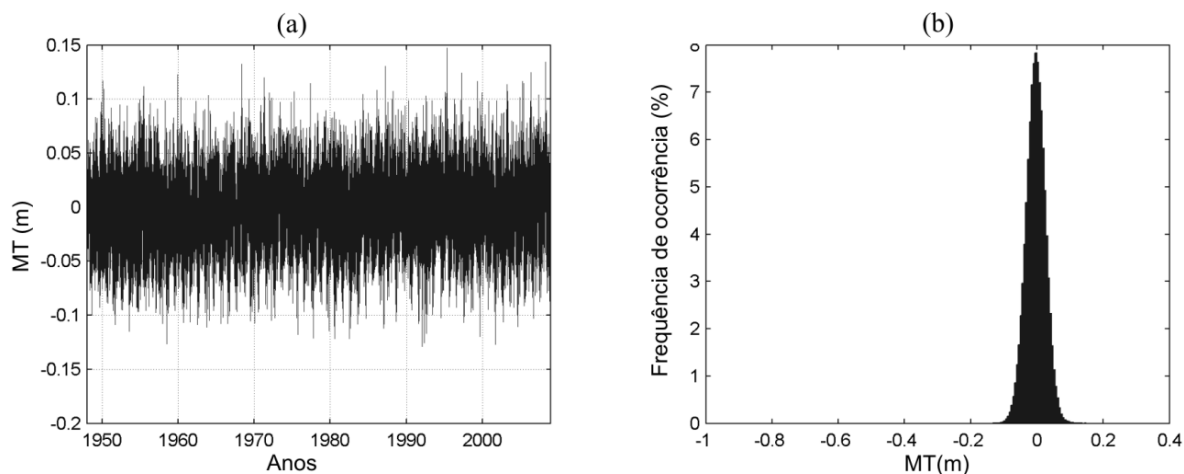
Os resultados mostram que o regime de oscilação do nível do mar é principalmente governado pela maré astronômica, com oscilações entre  $\pm 1,4$  m (Figura 4.7), enquanto que as marés meteorológicas oscilam entre  $\pm 0,1$  m, com influência praticamente desprezível (Figura 4.8).

Figura 4.7 - Caracterização maré astronômica (A) série histórica e (B) histograma.



Fonte: o autor.

Figura 4.8 - Caracterização da maré meteorológica: (A) série histórica e (B) histograma.



Fonte: o autor.

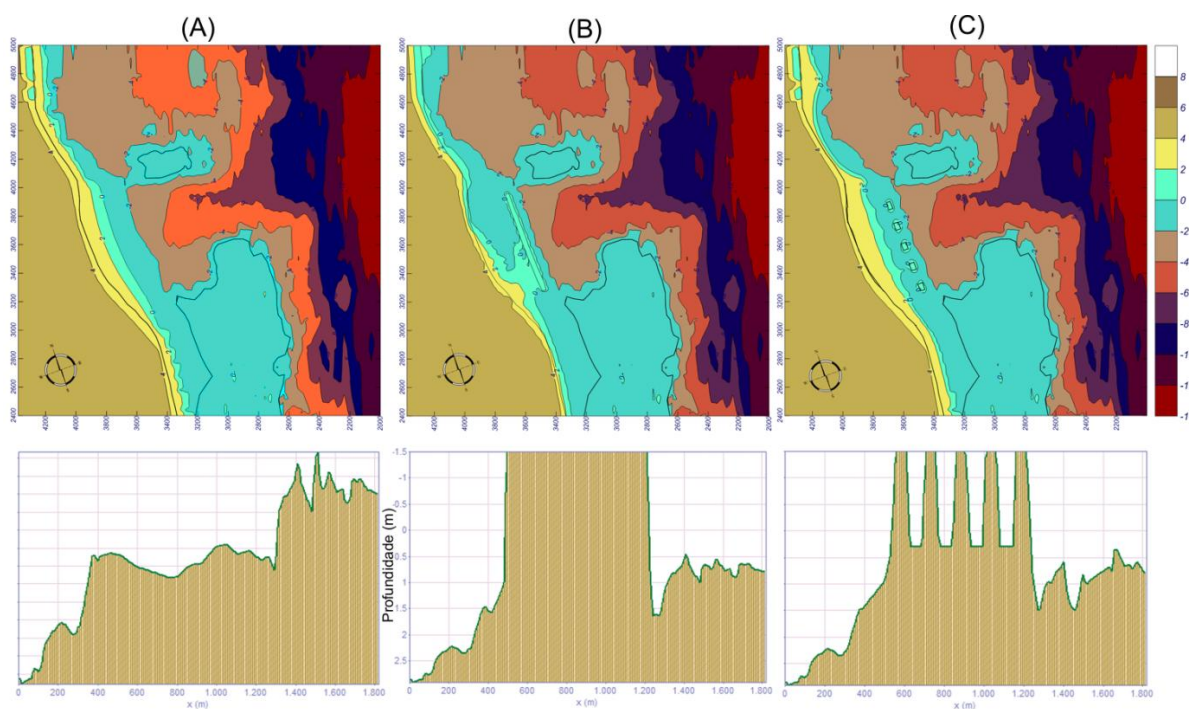
### 4.3.3 Características dos sedimentos

De acordo com Borba e Manso (1999), a análise granulométrica dos sedimentos na praia e na pós-praia da área de estudo obteve um valor de D50 entre 0,25 mm e 0,125 mm. Classificando este sedimento como areia fina.

### 4.3.4 Dados de topografia

A batimetria de baixa resolução da área de estudo foi obtida através do IH-Ameva. A esta fonte de baixa resolução batimétrica, foi acrescentada medições de alta resolução fornecidos pelo projeto MAI (FINEP/UFPE, 2009), a batimetria de cada cenário foi então modificada para refletir cada configuração do quebra-mar, bem como o cenário sem quebra-mar, utilizando-se o Módulo de Modelagem de Terreno (MMT), do SMC (Figura 4.9).

Figura 4.9 - As três configurações diferentes da área de estudo (A) sem quebra-mar, (B) antigo quebra-mar e (C) quebra-mar atual. Acima a batimetria, abaixo um perfil batimétrico com a profundidade exagerada ao longo do eixo do quebra-mar.



Fonte: o autor.

A Tabela 4.2 resume todas as configurações utilizadas neste estudo: o primeiro quebra-mar contínuo, o quebra-mar seccionado atual, e um cenário sem quebra-mar.

Tabela 4.2. Cenários simulados da área de estudo.

| Cenário | Partes e comprimento do quebra-mar                          | Ano de conclusão |
|---------|-------------------------------------------------------------|------------------|
| Antigo  | Uma parte de 750 m                                          | 2004             |
| Atual   | Cinco partes de 50 m cada<br>separadas por lacunas de 100 m | 2013             |
| Sem     | Nenhum                                                      | -                |

Fonte: o autor.

## CAPÍTULO 5

### DADOS OBSERVACIONAIS - ONDÓGRAFO DIRECIONAL

Este capítulo é baseado no artigo "*A Practical Spectral Partitioning Method Based on a Wave Buoy Data Analysis*", que foi submetido para publicação em agosto de 2015. Ele está organizado segundo o formato do artigo, com as seções: introdução, material e métodos, resultados, discussão e conclusões.

#### 5.1 INTRODUÇÃO

A caracterização do estado do mar que prevalece em uma determinada região durante todo o ano, é definida como clima de ondas (LAING *et al.*, 1998), ela é essencial para o planejamento de prevenção de fatores de risco para os ecossistemas costeiros, infra-estruturas costeiras, bem como a navegação marítima. É também fundamental para calcular as tendências dos campos de ondas no passado e também no futuro (FENG *et al.*, 2014; LIONELLO; GÜNTHER; HANSEN, 1995), usando cenários distintos de emissões de gases do efeito estufa (NAKICENOVIC *et al.*, 2000).

Para se estudar o clima de ondas de uma determinada região, muitas ferramentas podem ser usadas, tais como modelos computacionais de previsão de ondas, medições por satélite e equipamentos instalados *in situ*, como instrumentos acústicos e bóias. O estudo do clima de ondas através da modelagem é o recurso mais amplamente utilizado em todo o mundo. Entretanto, para atingir um determinado grau de precisão, é necessário realizar a calibração do modelo usando dados coletados *in situ* (REGUERO *et al.*, 2012).

A costa brasileira carece de medições de ondas situ, principalmente devido à falta de instrumentos instalados, que podem realizar coletas sistemáticas das características de dados

de ondas (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010). Modelos de ondas, como o Wavewatch (TOLMAN, 1989), indicam que o clima de ondas ao largo da costa de Pernambuco é caracterizada pela ocorrência simultânea de dois ou três sistemas de ondas distintos (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010; SEMEDO *et al.*, 2011).

As ondas em um determinado local são classificadas de acordo com a sua origem, como vagas (*windseas*, em inglês) ou marulhos (*swells*, em inglês). Os ventos locais criam as vagas, enquanto que os *swells* são gerados em regiões distantes (SVERDRUP; MUNK, 1947). Os parâmetros médios das onda (altura significativa total das ondas, período médio das ondas e direção média) não representam corretamente o estado do mar na maior parte do tempo, porque eles não levam em conta as diferentes componentes direcionais da distribuição de energia das ondas, que têm características particulares que muitas vezes diferem significativamente da média.

O estado do mar resultante da combinação de vários sistemas de ondas compõe uma distribuição da energia de ondas ao longo de diferentes direções e frequências, esta distribuição é conhecida como espectro direcional, que apesar de sintetizar toda a energia ondulatória presente no oceano em um determinado momento, não é um recurso prático para ser utilizado. Sendo assim, os principais parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção de pico), que descrevem separadamente os sistemas que compõem o espectro direcional, são extraídos através de técnicas de particionamento. Este conjunto de parâmetros destes sistemas individuais caracteriza mais precisamente um estado de mar (DANIELE HAUSER, KIMMO K. KAHMA, HARALD E. KROGSTAD, SUSANNE LEHNER, 2005).

Durante as últimas décadas, vários algoritmos de particionamento foram propostos para identificar os sistemas de ondas que compõem a distribuição espectral de energia e

determinar os seus principais parâmetros. Franco e Filho (2005) utilizou um critério simples, introduzido por Rodríguez, Guedes Soares e Machado (1999), que trouxe resultados insatisfatórios, porque se baseou apenas na distribuição do espectro na frequências, omitindo a informação no espectro direcional. Wang e Hwang (2001) utilizou um método de análise do declive da distribuição espectral, juntamente com o cálculo de uma frequência de corte, com base na distribuição espectral de Pierson e Moskowitz (1964) para a separação das energias de *swell* e de vagas.

Portilla et al. (2009) investigaram diferentes técnicas de separação, incluindo alguns técnicas que consideram a distribuição de energia das ondas apenas no domínio da frequência (1D), e também a distribuição das ondas nos domínios da frequência e da direção (2D). Foi então proposto uma técnica 1D mais robusta, que tem por objetivo eliminar os picos obviamente espúrios, resultando em um conjunto de partições mais consistentes.

Este artigo propõe um método de particionamento modificado a partir da técnica de eliminação de picos espúrios, desenvolvido por Portilla et al. (2009), através da introdução do detecção da energia de vagas, com base na previsão do vento local. Além disso, este método considera a informação espectral direcional para caracterizar adequadamente os sistemas de ondas.

Assim, os objetivos deste estudo são:

1. Descrever o método modificado de particionamento de Portilla et al. (2009), utilizado para a partição dos dados de ondas coletados por um ondógrafo direcional fundeado no litoral sul do estado de Pernambuco (Figura 5.1);

2. Comparar os resultados do particionamento, obtido através da utilização deste método, com os resultados de um programa fornecido pelo fabricante, para estabelecer um critério de controle de qualidade;
3. Descrever o clima de ondas na região com estes dados particionados.

Figura 5.1 - Ondógrafo Waverider MKIII utilizado para o experimento.



Fonte: Prof. Alex Costa.

## 5.2 LOCALIZAÇÃO

O ondógrafo direcional UFPE01 foi fundeado ao largo da localidade de Suape, no litoral sul do estado de Pernambuco, Brasil, nas coordenadas UTM zona 25L, 286387 m E, 9071447 m S (Figura 5.2), a profundidade de fundeio foi de 17 m.

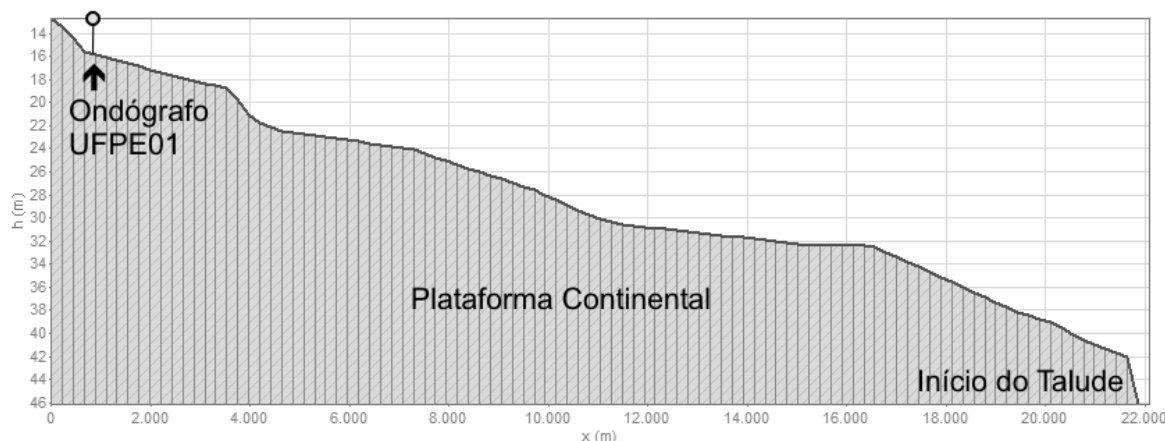
Figura 5.2 - Localização do ondógrafo UFPE01, fundeado em frente ao porto de Suape, coordenadas em UTM, zona 25L.



Fonte: Google Earth.

Usando os dados de batimetria da Marinha do Brasil, incluída na base de dados de batimetria do programa SMC (item 3.2.1), podemos calcular a inclinação média, da posição do ondógrafo UFPE01 até a quebra do talude como sendo de 0,12% (1:833), enquanto que a inclinação máxima da plataforma continental chega a apenas 0,6% (1:167) (Figura 5.3). Podemos assim considerar a rampa em frente ao ondógrafo como uma rampa suave, com inclinação menor que 1% (1:100), o que torna válido a aplicação das teorias lineares, ou fracamente lineares de ondas, pré-requisito este conhecido como pendente suave, necessárias ao uso do modelo Oluca, que faz parte do pacote SMC (item 3.4.1).

Figura 5.3 - Perfil esquemático da rampa do fundo em frente ao ondógrafo. Escala vertical exagerada.



Fonte: o autor.

### 5.3 MEDIÇÃO DE ONDAS

O ondógrafo utilizado nesta pesquisa é uma boia modelo Waverider MKIII, fabricado pela empresa holandesa Datawell BV, adquirida e importada através de um convênio com o CNPq (Proc.: 558 139/2009-4), para o projeto “Monitoramento do Clima de Ondas da Costa Nordeste Brasileira – MCONDAS/NE”.

O ondógrafo é uma esfera metálica com 90 centímetros de diâmetro, funcionando com baterias internas que possuem energia armazenada para 3 anos de funcionamento contínuo. Seus sensores são um termômetro que mede a temperatura da água do mar, acelerômetros para medir o seu movimento, e consequentemente as características das ondas que passam por ele, GPS para monitorar a posição, e uma bússola para obter a posição em relação ao norte magnético.

As características das ondas medidas são a altura das ondas com períodos entre 1,6 s e 30,0 s, além de sua direção, medidos em intervalos de 5 graus com acurácia de 0,5%. Os dados coletados em tempo real foram transmitidos, através de um link de rádio HF, para uma estação em terra, posicionada na torre de controle do porto de Suape. Esta estação é composta

de um receptor de rádio conectado a uma antena de alto ganho, que por sua vez está conectado a um computador, onde estão instalados os programas fornecidos pelo fabricante do ondógrafo.

O fabricante do ondógrafo fornece os programas utilizados para coletar e analisar os dados do ondógrafo. O processamento dos dados brutos, que chegam através do link de rádio, e o armazenamento em arquivos de computador são feitos através do programa “RfBuoy”, este programa também fornece estatísticas horárias do estado do mar. Outro programa fornecido pelo fabricante, chamado de “W@ves21”, possui uma interface gráfica que mostra a distribuição espectral da energia das ondas, além das características das ondas que foram medidas em tempo real.

O RfBuoy gera vários arquivos com as estatísticas horárias da agitação marítima, compilando os principais parâmetros estatísticos de ondas, incluindo altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção de pico ( $D_p$ ), calculado automaticamente por um programa fornecido pelo fabricante com 0,5% de precisão. O espectro de energia das ondas também é calculado automaticamente, e suas características discretizadas são armazenadas em arquivos com sufixo .SPT, estes arquivos foram utilizados como uma das fontes de dados para este artigo.

Os arquivos .SPT possuem a descrição da distribuição espectral da energia de ondas ao longo de cada hora de medição. A distribuição espectral descrita nos arquivos .SPT é dividida em grupos de faixas de frequências, em forma de curvas de distribuição de probabilidade, cujas características de assimetria, curtose, dispersão, direção de pico e energia de pico são relativos a cada faixa de frequência. Dessa maneira é possível se reconstituir a distribuição espectral da energia das ondas nas duas dimensões (frequência e direção), que portanto podem ser usados para se caracterizar o clima de ondas do local.

Para se reconstituir a distribuição espectral bidimensional a partir dos arquivos .SPT, utilizou-se uma rotina do tipo Matlab específica, que retornou um arquivo de saída com extensão .SPEC para cada hora de medição das ondas.

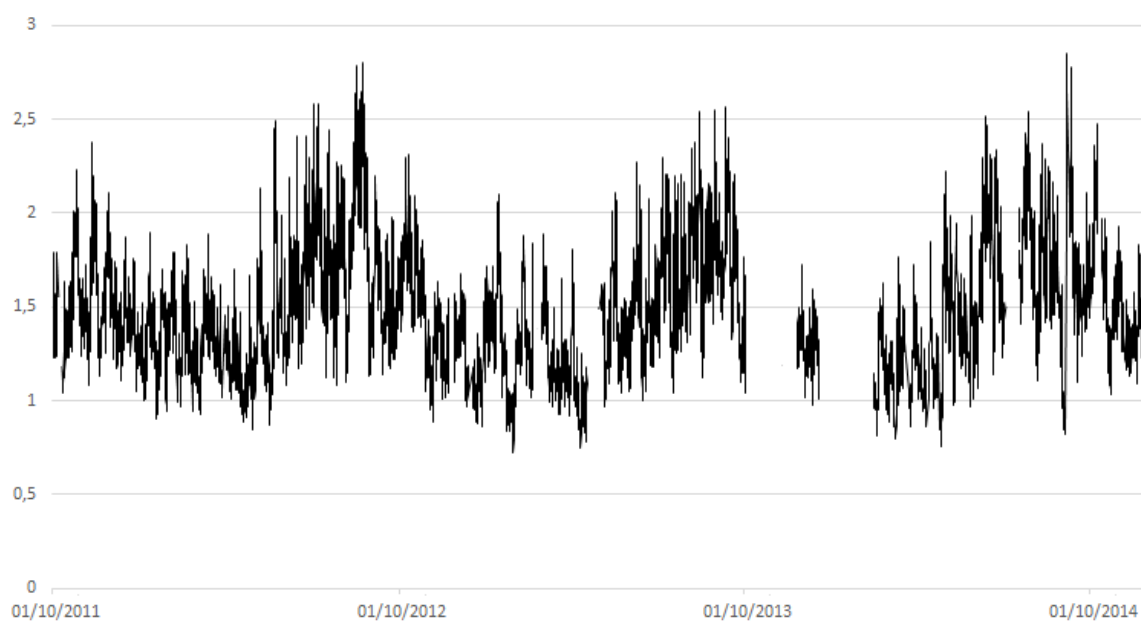
Cada arquivo .SPEC é constituído por um conjunto de 72 matrizes, com 64 elementos cada. Cada elemento corresponde a uma porção de energia de onda que constitui o espectro bidimensional para cada faixa de direção e frequência, respectivamente, nas quais foi dividido o espaço espectral. Sendo assim, obteve-se uma discretização da distribuição espectral originalmente contínua, com uma resolução direcional de 5 graus, e separada em 64 faixas de frequência.

#### 5.4 SÉRIE DE DADOS

O ondógrafo UFPE01 mediu a energia das ondas entre o mês de outubro de 2011 até o mês de novembro de 2014, com alguns períodos em que o ondógrafo ficou sem comunicação com a estação em terra ou foi retirado para manutenção. No total foram coletadas 22.190 amostras de energia do espectro direcional de ondas.

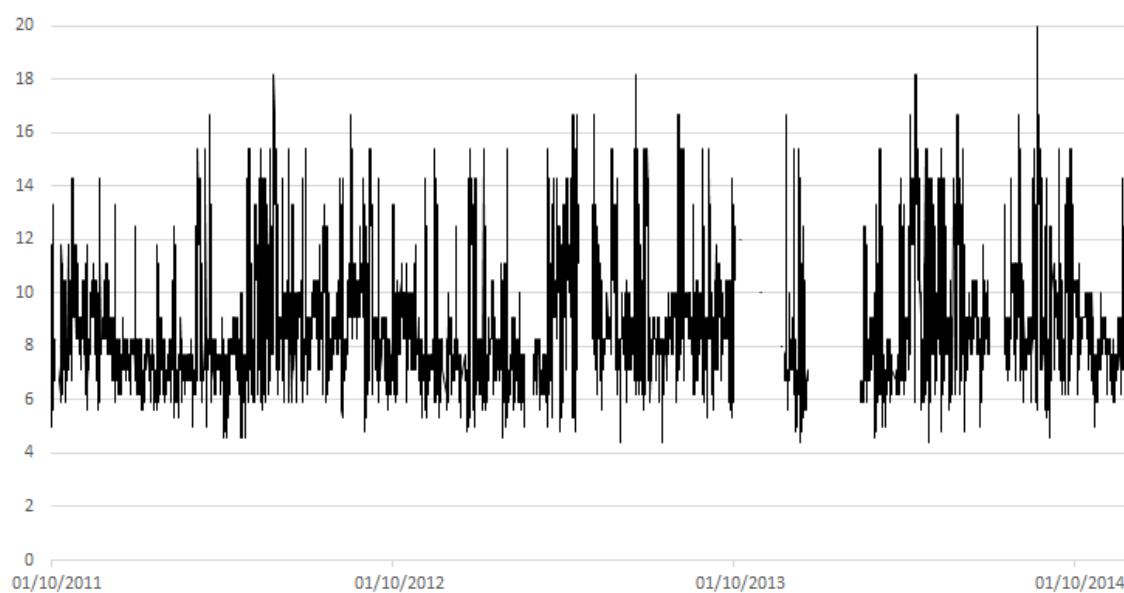
Os valores medidos dos principais parâmetros estatísticos de ondas: altura significativa ( $H_s$ ) (Figura 5.4), período de pico ( $T_p$ ) (Figura 5.5) e direção de pico ( $D_p$ ) (Figura 5.6) são calculados automaticamente pelo programa do fabricante, RfBuoy.

Figura 5.4 - Série de dados de alturas em metros, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014.



