



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA



CRISTIANE SANTOS BEZERRA

**CLIMA DE ONDAS E CORRENTES NO LITORAL DE BOA VIAGEM
(RECIFE – PE): APLICAÇÃO DO SISTEMA DE RADAR NÁUTICO DE
BANDA-X**

RECIFE

2013

CRISTIANE SANTOS BEZERRA

CLIMA DE ONDAS E CORRENTES NO LITORAL DE BOA VIAGEM
(RECIFE – PE): APLICAÇÃO DO SISTEMA DE RADAR NÁUTICO DE
BANDA-X

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientador: Dr. Alex Costa da Silva

Coorientador: Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho

RECIFE

2013

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

- B574c Bezerra, Cristiane Santos.
Clima de ondas e Correntes no Litoral de Boa Viagem (Recife – Pe):
aplicação do Sistema Radar Náutico de Banda-X. / Cristiane Santos
Bezerra. – Recife: O Autor, 2013.
98f., il., figs., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Alex Costa da Silva.
Co-Orientador: Prof. Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2012.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Oceanografia. 2. *Wind Sea*. 3. *Swell*. 4. Radar. 5. *WaMoS II*. 6.
Litoral de Boa Viagem (Recife-PE). I. Silva, Alex Costa da Silva
(Orientador). II. Araújo Filho, Moacyr Cunha de (Co-Orientador). III.
Título.

551.46 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2013 / 064

CRISTIANE SANTOS BEZERRA

CLIMA DE ONDAS E CORRENTES NO LITORAL DE BOA VIAGEM
(RECIFE – PE): APLICAÇÃO DO SISTEMA DE RADAR NÁUTICO DE
BANDA-X

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Aprovada em: 28 de Fevereiro de 2013.

BANCA EXAMINADORA

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

Dra. Carmen Medeiros Limongi (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr. Valdir do Amaral Vaz Manso (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Suplentes:

Dr. Roberto Lima Barcellos (Examinador Interno)
Dra. Dóris Regina Aires Veleda (Examinador Externo)

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida,

Aos meus pais,

Waldemir Bezerra e Waldely Bezerra.

Por me concederem um amor incondicional,

Por me motivarem a dar cada novo passo...

Meus exemplos de vida.

Minha essência!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor e Autor da minha vida, por me fortalecer a cada dia, não somente nesta nova etapa pela qual estou passando, mas ao longo de toda minha vida. Esta foi mais etapa de lutas, grandes descobertas e certamente de grandes vitórias que Deus está entregando em minhas mãos.

Agradeço imensamente aos meus pais, Waldemir Bezerra e Waldely Bezerra, por todo carinho, dedicação, amor e apoio que tive no decorrer de toda minha vida, desde os primeiros passos até a minha jornada de oceanografia, me incentivando grandemente a ir em busca dos meus sonhos, e sonhando-os junto comigo. À minha irmã e amiga, Deisiany Bezerra, por tanto amor, companheirismo e momentos únicos que vivemos juntas (apesar de longe), e olhares de entendimento que somente nós duas conseguimos explicar. Ao meu irmão, Waldemir Bezerra, e todos os meus tios e tias, que me dão todo suporte, amor e momentos de grande alegria. De todo meu coração, agradeço a essa minha família maravilhosa, que me acompanha em cada passo que dou, e vibra comigo cada vitória alcançada!

Agradeço ao Rafael Thompson, meu namorado, companheiro e amigo, que está sempre ao meu lado; com quem divido minhas emoções, minhas alegrias e tristezas; me ajudando a ultrapassar os momentos difíceis, me dando suporte em tudo que preciso e sempre me incentivando a alcançar meus objetivos. Obrigada também por ter me ajudado imensamente nas análises estatísticas desta dissertação, sem sua ajuda jamais teria conseguido!

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Alex Silva, por me direcionar durante estes dois anos; por toda dedicação e esforço em me auxiliar, me ajudando a ultrapassar todas as barreiras que surgiram no decorrer do Mestrado; e por nunca ter deixado de me ajudar e de dar o suporte necessário para a execução deste trabalho. Agradeço também por ter me dado a oportunidade de participar de um Embarque, o qual, sem dúvida, foi de extrema importância para mim.

Ao Moacyr Araújo, que me confiou os dados (tão queridos) gerados pelo radar.

À Dra. Ketrin Hessner que me auxiliou grandemente nas minhas inúmeras tentativas de entender o radar, sendo uma peça de extrema importância para esta dissertação!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa.

Agradeço muito à Flávia Lucena e Thierry Frédou por terem nos recebido (Rafael e eu) gentilmente em sua casa; por terem nos dado um suporte essencial na fase inicial, de

chegada à Recife, e até os dias de hoje, suprindo um pouco a saudade da família que está distante. Obrigada por serem minha família próxima e querida nestes dois anos.

À amiga Thaís Castelo Branco, com quem tive o prazer de conviver esses dois anos. Obrigada pelas conversas, risadas e companheirismo. Foi uma experiência única.

Aos meus amigos do laboratório de oceanografia física (LOFEC), em especial à Patrícia Façanha, que além de ter me recebido super bem no laboratório, teve a paciência de me ensinar a dar os primeiros passos na programação computacional (fase super importante para o desenvolvimento desta dissertação); e à Laila Fazekas, que me ajudou muito no tratamento dos dados; ao Antonio Neto e Gabriela Padilha pelos momentos de descontração e tensão que passamos juntos.

Aos meus amigos do laboratório ORGANOMAR, Daniele Maciel, Daniele Miranda, Nykon e Bruno, pela amizade, apoio e pelos momentos de descontração; por me terem me adotado como membro deste laboratório.

Aos meus amigos, Lúcio Flávio, Isaac Salém e Yúri Friaes, que me acompanharam, mesmo distante, nesta jornada, torcendo por mim e me incentivando a vencer mais esta etapa. E à todos os amigos da querida família Oceanografia 2007, que também estão passando e vencendo mais esta importante fase de nossas vidas profissionais.

Aos professores e funcionários do Departamento de Oceanografia com os quais tive a oportunidade de conviver: Manuel Flores, Carmen Medeiros, Pedro Pereira, Marcus Silva, Tereza Araújo, Eliete Zanardi, Gilvan Yogui, Fernando Feitosa e Myrna Lins.

E aos professores que aceitaram a participar da minha banca de defesa, Carmen Medeiros, Valdir Manso, Roberto Barcellos e Dóris Veleda. Por dedicarem um pouco do tempo tão corrido de vocês, com o intuito de contribuir para o melhoramento deste trabalho.

Agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos vocês meus sinceros agradecimentos.

ORAÇÃO DOS NAVEGANTES

“ Senhor, que em vossa vida manifestastes predileção pelo mar;
que escolhestes como apóstolos pescadores
que retiravam o pão de cada dia das águas do mar;
que caminhastes sobre as ondas, que aplacastes,
com gestos soberano, a tempestade do mar;
que da barca de Pedro ensinastes às multidões;
que ordenastes pescas milagrosas;
que aparecestes ressuscitado aos discípulos que estavam no mar;
fazei-nos aprender a lição das ondas;
que cada um de nossos recuos seja um esforço para nosso avanço.
Na hora da tempestade dai-nos fé em vosso poder sobre as ondas
e os ventos, e mostrai-nos que convosco não há naufrágio.
Sois o senhor dos mares e dos ventos, da terra e das estrelas.
Sois o farol, a luz que jamais se apaga.
Fazei-nos ver o rumo certo em nossa vida.
Conduza nossa mão presa ao leme, para que cheguemos
ao porto de infinita paz e de infinita alegria,
que preparastes para o fim de nossa longa viagem.
Amém”

Esta oração é de origem desconhecida e está exposta no Farol da Barra
Museu Náutico da Bahia, em Salvador.

RESUMO

As ondas e correntes representam a mais constante forma de transporte de energia no mar, fornecendo energia para uma vasta gama de processos litorâneos os quais exercem papel preponderante na morfologia da linha de costa e, por conseguinte na determinação das feições litorâneas. Além disso, representam ameaça às construções costeiras, às atividades de lazer e às operações navais. Diante deste cenário a presente dissertação de mestrado pretende contribuir através da análise temporal e espacial das ondas *wind sea* e *swell*, assim como das correntes atuantes no litoral de Boa Viagem (Recife – PE), a partir de dados de parâmetros físicos de ondas (altura máxima – H_{max} , altura significativa – H_s , Período de pico – T_p , e direção média – $\bar{\theta}$) e correntes (direção e intensidade), os quais foram obtidos a partir de imagens polares de radar náutico de banda-X, gerados a partir de um sistema denominado *Wave and Surface Current Monitoring System - WaMoS II*. O radar esteve em funcionamento entre o mês de abril de 2010 a abril de 2011. A partir das análises realizadas foi possível observar a ocorrência conjunta de ondas do tipo *wind sea* e *swell* no litoral de Boa Viagem, sendo que esta última foi bastante expressiva nos meses de junho e outubro de 2010, além dos meses entre dezembro de 2010 a março de 2011, sendo provenientes em sua maioria de leste. As ondas *wind sea* apresentaram uma altura significativa predominante entre 1 e 2 m, sendo provenientes de leste-sudeste. Além disso, foi possível observar uma variação na direção e diminuição na altura das ondas ao longo da plataforma interna de Boa Viagem, causadas pela variação na batimetria e pela presença de recifes de arenito. Para as correntes não se observou diferença na direção das mesmas nas duas áreas de análise, porém no que se refere a intensidade, esta foi maior na área mais afastada da costa (área 3) do que na área sobre o canal (área 1). De uma forma geral, neste trabalho foi possível identificar as características predominantes, em cada mês ao longo de todo período estudado, das ondas *wind sea*, as quais estão sempre presente no litoral de Boa Viagem, bem como as características de *swell* identificando seu período de maior atuação neste litoral; foi possível verificar como as características das ondas estão se alterando conforme se aproximam da costa; e também observar o padrão das correntes atuantes no litoral; e a altura máxima das ondas que incidem sobre a região. E diante de comparações com boia e modelo, foi possível comprovar a eficiência da medição de ondas a partir de radar e do sistema *WaMoS II* para o litoral de Boa Viagem (Recife – PE).

Palavras-chave: *Wind sea; Swell; Radar; WaMoS II.*

ABSTRACT

The waves and currents represent the most constant way of energy transport at sea, providing power for a wide range of coastal processes which exert major role in the morphology of the coastline and therefore in the determination of coastal features. Additionally, pose a threat to coastal construction, leisure activities and naval operations. Against this background, the present Master dissertation aims to contribute through of the temporal and spatial analysis of *wind sea* and *swell* as well as the current operating at coast of Boa Viagem (Recife - PE), from data of physical parameters of waves (maximum height - H_{max} , significant height - H_s , peak period - T_p , and direction - $\bar{\theta}$) and currents (direction and intensity), which were obtained from images polar of X-band nautical radar - generated from a system called *Wave and Surface Current Monitoring System - WaMoS II*. The radar was in operation between April 2010 and April 2011. From the analyzes, it was possible to observe the joint occurrence of waves *wind sea* and *swell* on the coast of Boa Viagem, and the latter was significant on June 2010 and October 2010, and the months between December 2010 and March 2011, being mostly coming from the east. The *wind sea* waves showed a significant height predominant between 1 and 2 m, and from east-southeast. Moreover, we observed a change in direction of the waves and decrease in wave heights along the inner shelf of Boa Viagem, caused by variation in bathymetry and the presence of beachrocks. For the currents no difference was observed in the direction of them in the two analyses areas, but about the intensity, it was greater in this area to more offshore (area 3) than over the channel area (area 1). Generally, in this work it was possible to identify the predominant features, every month throughout the study period, of the wind sea waves, which are always present in coastal Boa Viagem, as well as the characteristics of swell identifying its period of greater performance this coast; it was possible to check how the characteristics of the waves are changing as they approach the coast; and also observe the pattern of currents acting on the coast; and the maximum height of waves that affect the region. And after comparisons with boy and model it was possible to prove the efficiency of the measurement of waves from radar and system *WaMoS II* to the coast of Boa Viagem (Recife – PE).