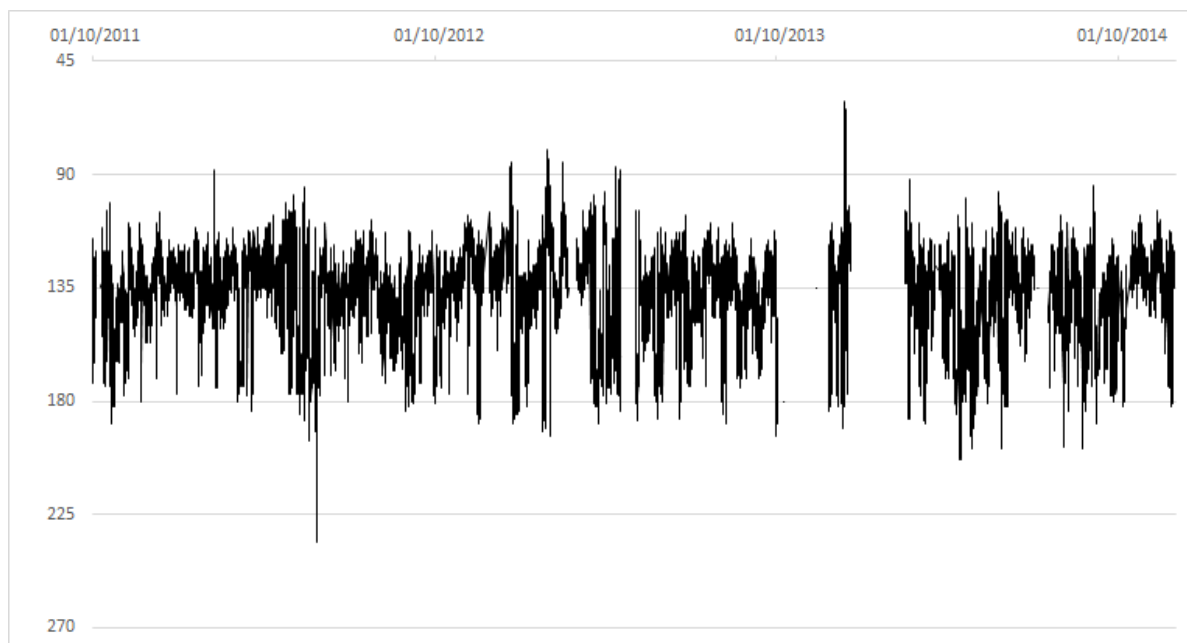
Fonte: o autor.

Figura 5.5 - Série de dados de períodos de pico, em segundos, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014.



Fonte: o autor.

Figura 5.6 - Série de dados de direção de pico, em graus, coletados pelo ondógrafo, entre os dias 01/10/2011 até o dia 30/11/2014.



Fonte: o autor.

## 5.5 PARTICIONAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL

O particionamento da distribuição espectral da energia das ondas é importante para se obter uma descrição mais realista do clima de ondas, principalmente do ponto de vista científico e da engenharia.

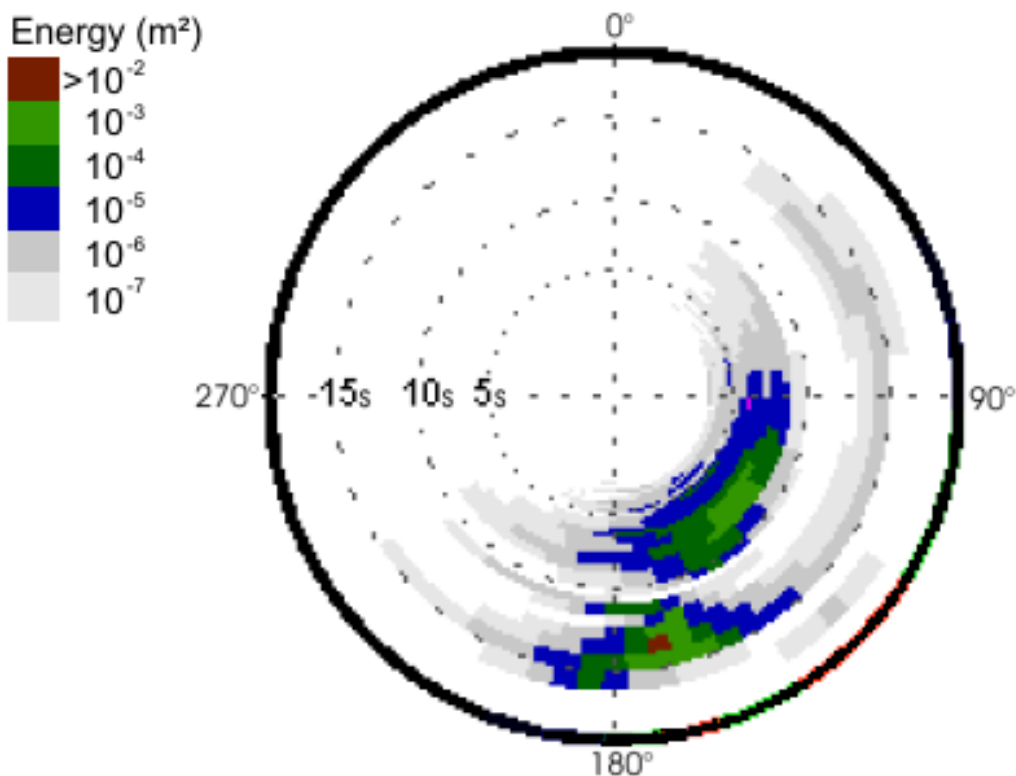
O conhecimento do clima de ondas de um local específico é importante para uma ampla gama de atividades (LAING *et al.*, 1998), incluindo:

- Projeto, estudos e planejamento de operabilidade para portos, estruturas costeiras, incluindo fazendas de peixes, estruturas marítimas, tais como plataformas de petróleo e navios;
- Erosão costeira e transporte de sedimentos;

- Estudos ambientais, como por exemplo, o destino e procedimentos de limpeza para derramamentos de petróleo;
- Estimativa de energia das ondas.

Observando-se a representação gráfica da distribuição espectral (Figura 5.7), uma pessoa treinada, na maioria das vezes, pode distinguir e rapidamente particionar uma amostra, contudo o critério de particionamento teve de ser automatizado, devido ao fato de não ser viável um particionamento manual, com uma grande quantidade de números de distribuições espectrais a serem analisadas (mais de 20 mil amostras). Outro fator importante na decisão de um critério automatizado é na possibilidade de aplicar o particionamento em tempo real, durante as medições diárias do ondógrafo.

Figura 5.7 - Representação gráfica da distribuição espectral para uma hora de amostragem de ondas que passaram pelo ponto de fundeio do ondógrafo. Os círculos concêntricos indicam os vários períodos de ondas, enquanto que as direções das ondas são indicadas por linhas que saem do círculo externo em direção ao ponto central. A energia relacionada a cada valor de direção e período de ondas é indicado pela escala de cores.



Fonte: o autor.

Analisando o processo de formação das ondas, podemos observar que quando estamos numa pista de vento suficientemente intenso, as ondas tendem a crescer gradualmente ao longo desta pista, até alcançar um estado aonde as ondas não mais irão crescer em altura, este estado de mar é chamado de estado totalmente desenvolvido, e a altura final das ondas é proporcional à velocidade do vento que sopra sobre esta pista. Neste caso, estamos diante das vagas, classificadas como ondas jovens, porque acabaram de ser criadas e estão absorvendo a energia do vento, ou absorveram o máximo de energia que seria possível.

Ao abandonarem a pista de vento, as vagas continuam a sua trajetória sobre o oceano, sendo que as ondas acabam perdendo uma fração da energia que foi inicialmente transferida pela fricção do vento com a superfície do oceano, mas ao longo de sua trajetória elas tendem a se organizar em grupos de ondas com velocidades e direções semelhantes, continuando a se dispersar ao longo do oceano, por vezes viajando milhares de quilômetros até alcançar o ponto de medição. Neste segundo caso estamos diante das ondas de *swell*, classificadas como ondas maduras, que possuem características de frequência e direção distintas e bem definidas, diferentes das características que compõem os sistemas de vagas, que geralmente não são bem definidas, mas abrangem uma ampla faixa de direções e frequências, porém podem ser representadas pelos valores de direção e frequência que representam um ponto aonde está concentrada a maior quantidade de energia, estes são a direção de pico ( $D_p$ ) e o período de pico ( $T_p$ ), que é o inverso da frequência de pico, além da energia de cada partição ( $E_p$ ), relacionada com a altura significativa da partição ( $H_{Sp}$ ) através da fórmula:

$$H_{Sp} = 4\sqrt{E_p}$$

onde:  $E_p = \sum E_{f,\theta}$  é a soma de cada porção de energia discretizada do espectro, pertencente à partição.

As características de período de pico ( $T_p$ ) e direção de pico ( $D_p$ ) de cada sistema de ondas constituem a assinatura espectral, que identifica se o sistema corresponde a uma energia de vagas ou de *swell*, portanto o particionamento da distribuição espectral da energia das ondas é um processo importante, e primordial para se distinguir os vários sistemas de ondas que fazem parte de um estado de mar.

Diversos métodos de particionamento foram analisados, Franco e Filho (2005) utilizou um critério simples introduzido por Rodríguez e Guedes Soares (1999), que porém trouxe resultados pouco satisfatórios em grande parte das amostras, aparentemente por se basear apenas na distribuição espectral ao longo da frequência, omitindo as informações direcionais do espectro. Wang e Hwang (2001) usaram um método de análise inclinação da distribuição espectral, em conjunto com o cálculo de uma frequência de corte, baseada na distribuição espectral de Pierson e Moskowitz (1964), para separar a energia espectral atribuída às vagas da energia de *swell*.

Uma análise de diferentes métodos 1D e 2D de particionamento foi feita por Portilla et al. (2009), dentre estes, um algoritmo de particionamento 1D que foi proposto por eles, serviu de base inicial para o método desenvolvido aqui, contudo o resultado prático do uso deste algoritmo, da forma como ele foi proposto, não foi plenamente satisfatório, cogitou-se então que a informação espectral na dimensão das direções também era tão necessária quanto na dimensão das frequências.

O estabelecimento de uma frequência de corte, baseada no espectro de Pierson-Moskowitz, foi incorporada ao algoritmo, utilizando a previsão da velocidade e a direção do vento, como base para o cálculo da frequência de corte. Outros melhoramentos foram introduzidos aos poucos no algoritmo, à medida que testes práticos eram feitos com as

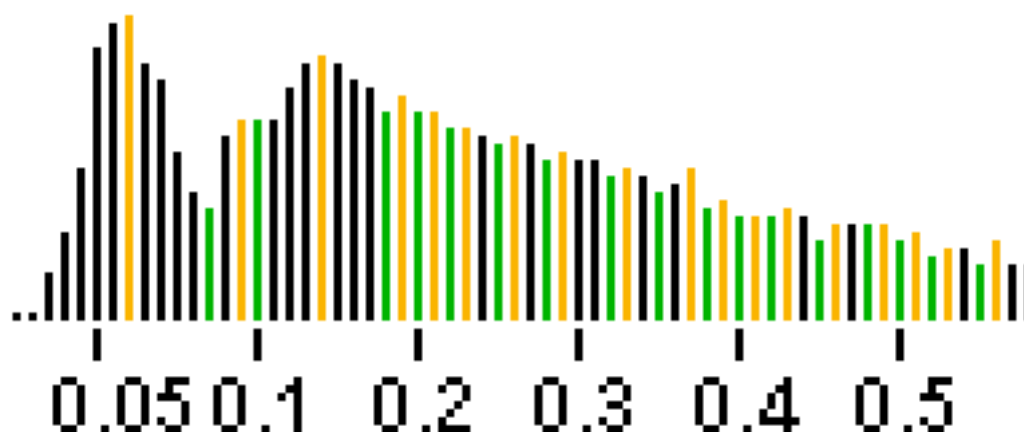
amostras de distribuição espectral coletadas, até que se obtivesse um resultado prático que satisfizesse um particionamento automatizado na maioria das amostras.

Após se obter o conjunto de dados discretizados das distribuições espectrais para cada hora de medição das ondas, procedeu-se ao particionamento em aglomerados de energia, conhecidos como sistemas de ondas, que identificam as ondas com características semelhantes.

O algoritmo de particionamento automatizado, escrito na linguagem de programação java, baseou-se inicialmente nos critérios de detecção e eliminação de picos espúrios, descrito por Portilla et al. (2009). O particionamento segue os seguintes passos, considerando apenas a distribuição da energia espectral na frequência:

1. Na dimensão das frequências, efetuar a detecção de todos os máximos e de todos os mínimos de energia, posicionados entre esses máximos (Figura 5.8).

Figura 5.8 - Distribuição da energia das ondas no domínio das frequências (Hz), com os picos de máximos (em amarelo) e de mínimos (em verde) de energia encontrados na etapa 1 do processamento.

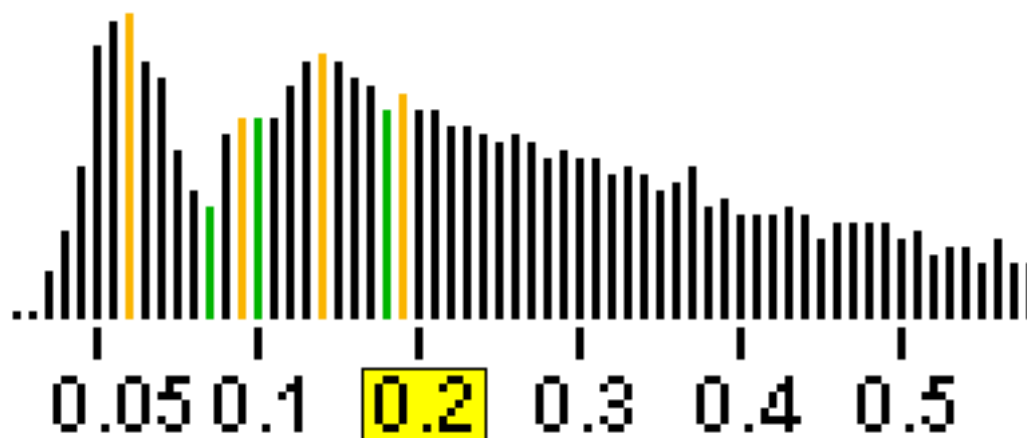


Fonte: o autor.

2. Corte das frequências mais altas, correspondendo a cauda do espectro de energia que apresenta muita variabilidade relativa à energia das vagas, este

corde é feito em uma frequência pré-estabelecida ( $f_T$ ), neste caso usou-se  $f_T = 0.2$  Hz (Figura 5.9).

Figura 5.9 - Etapa 2 do processamento, que é o corte das frequências mais altas, correspondendo a cauda do espectro de energia, na frequência de cauda  $f_T = 0.2$  Hz.



Fonte: o autor.

3. Soma de todas as quantidades de energia entre cada mínimo encontrado no passo 1, atribuindo essas quantidades a um conjunto inicial de partições. Calcula-se também o total de energia de toda a distribuição espectral.
4. Determinação de uma frequência de corte de vagas ( $f_c$ ), e uma frequência de pico de vagas, através do método descrito no item 2.3. Os próximos passos são executados apenas nas frequências abaixo de  $f_c$ .
5. Descarte de picos com energia menor do que ambos os picos vizinhos.
6. Descarte das partições que abranjam duas ou menos unidades de frequência entre os seus mínimos limites.
7. Descarte das partições com quantidades de energia menores do que 8 % da energia total.

O método de particionamento original (PORTILLA; OCAMPO-TORRES; MONBALIU, 2009) seguiu os passos acima, exceto pelo passo 4. A primeira parte do

algoritmo executa apenas as regras 1 a 3 descritas acima, então o sistema de vagas é detectado e isolado na distribuição de energia através da frequência de corte das vagas, e no momento seguinte as regras 5 a 7 são executadas para detectar os sistemas de *swell* em frequências menores do que a frequência de corte das vagas.

Para se detectar o sistema de vagas foi introduzido a detecção de uma frequência de corte de vagas ( $f_c$ ), similar ao descrito por David Wang e Paul Hwang (2001), tendo como base a previsão da vento ( $U_{10}$ ) e direção do vento em um ponto no oceano próximo ao ponto de fundeio do ondógrafo, fornecida pelo modelo atmosférico Global Forecast System entre de outubro/2011 a novembro/2014, obtidos através do site: <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.

O estabelecimento de uma frequência de corte de vagas foi baseada na distribuição espectral  $F(f)$  de Pierson-Moskowitz (1964) para um mar totalmente desenvolvido, estimada como

$$F(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \quad (1)$$

Onde:

$\alpha = 0,0081$  (Phillips, 1958);

$f_p = 0.13 \cdot g/U_{10}$  é a frequência de pico relacionada ao vento medido a uma altitude de 10 metros;

$U_{10}$  = velocidade do vento a 10 metros de altitude;

Primeiramente, formulou-se a frequência de pico das vagas ( $f_p$ ) como (2), então utilizou-se uma aproximação gráfica para formular (4) como a frequência de corte de vagas ( $f_c$ ), que determina o limite final da distribuição espectral da energia de vagas, a partir da

distribuição espectral de Pierson-Moskowitz (1964) para um mar totalmente desenvolvido, ao se igualar a energia na frequência de corte a 10% da energia da frequência de pico:  $F(f_c) = 0,1 \cdot F(f_p)$ .

$$f_p = \beta / U_{10} \quad (2)$$

$$\beta = 1,33458 \quad (3)$$

$$f_c = \frac{6 + U_{10}/2,5}{2\pi \cdot U_{10}^{1,25}} \quad (4)$$

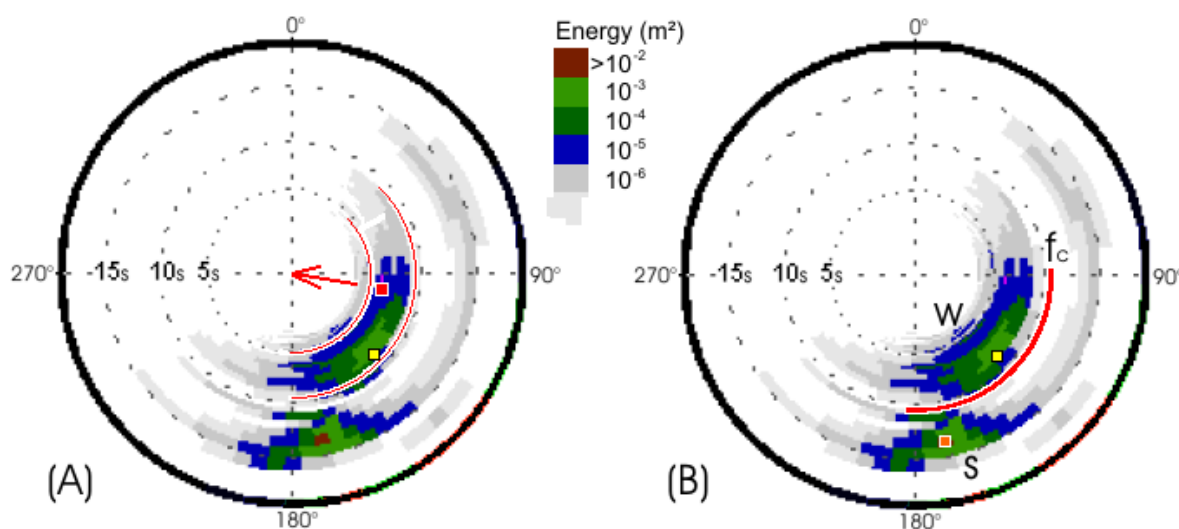
Levando em consideração que a velocidade do vento prevista próximo ao litoral normalmente é menor do que a velocidade do vento que sopra sobre o oceano, numa extensa área conhecida como pista de vento, como observado por Baptista (2003), este vento oceânico, soprando sobre uma extensa pista de vento normalmente irá desenvolver vagas com maior intensidade do que as esperadas apenas com base na velocidade do vento próxima ao litoral.

Com a finalidade de solucionar essa discrepância, foi desenvolvido um método para varrer a área limitada pela frequência de corte, calculada inicialmente, à procura do pico de energia que melhor representasse as vagas, dentro de uma faixa de direções entre  $\pm 45^\circ$  da direção do vento prevista pelo modelo GFS, essa prática demonstrou ser bastante eficiente na detecção de um pico que melhor represente a energia das vagas.

Este esquema consiste na delimitação de uma área da distribuição espectral a ser varrida à procura de um ponto aonde a energia das ondas apresente o seu maior valor (ponto modal), e que representa o pico de vagas. A área a ser varrida é delimitada pela frequência de corte inicial como o valor mínimo de frequência, sendo o valor máximo da frequência é a frequência de corte da cauda  $f_T$  (descrito no passo 2) (Figura 5.10-A).

Após a determinação da nova frequência de pico de vagas, uma nova frequência de corte de vagas é calculada, utilizando-se as Eqs. (2) e (4), a nova frequência de corte encontrada nem sempre corresponde a um mínimo de energia entre os picos vizinhos, assim procura-se nas frequências próximas por um mínimo de energia que estabelecerá a nova frequência de corte ( $f_c$ ) (Figura 5.10-B).

Figura 5.10 - Em (A) com base na velocidade e na direção do vento (vetor vermelho), a frequência de pico inicial foi calculada (quadrado laranja), e uma frequência de corte inicial. Numa área delimitada pela frequência de corte inicial e pela frequência de cauda (linha laranja), é efetuada uma varredura pela nova frequência de pico das vagas (quadrado amarelo). Em (B) após determinar uma nova frequência de corte das vagas ( $f_c$ ) (arco laranja), o sistema de vagas (W) compreende toda a energia delimitada pela frequência de corte ( $f_c$ ). Determina-se então o pico do swell (S).



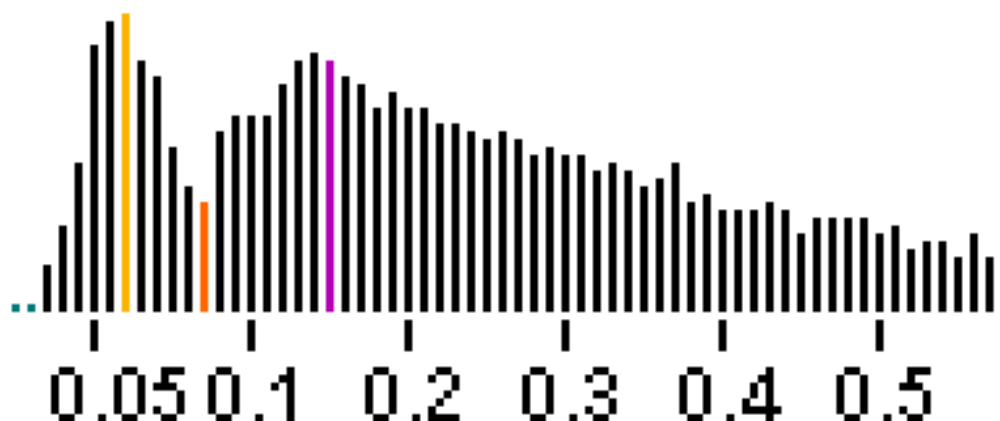
Fonte: o autor.

No momento seguinte, um ajuste da frequência de corte das vagas é realizado, tendo como base a frequência de corte calculada, procura-se nas frequências vizinhas um mínimo de energia que tenha um valor menor do que aquele correspondente a energia na frequência de corte calculada.

Após a detecção do limite mínimo de energia das vagas determinado pela frequência de corte, considera-se então os picos com frequências menores do que a frequência de corte

das vagas como candidatos a picos de *swell*, são executadas então as etapas de 5 a 7 do método de eliminação de picos espúrios, descritas anteriormente (Figura 5.11).

Figura 5.11 - Distribuição da energia das ondas no domínio das frequências após a execução de todos os processos. O pico em magenta é o de vagas, o pico em amarelo é o de *swell*, e a marca em laranja é a frequência de corte de vagas, que determina a separação entre a energia de vagas e de *swell*.



Fonte: o autor.

O resultado da aplicação desse conjunto de regras demonstrou ser satisfatório na maioria dos casos em separar com eficiência o sistema de vagas do sistema de *swell*, bem como agrupar as energias de *swell* em um único sistema, ou no máximo dois sistemas distintos.

O resultado do particionamento de cada uma das mais de 22.000 amostras de distribuição espectral gerou um arquivo de texto contendo em cada linha a energia total, bem como cada partição com a energia, direção e frequência de pico. Estes dados foram em seguida inseridos em uma base de dados, com isso foi possível realizar várias consultas, além das estatísticas básicas dos dados.

## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **6.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO ESTUDO DE CASO DE EROÇÃO COSTEIRA EM CANDEIAS, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE**

##### *6.1.1 Resultados das ondas, correntes e transporte de sedimentos*

Conforme descrito na análise estatística, as direções das ondas predominantes são de leste-sudeste, com 75% das ondas provenientes desta direção, tanto para o clima extremo quanto para o clima típico. A segunda direção mais provável são de ondas vindas de Sudeste, com 24% de probabilidade, e as ondas de leste com menor probabilidade.

Para cumprir com o critério determinado pelo método de Booij (1981) que se aplica ao modelo de ondas Oluca, as ondas propagadas necessariamente têm que estar dentro da faixa de  $\pm 50^\circ$  da direção principal de propagação. A propagação de ambas as direções de sudeste e de leste estão dentro a faixa de  $\pm 30^\circ$  em relação à direção principal de leste-sudeste, por isso apenas a grade que foi criada para propagar a direção predominante de leste-sudeste foi suficiente para cobrir mais de 99% de todas as direções de entrada de ondas.

Para obter os melhores resultados das simulação, a largura da grade é escolhida de tal forma que a interferência com as fronteiras laterais não afetam a área de interesse, uma vez que a reflexão de algumas das ondas nas fronteiras laterais é um efeito secundário indesejável, porém que normalmente está presente na simulação de ondas. Para melhor simular as condições, uma grade medindo 6.380 m de largura, centrada na área de estudo, foi criada.

Os níveis do mar mais representativos a serem considerados, como discutido na seção anterior, devem contabilizar apenas a maré astronômica, uma vez que a maré meteorológica é insignificante. Para este estudo, os níveis do mar considerados são 2,5 m da maré alta e 0,0 m da maré baixa de sizígia, assim como a maré de sizígia média de 1,25 m.

As simulações foram realizadas para as três configurações do estudo (Tabela 4.2), considerando-se os dois casos de ondas típico e extremo (Tabela 4.1) e para os três níveis de marés de sizígia.

A importância da caracterização do nível do mar para a simulação numérica está relacionada com as flutuações, que resultam em mudanças das condições de contorno em que as ondas incidentes são propagadas. Estas modificações mudam a profundidade batimétrica, o que muda a interação das ondas com o fundo do mar, e resulta em variações de alturas de ondas na zona de arrebentação, consequentemente, alterando os padrões de ondas-correntes e o transporte de sedimentos resultante.

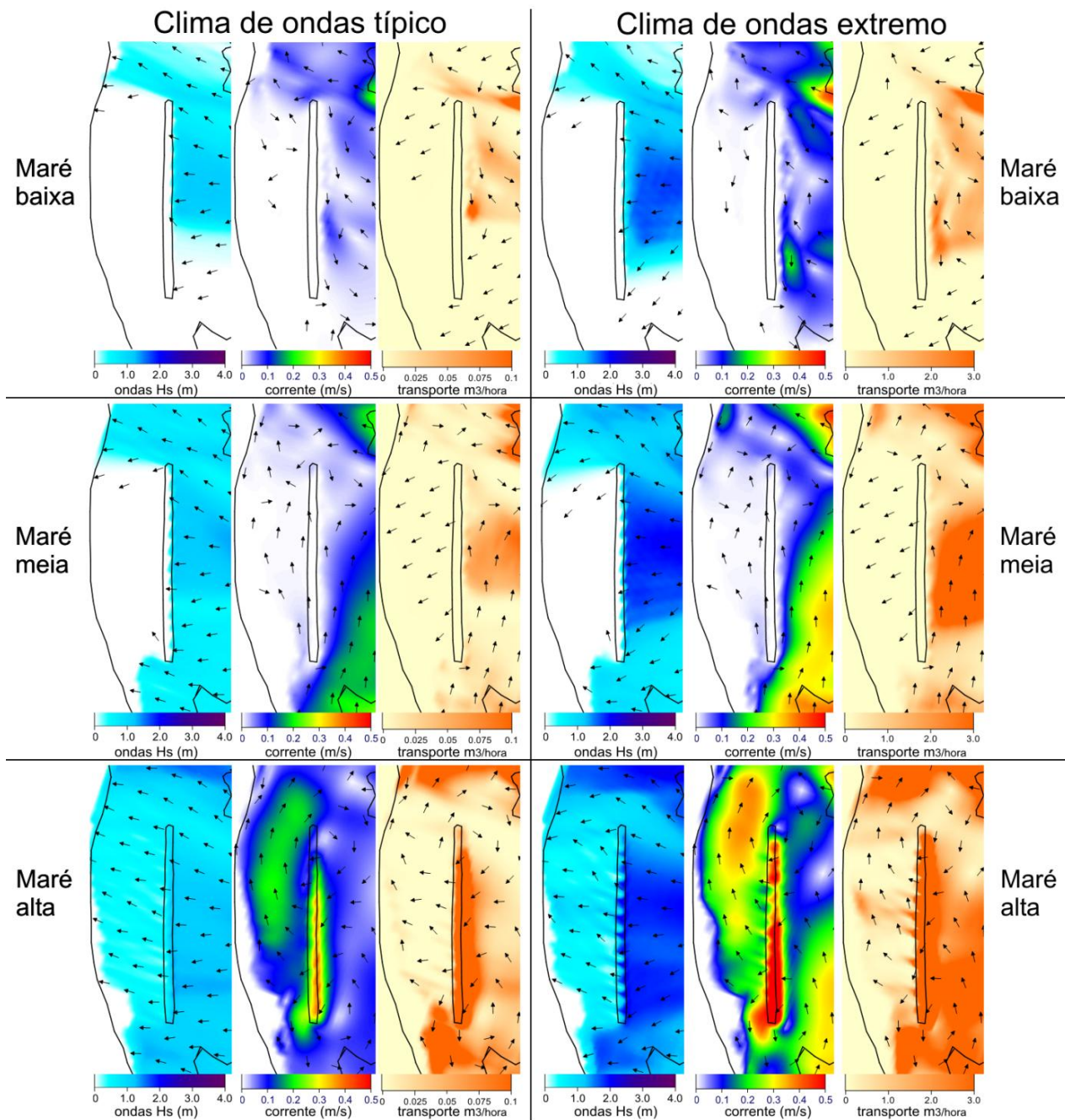
Os resultados do modelo sobre o quebra-mar contínuo mostram uma tendência de acumular sedimentos entre quebra-mar e a praia (Figura 6.1). Esta foi a situação observada nos anos após a construção da estrutura, validando a análise estatística da modelagem utilizada neste estudo.

Os resultados da simulação sem a estrutura do quebra-mar demonstram que a praia tem uma tendência para a erosão, e uma comparação com os resultados da configuração da atual estrutura do quebra-mar podem ser melhor interpretados na seção seguinte (Figuras 6.2 e 6.3, respectivamente).

### *6.1.2. Média anual de transporte de sedimentos*

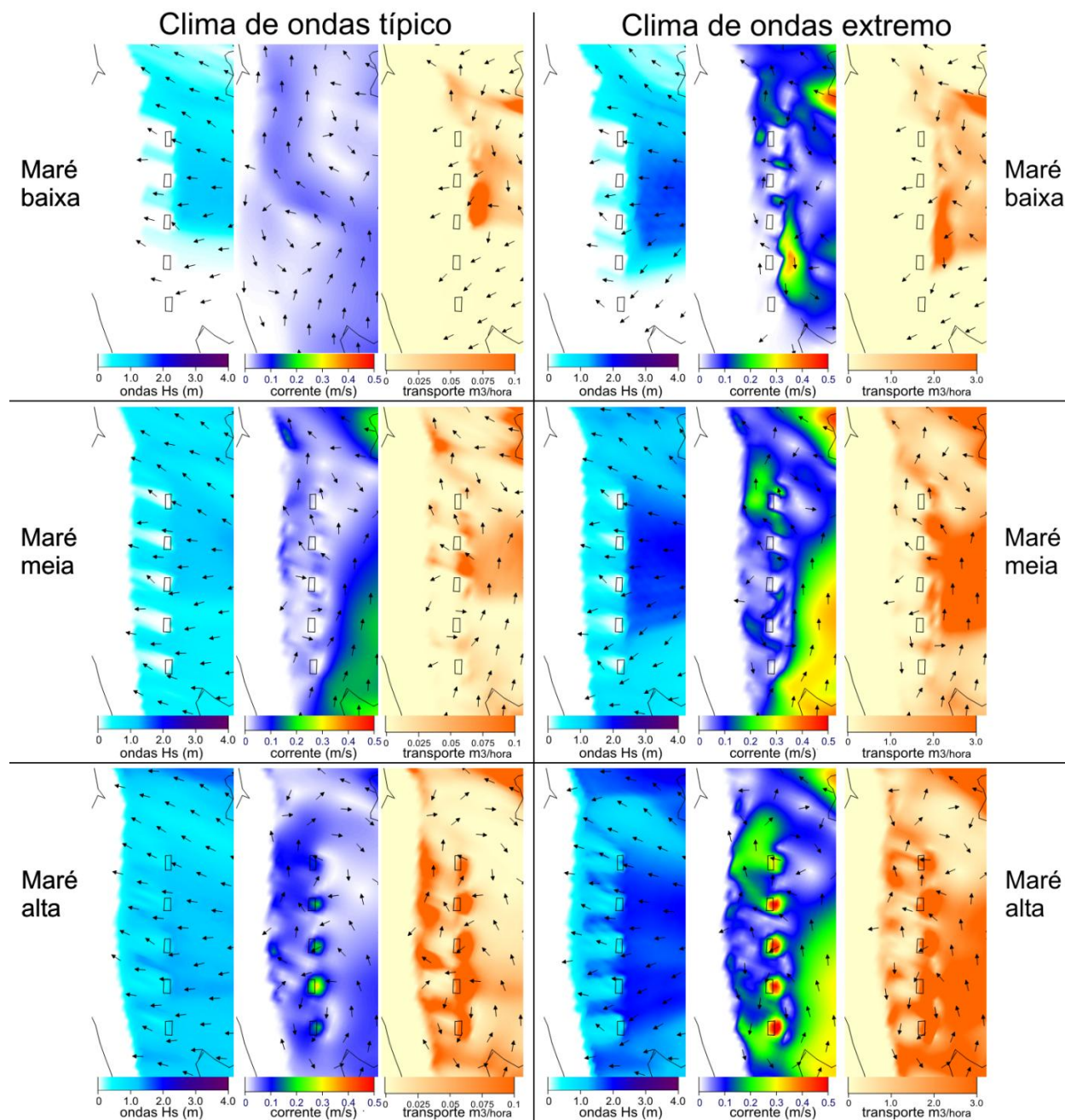
Para os cálculos da média anual do transporte de sedimentos, os estados de mar mais relevantes deve ser selecionados. Para isto, a técnica utilizada é a de Máxima Similaridade. Cerca de 150 estados de mar foram selecionados, propagados até a costa em três níveis de maré: baixa (0,0 m), média (1,25 m) e alta (2,5 m), utilizando o módulo IH-Dynamics, incluído no SMC-Tools.

Figura 6.1 - Os resultados das simulações para a configuração inicial do quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas.



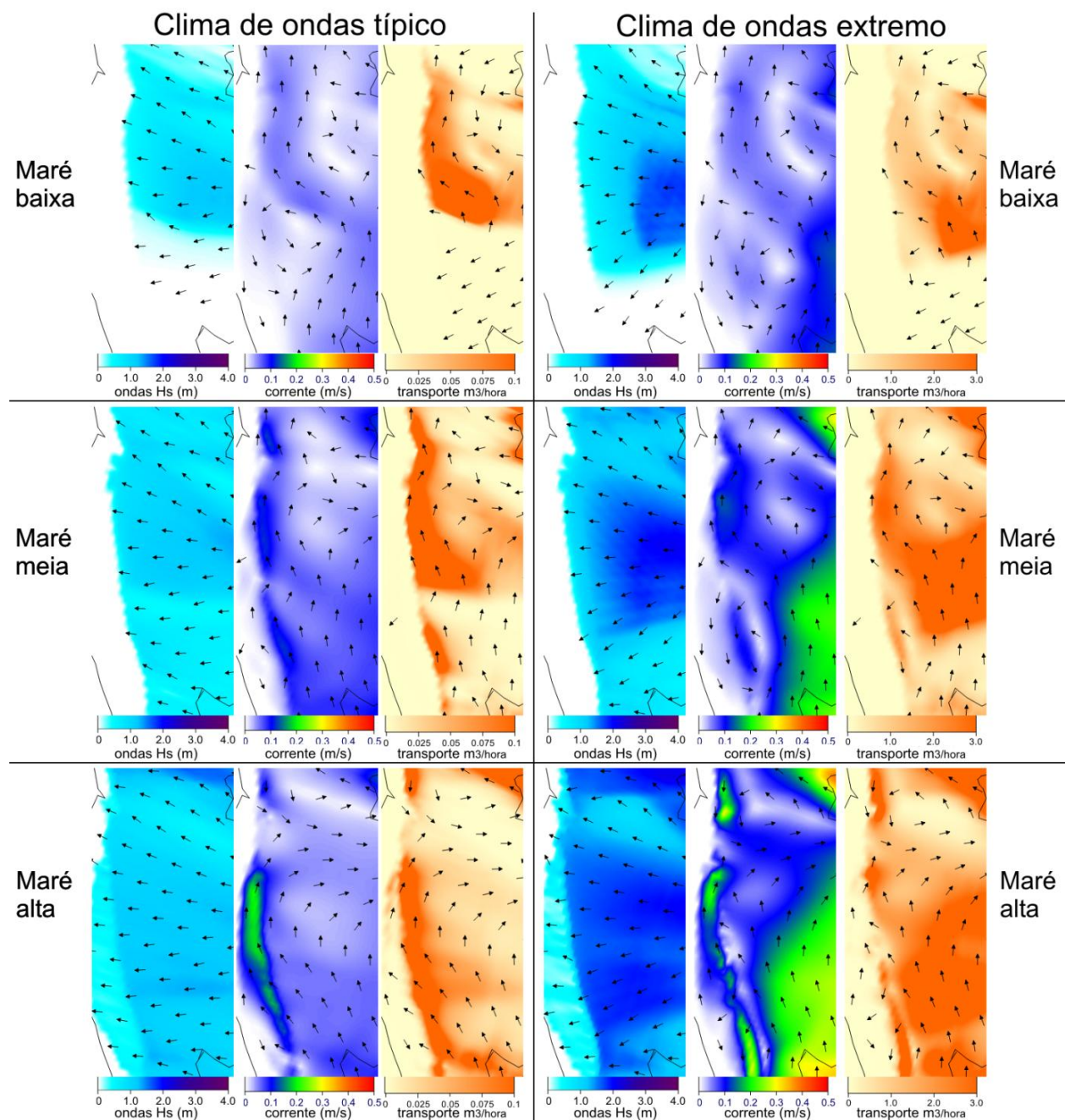
Fonte: o autor.

Figura 6.2 - Os resultados das simulações para a configuração atual do quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas.



Fonte: o autor.

Figura 6.3 - Os resultados das simulações para o cenário sem quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (tabela 1). De cima para baixo as linhas mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas.



Fonte: o autor.

Para a extração dos dados de transporte de sedimentos, são traçados perfis de praia perpendicularmente à linha de costa em pontos de interesse selecionados.

Para a atual configuração do quebra-mar e para o cenário sem quebra-mar, os perfis selecionados estão na mesma posição. Para a configuração de quebra-mar contínuo, os perfis foram traçados, tanto fora como dentro da área protegida pelo quebra-mar para mostrar a diferença no transporte de sedimentos destas regiões.

O transporte de sedimentos é representado por setas desenhadas nas laterais dos perfis de praia, que foram traçados sobre a imagem de satélite da área de estudo. Usando a convenção padrão de um observador posicionado na praia olhando para o mar, são atribuídos valores positivos para os sedimentos transportados para a direita, e negativos para os sedimentos transportados para a esquerda. Os valores de transporte de sedimentos apresentados na Tabela 3 aplicam esta convenção, sendo assim os transportes de sedimentos são positivos para o sul, e são negativos para o norte.

Os valores foram apresentados na ordem da posição dos perfis de praia de norte pra sul, como nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

O sedimento transportado através de um perfil de praia pode ocorrer em ambos os sentidos ao longo do ano, dependendo das características de onda de cada dia. Como as características das ondas variam ao longo do ano, haverá um montante total de sedimentos transportados para ambos os sentidos, e o valor médio anual será a diferença desses valores.

Os valores apresentados na Tabela 6.1 são a média de sedimentos transportados durante um ano, calculados para ambas as direções ( $Q^+$  e  $Q^-$ ). O valor médio total transportado ( $Q$ ), é a diferença entre os dois.

O transporte médio anual de sedimentos, calculado para os três casos em estudo (Figuras 6.4, 6.5, 6.6), mostram diferenças entre os padrões de transporte, mas as semelhanças são evidentes na configuração do quebra-mar atual (Figura 6.6) e o cenário sem o quebra-mar (Figura 6.4).

Comparando os valores apresentados na Tabela 6.1, podemos observar que, exceto no perfil 2, um transporte de sedimentos para o sul predomina na configuração do quebra-mar atual, em comparação com o cenário sem proteção do quebra-mar, a quantidade de transporte de sedimentos para o sul é bem superior, exceto no perfil 5, onde os valores têm a mesma ordem de grandeza.

Tabela 6.1 - Valores de transporte de sedimentos, calculados para a configuração atual do quebra-mar e o cenário sem o quebra-mar, para os perfis de praia dispostos em uma ordem de norte para sul, medido em 1.000 m<sup>3</sup> por ano (valores arredondados).

| Perfil | Quebra-mar atual |     |     | Sem quebra-mar |     |      |
|--------|------------------|-----|-----|----------------|-----|------|
|        | Q                | Q+  | Q-  | Q              | Q+  | Q-   |
| 1      | 626              | 647 | -22 | 380            | 394 | -13  |
| 2      | -33              | 44  | -77 | -413           | 858 | -414 |
| 3      | 77               | 95  | -18 | -133           | 0.4 | -133 |
| 4      | 158              | 164 | -6  | 11             | 24  | -12  |
| 5      | 225              | 226 | -1  | 228            | 233 | -4   |
| 6      | 531              | 533 | -1  | 392            | 392 | -0.6 |
| 7      | 803              | 831 | -28 | 248            | 248 | -0.5 |

Fonte: o autor.

Por outro lado, os valores do transporte de sedimentos para o norte são maiores na maior parte do cenário de costa exposta à ação direta das ondas, em comparação com a configuração do quebra-mar atual. E estes valores aumentam cada vez mais para o norte, onde a exposição para as ondas vindas de leste-sudeste aumenta, porque as áreas ao norte são menos protegidas pelo arrecife de franja (Figura 4.9). A configuração atual do quebra-mar, aparentemente, oferece proteção razoável para as ondas (Figura 6.5) com menos transporte de sedimentos para o norte sendo registrados nas áreas central e norte.

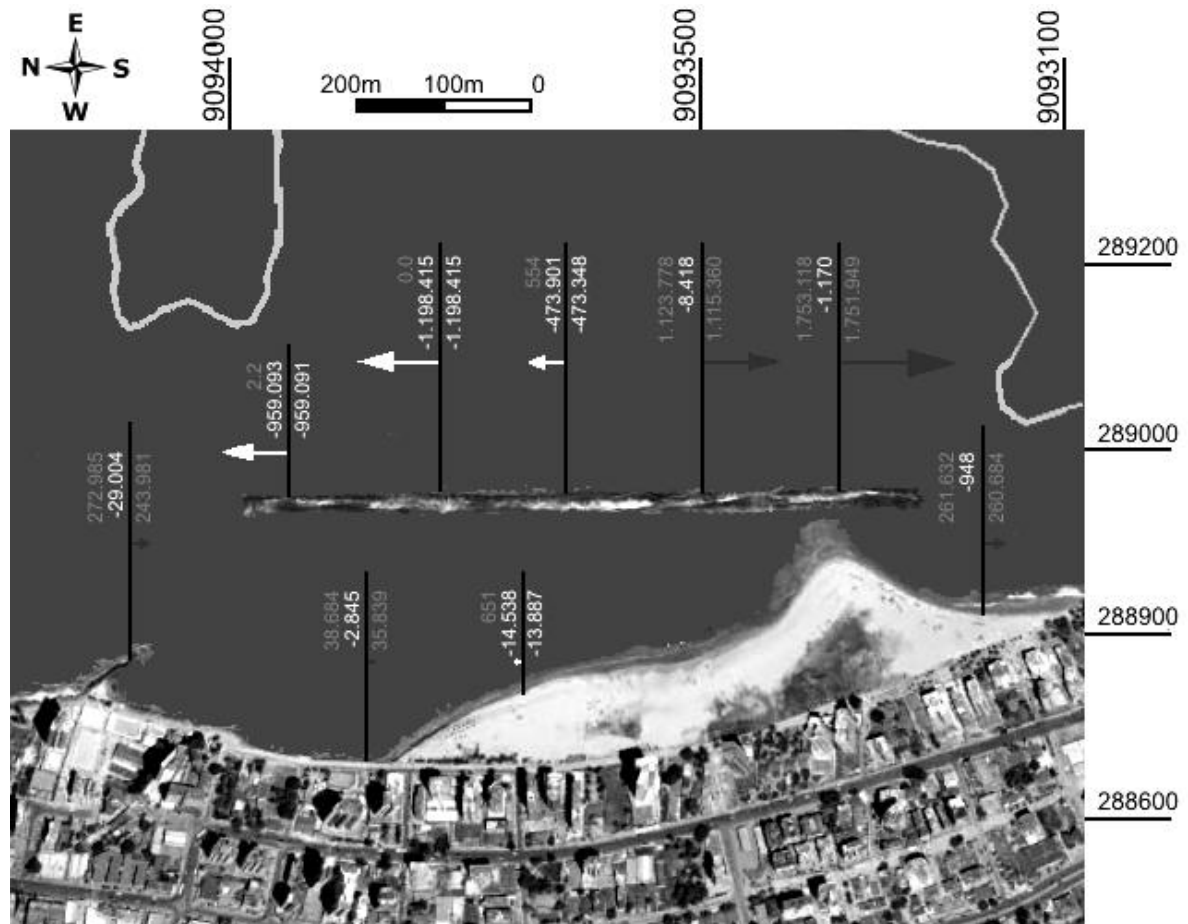
Os perfis de fronteira 1 e 7 registram grande transporte para o sul, em ambos os casos, já que há uma grande influência dos arrecifes em frente deles, criando refração e difração das ondas.

Os transportes médios anuais de sedimentos, calculados para a antiga configuração do quebra-mar (Figura 6.4), demonstram que há uma barreira clara à deriva costeira nesta área, o que acarretou na erosão do litoral ao norte.

Na área desprotegida, em frente ao antigo quebra-mar, o transporte em direções divergentes apresenta valores opostos excepcionalmente elevados nas fronteiras do quebra-mar, causando assim um obstáculo permanente para que os sedimentos possam ser transportados através desta área.

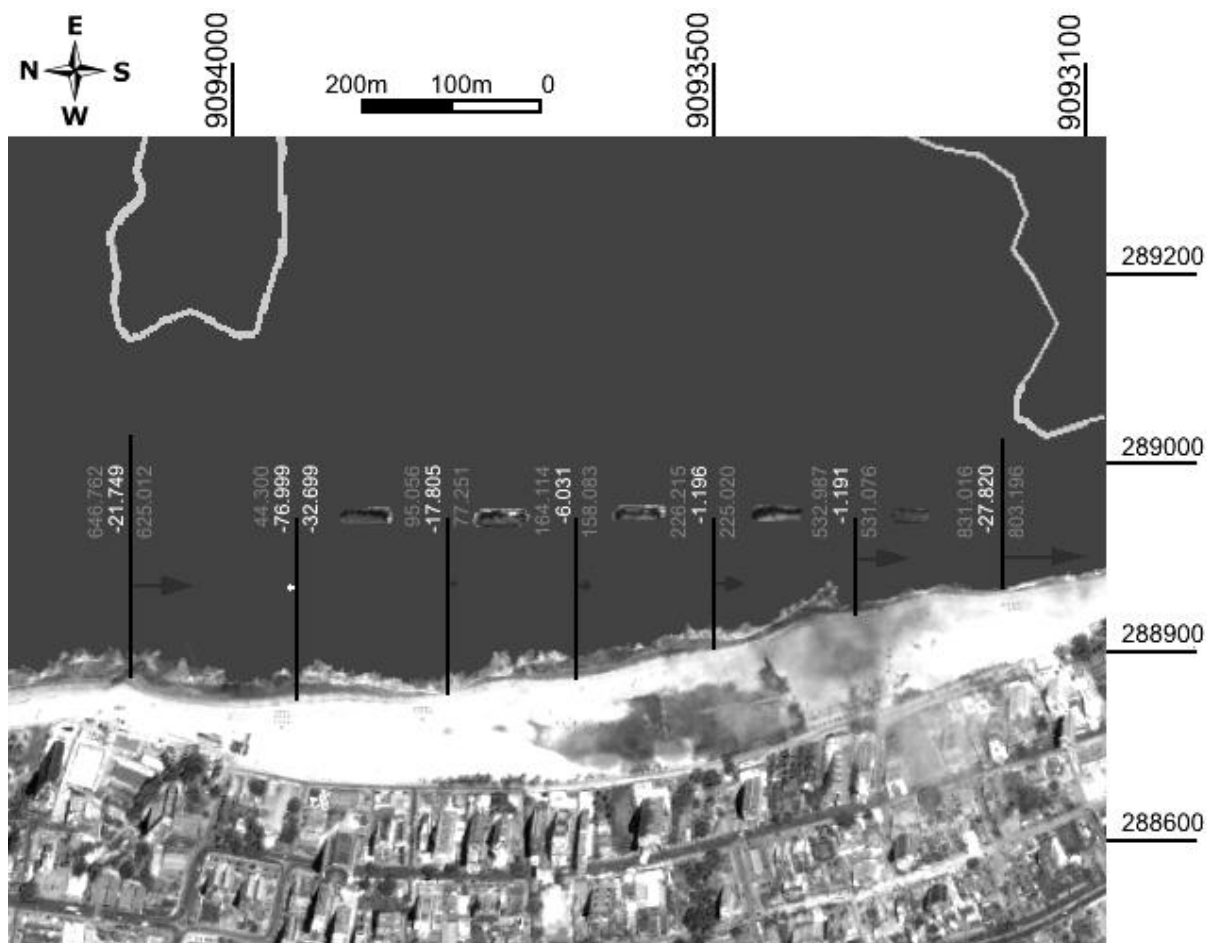
Na área protegida do quebra-mar contínuo, existem quantidades ínfimas registradas de valores de transporte de sedimentos, e em sentidos opostos, com uma tendência predominante dos sedimentos se moverem para o sul, em direção a área da saliência. Deste modo, esta área funciona como uma armadilha, capturando e acumulando todo o sedimento que se move para o interior desta região, bem como impedindo que este sedimento seja removido novamente.

Figura 6.4 - O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração do quebra-mar antigo. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com setas escuras. Os transportes para o norte são negativos e representados pelas setas claras. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em  $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em  $m^3/ano$ ).



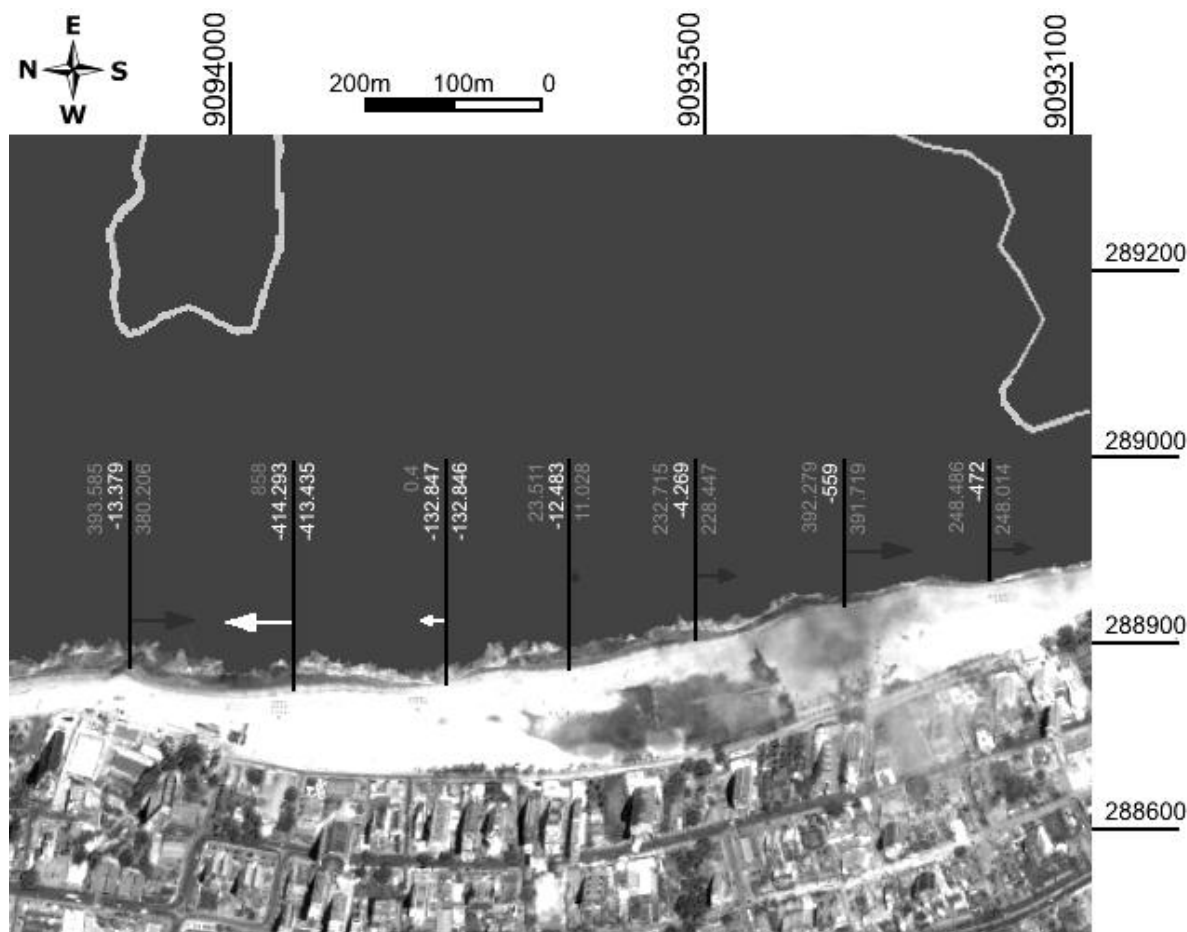
Fonte: o autor.

Figura 6.5 - O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração do quebra-mar atual. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com setas escuras. Os transportes para o norte são negativos e representados pelas setas claras. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em  $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em  $m^3/ano$ ).



Fonte: o autor.

Figura 6.6 - O transporte médio anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração sem o quebra-mar. Por convenção, os transportes de sedimentos para o sul foram definidos como positivos, que são representados com setas escuras. Os transportes para o norte são negativos e representados pelas setas claras. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em  $m^3/ano$ ), com o transporte médio mostrado abaixo de cada linha de perfil da praia (em  $m^3/ano$ ).



Fonte: o autor.

### 6.1.2 Discussão

Comparando os resultados das simulações para a configuração do quebra-mar atual com o cenário sem quebra-mar, não está claro se a configuração atual irá funcionar como uma proteção eficiente contra a erosão causada pelas corrente induzidas pelas ondas.

Na verdade, em comparação com o cenário de linha de costa exposta, as simulações mostram que a configuração do quebra-mar atual, há uma grande redução no transporte de

sedimentos na área ao norte, entretanto, a divergência de transporte de sedimentos observada na área central deve conduzir à erosão em longo prazo.

Utilizando os métodos de simulação apresentados, observamos a mesma tendência na zona sul do quebra-mar. De fato, o transporte de sedimentos para o sul é ainda maior do que se não houvesse proteção no litoral, porque não há nenhuma fonte de sedimentos na área, que poderia substituir o sedimento que está sendo movido para o sul. Como resultado, isto pode reduzir dramaticamente a disponibilidade de sedimentos na área, conduzindo a uma maior erosão costeira no futuro.

Por outro lado, existe uma melhoria relacionada com a modificação do quebra-mar. Ao abrir as lacunas, a deriva costeira foi restaurado, eliminando assim a armadilha de sedimentos criada pela instalação do quebra-mar original.

Com a circulação costeira restaurada, ainda existe a possibilidade de que o litoral possa chegar a uma configuração de equilíbrio em um curto prazo, já que a atual configuração teve pouca exposição às ondas de inverno, que têm um maior impacto energético. Elas podem potencialmente remodelar o litoral em direção a um equilíbrio.

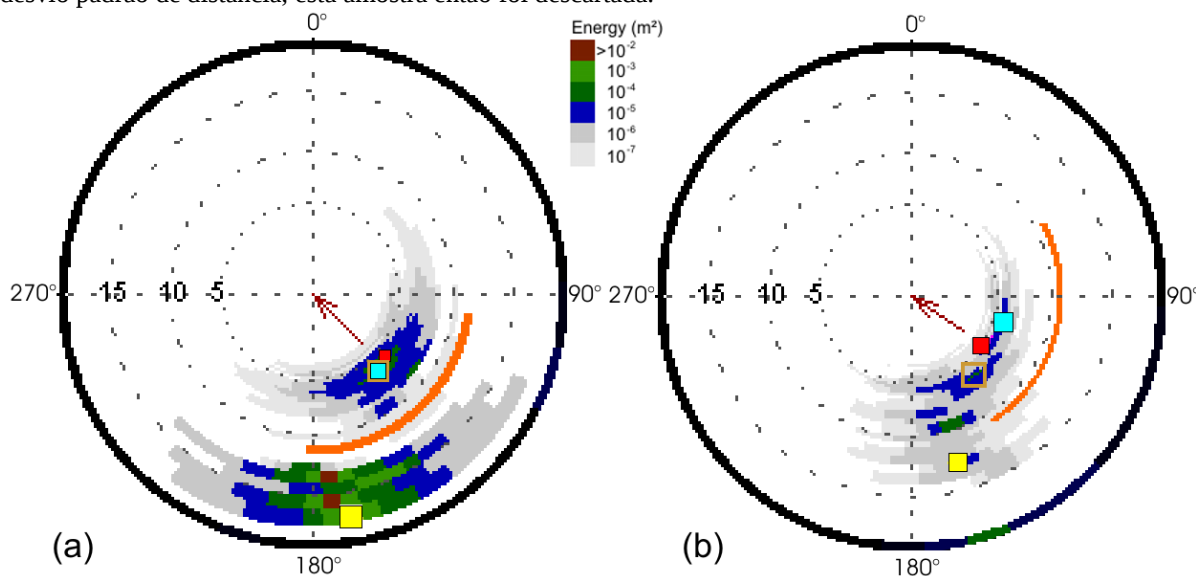
## 6.2 RESULTADOS DO MÉTODO DE PARTICIONAMENTO E DA COMPARAÇÃO ENTRE OS CLIMAS DE ONDAS DO ONDÓGRAFO E DO SMC

### 6.2.1 *Eficácia do Método de Particionamento Modificado*

O programa do fabricante, RfBuoy, também fornece o valor da frequência de pico e direção de pico da partição mais energética, que faz parte da distribuição espectral da amostra, além de um valor de variância em relação a esta direção de pico. Considerando-se uma diferença de um desvio padrão em ambos os lados da direção de pico como um limite

razoável para o erro entre o valor calculado pelo programa do fabricante, e um dos picos calculados pela metodologia descrita no item 5.5, verificou-se que 28% das amostras fora o limite definido pelo desvio padrão. Usando este critério como um método de controle de qualidade de dados, os valores fora desse limite foram descartados para descrever o clima de ondas como se segue.

Figura 6.7 - Nas figuras o arco laranja indica a frequência de corte, o quadrado amarelo o pico do sistema de swell, o quadrado vermelho é o pico do sistema de vagas calculado a partir da velocidade do vento. O quadrado ciano é o pico final do sistema de vagas, calculado pelo método de particionamento, e o quadrado laranja vazado é o pico fornecido pelo fabricante. Em (a) o pico calculado coincidiu com o pico do programa do fabricante. Em (b) o pico do programa do fabricante ficou muito distante do pico calculado pelo algoritmo, mais do que um desvio padrão de distância, esta amostra então foi descartada.



Fonte: o autor.

### 6.2.2 Caracterização Geral do Clima de Ondas

A Tabela 6.2 mostra os valores extremos dos parâmetros de ondas e valores médios (med.) e desvio padrão (std.) de cada parâmetro onda por ano, bem como para toda a série de dados. Cada ano tem valores médios muito semelhantes, com exceção de 2011. Este ano é

particularmente fora do padrão devido ao fato de que os dados computados neste ano apenas se referem aos meses de primavera, enquanto os outros anos incluem todas as estações do ano.

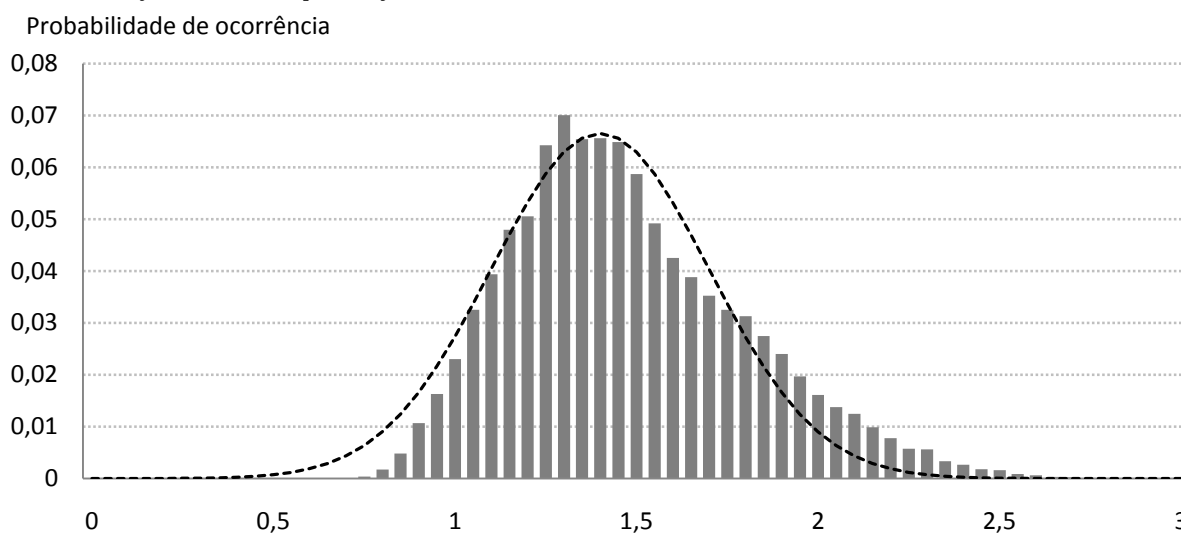
Tabela 6.2 - Valores extremos e valores estatísticos da média (med.) e desvio padrão (desvp.) dos principais parâmetros de ondas: Altura significativa ( $H_s$ ), período de pico (TP) e direção de pico (DP), listados para cada ano de medição e para todo o conjunto de dados.

| Ano   | $H_s$ (metros) |      |      |        | T <sub>p</sub> (segundos) |       |      |        | D <sub>p</sub> (graus) |      |      |        |
|-------|----------------|------|------|--------|---------------------------|-------|------|--------|------------------------|------|------|--------|
|       | min.           | max. | med. | desvp. | min.                      | max.  | med. | desvp. | min.                   | max. | med. | desvp. |
| Série | 0,72           | 2,85 | 1,48 | 0,326  | 4,35                      | 20,00 | 8,8  | 2,10   | 62                     | 236  | 138  | 16,9   |
| 2011  | 1,04           | 2,62 | 1,57 | 0,257  | 5,00                      | 15,38 | 9,0  | 1,87   | 101                    | 190  | 143  | 15,7   |
| 2012  | 0,85           | 2,80 | 1,48 | 0,333  | 4,55                      | 18,18 | 8,6  | 1,97   | 86                     | 236  | 136  | 15,5   |
| 2013  | 0,72           | 2,57 | 1,45 | 0,320  | 4,35                      | 18,18 | 8,9  | 2,18   | 62                     | 194  | 137  | 18,6   |
| 2014  | 0,76           | 2,85 | 1,49 | 0,352  | 4,35                      | 20,00 | 9,1  | 2,32   | 93                     | 204  | 139  | 17,4   |

Fonte: o autor.

Calculando a função densidade de probabilidade de altura significativa ( $H_s$ ) para todo o conjunto de dados, obtém-se uma distribuição que está dentro dos padrões de uma função Gaussiana com um valor modal de cerca de 1,4 m (Figura 6.8).

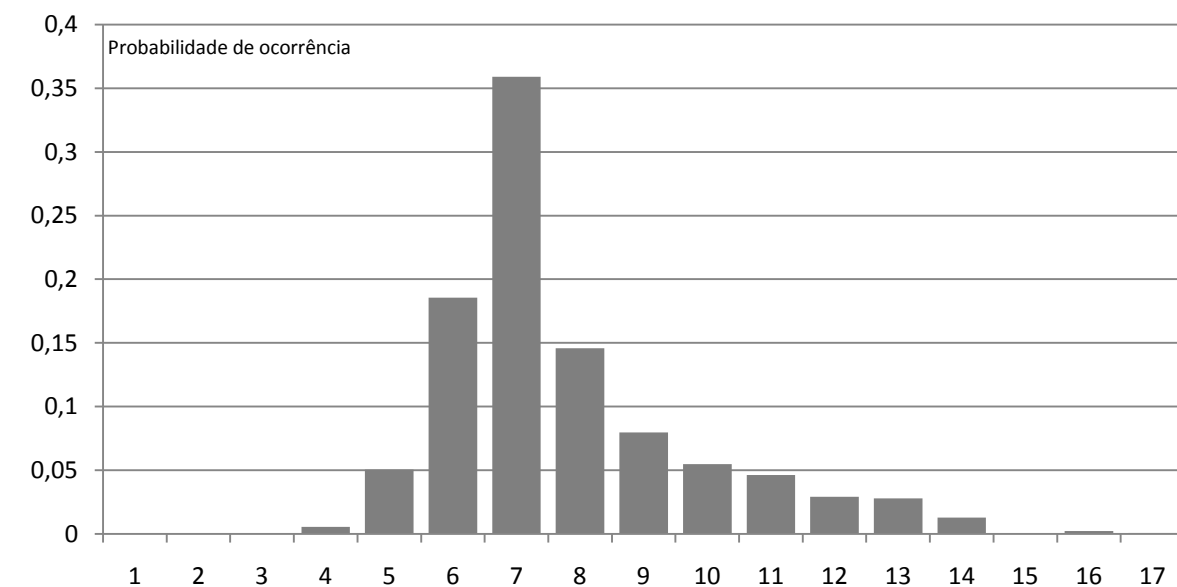
Figura 6.8 - Função de densidade de probabilidade (FDP), de altura significativa (m) para toda a série de dados e uma distribuição Gaussiana que se ajusta aos dados.



Fonte: o autor.

Calculando a função densidade de probabilidade de período de pico ( $T_p$ ) para todo o conjunto de dados, obtém-se uma distribuição normal com um pico bem definido em 7 s, e que apresenta uma cauda superior alongada chegando a ter valores representativos na faixa dos 14 s (Figura 6.9).

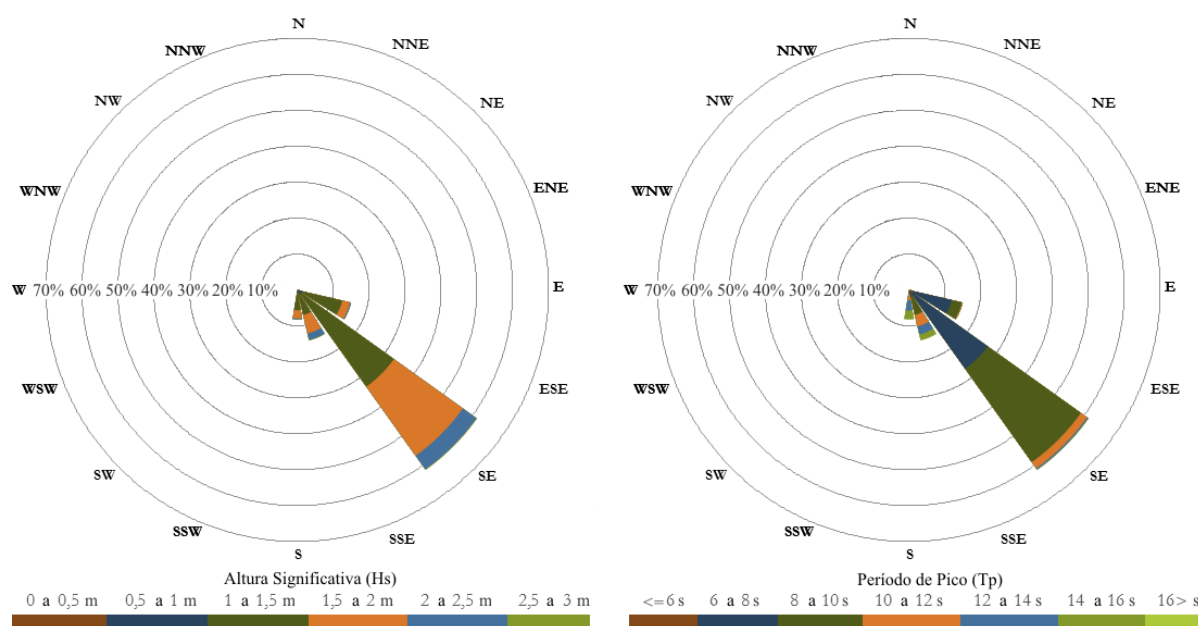
Figura 6.9 - FDP de período de pico (s) para toda a série de dados e sua respectiva probabilidade de ocorrência.



Fonte: o autor.

Plotando-se as rosas com as características direcionais do clima de ondas, observa-se que a maior parte da energia das ondas (mais de 60% da energia) vem do quadrante sudeste, com duas pequenas porções vindas de sul-sudeste e leste-sudeste (cerca de 15% cada), e pouco menos de 10% da energia provém do quadrante sul (Figura 6.10).

Figura 6.10 - Rosa de distribuição das direções na altura significativa (HS) e no período de pico (TP) para o somatório a energia das ondas de toda a série de dados.



Fonte: o autor.

As tabelas mostram as distribuições de probabilidade de ocorrência das alturas significativas e dos períodos de pico ao longo das diferentes direções, nota-se que as direções se referem às ondas que estão chegando (notação meteorológica), e as direções em que não ocorrem dados por estarem viradas para o continente (de Oeste-Sudoeste até Norte-Nordeste) foram omitidas. A última coluna da direita é o somatório da probabilidade de todas as alturas, ou dos períodos, e a última linha é o somatório das probabilidades para todas as direções.

As tabelas 6.3 e 6.4 mostram as probabilidades de ocorrência para toda a série de dados ao longo das diferentes direções, nota-se que a maior ocorrência é de ondas vindas de Sudeste com 61,44 %, com alturas entre 1,0 m e 1,5 m, e períodos entre 6,0 s e 10,0 s.