Keywords: *Wind sea; Swell; Radar; WaMoS II.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil topobatimétrico adjacente à praia de Boa Viagem. Fonte: FINEP/UFPE (2009)	23
Figura 2: Localização do ponto de instalação da antena do radar e sistema <i>WaMoS II</i> , mostrando a imagem polar referente a área de abrangência do radar.....	24
Figura 3: Esquema das três subáreas (Área 1, Área 2 e Área 3) selecionadas para análise de dados, indicando a distância em que estão da antena, sobre a batimetria da região. Fonte da batimetria: FINEP/UFPE, 2009.....	25
Figura 4: Esquema das etapas de funcionamento do radar e sistema <i>WaMoS II</i> , desde a aquisição das imagens polares à saída de dados de onda.....	29
Figura 5: Ondógrafo direcional S4ADWI.....	30
Figura 6: Gráfico de máxima diária (vermelho) e de média diária de velocidade (verde) para o período estudado.....	34
Figura 7: Gráficos direcionais de médias diárias de velocidade do vento para os meses de abril a dezembro de 2010.....	35
Figura 8: Gráficos direcionais de velocidade média de vento para os meses de janeiro a abril de 2011.....	36
Figura 9: Gráfico de altura máxima de onda do mês de abril (a), maio (b), junho (c), julho (d), agosto (e), setembro (f) outubro (g), novembro (h) e dezembro (i) de 2010.....	38
Figura 10: Gráfico de altura máxima de onda do mês de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) de 2011.....	39
Figura 11: Variação anual da altura significativa (H_s) das ondas <i>wind sea</i>	42
Figura 12: Variação anual do período de pico (T_p) das ondas <i>wind sea</i>	43
Figura 13: Variação anual da direção (Dir) das ondas <i>wind sea</i>	43
Figura 14: Variação anual da altura significativa (H_s) das ondas <i>swell</i>	46
Figura 15: Variação anual do período de pico (T_p) das ondas <i>swell</i>	47
Figura 16: Variação anual da direção (Dir) das ondas <i>swell</i>	47
Figura 17: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de abril de 2010.....	49
Figura 18: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de maio de 2010.....	49
Figura 19: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de junho de 2010.....	50

Figura 20: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de julho de 2010.....	51
Figura 21: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de agosto de 2010.....	51
Figura 22: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de setembro de 2010.....	52
Figura 23: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de outubro de 2010.....	53
Figura 24: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de novembro de 2010.	53
Figura 25: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de dezembro de 2010.....	54
Figura 26: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de janeiro de 2011.	55
Figura 27: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de fevereiro de 2011.....	55
Figura 28: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de março de 2011.	56
Figura 29: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas <i>wind sea</i> nas três áreas de análise para o mês de abril de 2011.....	56
Figura 30: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de abril de 2010.....	57
Figura 31: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de maio de 2010.	58
Figura 32: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de junho de 2010.....	58
Figura 33: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de julho de 2010.....	59
Figura 34: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de agosto de 2010.....	60
Figura 35: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de setembro de 2010.....	60
Figura 36: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de outubro de 2010.....	61

Figura 37: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de novembro de 2010.	62
Figura 38: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de dezembro de 2010.....	62
Figura 39: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de janeiro de 2011.	63
Figura 40: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de fevereiro de 2011.....	63
Figura 41: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de março de 2011.	64
Figura 42: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo <i>swell</i> nas três áreas de análise para o mês de abril de 2011.....	65
Figura 43: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de abril (a), maio (b), junho (c), julho (d) e agosto (e) de 2010.	67
Figura 44: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de setembro (a), outubro (b), novembro (c) e dezembro (d) de 2010.....	68
Figura 45: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) de 2011.....	69
Figura 46: Gráfico de comparação de dados de altura significativa de onda obtidos pelo sistema WaMoS II (azul) e ondógrafo S4ADWi (verde).....	73
Figura 47: Gráfico de altura significativa de onda a partir de dados de Radar (verde) e do modelo <i>Wavewatch III</i> (azul).	74
Figura 48: Mapa esquemático mostrando a refração das ondas no litoral de Boa Viagem (Recife – PE). Fonte da batimetria: FINEP/UFPE, 2009.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BDC	Banco de Dados Climatológicos
CE	Ceará
E	Leste
f	Frequência
g	Gravidade
H	Profundidade Local
Hmax	Altura Máxima
Hs	Altura Significativa
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
MAI	Monitoramento Ambiental Integrado
MTF	Função de Transferência de Modulação
N	Norte
NE	Nordeste
NHC	Centro Nacional de Furacões
PBCA	Subdivisão de Climatologia e Arquivo Meteorológico
PE	Pernambuco
S	Sul
SDP	Subdiretoria de Pesquisa
SE	Sudeste
SINDA	Sistema Nacional de Dados Ambientais
T	Período
Tm	Período Médio
Tp	Período de Pico
WaMoS II	Wave and Surface Current Monitoring System
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	15
1.1 Introdução	15
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDO	21
2.1 Vento	21
2.2 Clima	21
2.3 Marés	21
2.4 Plataforma Continental Interna de Boa Viagem	22
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Aquisição de Dados a partir de Radar	24
3.2 Processamento de Dados a partir do Sistema WaMoS II	26
3.3 Dados de Vento	29
3.4 Dados Observacionais – Ondógrafo S4ADWi	30
3.5 Resultados Numéricos - Modelo WAVEWATCH III	30
3.6 Análises Estatísticas	31
3.7 Organização dos Resultados	32
CAPÍTULO IV – RESULTADOS	34
4.1 Regime de Ventos	34
4.2 Altura Máxima de Onda	36
4.3 Análise Temporal de Ondas Wind Sea	40
4.4 Análise Temporal de Ondas Swell	44
4.5 Análise Espacial de Ondas Wind Sea	48
4.6 Análise Espacial de Ondas Swell	57
4.7 Análise Espaço-Temporal de Corrente	66
CAPÍTULO V – DISCUSSÃO	70
5.1 Variabilidade Temporal	70
5.1.1 Altura Máxima das Ondas (<i>H_{max}</i>)	70
5.1.2 Ondas do Tipo <i>Wind sea</i>	70
5.1.3 Ondas do Tipo <i>Swell</i>	71

5.1.4	<i>WaMoS II</i> vs Ondógrafo S4ADWi	73
5.1.5	<i>WaMoS II</i> vs Modelo <i>Wavewatch III</i>	74
5.2	Variabilidade Espacial	75
5.3	Variabilidade Espaço-Temporal da Corrente	77
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES		78
REFERÊNCIAS		80
APÊNDICE		85
APÊNDICE A: Pós-processamento das imagens polares a partir do software WinWaMoS85		
APÊNDICE B:	Altura máxima das ondas	86
APÊNDICE C:	Ondas wind sea	87
APÊNDICE D:	Ondas swell	92
APÊNDICE E:	Registros de ondas wind sea e swell.	97

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

As ondas oceânicas são resultantes de perturbações periódicas e não periódicas na água, tais como: vento, pressão, terremotos, força de Coriolis e ação gravitacional entre os corpos celestes (World Meteorological Organization, 1998). Partindo deste princípio, as partículas da água são deslocadas de uma posição de equilíbrio por ação das forças geradoras e retornam à sua posição de origem devido atuação das forças restauradoras (Wright et al., 1999). As ondas estudadas nesta dissertação referem-se às ondas que ocorrem na interface entre a atmosfera e o oceano, geradas pelo vento e cuja principal força restauradora é a força gravitacional exercida pela Terra, as quais são designadas ondas superficiais de gravidade (Wright et al., 1999).

O litoral da região nordeste (NE) do Brasil, devido à sua localização geográfica, está susceptível à atuação de um regime de ondas de superfície constituído por ondas locais, denominadas vagas (*wind sea*) geradas pelos ventos alísios, e por ondas formadas por eventos meteorológicos distantes, denominadas marulho (*swell*), tais como ciclones extratropicais nos hemisférios Norte e Sul e distúrbios ondulatórios de leste (Innocentini et al., 2005). Muitos desses distúrbios atmosféricos foram registrados transportando para o litoral do NE do Brasil a agitação marítima gerada pelos ciclones extratropicais, formados no Atlântico Norte ou Sul (Innocentini et al. (2001); Innocentini et al. (2005); Melo et al. (1995)).

Segundo Talley et al. (2011) o *swell* pode se propagar por longas distâncias com pouca atenuação. Um exemplo dado por estes autores é de um *swell* com período de 14 s, o qual viaja com uma velocidade de fase de 22 m.s^{-1} e velocidade de grupo de 11 m.s^{-1} , que levou aproximadamente cinco dias para se propagar do Golfo do Alasca a costa norte do Havaí, uma distância de cerca de 4500 km.

Além das ondas, as correntes também desempenham importante função nas regiões costeiras, sendo transportadoras de sedimento. Nestas regiões atuam principalmente três diferentes tipos de correntes, geradas por diferentes agentes dinâmicos: as correntes de deriva litorânea, que surgem quando as ondas não atingem perpendicularmente o litoral, o que resulta em um transporte paralelo à costa; as correntes de maré, produzidas pela diferença de

altura da maré; e as correntes geradas pelo vento, as quais não são tão regulares como as correntes de maré (Bird, 2008).

As correntes de maré no litoral de Pernambuco exercem importante influência na morfologia costeira, principalmente quando estão associadas ao período de ventos intensos que sopram de sudeste e as marés de sizígia, produzindo intenso processo erosivo em toda zona litorânea (Manso et al., 2006). E as correntes geradas pelo vento e pela maré podem ser forte suficiente para transportar areia e até mesmo cascalho, seja contribuindo para a deriva litorânea ou levando para longe da costa (Bird, 2008). Porém, as correntes de deriva litorânea são praticamente ausentes no litoral pernambucano devido à incidência frontal das ondas sobre a linha de praia (Manso et al., 2006).

As ondas e correntes costeiras estão relacionadas diretamente com a morfologia da linha de costa (Candella, 1997), alterando constantemente os perfis de praia em resposta a energia da onda incidente (Wright et al., 1999), o que pode resultar em processos tais como a erosão e deposição costeira, sendo que estes são processos naturais em que há uma redistribuição da areia da praia para áreas mais afastadas da costa e posterior reposição da mesma, processo este resultante da atuação conjunta de ondas, correntes e marés, sendo que é o nível da maré que determinará a área de atuação da onda e conseqüentemente a área que sofrerá mobilização deste sedimento (Zhang et al., 2004).

Em áreas costeiras altamente urbanizadas, o processo de erosão é visto como um sério problema tendo em vista às perdas ocasionadas por este fenômeno. Em Pernambuco, diante de um histórico de ocupação irregular da zona costeira (FINEP/UFPE, 2009), o processo de erosão costeira é seriamente sentido em diversas áreas litorâneas, a exemplo do litoral de Recife. Desta forma fica claro que as ondas, como processo físico de maior dinâmica atuante no litoral, representam grande ameaça às construções costeiras, ao turismo e às operações navais (Candella, 1997).

Diante deste cenário, vem se observando uma grande quantidade de obras de engenharia (obras de contenção para proteção costeira) ao longo do litoral pernambucano, como muros de proteção, molhes, espigões e quebra-mares (FINEP/UFPE, 2009). Porém apesar da presença destas obras em praticamente todo o litoral, ainda existem vários trechos com problema de erosão (Costa et al., 2008), além de faixas litorâneas adjacentes às quais foram implementadas tais obras, comprometendo o potencial turístico e ambiental desse litoral (MCT/UFPE, 2010a). Ou seja, de certa forma as obras de proteção costeira neste litoral

acabam por agravar e expandir o processo erosivo da costa (Carneiro et al., 2003). Além do mais, ao se avaliar as questões navais, a ação das ondas sobre navios, estruturas offshore, portos, etc., de semelhante modo, constitui uma questão de extrema importância para a realização de projetos de engenharia naval e oceânicos mais seguros e econômicos.

Devido à necessidade de se conhecer as características das ondas e correntes, várias técnicas têm sido utilizadas para monitorá-las e estudá-las. Por exemplo, as boias ondógrafo são os equipamentos mais utilizados, registrando continuamente dados das características das ondas, tais como altura, período e direção em um determinado ponto. Métodos observacionais também são utilizados, porém estes se restringem à zona de surfe (Wright et al., 1999).

Além dos métodos *in situ*, observações de ondas superficiais oceânicas também são realizadas a partir de detecção remota por satélite, a qual fornece uma observação elevada e sinótica única de amplas extensões do oceano, sendo um método prático de se obter repetidas observações com uma ampla cobertura geográfica necessária para uma previsão confiável. Os radares náuticos são muito utilizados, porém não no Brasil até o presente momento. Estes radares são instalados em plataformas fixas ou móveis, e são capazes de fornecer uma visão espacial e temporal do campo de ondas e correntes. Modelos de previsão também são altamente utilizados no estudo de dinâmica costeira, porém necessita de uma calibração efetuada por dados obtidos *in situ*.

Em nível nacional, devido a grande preocupação com o processo de erosão costeira sofrida em diversas regiões do litoral brasileiro a partir da ação das ondas principalmente em eventos de fortes tempestades, é observado um grande interesse em se compreender a dinâmica litorânea, o que objetivou a realização de diversos estudos do clima de ondas no litoral brasileiro, bem como o desenvolvimento de modelos que permitissem a previsão de ondas.

Ao longo da costa brasileira poucos trabalhos são provenientes de observações *in-situ* de ondas, sendo que a maioria são resultantes de análises de curto período de observações. No litoral do Brasil podemos destacar os trabalhos de Araújo et al. (2003) e Silva et al. (2011), sendo que estes trabalhos foram realizados a partir de uma série temporal de maior período. Outros trabalhos desenvolvidos sobre o clima de ondas no Oceano Atlântico foram gerados através de resultados de modelos numérico tais como Oliveira (2002), Parise (2010), Cuchiara et al. (2009), Branco (2005), Pianca et al. (2010).

Globalmente, é notória a preocupação em se realizar um monitoramento costeiro sazonal e espacial do clima de ondas. Estes monitoramentos servem para proteção da infraestrutura costeira, e de diversas atividades relacionadas ao mar como navais, portuárias e petrolíferas. Desta forma, estudos com modelagem e ondógrafos são bastante utilizados mundialmente como visto em Chini et al. (2010), Ogawa et al. (2011), Gorrell et al. (2011), Sabique et al. (2012) e Chiu et al. (2013).

Este trabalho, por outro lado, visa o estudo da variabilidade sazonal e espacial do clima de ondas e correntes no litoral de Boa Viagem (Recife-PE) utilizando imagens polares obtidas por radar náutico de banda-X, durante um período de 13 meses. As imagens polares obtidas foram transformadas em parâmetros físicos de ondas e correntes através de um sistema denominado *Wave and Surface Current Monitoring System - WaMoS II*. Este sistema vem sendo bastante utilizado principalmente em regiões do Noroeste do Atlântico e Nordeste do Pacífico, como observado, por exemplo, no estudo de Hessner et al. (2006), Hessner e Hanson (2010) e Reichert e Lund (2007).

Além do entendimento da variabilidade sazonal e espacial dos parâmetros físicos de ondas na região do litoral de Boa Viagem, esta dissertação testou a eficiência do uso de imagens polares obtidas por radar náutico de banda-X, transformada em parâmetros físicos de ondas e correntes pelo sistema *WaMoS II*, gerando embasamento teórico para futuras medidas de proteção costeira e naval para esta região.

1.2 Justificativa

No litoral de Pernambuco e em diversos litorais do mundo vem se observando uma crescente preocupação na compreensão e resolução dos diversos problemas existentes nas zonas costeiras, visto que estas áreas são alvo de intensa urbanização, atividade portuária e industrial relevantes, e exploração turística em larga escala (Gruber et al., 2003).

No entanto, como o litoral é altamente urbanizado, houve uma fixação da linha de costa impossibilitando que os processos naturais ambientais de deposição e erosão ocorram livremente. Isto implica em dizer que o processo de erosão constitui-se como um grave problema nesta zona costeira, sendo que as ondas e correntes constituem-se como principais agentes erosivos. Por este motivo são implementados diferentes meios para conter a erosão na zona costeira de Recife-PE, como foi abordado no tópico acima.

Quaisquer providências a respeito da zona costeira, devem ser realizadas com base, primeiramente, da dinâmica costeira local, principalmente no que se diz respeito ao clima de ondas e dinâmica das correntes da região.

No Brasil, existe, até o presente momento, uma ausência de dados de longo período no que concerne à medição de ondas e correntes. Sendo que a maioria das campanhas de medição tem sido tradicionalmente realizada de forma pontual e com o objetivo precípua de prover dados para projetos de engenharia. Alguns exemplos são as campanhas realizadas pela Petrobras na Bacia de Campos e pelo Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH) em vários locais da costa brasileira, como exemplo as campanhas de medição de ondas em Suape (PE) com 6 anos de duração, entre 1977 e 1984; para o Porto de Mucuripe (CE), entre 1994 e 1995; e em Pecém (CE) durante 5 anos (1998, 1999, 2000, 2001 e 2005) para estudos de Engenharia para a construção do Porto. Ou seja, a costa N/NE do Brasil permanece desprovida de monitoramento sistemático de ondas.

No litoral de Pernambuco, amostragens pontuais foram realizados no projeto MAI (2009) a partir de oito fundeios de ondógrafos direcionais S4DWi da InterOcean Systems, sendo dois em cada um dos municípios: Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista. Durante as campanhas do projeto MAI (FINEP/UFPE, 2009), séries temporais de 7-8 dias de duração foram obtidas com o instrumento sendo fixado 1 m acima do fundo, e coletando informações a cada 3 horas, por períodos de 30 minutos. Durante a execução do projeto PROCOSTA (MCT/UFPE, 2010b), novamente foram fundeados sensores S4DWi na plataforma interna de Recife.

Porém os equipamentos utilizados nas campanhas descritas acima, além de prover dados em um curto intervalo de tempo, fornecem dados somente no ponto onde estão fundeados. E como se sabe, a plataforma continental interna de Recife é bastante irregular, o que pode induzir alterações nas ondas em seu percurso até atingirem a costa. Desta forma, a utilização de radar náutico pode ser uma ferramenta altamente útil para o monitoramento das ondas e correntes superficiais no litoral de Boa Viagem.

Sendo assim, nesta dissertação foram utilizados treze meses de dados obtidos por radar, o qual permite monitorar em escala espacial e temporal do clima de ondas e correntes incidentes no litoral de Boa Viagem (Recife-PE), além do mais este trabalho será o primeiro a realizar uma análise com uma série de dados de maior período de tempo na região NE do Brasil.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Compreender a climatologia das ondas do tipo *wind sea* e *swell* e das correntes costeiras a partir do uso de imagens polares obtidas por radar náutico de banda-X, transformadas em parâmetros físicos de ondas através do sistema *Wave and Surface Current Monitoring System – WaMoS II*.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise temporal das características das ondas *wind sea* e *swell* (altura significativa – H_s , período de pico – T_p e direção – $\bar{\theta}$) e altura máxima (H_{max}) das ondas que atingem o litoral de Boa Viagem.
- Observar a variação espacial das ondas *wind sea* e *swell* sobre o litoral, com base em três áreas de análise.
- Verificar a variabilidade sazonal da intensidade e direção do vento e sua influência nas ondas incidentes sobre o litoral.
- Verificar o padrão das correntes (intensidade e direção) em duas áreas de análise, área 1 (mais próxima da costa) e área 3 (mais afastada da costa).
- Verificar a eficiência do sistema WaMoS II na medição de ondas e correntes para o litoral de Boa Viagem (Recife) a partir de comparações com dados de ondógrafo e modelo.

CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDO

2.1 Vento

No litoral de Pernambuco predominam os ventos alísios. Durante o período de fevereiro a setembro predominam ventos de SE com velocidades médias de 2,6 a 4,0 m.s⁻¹, com ventos mais intensos nos meses de julho e agosto. Durante os meses de outubro e janeiro, predominam ventos E-SE com velocidades de 3,0 a 3,2 m.s⁻¹. Ventos de E-NE e menos intensos, com velocidade de 2,0 a 2,1 m.s⁻¹, ocorrem com mais frequência nos meses de novembro e dezembro (Rollnic (2008) e FINEP/UFPE (2009)).

2.2 Clima

Segundo o sistema de classificação de Köppen, o litoral Pernambucano encontra-se numa região de clima tipo As', denominado Tropical Quente-Úmido. A temperatura anual situa-se na faixa de 25,5 °C, havendo 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). (Andrade e Lins, 1971).

O principal agente causador da pluviosidade na área de estudo são os distúrbios de leste, sendo por vezes os grandes responsáveis pelo excesso de chuva (Pontes da Silva et al., 2010). Estes distúrbios originam-se no norte da África, e propagam-se em direção oeste alcançando intensidade máxima entre os meses agosto e setembro.

2.3 Marés

No litoral de Recife as marés são do tipo semidiurna, classificadas como mesomarés, dominadas por ondas e sob ação constante dos ventos alísios, apresentando duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar. Neste litoral, as marés apresentam altura média de 1,67m,

com alturas médias de sizígia de 2,07m e alturas médias de quadratura de 0,97m (FINEP/UFPE (2009)).

2.4 Plataforma Continental Interna de Boa Viagem

A plataforma continental do nordeste brasileiro é dividida em três partes a partir da morfologia e da distribuição dos sedimentos: a plataforma interna, limitada pela isóbata de 20 m; a plataforma média, entre as isóbatas de 20 m e 40 m; e a plataforma externa, entre 40 m e 60 m (Coutinho, 1976).

Os recifes de arenito ocorrem ao longo da costa pernambucana formando feições lineares por cerca de 10 km, as vezes continuamente, paralelamente ao litoral por longos trechos, normalmente formando duas ou três faixas de bancos, dos quais alguns afloram na baixa-mar (Araújo, 2008), constituindo diques naturais dissipando a energia das ondas, e consequentemente protegendo a praia contra a erosão marinha (Guerra e Manso, 2002). Em áreas onde não existem essas feições ocorre uma maior susceptibilidade erosional (Araújo, 2008).

Em perfis batimétricos da plataforma continental interna de Recife, se observa um relevo de amplitude vertical de 4 m, correspondendo à presença de uma linha de recife totalmente submersa (Araújo et al., 2004). Mais recentemente, verificou-se a presença de um canal entre a linha de recife submerso e a linha de recife de arenito emerso durante a maré baixa, na plataforma continental interna de Boa Viagem (FINEP/UFPE (2009) e Gregório et al.(2010)). (Fig. 1).

O canal apresenta uma profundidade média de 6.40 m e uma largura média 437 m. O recife de arenito apresenta uma profundidade média 7.30 m, no início da base, no final o valor de 11.30 m, e uma largura média de 1285.50 m. Apesar de a plataforma continental interna apresentar uma declividade suave em direção ao mar, entre a linha de costa e o canal é observada uma grande declividade do relevo, entre o ambiente praias e esta feição. (Gregório et al., 2010)

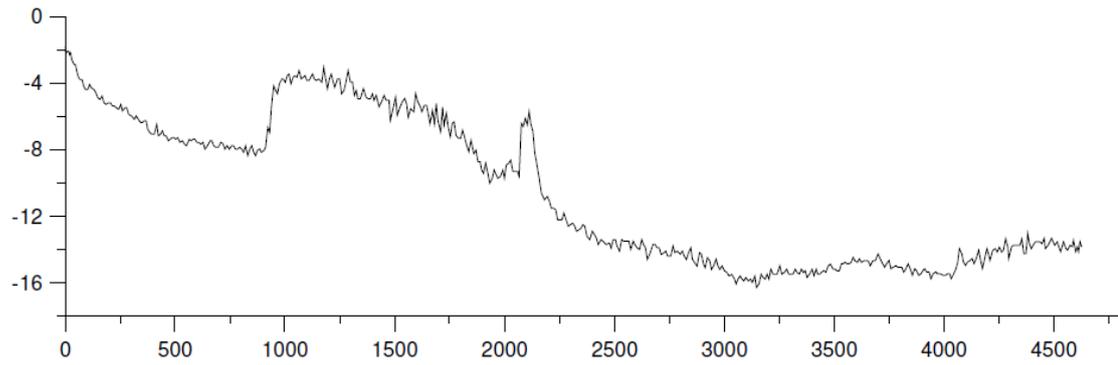


Figura 1: Perfil topobatimétrico adjacente à praia de Boa Viagem. Fonte: FINEP/UFPE (2009)

No litoral de Boa Viagem esses afloramentos se distribuem descontinuamente no litoral, devido ao processo de erosão que age de forma diferencial (Silva et al., 2006). Em alguns pontos, estes recifes favorecem a formação de piscinas naturais na maré baixa, o que confere uma maior segurança para banho nessas áreas (Araújo, 2008).

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aquisição de Dados a partir de Radar

Os dados de onda (altura máxima – H_{max} , altura significativa – H_s , período de pico – T_p , e direção média – $\bar{\theta}$) e de corrente (intensidade e direção) foram obtidos a partir de um sistema denominado *Wave and Surface Current Monitoring System - WaMoS II*, através de imagens polares de radar náutico de banda-X, desenvolvidos pela empresa alemã OceanWaves GmbH. A antena do radar, de marca Foruno FAR-2117 BB, esteve instalada na cobertura de um edifício localizado a 56 m acima do nível do mar, no litoral de Boa Viagem (Recife - PE), nas coordenadas geográficas: latitude: 08°08.098 S e longitude: 034°54.085 W (Fig. 2). Os dados foram adquiridos no período de abril de 2010 a abril de 2011. Contudo, entre os dias 15 e 25 de maio e 7 e 21 de julho não houve registro de dados.