Tabela 6.3 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para toda a série de dados.

| >     | 0,0   | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0   | 2,5   | 3,0   | Total  |
|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5   | 1,0   | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | >3,0  |        |
| NE    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00% | 0,04%  | 0,01%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,05%  |
| E     | 0,00% | 0,31% | 0,25%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,55%  |
| ESE   | 0,00% | 1,48% | 11,35% | 2,22%  | 0,30% | 0,00% | 0,00% | 15,34% |
| SE    | 0,00% | 1,42% | 31,61% | 23,61% | 4,65% | 0,15% | 0,00% | 61,44% |
| SSE   | 0,00% | 0,53% | 6,59%  | 5,28%  | 1,83% | 0,13% | 0,00% | 14,35% |
| S     | 0,00% | 0,87% | 4,74%  | 2,30%  | 0,26% | 0,01% | 0,00% | 8,17%  |
| SSW   | 0,00% | 0,01% | 0,06%  | 0,01%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,08%  |
| SW    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| Total | 0,00% | 4,60% | 54,64% | 33,43% | 7,04% | 0,29% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

Tabela 6.4 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para toda a série de dados.

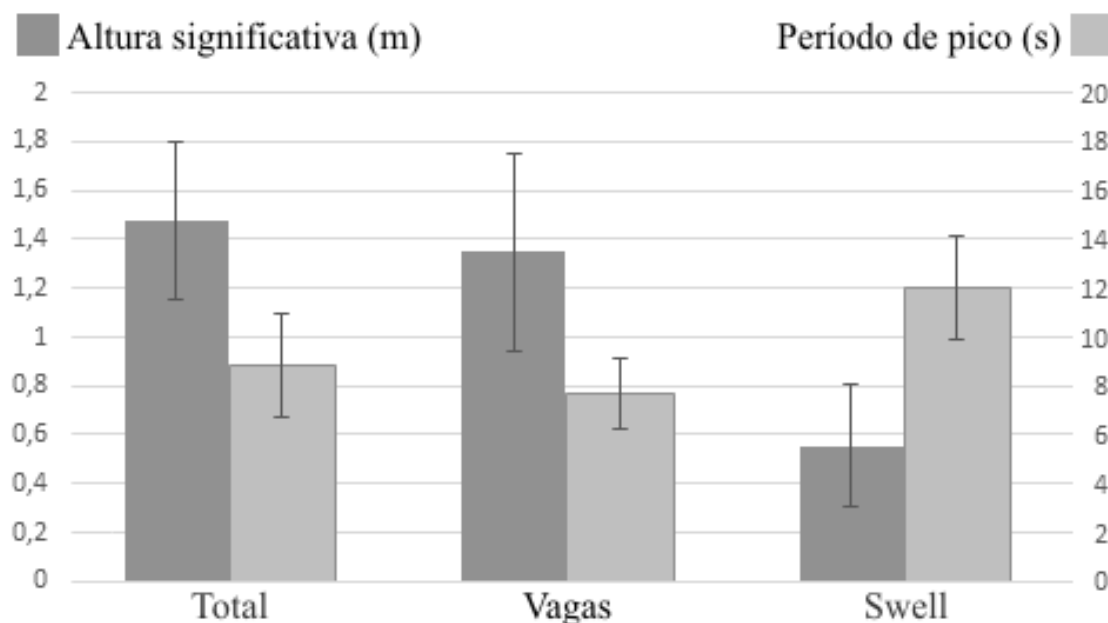
| >     | 0,0   | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0  | 14,0  | 16,0  | Total  |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0  | 16,0  | >16,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE   | 0,05% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,05%  |
| E     | 0,18% | 0,14%  | 0,07%  | 0,16% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,55%  |
| ESE   | 1,21% | 11,00% | 2,92%  | 0,21% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 15,34% |
| SE    | 1,02% | 25,89% | 31,92% | 2,11% | 0,39% | 0,10% | 0,01% | 61,44% |
| SSE   | 0,23% | 1,71%  | 5,16%  | 3,26% | 2,29% | 1,57% | 0,12% | 14,35% |
| S     | 0,05% | 0,15%  | 0,91%  | 1,71% | 2,86% | 2,36% | 0,14% | 8,17%  |
| SSW   | 0,01% | 0,00%  | 0,00%  | 0,01% | 0,01% | 0,02% | 0,03% | 0,08%  |
| SW    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| Total | 2,75% | 38,89% | 40,97% | 7,47% | 5,56% | 4,05% | 0,31% |        |

Fonte: o autor.

### 6.2.3 Caracterização do Swell e das Vagas

Com os dados da energia espectral das ondas particionados, obtém-se uma análise mais detalhada do clima de ondas na região (Figura 6.11), no qual se observa a contribuição de cada um dos sistemas de ondas (vagas e *swell*) na caracterização direcional do clima de ondas, comparados com a energia total das ondas.

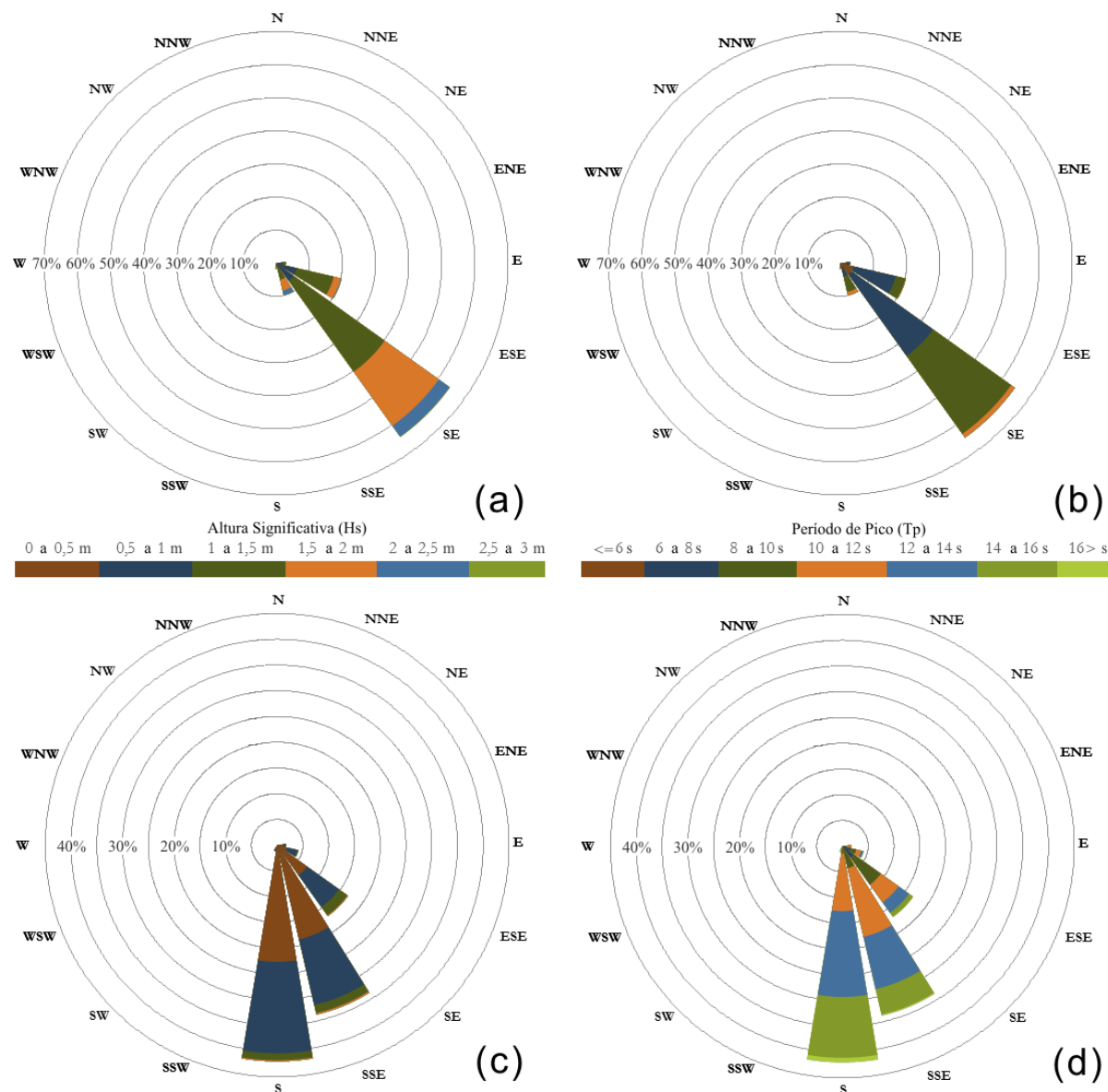
Figura 6.11 - Média e desvio padrão da altura significativa e do período primário para as partições de vagas e swell, e para a energia espectral total.



Fonte: o autor.

A maior parte da energia de vagas (cerca de 65%) vem do quadrante sudeste (Figura 6.12 a e b), enquanto outra parte vem de leste-sudeste (cerca de 20%), e cerca de 10% vem do quadrante sul-sudeste, sendo que boa parte dos períodos de pico de vagas são até 10 s. A energia de *swell* (Figuras 6.12 c e d), ficou dividida principalmente entre os quadrantes sul e sul-sudeste, com outra pequena parte proveniente do sudeste (cerca de 10%). As ondas de *swell* foram caracterizadas por apresentarem em sua maioria menos de 1 m de altura significativa, com períodos de pico que variam entre 10 s e 16 s.

Figura 6.12 - Rosas direcionais de altura significativa e o período de pico, que representam a energia de vagas (a e b) e *swell* (c e d) para toda a série de dados. Quase um terço de toda a energia de vagas vem do quadrante sudeste, cerca de um quinto vem de leste-sudeste, e cerca de um décimo da energia vem do quadrante sul-sudeste. Quase todas as vagas tem períodos de pico de até 10 s, enquanto que as ondas de *swell* têm períodos de pico na sua maioria superiores a 10s, prevalecendo as ondas provenientes dos quadrantes sul e sul-sudeste, com até 1 metro de altura significativa.



Fonte: o autor.

As tabelas 6.5 e 6.6 mostram as probabilidades de ocorrência para os sistemas de vagas em toda a série de dados, ao longo das diferentes direções. Nota-se que a maior

ocorrência é de ondas vindas de Sudeste com 64,71 %, com alturas entre 1,0 m e 1,5 m, e períodos entre 6,0 s e 10,0 s.

Tabela 6.5 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para as vagas em toda a série de dados.

| >     | 0,0   | 0,5    | 1,0    | 1,5    | 2,0   | 2,5   | 3,0   | Total  |
|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | >3,0  |        |
| NE    | 0,00% | 0,01%  | 0,01%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,02%  |
| ENE   | 0,08% | 0,11%  | 0,08%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,26%  |
| E     | 0,55% | 1,43%  | 0,86%  | 0,06%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 2,91%  |
| ESE   | 0,65% | 5,73%  | 11,42% | 2,16%  | 0,27% | 0,00% | 0,00% | 20,23% |
| SE    | 0,56% | 5,91%  | 33,76% | 20,09% | 4,01% | 0,12% | 0,00% | 64,44% |
| SSE   | 0,23% | 0,86%  | 3,96%  | 3,38%  | 1,50% | 0,08% | 0,00% | 10,01% |
| S     | 0,08% | 0,18%  | 0,85%  | 0,44%  | 0,13% | 0,00% | 0,00% | 1,68%  |
| SSW   | 0,02% | 0,00%  | 0,02%  | 0,01%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,06%  |
| SW    | 0,04% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,04%  |
| Total | 2,21% | 14,24% | 50,96% | 26,14% | 5,91% | 0,20% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

Tabela 6.6 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para as vagas em toda a série de dados.

| >     | 0,0    | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0  | 14,0  | 16,0   | Total  |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| <=    | 6,0    | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0  | 16,0  | > 16,0 |        |
| NE    | 0,02%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,03%  |
| ENE   | 0,25%  | 0,03%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,27%  |
| E     | 1,72%  | 1,04%  | 0,15%  | 0,01% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 2,91%  |
| ESE   | 4,17%  | 12,94% | 3,01%  | 0,15% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 20,27% |
| SE    | 4,13%  | 30,24% | 28,94% | 1,35% | 0,05% | 0,00% | 0,00%  | 64,71% |
| SSE   | 1,16%  | 2,89%  | 4,85%  | 1,05% | 0,06% | 0,01% | 0,00%  | 10,02% |
| S     | 0,29%  | 0,46%  | 0,64%  | 0,25% | 0,04% | 0,01% | 0,00%  | 1,68%  |
| SSW   | 0,03%  | 0,02%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,06%  |
| SW    | 0,04%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,04%  |
| Total | 11,80% | 47,62% | 37,59% | 2,81% | 0,16% | 0,02% | 0,00%  |        |

Fonte: o autor.

As tabelas 6.7 e 6.8 mostram as probabilidades de ocorrência para os sistemas de *swell* para toda a série de dados, ao longo das diferentes direções. Nota-se que a maior ocorrência é de ondas vindas de Sul com 41,98 % e de Sul-Sudeste com 33,76 %, com mais da metade das alturas de até 0,5 m e pouco mais de 40% com 0,5 m a 1,0 m, e períodos entre 10,0 s e 14,0 s.

Tabela 6.7 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para os swells em toda a série de dados.

| >     | 0,0    | 0,5    | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 2,5   | 3,0   | Total  |
|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5    | 1,0    | 1,5   | 2,0   | 2,5   | 3,0   | > 3,0 |        |
| NE    | 0,02%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,02%  |
| ENE   | 0,15%  | 0,01%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,16%  |
| E     | 1,33%  | 0,30%  | 0,05% | 0,01% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 1,68%  |
| ESE   | 1,94%  | 2,08%  | 0,19% | 0,02% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 4,23%  |
| SE    | 7,14%  | 7,59%  | 2,01% | 0,15% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 16,88% |
| SSE   | 18,76% | 13,07% | 1,64% | 0,26% | 0,03% | 0,00% | 0,00% | 33,76% |
| S     | 22,65% | 17,77% | 1,35% | 0,19% | 0,02% | 0,00% | 0,00% | 41,98% |
| SSW   | 0,76%  | 0,40%  | 0,02% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 1,18%  |
| SW    | 0,05%  | 0,05%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,10%  |
| Total | 52,80% | 41,27% | 5,25% | 0,63% | 0,05% | 0,00% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

Tabela 6.8 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para os swells em toda a série de dados.

| >     | 0,0   | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0   | 14,0   | 16,0   | Total  |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <=    | 6,0   | 8,0   | 10,0   | 12,0   | 14,0   | 16,0   | > 16,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,02%  | 0,00%  | 0,02%  |
| ENE   | 0,00% | 0,01% | 0,05%  | 0,05%  | 0,05%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,16%  |
| E     | 0,01% | 0,16% | 0,65%  | 0,77%  | 0,06%  | 0,02%  | 0,01%  | 1,68%  |
| ESE   | 0,06% | 1,45% | 1,24%  | 0,96%  | 0,38%  | 0,12%  | 0,01%  | 4,23%  |
| SE    | 0,11% | 2,54% | 6,50%  | 4,22%  | 2,49%  | 0,95%  | 0,06%  | 16,87% |
| SSE   | 0,01% | 0,34% | 4,03%  | 13,67% | 10,44% | 5,06%  | 0,22%  | 33,76% |
| S     | 0,00% | 0,09% | 1,27%  | 11,24% | 16,65% | 11,82% | 0,91%  | 41,98% |
| SSW   | 0,00% | 0,00% | 0,03%  | 0,25%  | 0,28%  | 0,41%  | 0,22%  | 1,18%  |
| SW    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,02%  | 0,08%  | 0,10%  |
| Total | 0,19% | 4,59% | 13,76% | 31,16% | 30,35% | 18,42% | 1,51%  |        |

Fonte: o autor.

A tabela 6.9 mostra os valores médios, bem como o erro relacionado às principais variáveis estatísticas que descrevem os sistemas de vagas e de *swell* ao longo de toda a série de dados. Observa-se que as vagas possuem altura significativa média em torno de 1,3 m e período de pico em torno de 8 s e direção de pico de Sudeste (131°), enquanto que os *swells* possuem altura significativa média em torno de 0,6m e período de pico de 12s, com direção de pico de Sul-Sudeste (160°). As vagas predominam nesta região, com porcentagem média de ocorrência de 82%, enquanto que a ocorrência de ondas de *swell* é de apenas 10%.

Tabela 6.9 - Média (med.) e desvio padrão (desvp.) para os valores de altura significativa (HS), período de pico (TP) e direção de pico (DP) para os sistemas de vagas e de swell, computados para toda a série de dados.

| Sistema | H <sub>s</sub> (metros) |        | T <sub>p</sub> (segundos) |        | D <sub>p</sub> (graus) |        | Ocorrência |        |
|---------|-------------------------|--------|---------------------------|--------|------------------------|--------|------------|--------|
|         | med.                    | desvp. | med.                      | desvp. | med.                   | desvp. | med.       | desvp. |
| Vagas   | 1,35                    | 0,405  | 7,7                       | 1,46   | 131                    | 15,3   | 82,0%      | 16,8%  |
| Swell   | 0,56                    | 0,249  | 12,0                      | 2,13   | 160                    | 20,8   | 10,0%      | 10,9%  |

Fonte: o autor.

A tabela 6.10 mostra os valores médios, bem como o erro relacionado às principais variáveis estatísticas que descrevem as ondas ao longo de cada estação do ano. Nota-se que há uma estabilidade em relação à direção de pico, que é predominantemente de Sudeste, mas uma ligeira tendência no outono para ondas mais voltadas para Sul-Sudeste, inclusive com uma maior variância, isso devido ao fato de ocorrência de mais ondas de *swell* registradas durante o outono do que nas outras estações.

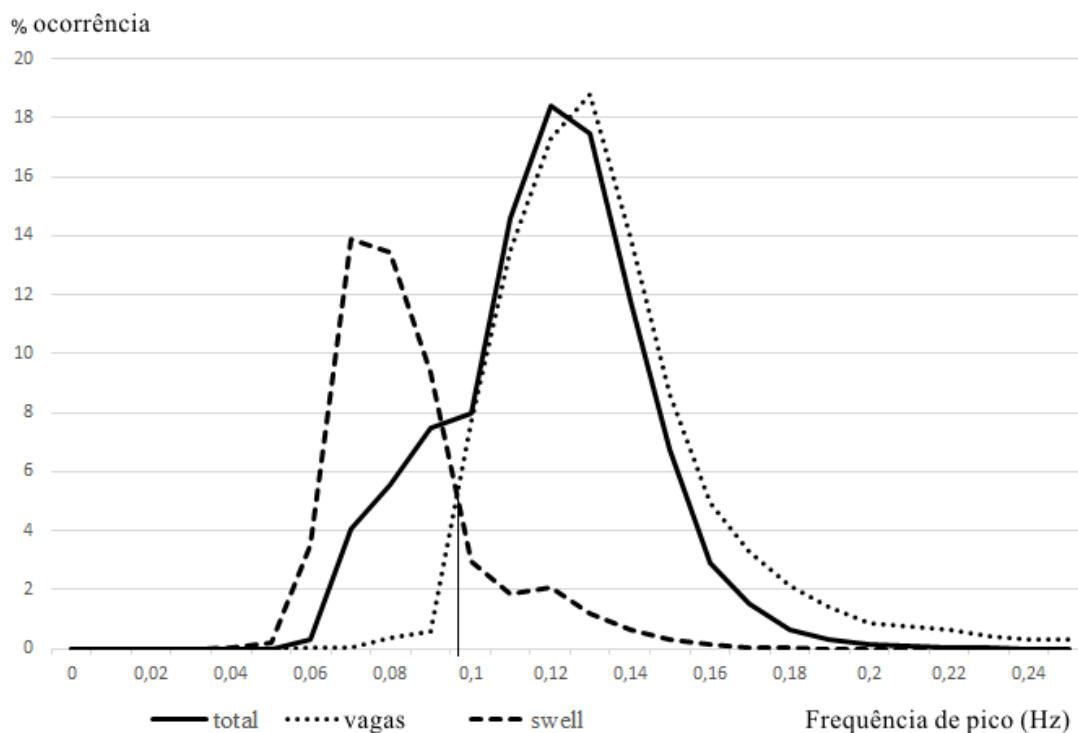
Tabela 6.10 - Média (med.) e desvio padrão (desvp.) para os valores de altura significativa (HS), período de pico (TP) e direção de pico (DP) para o somatório de energias computados para cada estação do ano.

| Estação   | H <sub>s</sub> (m) |        | T <sub>p</sub> (s) |        | D <sub>p</sub> (graus) |        |
|-----------|--------------------|--------|--------------------|--------|------------------------|--------|
|           | med.               | desvp. | med.               | desvp. | med.                   | desvp. |
| Verão     | 1,29               | 0,213  | 8,0                | 1,85   | 135                    | 16,8   |
| Outono    | 1,41               | 0,314  | 9,4                | 2,45   | 141                    | 19,3   |
| Inverno   | 1,73               | 0,323  | 9,1                | 1,89   | 139                    | 14,0   |
| Primavera | 1,44               | 0,255  | 8,6                | 1,86   | 136                    | 16,6   |

Fonte: o autor.

A distribuição da energia ao longo da frequência, visualizada através da função densidade de probabilidade (FDP) de cada amostra, indica que a energia das vagas se concentra numa faixa de frequências de pico igual ou acima dos 0,1 Hz, enquanto que a energia de *swell* está abaixo deste limite em sua maior parte (Figura 6.13), calculando-se a probabilidade de uma amostra apresentar uma frequência de pico abaixo de 0,1 Hz encontra-se 17,4 % enquanto 82,6 % das ondas apresentam frequência de pico igual ou acima de 0,1 Hz.

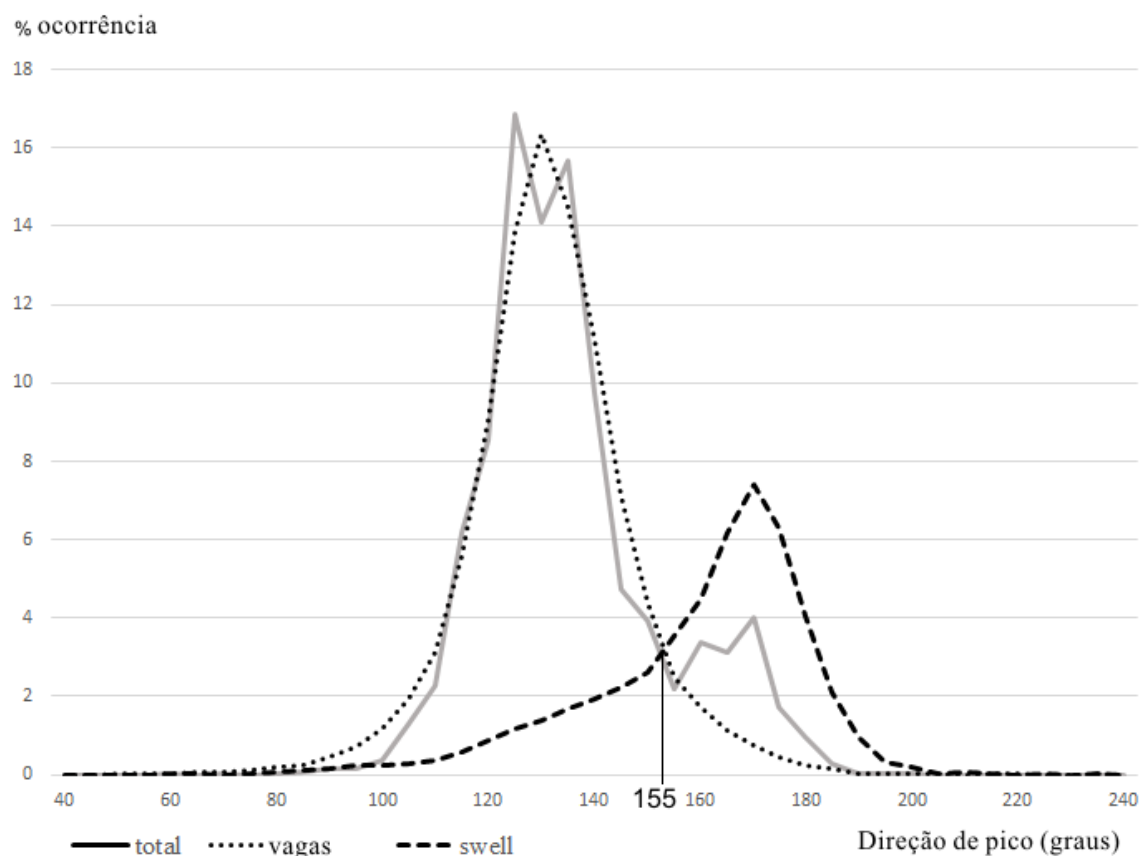
Figura 6.13 - FDP mostrando a porcentagem de energia relativa a soma de todas as componentes (linha contínua), bem como a porcentagem das componentes de vagas (linha pontilhada) e de *swell* (linha tracejada) de toda a série de dados em relação à frequência de pico das amostras. A linha vertical indica o ponto em que estatisticamente se dá a divisão entre a distribuição das energias de vagas e as de *swell*, que se situa aproximadamente em 0,1 Hz.



Fonte: o autor.

A distribuição da energia ao longo das direções, visualizada através da FDP da direção primária de cada amostra, indica que a energia das vagas se concentra numa faixa de direção igual ou abaixo dos 155°, enquanto que a energia de *swell* está acima deste limite em sua maior parte (Figura 6.14), calculando-se a probabilidade de uma amostra ter direção primária igual ou abaixo de 155° encontramos 86,4%, enquanto 13,6% possui direções primárias acima de 155°.

Figura 6.14 - FDP mostrando a porcentagem de energia relativa a soma de todas as componentes (linha contínua), bem como a porcentagem das componentes de vagas (linha pontilhada) e de *swell* (linha tracejada) de toda a série de dados em relação à direção de pico das amostras. A linha vertical indica o ponto em que estatisticamente se dá a divisão entre a distribuição das energias de vagas e as de *swell*, que se situa aproximadamente em 150°.



Fonte: o autor.

As tabelas 6.11 e 6.12 mostram as probabilidades de ocorrência para as ondas durante os meses de verão (janeiro a março) para toda a série de dados, nota-se que a maior ocorrência é de ondas vindas de Sudeste com 63,12% e com 75% as alturas de 1,0 m até 1,5 m e mais de 64 % com períodos entre 6,0 s a 8,0 s.

Tabela 6.11 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o verão.

| >     | 0,0   | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0   | 2,5   | 3,0   |        |
|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5   | 1,0   | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | > 3,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| E     | 0,00% | 1,07% | 0,42%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 1,49%  |
| ESE   | 0,00% | 2,78% | 16,40% | 0,54%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 19,73% |
| SE    | 0,00% | 2,74% | 47,97% | 12,26% | 0,15% | 0,00% | 0,00% | 63,12% |
| SSE   | 0,00% | 0,92% | 5,90%  | 1,55%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 8,37%  |
| S     | 0,00% | 1,88% | 4,27%  | 1,11%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 7,26%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00% | 0,04%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,04%  |
| SW    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| Total | 0,00% | 9,39% | 75,00% | 15,46% | 0,15% | 0,00% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

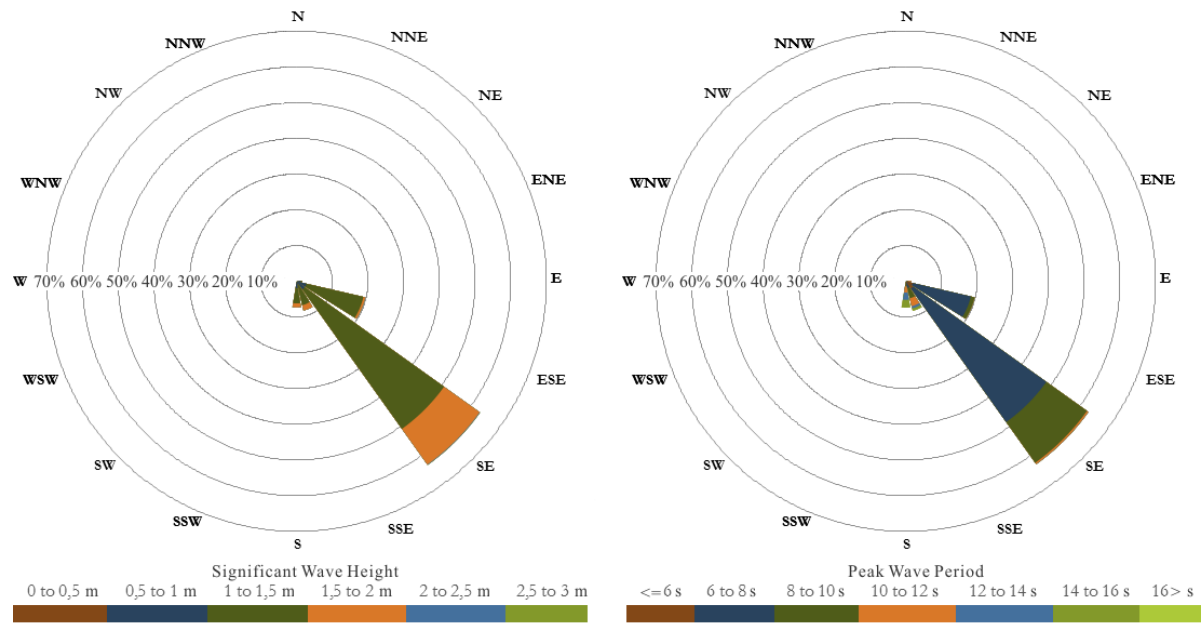
Tabela 6.12 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o verão.

| >     | 0,0   | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0  | 14,0  | 16,0   | Total  |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| <=    | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0  | 16,0  | > 16,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| E     | 0,23% | 0,19%  | 0,31%  | 0,75% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 1,49%  |
| ESE   | 1,92% | 16,67% | 1,09%  | 0,04% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 19,73% |
| SE    | 2,41% | 46,03% | 14,18% | 0,46% | 0,04% | 0,00% | 0,00%  | 63,12% |
| SSE   | 0,02% | 1,82%  | 2,97%  | 2,24% | 0,63% | 0,67% | 0,02%  | 8,37%  |
| S     | 0,00% | 0,04%  | 1,36%  | 1,67% | 2,03% | 2,15% | 0,00%  | 7,26%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00%  | 0,02%  | 0,00% | 0,00% | 0,02% | 0,00%  | 0,04%  |
| SW    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| Total | 4,58% | 64,75% | 19,94% | 5,17% | 2,70% | 2,85% | 0,02%  |        |

Fonte: o autor.

As rosas de direção da figura 6.15 descrevem visualmente esta distribuição especificada nas tabelas acima, assim podemos visualizar a predominância das ondas de Sudeste sobre as outras direções, e em seguida as ondas de Leste-Sudeste, que acompanham a mudança da direção dos ventos alísios observada nos meses de verão nesta região.

Figura 6.15 - Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do verão (janeiro a março) de toda a série de dados.



Fonte: o autor.

As tabelas 6.13 e 6.14 mostram as probabilidades de ocorrência para as ondas durante os meses de outono (abril a junho) para toda a série de dados, nota-se que a maior ocorrência é de ondas de Sudeste, porém a ocorrência de ondas de Sul-Sudeste e de Sul é maior do que nas outras estações, isso devido a maior frequência de sistemas de *swell* vindas de tempestades que ocorrem no oceano Atlântico subtropical e temperado nesta época do ano.

Tabela 6.13 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o outono.

| >   | 0,0   | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0   | 2,5   | 3,0   |        |
|-----|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| <=  | 0,5   | 1,0   | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | > 3,0 |        |
| NE  | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| E   | 0,00% | 0,14% | 0,24%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,38%  |
| ESE | 0,00% | 1,86% | 12,59% | 2,05%  | 0,17% | 0,00% | 0,00% | 16,67% |
| SE  | 0,00% | 2,12% | 27,58% | 17,58% | 3,84% | 0,02% | 0,00% | 51,13% |
| SSE | 0,00% | 1,00% | 11,85% | 5,02%  | 0,74% | 0,00% | 0,00% | 18,61% |
| S   | 0,00% | 1,43% | 7,88%  | 3,44%  | 0,24% | 0,00% | 0,00% | 12,99% |
| SSW | 0,00% | 0,03% | 0,17%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,21%  |
| SW  | 0,00% | 0,00% | 0,02%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,02%  |
|     | 0,00% | 6,57% | 60,33% | 28,09% | 4,99% | 0,02% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

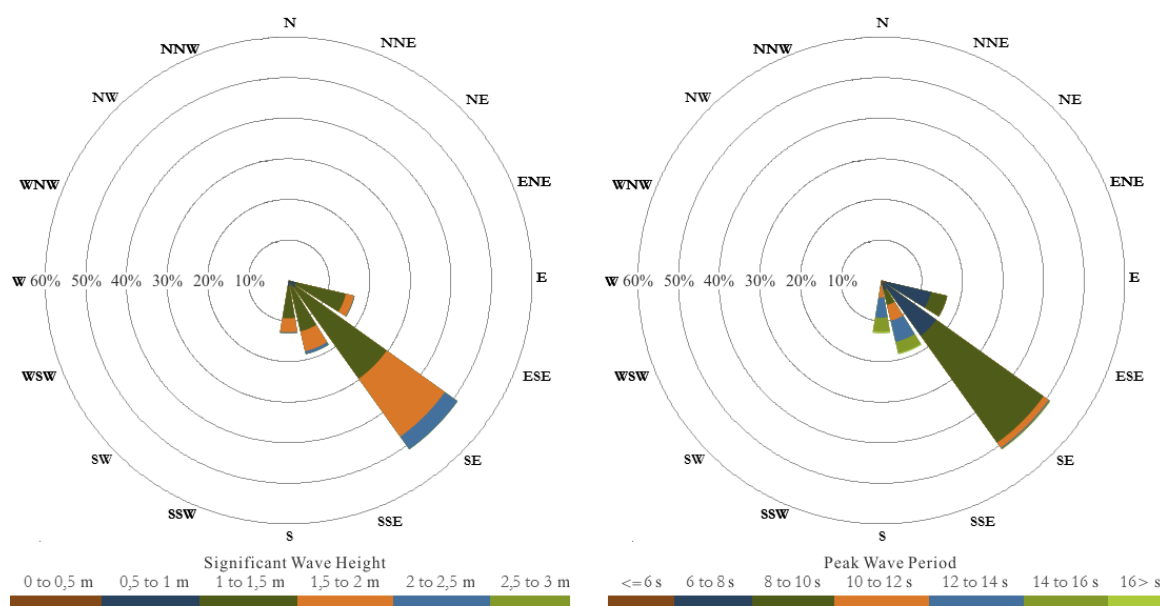
Observa-se que mais de 25 % das ondas têm período entre 10 s a 16 s (destacado em cinza na tabela 5.12), vindas principalmente de Sul e de Sul-Sudeste (Figura 6.16), o que coincide com a distribuição estatística dos sistemas de *swell*, demonstrado graficamente na FDP dos sistemas de vagas e de *swell* (Figura 6.13).

Tabela 6.14 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o outono.

| >   | 0,0   | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0   | 14,0  | 16,0   |        |
|-----|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| <=  | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0   | 16,0  | > 16,0 |        |
| NE  | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| ENE | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| E   | 0,12% | 0,26%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,38%  |
| ESE | 0,98% | 11,59% | 4,04%  | 0,05% | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 16,67% |
| SE  | 0,79% | 15,84% | 32,44% | 1,55% | 0,28%  | 0,19% | 0,03%  | 51,13% |
| SSE | 0,46% | 1,91%  | 3,78%  | 3,99% | 5,35%  | 2,84% | 0,28%  | 18,61% |
| S   | 0,14% | 0,28%  | 0,79%  | 2,98% | 4,97%  | 3,44% | 0,40%  | 12,99% |
| SSW | 0,03% | 0,00%  | 0,00%  | 0,02% | 0,03%  | 0,03% | 0,09%  | 0,21%  |
| SW  | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00%  | 0,00% | 0,02%  | 0,02%  |
|     | 2,53% | 29,88% | 41,06% | 8,58% | 10,63% | 6,50% | 0,81%  |        |

Fonte: o autor.

Figura 6.16 - Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do outono (abril a junho) de toda a série de dados.



Fonte: o autor.

As tabelas 6.15 e 6.16 mostram as probabilidades de ocorrência para as ondas durante os meses de inverno (julho a setembro) para toda a série de dados, nota-se que a maior ocorrência é de ondas de Sudeste com 1,5 m a 2,0 m, a maior parte com período de pico entre 8,0 s a 10,0 s, o que denota a predominância de sistemas de vagas com mais energia.

Tabela 6.15 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para o inverno.

| >     | 0,0   | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | Total  |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5   | 1,0   | 1,5    | 2,0    | 2,5    | 3,0   | > 3,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| E     | 0,00% | 0,02% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,02%  |
| ESE   | 0,00% | 0,46% | 3,30%  | 4,45%  | 0,93%  | 0,00% | 0,00% | 9,14%  |
| SE    | 0,00% | 0,68% | 16,01% | 38,82% | 12,20% | 0,56% | 0,00% | 68,27% |
| SSE   | 0,00% | 0,07% | 3,09%  | 8,74%  | 5,08%  | 0,49% | 0,00% | 17,47% |
| S     | 0,00% | 0,00% | 1,61%  | 2,92%  | 0,48%  | 0,03% | 0,00% | 5,05%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00% | 0,02%  | 0,03%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,05%  |
| SW    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| Total | 0,00% | 1,22% | 24,03% | 54,96% | 18,69% | 1,09% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

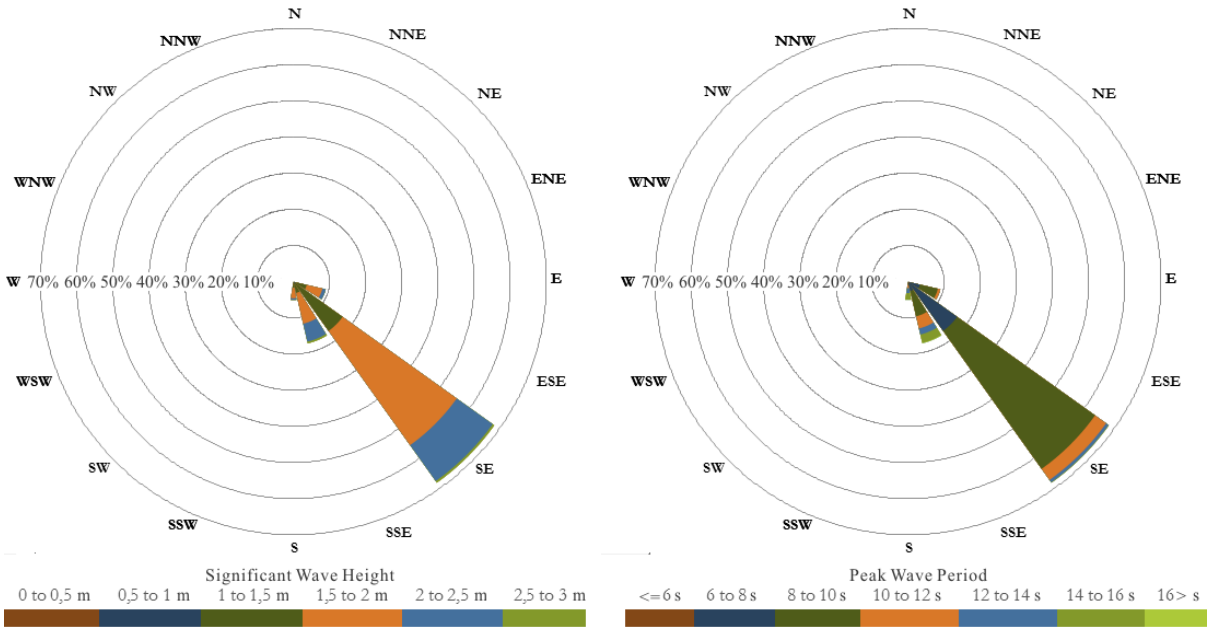
Tabela 6.16 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para o inverno.

| >     | 0,0   | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0  | 14,0  | 16,0   | Total  |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| <=    | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0  | 16,0  | > 16,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| E     | 0,02% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,02%  |
| ESE   | 0,36% | 3,01%  | 5,08%  | 0,70% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 9,14%  |
| SE    | 0,61% | 16,04% | 46,91% | 3,76% | 0,83% | 0,10% | 0,02%  | 68,27% |
| SSE   | 0,37% | 2,21%  | 7,21%  | 3,45% | 1,72% | 2,35% | 0,17%  | 17,47% |
| S     | 0,05% | 0,14%  | 0,65%  | 0,90% | 1,41% | 1,80% | 0,10%  | 5,05%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,02% | 0,00% | 0,02% | 0,02%  | 0,05%  |
| SW    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| Total | 1,41% | 21,40% | 59,84% | 8,82% | 3,96% | 4,27% | 0,31%  |        |

Fonte: o autor.

As rosas da figura 6.17 mostram visualmente a predominância de ondas de entre 1,5 m e 2,5 m e período de pico entre 8,0 s a 10,0 s.

Figura 6.17 - Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses do inverno (julho a setembro) de toda a série de dados.



Fonte: o autor.

As tabelas 6.17 e 6.18 mostram as probabilidades de ocorrência para as ondas durante os meses de primavera (outubro a dezembro) para toda a série de dados, nota-se que a maior ocorrência é de ondas de Sudeste com 1,0 m a 1,5 m, a maior parte com período de pico entre 6,0 s a 8,0 s, o que denota a predominância de sistemas de vagas com menor energia do que no inverno.

Tabela 6.17 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo das alturas significativas (m) e das direções para a primavera.

| >     | 0,0   | 0,5   | 1,0    | 1,5    | 2,0   | 2,5   | 3,0   | Total  |
|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| <=    | 0,5   | 1,0   | 1,5    | 2,0    | 2,5   | 3,0   | > 3,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| ENE   | 0,00% | 0,00% | 0,16%  | 0,04%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,19%  |
| E     | 0,00% | 0,14% | 0,37%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,51%  |
| ESE   | 0,00% | 1,05% | 14,16% | 1,49%  | 0,02% | 0,00% | 0,00% | 16,72% |
| SE    | 0,00% | 0,35% | 38,09% | 23,60% | 1,47% | 0,00% | 0,00% | 63,50% |
| SSE   | 0,00% | 0,19% | 5,41%  | 5,09%  | 1,12% | 0,00% | 0,00% | 11,82% |
| S     | 0,00% | 0,33% | 5,15%  | 1,51%  | 0,28% | 0,00% | 0,00% | 7,26%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| SW    | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  |
| Total | 0,00% | 2,07% | 63,33% | 31,72% | 2,89% | 0,00% | 0,00% |        |

Fonte: o autor.

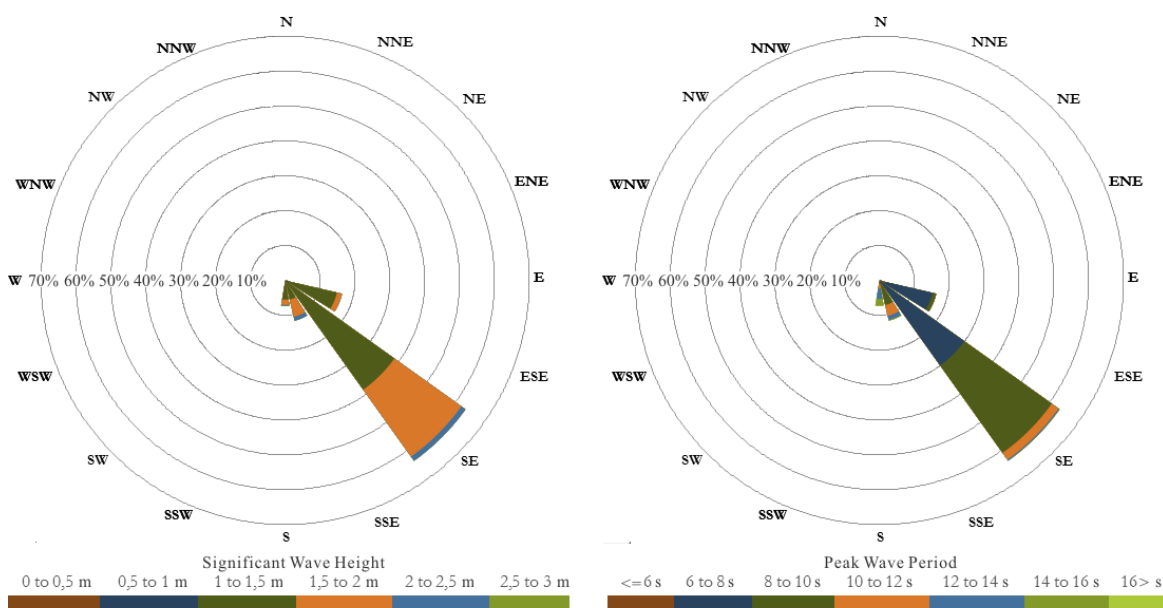
Tabela 6.18 - Distribuição de probabilidade de ocorrência de ondas ao longo dos períodos de pico (s) e das direções para a primavera.

| >     | 0,0   | 6,0    | 8,0    | 10,0  | 12,0  | 14,0  | 16,0   | Total  |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| <=    | 6,0   | 8,0    | 10,0   | 12,0  | 14,0  | 16,0  | > 16,0 |        |
| NE    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| ENE   | 0,19% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,19%  |
| E     | 0,37% | 0,14%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,51%  |
| ESE   | 1,73% | 13,88% | 1,07%  | 0,00% | 0,02% | 0,02% | 0,00%  | 16,72% |
| SE    | 0,51% | 29,41% | 30,79% | 2,38% | 0,33% | 0,09% | 0,00%  | 63,50% |
| SSE   | 0,04% | 0,89%  | 6,28%  | 3,19% | 1,17% | 0,25% | 0,00%  | 11,82% |
| S     | 0,00% | 0,12%  | 0,91%  | 1,30% | 2,91% | 2,00% | 0,04%  | 7,26%  |
| SSW   | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| SW    | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00%  | 0,00%  |
| Total | 2,84% | 44,44% | 39,05% | 6,86% | 4,43% | 2,35% | 0,04%  |        |

Fonte: o autor.

As rosas na Figura 6.18 mostram visualmente a predominância de ondas entre 1,0 m e 2,0 m de altura significativa e período de pico entre 6,0 s a 10,0 s durante a primavera.

Figura 6.18 - Rosa de distribuição das direções na altura significativa e no período de pico para os meses de primavera (outubro a dezembro) de toda a série de dados.



Fonte: o autor.

#### 6.2.4 Comparação entre os Climas de Ondas do Ondógrafo e do SMC

O objetivo deste capítulo é fazer uma análise comparativa do clima de ondas que é disponibilizado pelo pacote de software SMC-Brasil, com os dados que foram calculados para o ondógrafo UFPE01. Obviamente não se espera que as semelhanças entre ambos os climas de ondas a serem comparados neste capítulos seja perfeita, uma vez que ambos descrevem épocas diferentes, além do mais, toda simulação de ondas feita através de modelos deve-se sujeitar a calibragem com dados coletados *in situ*, para se obter resultados mais confiáveis. Esta comparação portanto é um resultado apenas teórico, não implicando na invalidação da ferramenta SMC-Brasil, contudo a comparação, ao obter sucesso na semelhança, irá reforçar a confiabilidade do uso do pacote SMC-Brasil como uma boa ferramenta na simulação das ondas na região, com a finalidade de se estudar a erosão costeira, como já discutido no capítulo 3.