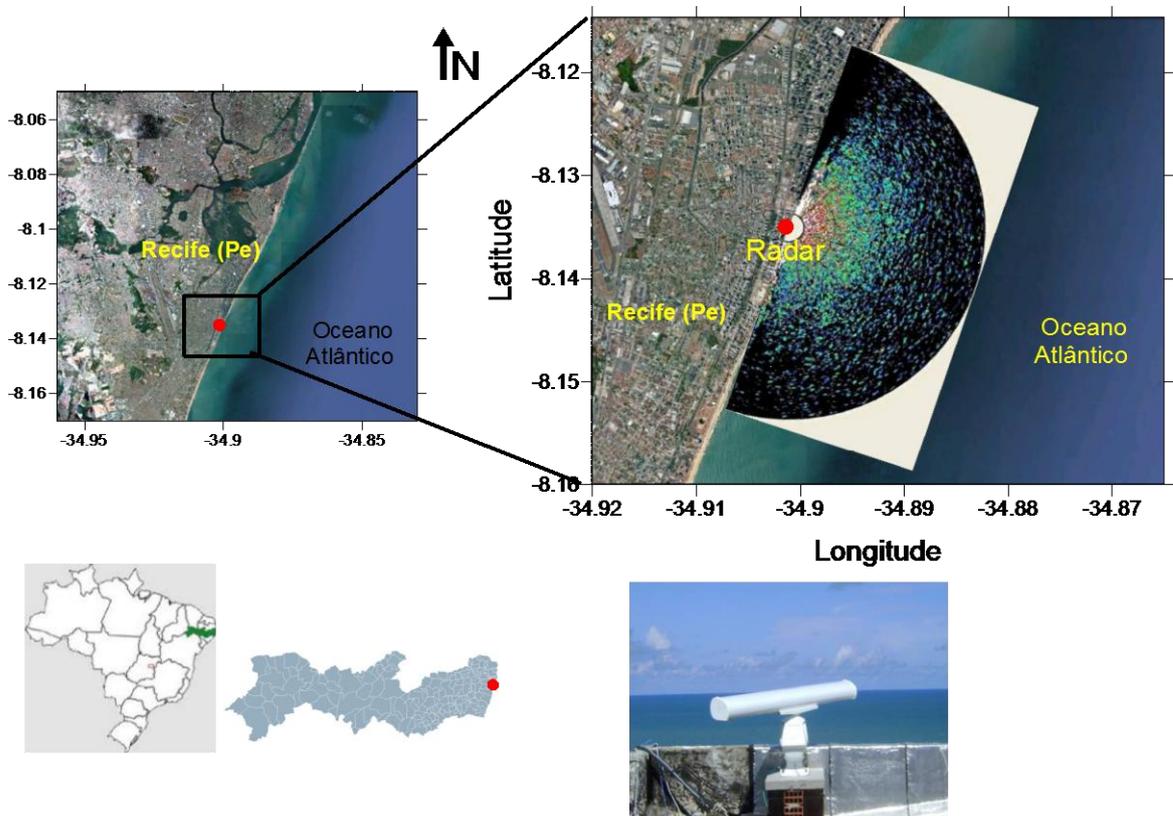


Figura 2: Localização do ponto de instalação da antena do radar e sistema *WaMoS II*, mostrando a imagem polar referente a área de abrangência do radar.

O funcionamento do radar se dá por meio de emissão de pulsos de ondas eletromagnéticas e posterior recebimento do sinal de retroespalhamento, gerado a partir da dispersão dessas ondas pelas ondas oceânicas superficiais, causadas pelo vento. A abrangência do radar corresponde a uma área que se inicia em uma distância de 180 m da antena do radar até 2080 m em direção *offshore*.

Os registros de cada arquivo de dados obtidos pelo sistema *WaMoS II* foram realizados a cada 2 minutos. Um arquivo de dados do sistema *WaMoS II* consistiu de 32 imagens polares, sendo que uma imagem é gerada em um ciclo completo de rotação da antena do radar. Um ciclo completo de rotação da antena do radar foi efetuado em um tempo de 2,34 s. Posteriormente ao registro das imagens polares, o sinal do retroespalhamento foi processado para o cálculo dos parâmetros físicos de ondas do tipo *wind sea* e *swell* (altura significativa (H_s), altura máxima (H_{max}), período de pico (T_p), período médio (T_m), direção média ($\bar{\theta}$), comprimento de onda (λ)), assim como velocidade e direção da corrente superficial. Nesta dissertação foram selecionados e analisados os dados de H_{max} , H_s , $\bar{\theta}$ e T_p para cada uma hora, totalizando aproximadamente 8500 arquivos de dados por área.

Para o melhor entendimento do clima de ondas na região, foram selecionadas três subáreas de análise da região de varredura do radar. Estas subáreas correspondem a 128 x 128 pixels, tendo aproximadamente 1 km² (Fig. 3).

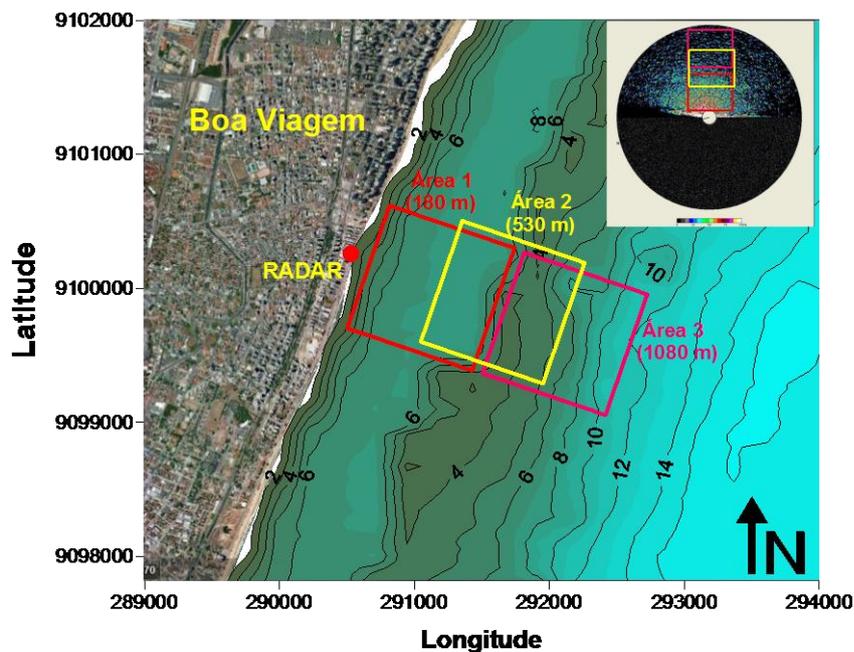


Figura 3: Esquema das três subáreas (Área 1, Área 2 e Área 3) selecionadas para análise de dados, indicando a distância em que estão da antena, sobre a batimetria da região. Fonte da batimetria: FINEP/UFPE, 2009

3.2 Processamento de Dados a partir do Sistema *WaMoS II*

A partir do armazenamento das imagens polares, e subsequente escolha da subárea de análise, a imagem é transformada em coordenadas cartesianas (imagens cartesianas). A sequência de imagens cartesianas passa pelo processamento de sinais, que consiste na análise e/ou modificação dos sinais a fim de extrair informações de parâmetros físicos de ondas. No sistema *WaMoS II* o processamento de sinais é feito a partir da Transformada Discreta de Fourier, a qual transforma as imagens cartesianas em um espectro de frequência de número de onda-3D $X(\omega, \vec{k})$, onde $\omega = 2\pi / T$ é a frequência em radianos, T é o período de onda e \vec{k} é o vetor onda, sendo $|\vec{k}| = 2\pi / \lambda$ o número de onda, com λ sendo o comprimento de onda.

A partir deste processo ocorre a filtragem do espectro da imagem 3D e então determinação da corrente superficial. A energia de onda relacionada com $X(\omega, \vec{k})$ é determinada por aplicação da relação de dispersão teórica para onda de gravidade linear com uma filtragem Passa-banda, descrita na Eq.(1):

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kH) + \vec{U}\vec{k}} \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, $k = |\vec{k}|$ é o número de onda, H é a profundidade local e \vec{U} a corrente superficial.

Em seguida é determinado o espectro de frequência-direcional - 2D. Através de integração ao longo do domínio da frequência e aplicação da função de transferência de modulação (MTF) o espectro de frequência-direcional de onda $E(f, \theta)$ é obtido, com θ sendo a direção de propagação da onda em radiano.

O espectro de frequência unidimensional $S(f)$ é calculado por integração de $E(f, \theta)$ em todas as direções de onda, mostrando a energia de onda em função da frequência, dada pela Eq.(2):

$$S(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (2)$$

A partir de $E(f, \theta)$ e $S(f)$, a função do espalhamento direcional, a qual descreve as propriedades do campo de ondas, é dada pela Eq. (3):

$$D(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)}{S(f)} \quad (3)$$

$$\text{Onde } \int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1.$$

Os parâmetros direcionais padrões, como a direção média $\bar{\theta}$ (mostrada abaixo na Eq. (4)) pode ser derivada diretamente de $D(f, \theta)$:

$$\bar{\theta}(f) = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right), \quad (4)$$

onde $a_1(f)$ e $b_1(f)$ são os primeiros coeficientes de Fourier de $D(f, \theta)$, obtidos pela Eq. (5) e (6), respectivamente:

$$a_1(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cos \theta d\theta \quad (5)$$

$$b_1(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \sin \theta d\theta \quad (6)$$

A partir de $S(f)$, parâmetros de onda como período de pico (T_p) e direção de pico (θ_p) podem ser inferidos por $T_p = 1/f_p$ e $\theta_p = \bar{\theta}(f_p)$, onde f_p é a localização da máxima energia em $S(f)$. E para determinar f_p , o *WaMoS II* utiliza a fórmula centróide expressa pela Eq. (7):

$$f_p = \frac{\int_{f_1}^{f_2} S(f) f df}{\int_{f_1}^{f_2} S(f) df} \quad (7)$$

onde $f1$ e $f2$ dão o intervalo de frequência da máxima energia. Outra equação de período de onda que é geralmente utilizada para caracterizar o espectro de onda é $T_{m02} = \sqrt{m_0/m_2}$, onde $m_n = \int f^n S(f)df$, $n=0,1,2...$ são os momentos espectrais obtidos em toda faixa de frequências.

O período de onda que representa o limite entre o *swell* e *wind sea* (T_s) é em função da velocidade do vento, em que o *swell* é caracterizado por sua velocidade de fase ser mais rápida que a velocidade do vento. Assumindo condições de água profunda, o período limite para se classificar as ondas é dado pela Eq. (8):

$$T_s \geq \frac{2\pi}{g} |W| \quad (8)$$

onde $|W|$ é a velocidade do vento. Porém em casos em que a velocidade do vento não é conhecida, em geral é assumido $T_s = 10$ s, o qual foi utilizado nesta dissertação.

A altura significativa (H_s) de onda é calculada a partir de séries temporais, representando a média de um terço das maiores alturas de todas as onda durante o período de amostragem, sendo que este parâmetro pode também ser determinado a partir do espectro de frequência por $H_s = 4\sqrt{m_0}$.

A altura máxima de onda (H_{max}) é determinada através de relações empíricas entre H_s e H_{max} . O *WaMoS II* utiliza a relação $H_{max} = 1.44 \max(H_s)$, onde $\max(H_s)$ é a máxima altura significativa durante o período de amostragem.

A aquisição das imagens polares até a saída de dados de onda estão esquematizados na figura 4.

Maiores informações sobre a descrição do método pelo qual ocorre o processamento do sinal até a obtenção dos parâmetros de onda estão descritas no manual de operação do *WaMoS II* (Wave Monitoring System, 2007) e em Hessner (2007)

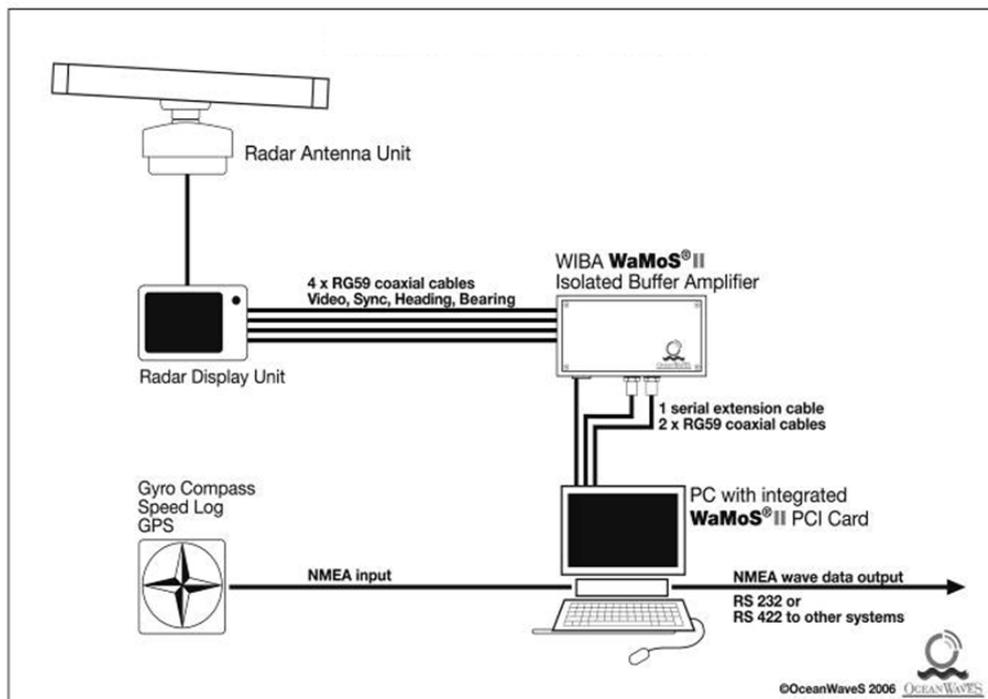


Figura 4: Esquema das etapas de funcionamento do radar e sistema WaMoS II, desde a aquisição das imagens polares à saída de dados de onda.

3.3 Dados de Vento

Os dados de vento utilizados foram adquiridos do Banco de Dados Climatológicos (BDC) do Brasil, cedidos pela Subdivisão de Climatologia e Arquivo Meteorológico (PBCA), da Subdiretoria de Pesquisa (SDP) do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). Neste trabalho foram utilizados os dados meteorológicos observacionais de velocidade do vento (médias e máximas diárias) e direção média diária, da Estação SBRF, no Aeroporto Guararapes, localizada nas coordenadas: 08,11° S e 34,91° W.

Para o mês de setembro de 2010 foram utilizados dados de intensidade e direção do vento provenientes do banco de dados do Sistema Nacional de dados Ambientais (SINDA), localizada em Recife - PE (Latitude: 8,06° S e Longitude: 34,92° W). Estes dados foram utilizados devido a não representatividade dos dados do BDC para este mês.

3.4 Dados Observacionais – Ondógrafo S4ADWi

Para validação dos dados obtidos pelo sistema *WaMoS II* utilizou-se informações observacionais obtidas com um ondógrafo direcional S4ADWi da empresa InterOcean (Fig. 5), o qual foi fundeado em uma profundidade de 12m, porém estando a 1 m de distância do fundo, entre os dias 04/10/2010 e 11/10/2010. O ondógrafo operou com frequência de amostragem de 2 Hz em modo intermitente com duração de 30 minutos em ciclos de uma hora.



Figura 5: Ondógrafo direcional S4ADWi

3.5 Resultados Numéricos - Modelo *WAVEWATCH III*

Foram utilizados dados numéricos de altura de onda gerados pelo Modelo *WAVEWATCH III* (NWW3) desenvolvido pela NOAA/NCEP, durante o período de aquisição de dados do radar, ou seja, entre abril de 2010 a abril de 2011, porém com resolução temporal de três horas.

O modelo *WAVEWATCH III* calcula a equação de equilíbrio da densidade espectral em função do número de ondas e direção, considerando que as propriedades do meio, como profundidade e correntes, bem como o campo de ondas variam em escalas de tempo e espaço muito maior do que as escalas de variação de uma única onda (Tolman, 2009).

Uma limitação do modelo refere-se ao fato de que a parametrização não considera condições onde as ondas estão limitadas pela profundidade.

As parametrizações físicas para a geração e decaimento das ondas incluem ação do vento, termos de interação não linear e dissipação através de whitecapping. É considerado que a propagação é linear e que os termos não lineares relevantes estão incluídos nos parâmetros físicos de geração e decaimento.

O modelo utiliza um grid espacial em termos de longitude e latitude e o espectro de energia abrange todas as direções, para isso é discretizado usando um incremento direcional constante e um grid variável do número de onda. O modelo fornece também saídas pontuais de dados, as quais foram utilizadas nesta dissertação.

3.6 Análises Estatísticas

Para análises estatísticas foram aplicados testes não paramétricos, os quais não estão condicionados por qualquer distribuição de probabilidades dos dados em análise.

O teste de Mann-Whitney foi aplicado com a finalidade de comparar duas amostras independentes e aleatórias (Siegel e Castellan Jr., 2006), seguindo a Eq. (9), com o objetivo de comparar se há diferença significativa entre a altura das ondas (H_s) obtidas pelo sistema *WaMoS II* com a observada pelo ondógrafo S4ADWi, e com os resultados do modelo *Wavewatch III*.

$$z = \frac{U - \frac{n_1 - n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \quad (9)$$

Sendo U dado pela Eq. (10)

$$U = R - \frac{n(n+1)}{2} \quad (10)$$

sendo n o tamanho de cada amostra e R a soma das posições.

A análise de variância também foi realizada, sendo este um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos (Siegel e Castellan Jr., 2006). Assim, o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado com o objetivo de comparar a altura significativa das ondas nas três áreas de análise. Uma exigência deste teste é que a variável em estudo seja contínua, e outra, que as observações devam ser independentes. Para testar a hipótese nula, é utilizada a estatística de teste seguinte (Eq. (11)):

$$H = \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k n_j R_j^2 \right] - 3(N+1) \quad (11)$$

Onde:

N = número total de observações;

K = número de tratamentos

n_j = número de observações no j -ésimo tratamento;

R_j = soma dos postos do j -ésimo tratamento.

H_0 é rejeitada se $H \geq X^2$ com $K - 1$ graus de liberdade ao nível α de significância.

Se ocorrerem empates, a estatística de teste H deve ser corrigida com a seguinte expressão (Eq. (12)):

$$C = 1 - \frac{\sum (t_i^3 - t_i)}{N^3 - N} \quad (12)$$

em que t_i é o número de observações empatadas no i -ésimo grupo.

Assim, a estatística corrigida é (Eq. (13)):

$$H_1 = \frac{H}{C} \quad (13)$$

Os testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis foram aplicados para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

3.7 Organização dos Resultados

Os resultados foram divididos em quatro partes, os quais expressam a utilização de diferentes grupos de dados.

No primeiro tópico será apresentada a análise da intensidade e direção do vento, sendo apresentados como médias diárias.

No segundo, terceiro e quarto tópicos foram utilizados dados de ondas referentes à área 3, a qual inicia a 1080 m da antena do radar. Esta área foi escolhida a fim de se observar como as ondas estão incidindo sobre a plataforma interna de Boa Viagem e por esta ser a área com menor influência dos recifes de arenito dispostos ao logo da plataforma continental interna em questão. Foram confeccionados gráficos que possibilitassem observar a variação dos parâmetros de onda.

Sendo assim, no segundo tópico será apresentada a análise temporal da altura máxima das ondas.

No terceiro e quarto tópicos o objetivo foi de analisar as características, separadamente, das ondas *wind sea* e *swell*, respectivamente, (H_s , T_p e $\bar{\theta}$) que ocorrem no litoral de Boa Viagem (Recife-PE), visando uma melhor compreensão do clima de ondas atuantes sobre esta região.

No quinto e sexto tópicos serão apresentadas as análises espaciais das ondas *wind sea* e *swell* para cada mês, sem detalhamento dos dias. Foram confeccionados gráficos direcionais de altura significativa, apresentados em forma de mapa, que possibilitassem a visualização simultânea das três áreas estudadas em relação à costa. Estes tópicos tiveram por finalidade observar a variação da H_s e $\bar{\theta}$ da onda ao longo da plataforma interna de Boa Viagem.

O sétimo tópico teve por finalidade o estudo da corrente (intensidade e direção) em duas áreas, sobre o canal (área 1) e sobre a linha de recife (área 3).

CAPÍTULO IV – RESULTADOS

4.1 Regime de Ventos

Entre os meses de abril de 2010 e abril de 2011 houve grande variação na intensidade do vento. Os meses com maiores médias diárias de intensidades foram principalmente julho, agosto e setembro, sendo que em junho houve um pico de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 25, em outubro um pico de $7,9 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 15 e em novembro um pico de $6,9 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 9. Por outro lado, os meses com a menor intensidade foram principalmente de janeiro a abril de 2011. (Fig. 6).

Para a velocidade máxima, entre os meses de junho e outubro de 2010, principalmente, percebe-se que o vento ultrapassou 10 m.s^{-1} , observando valores máximos de $11,9 \text{ m.s}^{-1}$ nos meses de junho e agosto de 2010, e de $11,5 \text{ m.s}^{-1}$ em dezembro de 2010; enquanto que nos demais meses a velocidade foi predominantemente inferior a 8 m.s^{-1} (Fig. 6).

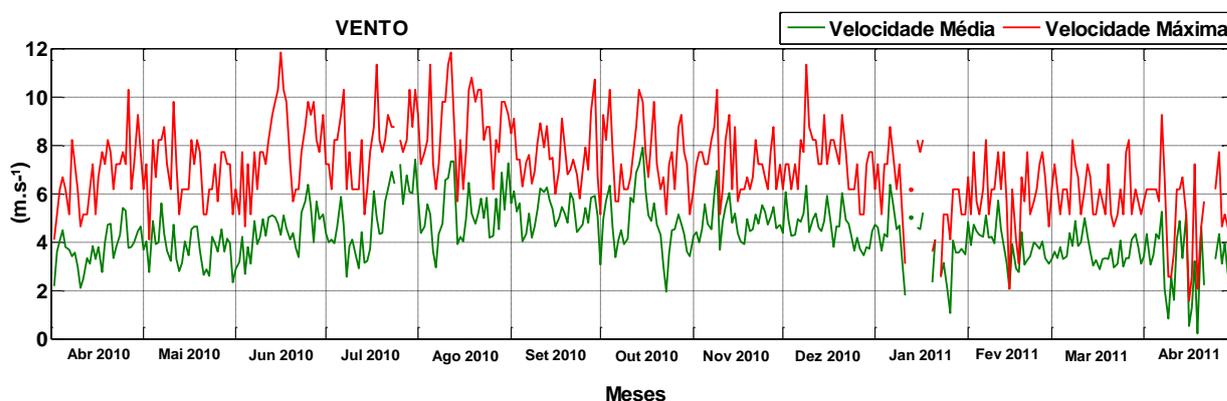


Figura 6: Gráfico de máxima diária (vermelho) e de média diária de velocidade (verde) para o período estudado.

A direção do vento no período de maio a agosto foi preferencialmente de S-SE, sendo que nos meses de agosto e setembro de 2010 esta direção apresentou frequência de aproximadamente 70% e 85%, respectivamente; em setembro o vento foi de sudeste; no mês de outubro e dezembro nota-se uma maior variação da direção, sendo que esta é encontrada basicamente entre NE e SE, porém ainda com a maior ocorrência de ventos de SE; no mês de novembro predominaram ventos de E; já nos meses de janeiro à março de 2011, os ventos

foram basicamente de E-SE. Em abril de ambos os anos, observa-se que é o mês em que o vento torna-se preferencialmente de SE, e com intensidade ainda inferiores a 6 m.s^{-1} . A partir de junho até outubro observa-se grande ocorrência de ventos com intensidade acima de 6 m.s^{-1} , provenientes de S e SE. (Fig. 7 e Fig. 8).

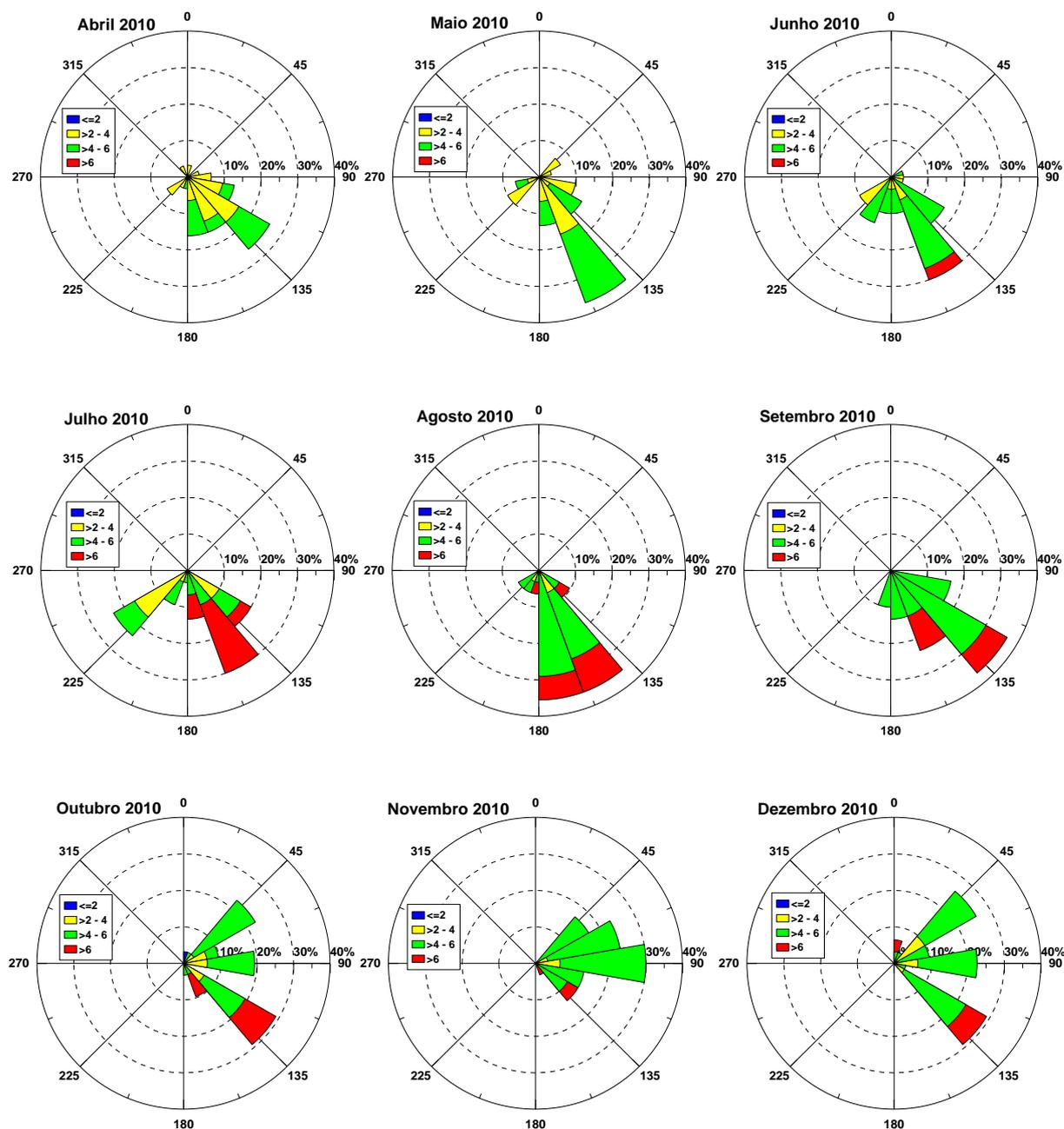


Figura 7: Gráficos direcionais de médias diárias de velocidade do vento para os meses de abril a dezembro de 2010.