No pacote SMC-Brasil, o clima de ondas na área oceânica próxima à costa de Pernambuco foi conhecido a partir do banco de dados incluído no pacote. O banco de dados de clima de ondas próximo à costa é calculado a partir dos dados de ondas da seguinte maneira:

Inicialmente foi gerado um banco de dados de ondas em águas profundas, conhecido como *Global Ocean Waves* (GOW), gerado a partir da reanálise de 60 anos de previsão de ondas, de 1948 até 2009, com uma malha de resolução  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  para a implementação da modelagem de ondas utilizando-se o modelo Wavewatch III (TOLMAN, 2009), ao longo da costa brasileira. Para a simulação das ondas utilizou-se os campos de vento da reanálise global NCEP/NCAR a 10 metros de altura, disponíveis em <http://www.ncdc.noaa.gov/data->

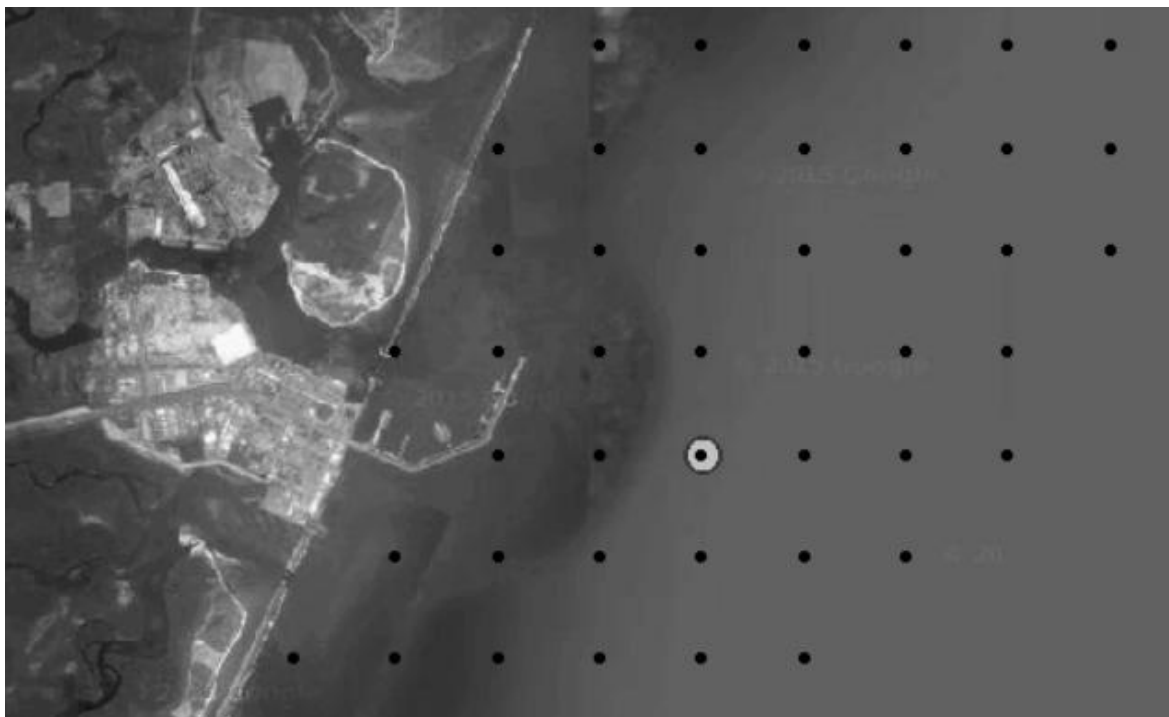
access/model-data/model-datasets/reanalysis. A resolução espacial dos dados de vento utilizados foi de  $1.9^\circ \times 1.9^\circ$  e a resolução temporal foi de 6 horas.

Após o cálculo da reanálise GOW, foi então realizado um *downscaling*, que trata-se uma propagação das ondas de um ponto de previsão oceânico, a grande profundidade, aonde não há influência do fundo no comportamento das ondas, para pontos de águas rasas aonde esta influência já é relevante. Para isso utiliza-se um modelo de ondas de águas rasas, que consegue computar satisfatoriamente os efeitos de fundo nas ondas, o modelo escolhido para esta propagação para águas rasas foi o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), este modelo foi desenvolvido pela *Delft University of Technology*, a mesma instituição que desenvolveu a primeira versão do modelo Wavewatch III. O modelo SWAN é baseado na equação da ação de onda que faz média na fase e não reconstrói a superfície do mar no espaço e tempo (BOOIJ; RIS; HOLTHUIJSEN, 1999), isto possibilita a propagação das ondas em todas as direções, além de permitir a aplicação deste modelo a superfícies extensas, por não necessitar de um número mínimo de pontos de cálculo por comprimento de onda. A terceira geração deste modelo incorporou fenômenos de águas rasas, como por exemplo as interações não lineares entre as ondas, refração, atrito com o fundo, *whitecapping* e empinamento. Por ser um modelo energético, ele consegue simular a geração das ondas pelo vento dentro de sua grade de propagação, ou seja, enquanto as ondas oceânicas são propagadas para o litoral, o vento atuante na área também é responsável por criar ou alimentar as vagas.

Para a realização do *downscaling*, foram desenhadas malhas com resolução de aproximadamente  $1\text{km} \times 1\text{km}$ , utilizando-se os mesmos dados de vento da reanálise GOW nesta propagação a pontos próximos à costa, gerando uma nova base de dados de pontos de previsão, chamados de pontos DOW (*Downscaling Ocean Waves*).

O ponto DOW escolhido para a fonte de energia de ondas foi o de latitude =  $-8,2^\circ$  e longitude =  $-34,9^\circ$ , com profundidade = 16,5 m (Figura 6.19).

Figura 6.19 - Pontos DOW de previsão de ondas próximas à costa, que fazem parte da base de dados do SMC-Brasil. O ponto em destaque foi escolhido para se extrair os dados do clima de ondas.

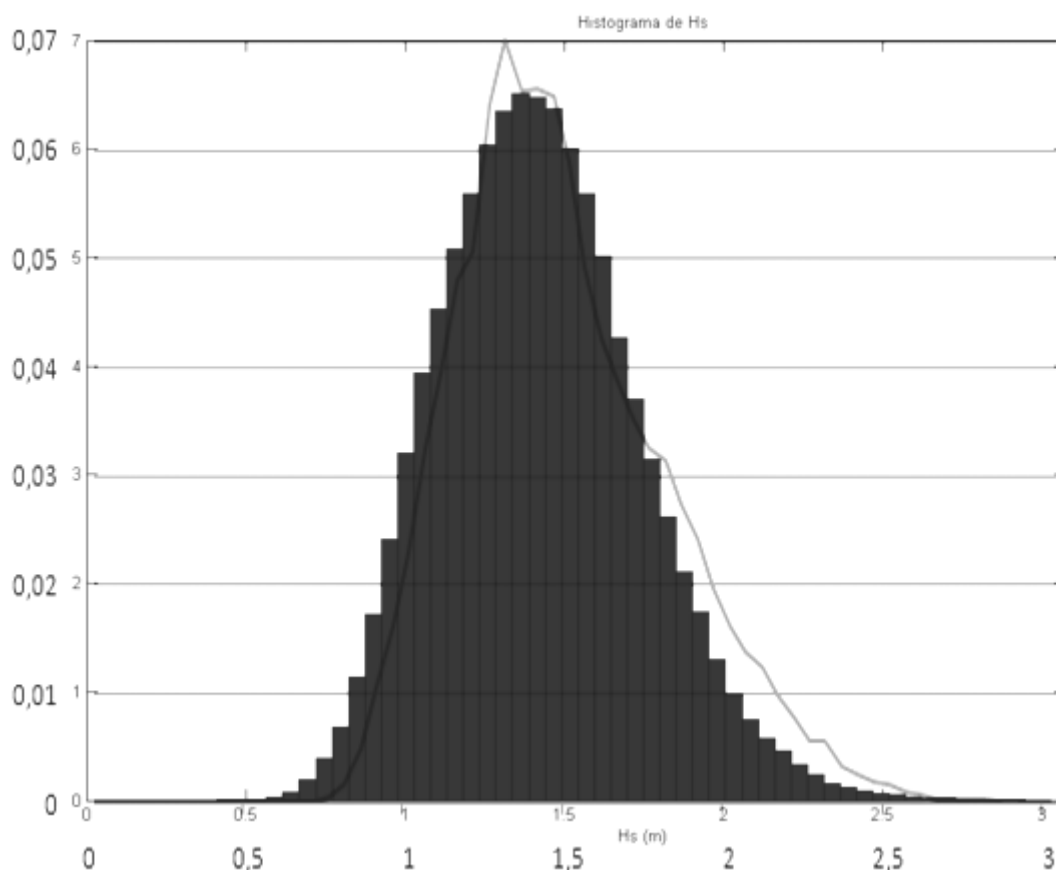


Fonte: SMC-Tools.

Ao ser escolhido o ponto DOW, o SMC-Tools então gera os dados de climatologia de ondas para o ponto escolhido, utilizando-se o módulo IH-AMEVA (ver item 3.2.1), estes dados então ficam disponíveis para o uso na descrição do clima de ondas local.

Na primeira comparação utilizou-se as FDP de altura significativa ( $H_s$ ) do ondógrafo superposta sobre a do SMC-Brasil (Figura 6.20). O formato de ambas as curvas é bem semelhante, registrando a moda em aproximadamente 1,3 m. Os dados do ondógrafo mostram uma maior densidade de ondas com mais de 1,8 m do que o SMC-Brasil, que registra uma maior densidade de ondas com menos de 1,4 m.

Figura 6.20 - Comparação do histograma de  $H_s$  do ondógrafo (linha cinza), com o histograma de  $H_s$  fornecido pelo SMC-Brasil, as imagens estão superpostas e os valores de cada escala coincidem.



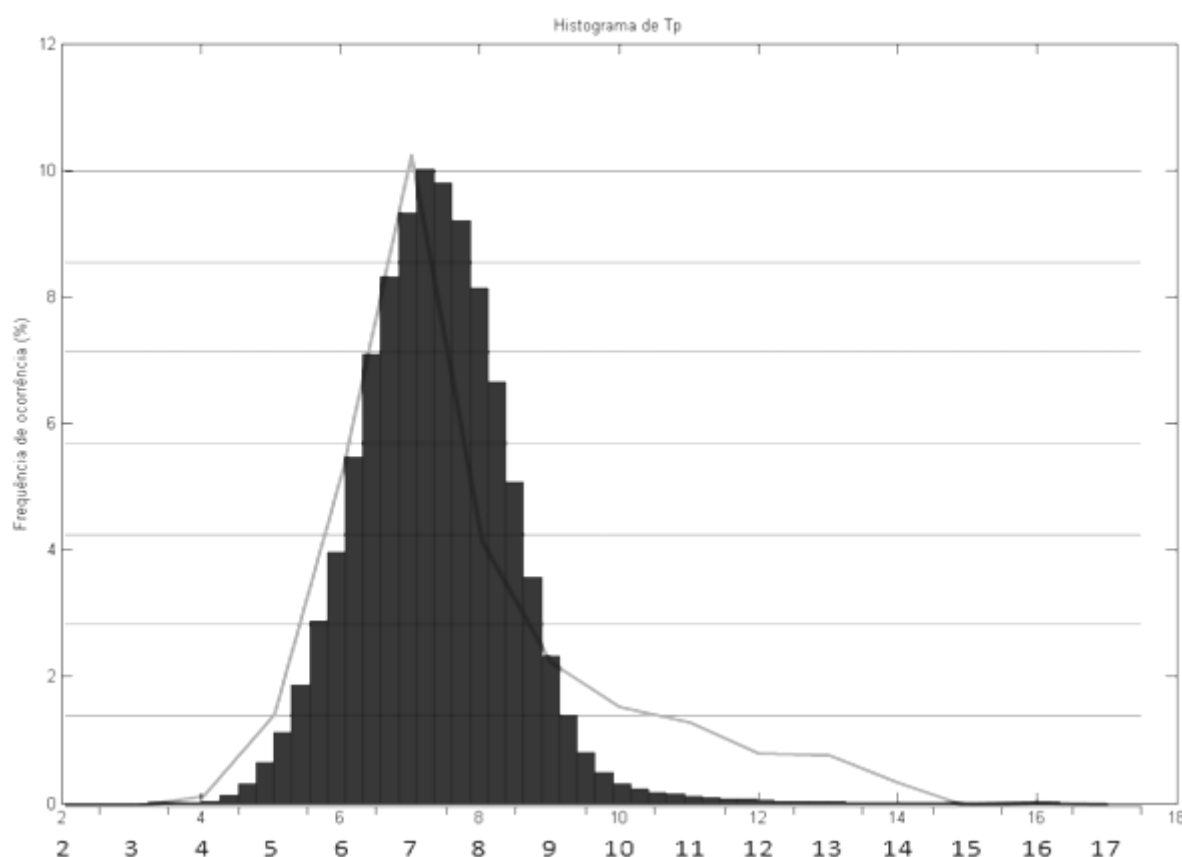
Fonte: o autor.

Comparando-se a FDP de período de pico ( $T_p$ ), registrada na Figura 6.21, observa-se uma boa semelhança entre as distribuições fornecidas pelo SMC-Brasil em relação às medidas pelo ondógrafo na faixa dos períodos menores do que 7,0 s. O ponto modal de ambas as curvas está bem próximo e fica em torno dos 7,0 s.

Para valores de períodos de pico superiores a 7,0 s começa a haver uma ligeira diferença entre as curvas, sendo que os dados do SMC-Brasil concentram as probabilidades próximas a este valor modal, correspondendo mais a uma curva de distribuição normal, com valores muito pequenos de probabilidade de ocorrência de ondas acima de 10,0 s. O registro das medições do ondógrafo possuem outra característica diferente, com uma queda muito

acentuada após o valor modal, mas tendendo uma queda suave a partir dos 9,0 s, registrando uma probabilidade razoável de ocorrência de ondas com períodos de pico entre 10,0 s a 14,0 s. Esta faixa corresponde exatamente a ocorrência de ondas de swell.

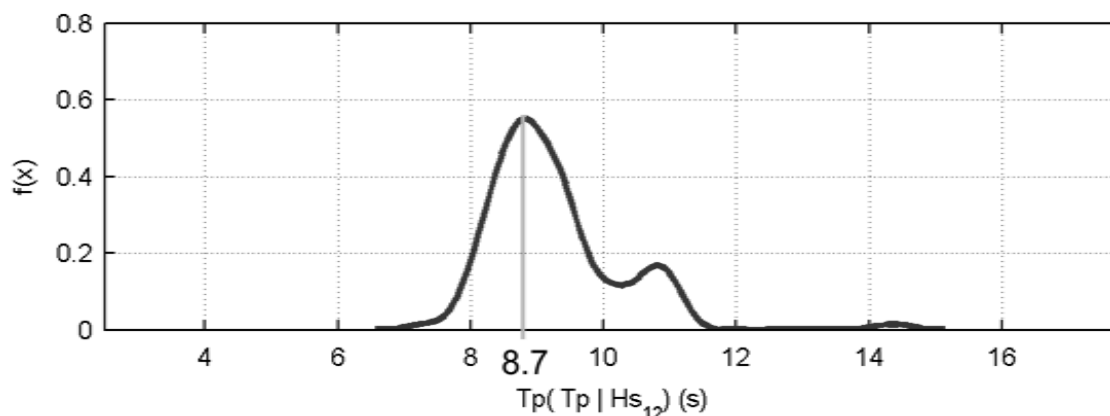
Figura 6.21 - Comparação do histograma de  $T_p$  do ondógrafo (linha cinza), com o histograma de  $T_p$  fornecido pelo SMC-Brasil (barras verticais).



Fonte: o autor.

Observando-se porém a FDP dos períodos de pico associados às maiores ondas que acontecem durante 12 horas por ano ( $H_{S12}$ ) (Figura 6.22), observa-se um pico secundário em torno dos 11 s, que corresponde aproximadamente à energia que aparece na FDP da medição da boia relativa aos sistemas de swell, sendo assim especula-se que os sistemas de swell somente ficaram visíveis no clima de ondas do SMC-Brasil para esta região quando tinham valores extremos, e que os *swells* com valores de altura significativa baixos não foram computados satisfatoriamente.

Figura 6.22 - Função de Densidade de Probabilidade dos períodos de pico associados ao HS12.

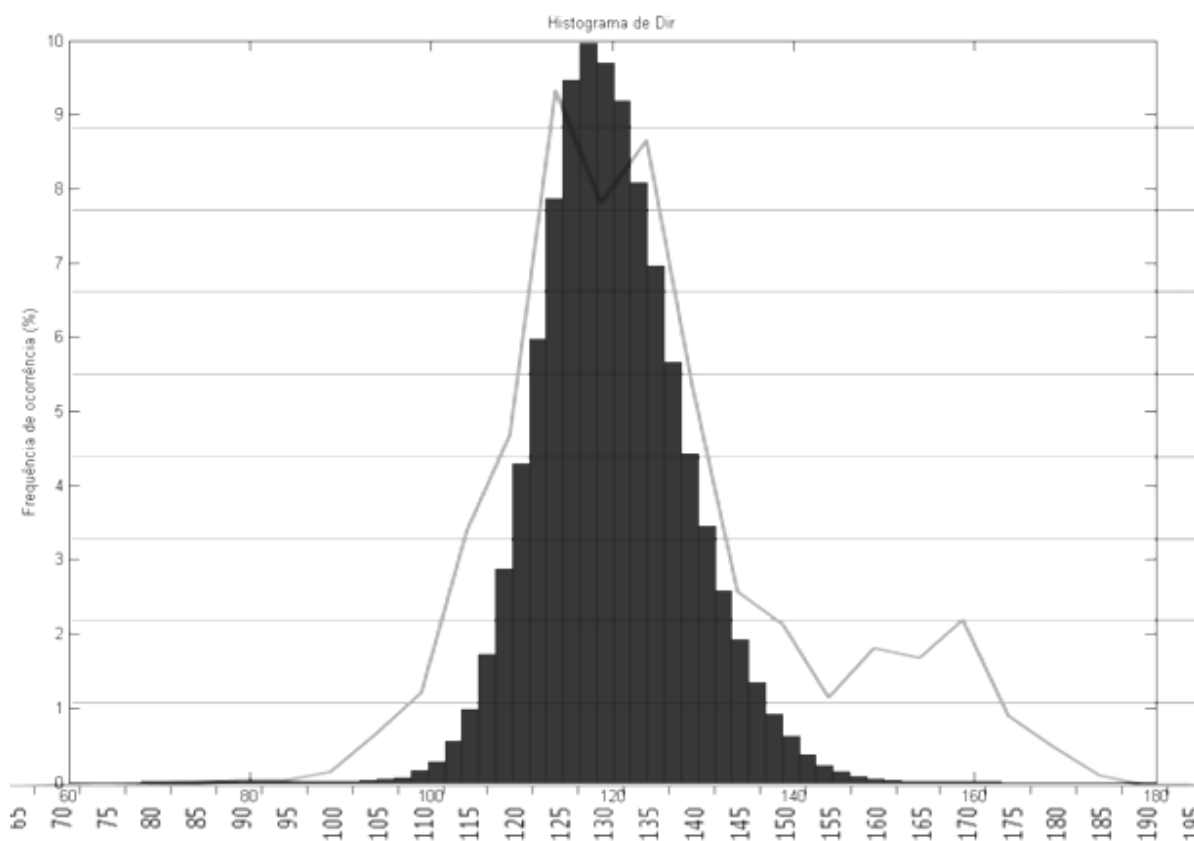


Fonte: SMC-Tools.

Comparando-se a FDP de direção de pico ( $D_p$ ), registrada na Figura 6.23, observa-se a maior diferença entre as distribuições fornecidas pelo SMC-Brasil em relação às medições do ondógrafo UFPE01. Observa-se o deslocamento da maior massa de dados para a direita das medições do ondógrafo em relação às fornecidas pela base de dados do SMC-Brasil.

Enquanto a curva do SMC-Brasil registra uma moda em torno dos  $120^\circ$ , o ondógrafo possui uma curva bi-modal com picos em  $125^\circ$  e  $140^\circ$ , ou seja um pico "médio" em torno dos  $133^\circ$ . Esta diferença não é tão significativa e pode denotar a necessidade de calibração na bússola do ondógrafo, com respeito ao norte magnético, etc. Assim a curva das medições do ondógrafo foi encaixada com um ligeiro deslocamento para a esquerda, para que o seu pico coincidisse com o pico da massa de dados do SMC-Brasil, o que as torna muito semelhantes, exceto por um terceiro ponto modal observado na massa de dados do ondógrafo próximo aos  $170^\circ$ .

Figura 6.23 - Comparação do histograma de Dp do ondógrafo (linha cinza), com o histograma de Dp fornecido pelo SMC-Brasil (barras verticais).



Fonte: o autor.

Este segundo pico de ocorrência de ondas corresponde exatamente aos sistemas de *swell*, como já foi exposto no capítulo 5, e foi observado na Figura 5.12. Assim, tanto ao se comparar as FDP de período de pico, quanto as FDP de direção de pico, observa-se que os sistemas de *swell* são subestimados na base de dados do SMC-Brasil, da forma como foram medidas pelo ondógrafo UFPE01. Como a calibração da reanálise na região foi feita utilizando-se apenas dados de escatometria por satélites (GONZALEZ, 2011d), e observando que nesta região há predominância de sistemas de vagas com ondas maiores que 1,0 m de altura, enquanto que os sistemas de *swell*, por outro lado, quando estão presentes possuem ondas na maioria das vezes em torno de 0,5 m de altura, e como a distinção entre estes dois diferentes tipos de ondas através da escatometria por satélite é complexa e nem sempre

satisfatória (CHEN *et al.*, 2002), estima-se que devido a este tipo de calibração utilizando-se apenas dados de escatometria foi o que levou a subestimação da presença dos sistemas de *swell* na climatologia fornecida pelo SMC-Brasil. Contudo, como os sistemas de *swell* correspondem a apenas 10% da ocorrência de ondas na região, a falta destes sistemas no estudo da erosão costeira é aceitável, porém não desprezível, e deve ser levada em consideração em estudos posteriores utilizando-se o pacote SMC-Brasil, fazendo a seleção de estados de mar que dêem mais ênfase aos sistemas de *swell*, ou seja, ondas com mais de 10 s de período e com direção de mais de 150°.

#### 6.2.5 Simulação do Clima de Ondas Extremo de Swell

Para se observar se a falta da representatividade de um sistema de *swell* com das características medidas pelo ondógrafo direcional UFPE01 na base de dados do SMC irá modificar significativamente os resultados das simulações, elaborou-se um caso de um clima de ondas extremo com as características típicas dos *swells*, medidas pelo ondógrafo direcional em Suape.

O clima de ondas entrando na borda externa da grade de simulação, sobre uma profundidade de 10,0 m, apresenta altura significativa de 1,0 m, período de pico de 12 s, e direção de Sul-Sudeste (158°). Outros parâmetros utilizados para se caracterizar o espectro TMA são: gama = 5,0 e dispersão = 5°, frequência máxima de 0,1 Hz (período de 10 s).

Este clima foi introduzido como um caso no sub-módulo Mopla do SMC, e a sua atuação foi simulada sobre a batimetria do cenário do quebra-mar atual, com uma maré alta de 2,4 m, e duração de 8h20.

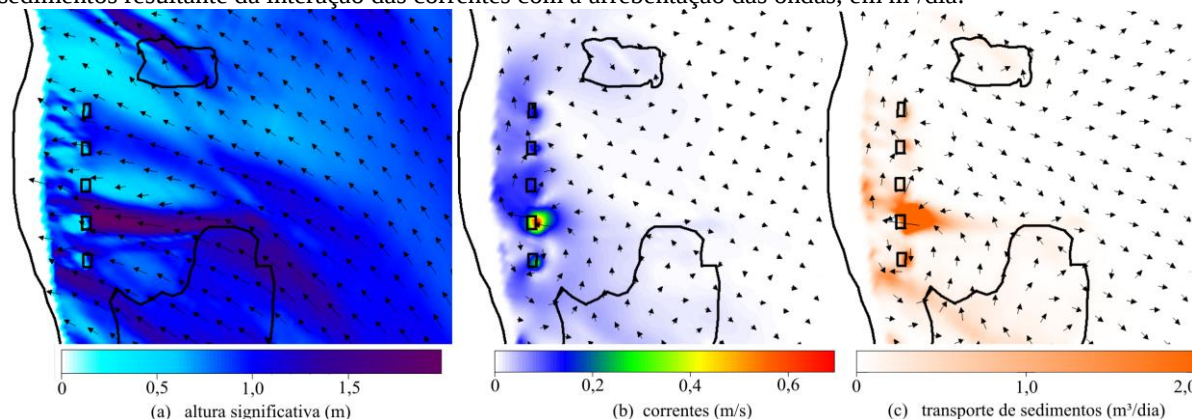
O resultado da simulação é apresentado na Figura 6.24. Observa-se que as ondas refratam em direção ao continente, sofrendo forte refração na borda norte do arrecife de

franja, o que é típico de ondas que possuem um período elevado. Ocorre uma concentração da energia neste ponto do arrecife, que então se propaga em direção a uma das seções remanescentes do quebra-mar antigo. Interessante notar que esta seção serve justamente de barreira para impedir que a maior parte da energia das ondas alcance a beira-mar, impondo forte perda da energia das ondas. O efeito resultante é o surgimento de fortes correntes na borda externa desta seção de quebra-mar, que juntamente com o efeito da arrebentação das ondas neste local, resulta em elevado transporte de sedimentos em direção à praia.

Observa-se também que uma fração da energia das ondas consegue passar entre seções adjacentes do quebra-mar e atingir a beira-mar, provocando correntes que divergem exatamente atrás da seção de quebra-mar que absorve a maior parte do impacto das ondas.

O resultado no transporte de sedimentos é divergente neste ponto, porém se contabilizado os sedimentos que se deslocam da área externa do quebra-mar em direção à beira-mar, como resultado do maior impacto da energia das ondas na seção do quebra-mar, como descrito acima, o balanço de sedimentos na beira-mar será insignificante. Portanto conclui-se que a atuação dos sistemas de swell medidos pelo ondógrafo UFPE01 em Suape, porém não observados na base de dados de reanálise do SMC, não irá provocar uma variação significativa dos resultados das simulações previamente realizadas com o SMC.

Figura 6.24 - Resultado da simulação de um clima de ondas de swell com altura de 1,0 m; período de 12 s e direção de 158°. (a) Altura Significativa em m; (b) Correntes geradas pelas ondas, em m/s; (c) transporte de sedimentos resultante da interação das correntes com a arrebentação das ondas, em m<sup>3</sup>/dia.



fonte: o autor

### 6.2.6 Discussão

Com base na distribuição espectral das ondas ao largo da costa sul do Estado de Pernambuco, medida pela boia direcional, um método de particionamento com ênfase nas características direcionais das partições foi desenvolvido. Este método, modificado a partir do Portilla et al. (2009), inclui um processo para separar a energia dos sistemas de vagas e de *swell* a partir das informações do vento local, procurando uma frequência de corte. Isso melhora a eficiência da identificação e da separação destes dois sistemas presentes na distribuição espectral da energia das ondas, e foi sistematicamente aplicado nas mais de 20.000 amostras disponíveis. Uma análise qualitativa destes resultados foi então realizada, comparando o único pico calculado pelo programa do fabricante, com um dos picos localizados pelo método de particionamento. Isto resultou na aceitação de mais de 70% dos resultados, os quais foram então utilizados para caracterizar o clima de ondas na região.

Tendo em conta que a boia estava fundeada numa região de transição entre águas rasas e profundas (17 m), os efeitos de profundidade, como a refração, empolamento e atrito com o fundo influenciaram as ondas, especialmente aqueles com frequências mais baixas

(VINCENT, C. L.; DEMIRBILEK; WEGGEL, 2002). Como o litoral sul de Pernambuco é ligeiramente inclinada para o sul (orientação NNE-SSW), um efeito de sombreamento para as ondas do quadrante norte é perceptível. Estas ondas de norte estão presentes na modelagem de ondas, principalmente durante o verão, devido à grande atividade de tempestades no Oceano Atlântico Norte (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010).

Através do método de particionamento descrito, o clima de ondas foi caracterizado na região de estudo. A maior parte da energia espectral das ondas foi medida como vindo do quadrante sudeste, o que é lógico, se considerarmos o regime prevalecente dos ventos alísios de sudeste na bacia do Atlântico tropical sul (BAPTISTA, 2003). Isto é semelhante ao que é previsto pelo modelo Wavewatch III (TOLMAN, 1989), utilizado nos 11 anos de reanálise elaborado por Pianca et al. (2010). Considerando que esta reanálise foi calculada para um ponto de previsão oceânica, localizada em águas profundas (4.600 m) a cerca de 150 km a leste-sudeste do local de fundeio do ondógrafo UFPE01, por isso não há efeito de fundo sobre esta reanálise. No entanto, a profundidade afetou as medições da boia, por isso pode-se supor que a plataforma continental, com cerca de 30 km de largura, teve grande influência sobre a refração das ondas oceânicas, redirecionando-as para o quadrante sudeste.

Entretanto, os dados medidos para a energia de swell (períodos de mais de 10 s) em grande parte coincidiram com a modelagem de Pianca et al. (2010), como provenientes principalmente do quadrante sul. As alturas significativas de águas profundas previstas por Pianca et al. (2010) eram mais elevadas ( $H_{Smax} = 4,3$  m e  $H_{Smed} = 2,2$  m) do que a medição da boia ( $H_{Smax} = 2,85$  m e  $H_{Smed} = 1,48$  m), com uma relação de proporção de cerca de 1,5 entre elas. Este resultado sugere uma perda de aproximadamente 33% de altura significativa deve-se principalmente ao atrito com o fundo.

No que diz respeito ao período de pico médio encontrado nas medições (8,8 s), este foi semelhante ao período de pico médio modelado por Pianca et al. (2010), que ficou na faixa entre 8,3 s e 8,9 s, este fato prova que existe a influência dos efeitos de fundo na altura e na direção das ondas, contudo não há influência no período (VINCENT, C. L.; DEMIRBILEK; WEGGEL, 2002).

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

#### **7.1 CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA A EROSÃO COSTEIRA EM JABOATÃO DOS GUARARAPES**

Os resultados das simulações numéricas para as diferentes configurações do quebra-mar responderam bem à dinâmica costeira observada na área de estudo (dinâmica de sedimentos, erosão costeira). Sendo assim, a ferramenta numérica utilizada neste estudo contribui para os estudos, visando minimizar os impactos da erosão costeira.

Este artigo valida a modelagem numérica apresentada para prever mudanças na morfologia da praia, como o resultado da modificação do antigo quebra-mar na praia de Candeias. Ele também demonstra o valor da modelagem costeira para prever as mudanças na morfologia da praia, como resultado do desenvolvimento costeiro planejado, e convida a futuras simulações através de modelagens, antes de realizar quaisquer outros desenvolvimentos.

O uso da ferramenta SMC-Brasil para o estudo da erosão costeira se revelou bastante interessante, sendo uma ferramenta fácil de ser utilizada, tendo os muitos recursos agrupados em um único pacote de software, tornando o processo de pesquisa, análise e teste de soluções fácil e rápido, fazendo com que a apresentação de uma alternativa para se combater a erosão costeira possa ser analisada com muita eficiência, possibilitando assim uma rápida prevenção à destruição causada pela erosão costeira.

O estudo da área da praia de Candeias com o pacote SMC-Brasil mostrou que a escolha da nova alternativa foi uma solução razoável, permitindo o retorno da circulação

costeira, que alimenta de areia as praias ao Norte, numa tentativa de evitar uma futura erosão nestas praias, além de permitir que a praia aonde o quebra-mar partido está instalado permaneça parcialmente protegida do impacto direto das ondas, uma vez que esta configuração do quebra-mar atua como um freio à energia das ondas (Figura 4.7) que, de outra forma, atingiriam esta praia praticamente com a força das ondas de águas profundas, já que o canal existente em frente ao quebra-mar permite a passagem das ondas vindas de águas profundas com pouca perda por atrito com o fundo.

## 7.2 CONCLUSÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE OS CLIMAS DE ONDAS

Um método de particionamento foi desenvolvido de forma a criar uma maneira rápida e sistemática para obter as partições direcionais das amostras de espectros de ondas medidos por uma boia localizado no Nordeste do Brasil. Este método teve acima de 70% de eficiência em comparação com um programa fornecido pelo fabricante. Os resultados do particionamento, que passou através do teste qualitativo, foi utilizado para caracterizar o clima de ondas na região.

O clima de ondas da região foi predominantemente caracterizado por vagas de sudeste, com períodos de pico de até 10 s, criadas pelos ventos alísios que sopram sobre o oceano Atlântico tropical sul. As ondas de quadrante sul, com períodos de pico acima de 10 s também estão presentes, criado principalmente por tempestades sobre o Oceano Atlântico sub-tropical e temperado.

Há uma boa similaridade encontrada na comparação entre os resultados do modelo de Wavewatch III, usando dados de ventos de modelo GFS do NOAA (Pianca et al., 2010), com os dados recolhidos pela boia UFPE01, localizada no Nordeste do Brasil (Estado de Pernambuco), tendo em conta os efeitos de profundidade que eram esperados na medição.

Esta semelhança entre modelagem e a medição reforça as conclusões sobre o clima de ondas na região descrita, e também valida o método de particionamento desenvolvido para este fim.

O clima de ondas no litoral de Pernambuco, descrito através das medições feitas com o ondógrafo direcional UFPE01, ao longo de três anos de funcionamento, obteve resultados basicamente parecidos com a modelagem de ondas feitas em trabalhos anteriores para esta região. As ondas predominantes são os sistemas de vagas, geradas pelos alísios que sopram continuamente sobre o oceano Atlântico tropical, porém também são registrados vários sistemas de *swell*, predominantemente vindos do quadrante Sul, e que se caracterizam por ter períodos de pico acima dos 10 s.

Estes sistemas de *swell* são mais evidentes nos meses de outono, devido a atividade de tempestades e frentes-frias no Atlântico Sul nesta época do ano, além do fato de os ventos alísios, que sopram nesta região, não estarem tão intensos como nos meses de inverno, formando assim sistemas de vagas menores, que portanto muitas vezes não conseguem mascarar a presença dos *swells*.

Os meses que possuem a maior atividade de agitação marítima correspondem aos meses de inverno, e os de menor agitação marítima são os meses do verão, isso devido respectivamente à maior e menor intensidade dos ventos alísios durante estes meses.

O clima de ondas para a região, obtido através dos dados de reanálise de ondas do pacote SMC-Brasil, em grande parte coincidiu com o clima de ondas produzido a partir das medições do ondógrafo direcional UFPE01, especialmente quando se analisou a distribuição das alturas de ondas. Observou-se porém a subestimação no clima de ondas do SMC-Brasil dos sistemas de *swell*, que praticamente não foram registrados nesta climatologia, exceto quando se observou a climatologia de ondas extremas. Pode-se supor que a ausência dos sistemas de *swell* na climatologia do SMC-Brasil foi provocada pela calibração dos dados de

reanálise, que baseou-se unicamente na escatometria por satélite, e que neste tipo de medição de ondas há uma dificuldade na detecção de sistemas de *swell* com pouca altura, quando na presença de sistemas de vagas que predominam.

O resultado da climatologia de ondas desenvolvida para este trabalho pode ajudar numa futura calibração dos dados reanálise de previsão de ondas a ser aplicado em novas versões da base de dados do SMC-Brasil, bem como em outros trabalhos que porventura necessitem de uma climatologia de ondas desta região.

Para futuros trabalhos deverão ser feitas análises mais detalhadas da climatologia de ondas obtida a partir dos dados do ondógrafo UFPE01, considerando por exemplo uma comparação mensal, para se obter uma diferença estatística significativa entre agitação marítima de cada mês, ao invés de considerar apenas as estações do ano padrão, como foi feito neste trabalho, de forma a caracterizar regionalmente o clima de ondas. Outros estudos, como a altura máxima das ondas, bem como o período de retorno também serão considerados.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, G. O.; LINS, R. C. **Os Climas do Nordeste**. In: SOBRINHO, J. V. (Org.). *As regiões naturais do Nordeste, o meio e a civilização*. Recife, PE: Conselho do Desenvolvimento de Pernambuco, 1971. p. 95–138.
- BAPTISTA, M. C. **Uma análise do campo de vento de superfície sobre o oceano atlântico tropical e sul usando dados do escaterômetro do ers**. 2003. 131 f. INPE, 2003.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. **Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul**. 2008, [S.l.]: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2008. p. 612–619.
- BERKHOFF, J. C. W. **Computation of combined refraction-diffraction**. 1972, Vancouver: ASCE, 1972. p. 471–490.
- BEZERRA, C. S. **Clima de Ondas e Correntes no Litoral de Boa Viagem ( Recife – Pe ): Aplicação do Sistema de Radar Náutico de Clima de Ondas e Correntes no Litoral de Boa Viagem ( Recife – Pe ): Aplicação do Sistema de Radar Náutico de Banda-X**. 2013. UFPE, 2013.
- BOOIJ, N. **Gravity waves on water with non-uniform depth and current**. *Report nº 81-1*. [S.l: s.n.], 1981.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. **A third-generation wave model for coastal regions. I- Model description and validation**. *Journal of geophysical research*, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 1999.
- BORBA, A. L. S.; MANSO, V. DO A. V. **Estudos sedimentológicos, morfodinâmicos e da vulnerabilidade das praias da Piedade, Candeias e Barra das Jangadas - Municípios do Jaboatão do Guararapes**. 1999. UFPE, 1999.
- BOUWS, E. *et al.* **Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water**. *Journal of Geophysical Research*, 1985.
- CAMUS, P. *et al.* **Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate**. *Coastal Engineering*, 2011.
- CHEN, G. *et al.* **A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer**. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, n. 11, p. 1849–1859, 2002.
- CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5**. Disponível em: <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/index.html>>.
- COSTA, M. B. S. F. **Influência da estrutura recifal na transformação das ondas do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes / PE - Brasil**. 2010. Universidade Federal de Pernambuco, 2010.
- COSTA, M. B. S. F.; MALLMANN, D. L. B. **Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil**. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v. 5, n. 2, p. 341–349, 2010.
- CRAIK, A. D. D. **the Origins of Water Wave Theory**. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 36, n. 1, p. 1–28, 2004.
- DALLY, W. R.; DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Wave height variation across beaches**

**of arbitrary profile.** *Journal of Geophysical Research*, 1985.

DALRYMPLE, R.; KIRBY, J.; HWANG, P. **Wave Diffraction Due to Areas of Energy Dissipation.** *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 110, n. 1, p. 67–79, 1984.

DANIELE HAUSER, KIMMO K. KAHMA, HARALD E. KROGSTAD, SUSANNE LEHNER, J. M. AND L. R. W. (Org.). **Measuring and Analysing the Directional Spectrum of Ocean Waves.** Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005.

DNH. **PREVISÕES DE MARÉS (Máximas e Mínimas diárias).** Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>>. Acesso em: 1 jul. 2015.

EDWARDS, B. L.; NAMIKAS, S. L. **Changes in Shoreline Change Trends in Response to a Detached Breakwater Field at Grand Isle, Louisiana.** *Journal of Coastal Research*, v. 27, n. 4, p. 698–705, 2011.

FENG, X. *et al.* **Wave height analysis from 10 years of observations in the Norwegian Sea.** *Continental Shelf Research*, v. 72, p. 47–56, 2014.

FINEP/UFPE. **Monitoramento ambiental integrado (MAI-PE).** . Recife, PE: [s.n.], 2009.

FLÓREZ-ORREGO, D. A. **Euações de Navier-Stokes.** . São Paulo: Universidade de São Paulo. , 2012

FRANCO, D.; FILHO, E. M. **Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina , SC.** . Florianópolis: [s.n.], 2005

GONZALEZ, M. E. **Copla - MC/SP - Modelo de Correntes em Quebra de Praias.** . Santander, ES: IH - Cantábria. , 2011a

GONZALEZ, M. E. **EROS - Modelo de Erosão/Sedimentação.** . Santander, ES: IH - Cantábria. , 2011b

GONZALEZ, M. E. **Oluca - SP - Modelo de propagação de onda espectral.** . Santander, ES: IH - Cantábria. , 2011c

GONZALEZ, M. E. **Sistema de Modelado Costero Manual do Usuário Smc-Brasil.** . [S.l: s.n.], 2011d

GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

GUERRA, N. C. **Mapeamento do Quaternário costeiro ao sul Recife – Pernambuco (Área 4 – Porto de Galinhas e Guadalupe).** 1991. Universidade Federal de Pernambuco, 1991.

HASSELMANN, K. *et al.* **Measurements of Wind - Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).** Hamburg: DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT, 1973. v. 46.

HAYES, M. O. **Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime.** In: LEATHERMAN, S. P. (Org.). . *Barrier Islands, from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico.* New York: Academia Press, 1979. p. 1–27.

HOUNSOU-GBO, G. A. *et al.* **Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability Along the Northeast Brazilian Coast.** *Advances in Meteorology*, v. 2015, 2015.

IBGE. **Jaboatão dos Guararapes.** Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=260790&search=pernambuco|jaboatão-dos-guararapes>>. Acesso em: 1 out. 2015.

INNOCENTINI, V. *et al.* **a Agitação Marítima No Litoral Nordeste Do Brasil Associada Aos Distúrbios Africanos De Leste.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, p. 367–374, 2005.

KEMPF, M. **A Plataforma Continental de Pernambuco.** . Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco. , 1969

KENCH, P. S.; BRANDER, R. W. **Wave Processes on Coral Reef Flats: Implications for Reef Geomorphology Using Australian Case Studies.** *Journal of Coastal Research*, v. 22, n. 1, p. 209–223, 2006.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. **Modeling waves in surfzones and around islands.** *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 112, n. 1, p. 78–93, 1986.

KOEPPEN, W. **limatología: Con un estudio de los climas de la Tierra.** [S.l: s.n.], 1948.

LAING, A. K. *et al.* **Guide to Wave Analysis.** 2nd. ed. Geneva: World Meteorological Organization, 1998. v. 1998.

LIONELLO, P.; GÜNTHER, H.; HANSEN, B. **A sequential assimilation scheme applied to global wave analysis and prediction.** *Journal of Marine Systems*, v. 6, n. 1-2, p. 87–107, 1995.

LONGUET-HIGGINS, M. S. **Longshore currents generated by obliquely incident sea waves.** *Journal of Geophysical Research*, 1970.

LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W. **Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications.** *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 11, n. 4, p. 529–562, 1964.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. **Coral reefs of Brazil: an overview.** 1997, Panama: [s.n.], 1997. p. 263–274.

MANSO, V. DO A. V. *et al.* **Pernambuco.** In: DIETER MUEHE (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. 2. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2006. p. 179–196.

MANSO, V. DO A. V.; CORREA, I.; GUERRA, N. C. **Morfologia e sedimentologia da Plataforma Continental Interna entre as Praias Porto de Galinhas e Campos-Litoral Sul de Pernambuco, Brasil.** *Pesquisas em Geociências*, v. 30, n. 2, p. 17–25, 2003.

MARRONI, E. V.; ASMUS, M. L. **Gerenciamento Costeiro: uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental.** Pelotas, RS: USEB, 2005.

MORAIS, J. O. DE *et al.* **Erosão e progradação do litoral brasileiro.** Brasília, DF: MMA, 2006.

MUEHE, D. **Definição de Limites e Tipologias da Orla Sob os Aspectos Morfodinâmicos e Evolutivo.** *Subsídios para um Projeto de Gestão/Brasília*. Brasília, DF: MMA e MPO,

2004. .

NAKICENOVIC, N. *et al.* **Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [S.l.]: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

NEVES, C. F.; MUEHE, D. **Potential Impacts of Sea-Level Rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil.** *Journal of Coastal Research*, n. SPECIAL ISSUE NO. 14, p. 116–131, 1995.

O'REILLY, W. **Comparison of spectral refraction and refraction-diffraction wave models.** *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 117, n. 3, p. 199–215, 1991.

OTSUKA, A. Y. *et al.* **Dynamics of Chlorophyll a and Oceanographic Parameters in the Coastal Zone : Barra das Jangadas-Pernambuco , Brazil.** *Journal of Coastal Research*, n. December, p. 1–11, 2015.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. **Extreme Storm Surges in the South of Brazil : Atmospheric Conditions and.** *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 57, n. 3, p. 1–23, 2009.

PHILLIPS, O. M. **The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves.** *Journal of Fluid Mechanics*, v. 4, p. 426 – 434, 1958.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. **Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis.** *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, n. 1, p. 53–70, 2010.

PIERSON, W. J.; MOSKOWITZ, L. **A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii.** *Journal of Geophysical Research*, n. 69, p. 5181–5190, 1964.

PORTILLA, J.; OCAMPO-TORRES, F. J.; MONBALIU, J. **Spectral partitioning and identification of wind sea and swell.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 26, n. 1, p. 107–122, 2009.

QUINAMO, L. DE A. **Caracterização sedimentológica e aspectos geoambientais das praias do litoral sul de Pernambuco.** 2013. 2013.

RADDER, A. C. **On the parabolic equation method for water-wave propagation.** *Journal of Fluid Mechanics*, v. 95, n. 01, p. 159, 1979.

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

RESIO, D.; BRATOS, S.; THOMPSON, E. **Deep Water Waves.** In: VINCENT, L.; DEMIRBILEK, Z. (Org.). . *Coastal Engineering Manual - Part II.* Washington, D.C.: U.S. Army Corps. of Engineers, 2003. .

ROBERTS, H. H.; MURRAY, S. P.; SUHAYDA, J. M. **Physical processes in a fringing reef system.** *Journal of Marine Research*, 1975.

RODRÍGUEZ, G. R.; GUEDES SOARES, C. **A criterion for the automatic identification of multimodal sea wave spectra.** *Applied Ocean Research*, v. 21, n. 6, p. 329–333, 1999.

RODRÍGUEZ, G. R.; GUEDES SOARES, C.; MACHADO, U. **Uncertainty of the sea state parameters resulting from the methods of spectral estimation.** *Ocean Engineering*, v. 26, n. 10, p. 991–1002, 1999.

ROLLNIC, M. **Dinâmica das ondas e circulação no litoral da região metropolitana do Recife: implicações para o transporte de sedimentos e estabilidade da costa.** 2008. 124 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

SALLENGER, A. H.; HOLMAN, R. A. **Wave energy saturation on a natural beach of variable slope.** *Journal of Geophysical Research*, 1985.

SEMEDO, A. *et al.* **A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40.** *Journal of Climate*, v. 24, n. 5, p. 1461–1479, 2011.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. **The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model.** *Ocean Modelling*, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

SMITH, J. M. **Surf Zone Hydrodynamics.** In: VINCENT, L.; DEMIRBILEK, Z. (Org.). *Coastal Engineering Manual - Part II.* Washington, D.C.: U.S. Army Corps. of Engineers, 2003. .

SOARES JR., C. F. DE A. **Influência das ondas e das características geomorfológicas no zoneamento territorial costeiro entre Porto de Galinhas e Rio Formoso, litoral sul de Pernambuco-Brasil.** 2014. 144 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

SVERDRUP, H. U.; MUNK, W. H. **Wind, Sea, and Swell. Theory of Relations For Forecasting.** Washington, D.C.: United States Navy Department - Hydrographic Office, 1947.

THORTON, E.B.; GUZA, R. T. **Surf Zone Longshore Currents and Radmon Waves: Field Data Models.** *Journal of Physical Oceanography*, p. 1165–1178, 1986.

TOLMAN, H. L. **The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas.** *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, n. Rep. no. 89-2, p. 72, 1989.

TOLMAN, H. L. **User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 3.14.** . Camp Springs, MD: National Oceanic and Atmospheric Administration. , 2009

VIDAL, C.; LOSADA, M. A; MEDINA, R. **Modelos de morfodinámica de playas.** *Ingeniería del Agua*, v. 2, n. Abril, p. 55–74, 1995.

VINCENT, C. L.; DEMIRBILEK, Z.; WEGGEL, R. **Estimation of Nearshore Waves.** In: VINCENT, L.; DEMIRBILEK, Z. (Org.). *Coastal Engineering Manual- Part II.* Washington, D.C.: U.S. Army Corps. of Engineers, 2002. p. II-3–1, II-3–41.

WANG, D. W.; HWANG, P. A. **An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 18, n. 12, p. 2052–2062, 2001.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; PARK, D. **Waves, Tides and Shallow Water Processes.** 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.