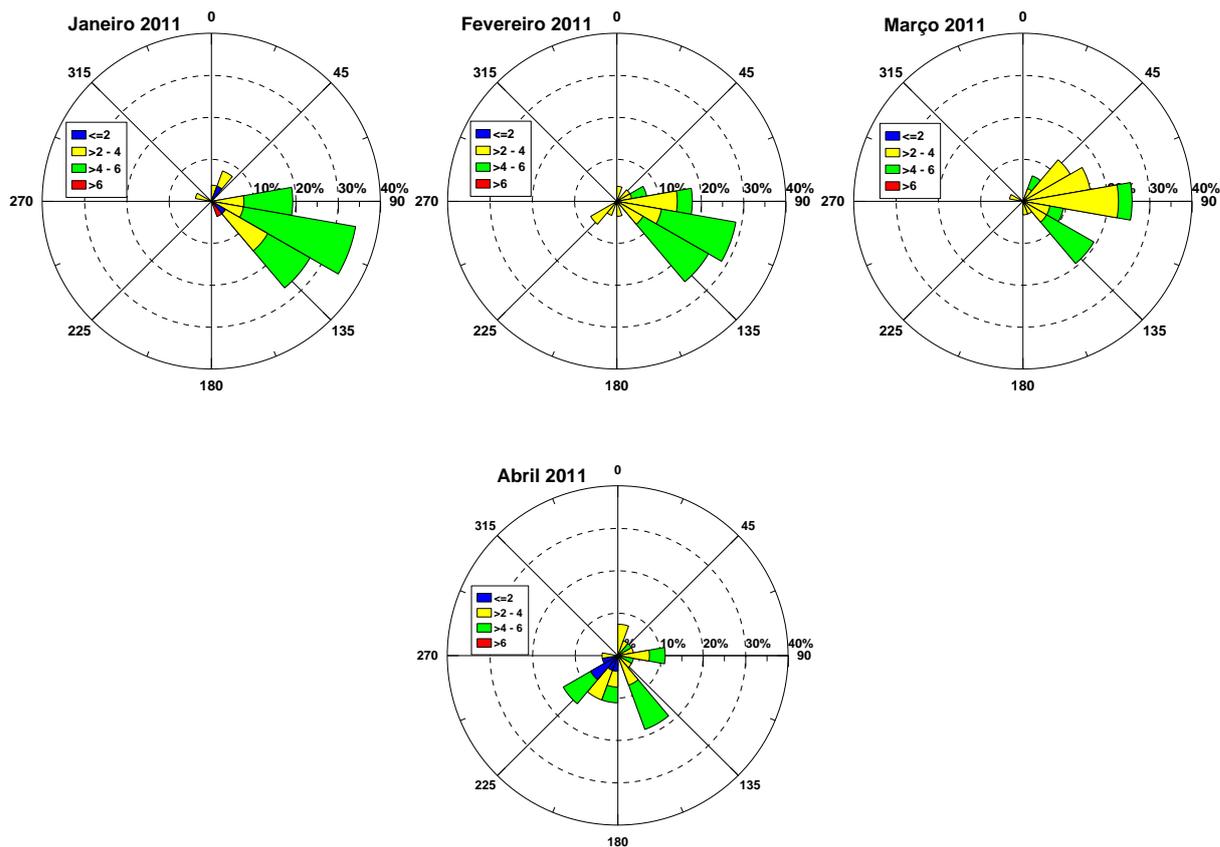


Figura 8: Gráficos direcionais de velocidade média de vento para os meses de janeiro a abril de 2011.

4.2 Altura Máxima de Onda

Os menores valores de H_{max} observados ao longo do período estudado foram de 1,1 m no mês de julho, 1 m no mês de novembro e de 0,7 m em todos os demais meses estudados, ou seja, não apresentaram grande diferença entre os meses. Por outro lado, no que se refere aos maiores valores de H_{max} , estes variaram bastante, estando entre 2,9 m e 5,9 m, e portanto serão apresentados separadamente.

No mês de abril de 2010 a maior H_{max} registrada foi de 3,9 m no dia 27, com predomínio de ondas com 1,9 m (Fig. 9a). No mês de maio a maior altura observada foi de 4,3 m e H_{max} mais frequente de 1,6 m (Fig. 9b). Nos meses de abril e maio a maior ocorrência de ondas foi com altura entre 1 e 2 m. A H_{max} predominante no mês de junho também foi de 1,6 m, porém houve grande ocorrência de ondas entre 1 e 2 m nos primeiros quinze dias e entre 2 e 3 m nos dias seguintes, sendo a maior altura de 5,2 m no dia 15 (Fig. 9c).

O mês de julho foi separado em dois períodos quanto ao predomínio da altura de onda: no início do mês, do dia 1 ao dia 7, a maior ocorrência foi de ondas com altura entre 1,5 e 2,5 m, com o máximo e mínimo valores de 3,1 e 1,1 m respectivamente; já no segundo período, entre os dias 22 e 31, houve maior incidência de ondas com altura entre 2 e 3 m, e neste período a maior altura registrada foi de 4 m no dia 24, e a menor altura foi de 1,5 no dia 22. Neste mês, ondas com H_{max} de 2,1 m apresentaram maior frequência de ocorrência na região (Fig. 9d).

Em agosto o maior valor de H_{max} registrado foi de 4,5 m. Neste mês a altura de onda predominante foi de 2 a 3 m ao longo de todo o mês, com valor mais frequente de 1,8 m (Fig. 9e). Em setembro, entre os dias 1 e 25 houve grande incidência de ondas com altura entre 2 e 3 m, e entre os dias 26 e 31 predominaram ondas entre 3 e 4 m. A maior altura registrada neste mês foi de 5,7 m observada no dia 26 (Fig. 9f). No mês de outubro houve grande variação da altura ao longo dos dias, alternando entre períodos em que houveram valores crescentes, com períodos em que houveram valores decrescente de H_{max} , mas ainda assim apresentando grande ocorrência de ondas entre 1 e 2 m, com maior frequência de 1,5 m; e a maior H_{max} registrada foi de 4,7 m nos dias 15 e 25 (Fig. 9g). Em novembro também houve maior incidência de ondas com altura entre 1 e 2 m, sendo que a maior H_{max} foi de 3,9 m no primeiro dia do mês (Fig. 9h). E em dezembro predominaram ondas com altura entre 1 e 2 m, sendo que a maior altura foi de 3 m no dia 18, havendo maior ocorrência de H_{max} de 1,4 m (Fig. 9i).

Em janeiro e fevereiro de 2011 as ondas estiveram bem definidas no intervalo de variação entre 1 e 2 m. Os maiores valores e os mais frequentes para cada mês foram, respectivamente de 4 m e 1,5 m (Fig. 10a) e 2,9 m e 1,2 m (Fig. 10b).

Nos meses de março e abril de 2011 a maior frequência foi de ondas com H_{max} de 1,3 m e os maiores valores registrados nesses meses foram de 5,3 m (Fig. 10c) e 5,9 m (Fig. 10d).

Os valores médios de H_{max} , bem como mais frequentes, máximos e mínimos estão sumarizados em tabela, apresentada no apêndice B.

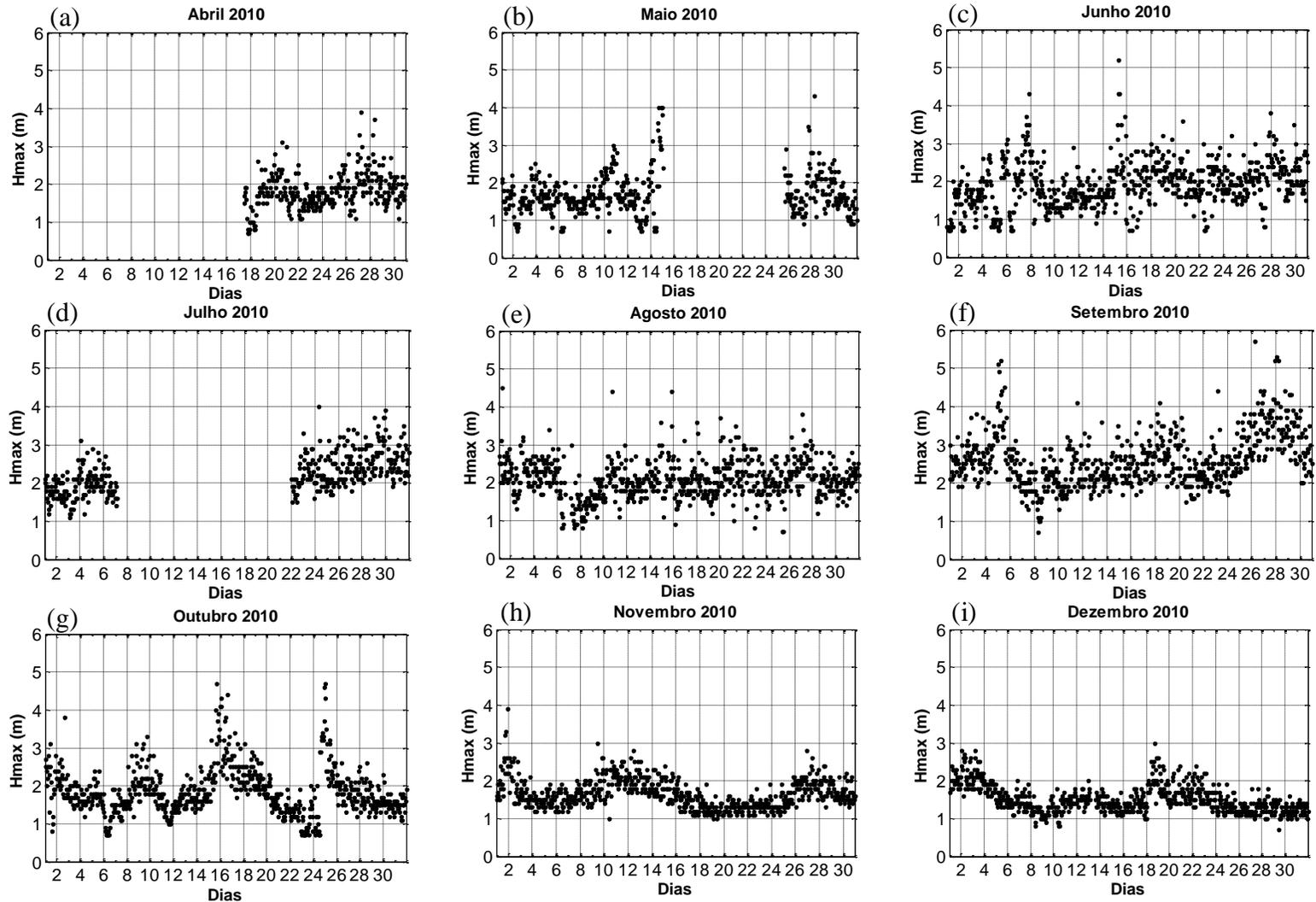


Figura 9: Gráfico de altura máxima de onda do mês de abril (a), maio (b), junho (c), julho (d), agosto (e), setembro (f) outubro (g), novembro (h) e dezembro (i) de 2010.

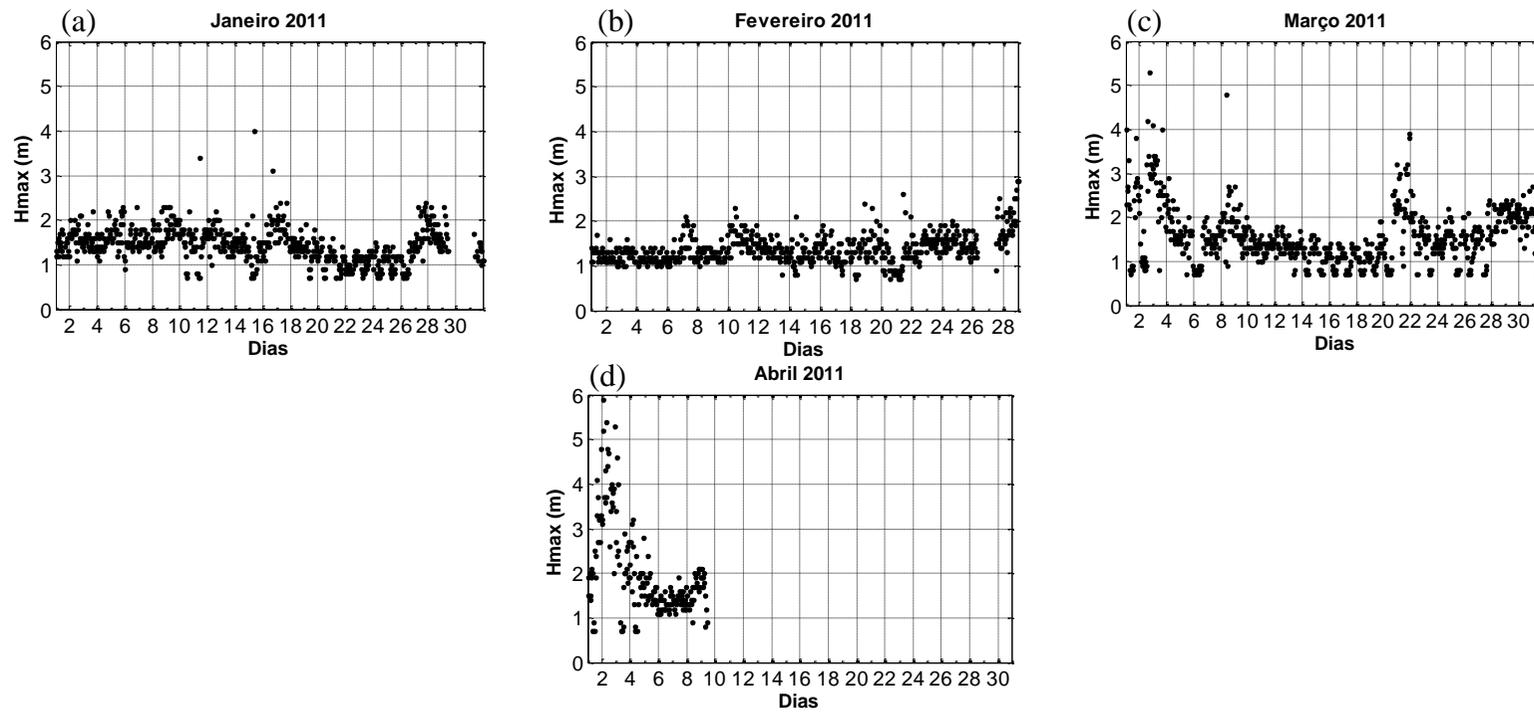


Figura 10: Gráfico de altura máxima de onda do mês de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) de 2011.

4.3 Análise Temporal de Ondas *Wind Sea*

Durante o período estudado as ondas do tipo *wind sea* apresentaram direção predominantemente entre 90°Az e 135°Az (Fig. 13), com um percentual de 94,86% de ocorrência. Esta direção prevaleceu ao longo de todos os meses estudados, enquanto que a H_s e o T_p apresentaram variações e portanto serão analisados mensalmente.

A variação anual da H_s das ondas *wind sea* está representada pela Fig. 11.

Estudo da variabilidade sazonal de H_s na região de estudo, demonstrou que nos meses de abril 2010 a outubro 2010 foi observada maior ocorrência de ondas com H_s entre 1,1 e 1,5 m e nos meses a partir de novembro 2010 a Abril 2011 houve maior ocorrência de ondas com H_s entre 0,5 e 1 m. Seguindo esta variação ao longo do ano, observa-se que a maior H_s de onda ocorreu no final do mês de setembro de 2010, com valor de 3,9 m, sendo que neste mês se teve maior incidência de ondas com altos valores de H_s .

No mês de setembro a H_s apresentou uma certa variação, alternando entre intervalos de dias com maiores e menores valores. Ao longo deste ciclo, os dias de maiores alturas foram os dias 2 e 3, 18 e 20 e entre 26 e 28, sendo que neste último intervalo ocorreram as maiores ondas do mês, com altura de até 3,9 m, e no dia 8 foi observada a menor altura, de 0,5 m. Entre os dias 1 e 24 a altura predominante foi entre 1 e 2 m; e a partir do dia 25 foi entre 2 e 3 m, sendo que neste mês a maior frequência foi de ondas com H_s de 1,5 m.

E em outubro a H_s ainda apresentou certa variação, principalmente entre os dias 6 e 24. Neste intervalo de dias, a mínima e máxima altura foi de 0,4 m e 2,6 m. A partir do dia 25 a altura não apresentou grande variação, estando basicamente entre o intervalo de 1 e 1,5 m.

Os menores valores de H_s registrados foram de 0,6 m nos meses de julho e novembro de 2010; de 0,5 m em abril, agosto e setembro de 2010; e de 0,4 m maio, junho, outubro e dezembro de 2010, e de janeiro a abril de 2011.

Para o T_p , ao longo de todo o ano foi possível verificar a ocorrência conjunta de máximos e mínimos valores (Fig. 12). O que difere, portanto, esta característica de onda é o valor médio de cada mês, bem como o valor mais frequente. Desta forma, os valores médios de T_p entre 6,6 - 6,9 foram observados entre os meses de novembro de 2010 a fevereiro de 2011, porém no que se refere os valores médios de T_p acima de 7 foram observados nos outros meses (máximo de 7,9 em setembro e mínimo de 7,1 em março de 2011). Os valores mais frequentes de T_p foram de 6,1 s (Dezembro 2010 e Fevereiro 2011), 7 s (Maio 2010,

Junho 2010, Agosto 2010, Novembro 2010 e Fevereiro 2011), 7,3 s (Abril 2010 e Abril 2011), 7,6 (Julho 2010 e Setembro 2010), 8,3 (outubro 2010) e 9,6 (Março 2011).

Gráficos mensais dos parâmetros das ondas estão apresentados no apêndice C, assim como os valores médios, mais frequentes, máximos e mínimos de H_s , T_p e $\bar{\theta}$ de *swell* estão sumarizados em tabela.

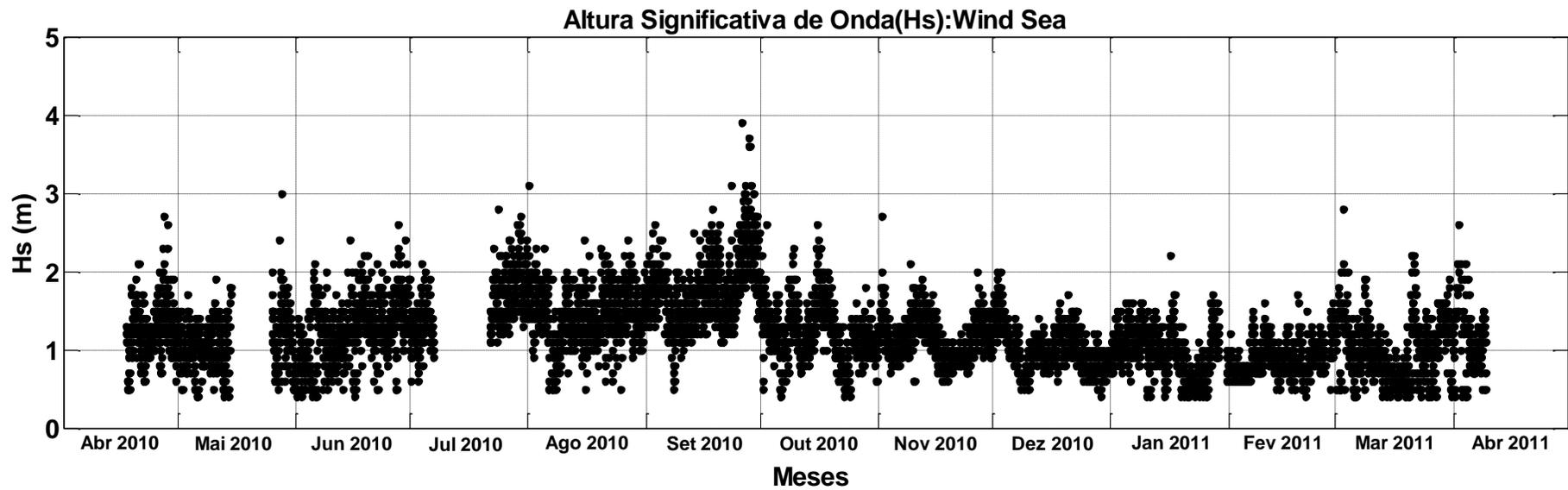


Figura 11: Variação anual da altura significativa (H_s) das ondas *wind sea*.

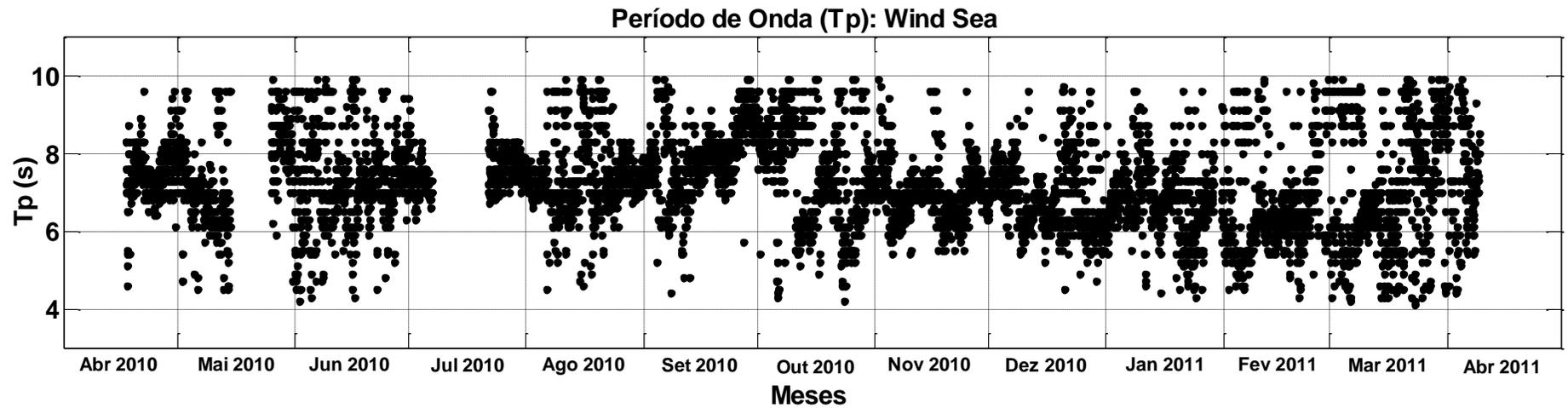


Figura 12: Variação anual do período de pico (T_p) das ondas *wind sea*.

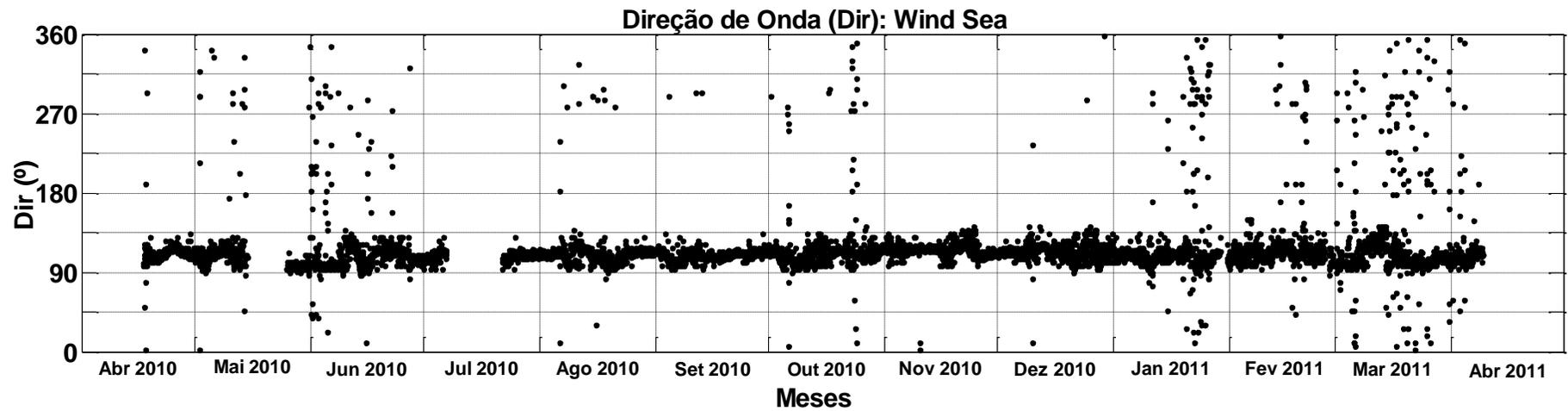


Figura 13: Variação anual da direção (Dir) das ondas *wind sea*.

4.4 Análise Temporal de Ondas *Swell*

As ondas do tipo *swell*, foram observadas em todos os meses na região de estudo, porém com diferentes quantidades de registros. Os meses de maior ocorrência de *swell* foram em junho, outubro e dezembro de 2010 (com 287, 246 e 230 registros, respectivamente) e em fevereiro e março de 2011 (com 320 e 404 registros, respectivamente) (Tab. 1).

Para H_s , o período estudado caracterizou-se pela grande incidência de ondas com baixos valores de altura, pois predominaram ondas de 0,7 m em julho de 2010; 0,6 m nos meses de abril, maio, junho e agosto de 2010; e 0,5 m entre outubro de 2010 e abril de 2011. Os menores valores de H_s de *swell* foram 0,3 m no mês de novembro de 2010; 0,4 m em julho de 2010; e 0,2 m nos demais meses estudados (Fig. 14).

Os maiores valores de H_s de *swell* variaram bastante entre os meses, sendo que em abril de 2011 foi o mês em que se registrou a maior H_s de todo o período estudado, com valor de 4,1 m, seguido pelos meses de junho, setembro e outubro de 2010 e março de 2011, com valores máximos de H_s de 3,6 m. Nos demais meses os maiores valores de H_s registrados estiveram entre 1,2 e 3 m (Fig. 14).

O T_p dessas ondas apresentou mesmo intervalo de variação predominante entre os meses, entre 10 s e 15 s em todos os meses, sendo que a ocorrência de T_p maiores que 17 s foi registrada em junho de 2010 e em janeiro, fevereiro e março de 2011, porém com predomínio de T_p de 12,2 s nos meses de abril de 2010 a janeiro de 2011; 10,2 s em fevereiro e março de 2011; e 11,4 s em abril de 2011 (Fig. 15).

A direção das ondas do tipo *swell* (Fig. 16) que alcançaram a área de estudo foi dividida por setores, sendo eles: norte ($0^\circ\text{Az} - 22^\circ\text{Az}$ e $337^\circ\text{Az} - 360^\circ\text{Az}$), nordeste ($23^\circ\text{Az} - 67^\circ\text{Az}$), leste ($68^\circ\text{Az} - 112^\circ\text{Az}$) e sudeste ($113^\circ\text{Az} - 157^\circ\text{Az}$). A maior ocorrência de ondas foi proveniente da direção leste, representando 45,72% das ocorrências ao longo de todo o período estudado. Os meses de junho e outubro de 2010 e março de 2011 apresentaram as maiores ocorrências de *swell* de leste, com 198, 143 e 165 registros de ocorrência. A ocorrência de *swell* de norte apresentou ocorrência baixa (6,97%), mas ainda assim havendo registro na maioria dos meses, desta forma os meses de maior incidência de *swell* de norte foram os meses de junho de 2010, com 25 ocorrências, e março de 2011, com 43 registros. (Tab. 1).

A menor incidência de *swell* ao longo do estudo foi *swell* proveniente de nordeste (4,38%), o qual não atingiu 10 registros de onda na maioria dos meses, contudo os meses de janeiro, fevereiro e março de 2011 foram os que apresentaram maiores quantidades de registros (17, 15 e 22 ocorrências, respectivamente).

As ondas *swell* de sudeste foram as que tiveram a segunda maior frequência, com 14,65%, predominando nos meses de janeiro (43 registros) e fevereiro de 2011 (117 registros), sendo expressivas também nos meses de outubro e dezembro de 2010 e março de 2011.

Tabela 1. Total de registros de *swell* e classificação quanto a origem da onda, com suas respectivas quantidades de ocorrência em cada mês estudado.

	Abr 2010	Mai 2010	Jun 2010	Jul 2010	Ago 2010	Set 2010	Out 2010	Nov 2010	Dez 2010	Jan 2011	Fev 2011	Mar 2011	Abr 2011
Total de Registros	38	196	287	17	97	94	246	67	230	194	320	404	89
<i>Swell</i> de Norte	2	15	25	14	5	1	13	1	12	18	14	43	6
<i>Swell</i> de Nordeste	3	10	9	0	1	1	8	2	8	17	15	22	4
<i>Swell</i> de Leste	17	99	198	0	75	90	143	36	76	23	66	165	54
<i>Swell</i> de Sudeste	2	12	24	0	1	2	35	7	35	43	117	44	12

Swell de Norte ($0^\circ\text{Az} - 22^\circ\text{Az}$ e $337^\circ\text{Az} - 360^\circ\text{Az}$); *Swell* de Nordeste ($23^\circ\text{Az} - 67^\circ\text{Az}$), *Swell* de Leste ($68^\circ\text{Az} - 112^\circ\text{Az}$) e *Swell* de Sudeste ($113^\circ\text{Az} - 157^\circ\text{Az}$).

Gráficos mensais dos parâmetros das ondas estão apresentados no apêndice D, assim como os valores médios, mais frequentes, máximos e mínimos de H_s , T_p e $\bar{\theta}$ de *swell* estão sumarizados em tabela.

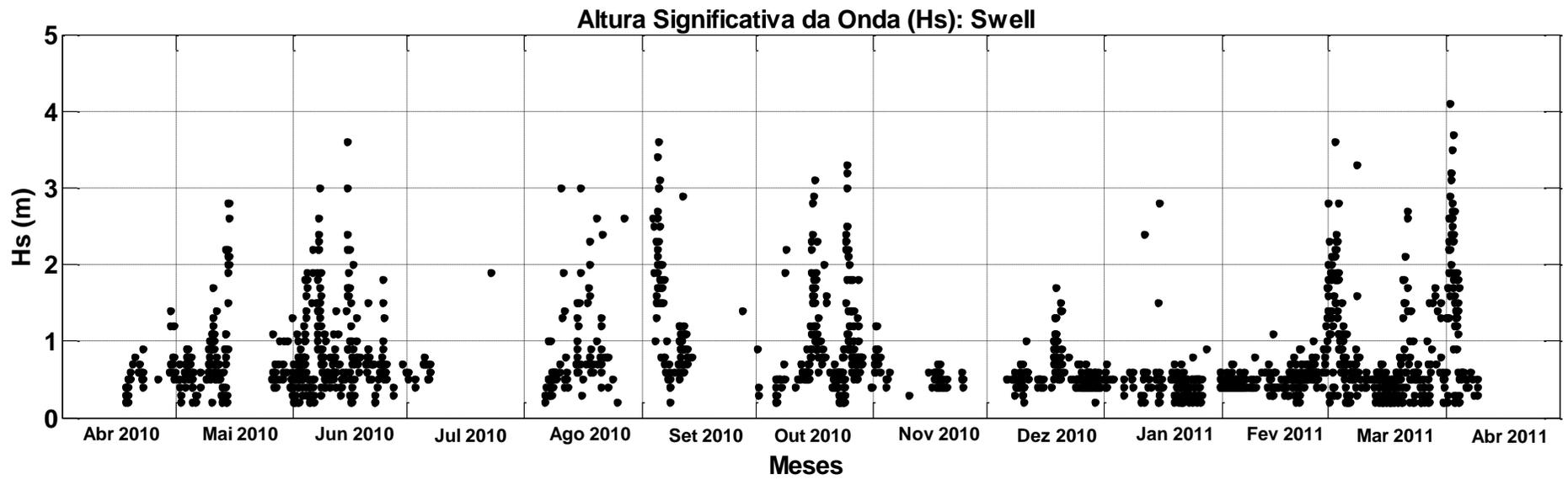


Figura 14: Variação anual da altura significativa (H_s) das ondas *swell*.

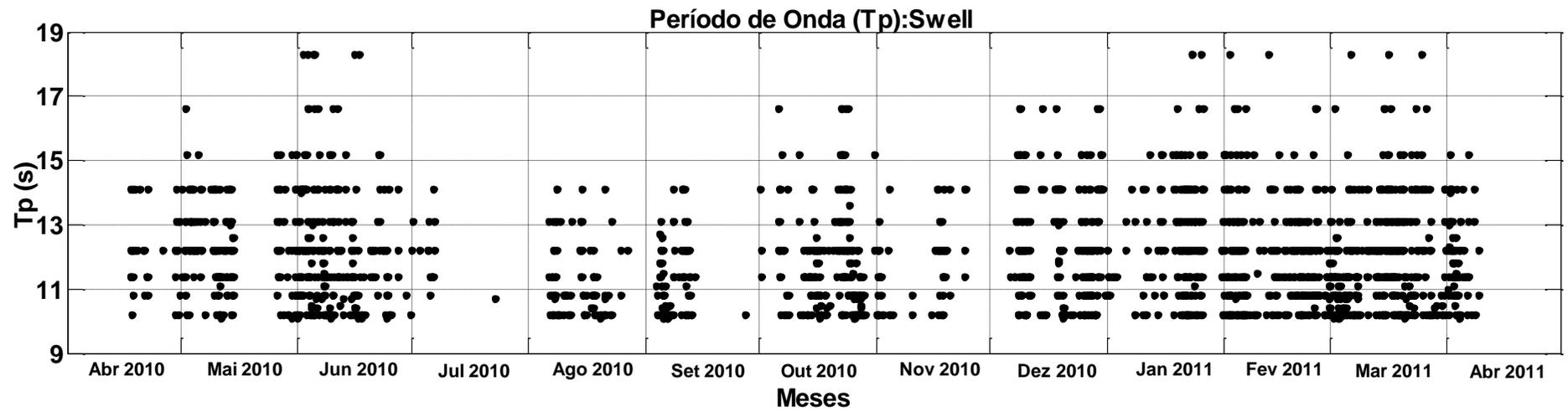


Figura 15: Variação anual do período de pico (T_p) das ondas *swell*.

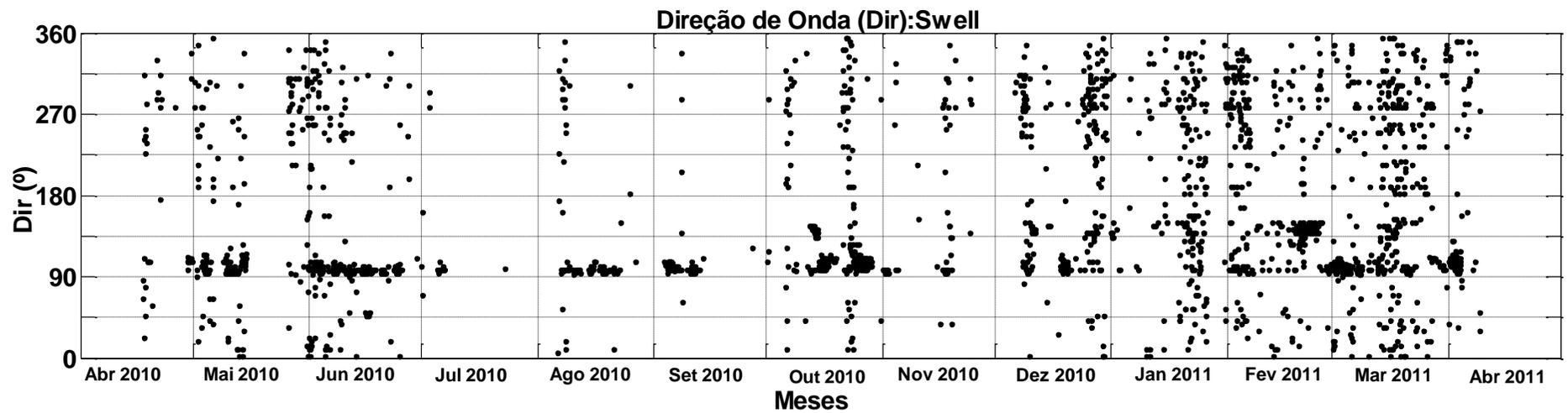


Figura 16: Variação anual da direção (Dir) das ondas *swell*.

4.5 Análise Espacial de Ondas *Wind Sea*

A partir dos mapas espaciais de $\bar{\theta}$ e H_s das ondas é possível observar a modificação da direção das ondas da área 3 para a área 1, assim como a redução da altura das ondas.

Em abril de 2010 nota-se um aumento na ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110°, e uma diminuição de ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° da área 3 para a área 1. As ondas com $\bar{\theta}$ de 110° a 120° foi predominante na área 3 com quase 60% de ocorrência, a qual reduziu para 45% na área 2 e 40% na área 1. Enquanto que a ocorrência de ondas $\bar{\theta}$ entre 120° e 130° sofreu um pequeno aumento, de pouco menos de 5% na área 3 para próximo de 10% nas demais áreas. A H_s das ondas apresentou uma redução gradativa da área 2 para a área 1, enquanto que da área 3 para as demais áreas essa redução foi bastante expressiva; predominaram ondas com H_s entre 1 e 2 m e pequena ocorrência de altura entre 2 e 3 m na área 3. E na área 1 e 2 observou-se grande ocorrência de ondas com H_s de até 1 m. (Fig. 17).

No mês de maio de 2010 (Fig. 18) houve maior variação quanto às ondas com direção entre 90° e 100°, as quais na área 3 apresentaram cerca de 30% de ocorrência, reduzindo para 29% e 17% na área 2 e 1 respectivamente. Em relação à $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° houve um pequeno aumento e em seguida redução na ocorrência da área 3 para a área 1. Foi observada uma redução na frequência da $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° na área 3 (32%) para a área 2 (24%) e posteriormente aumentando para 38% na área 1. Neste mês foram registradas ondas com $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° na área 1, além de aumento na ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 120° e 130°, sendo que na área 3 a frequência de ocorrência era de 5%, e na área 1 de 14%. A H_s das ondas na área 3 foi predominantemente entre 1 e 2 m, porém com uma pequena ocorrência de ondas com H_s entre 2 e 3 m, sendo que da área 3 para a área 1 esse predomínio foi modificado para ondas de até 1 m.

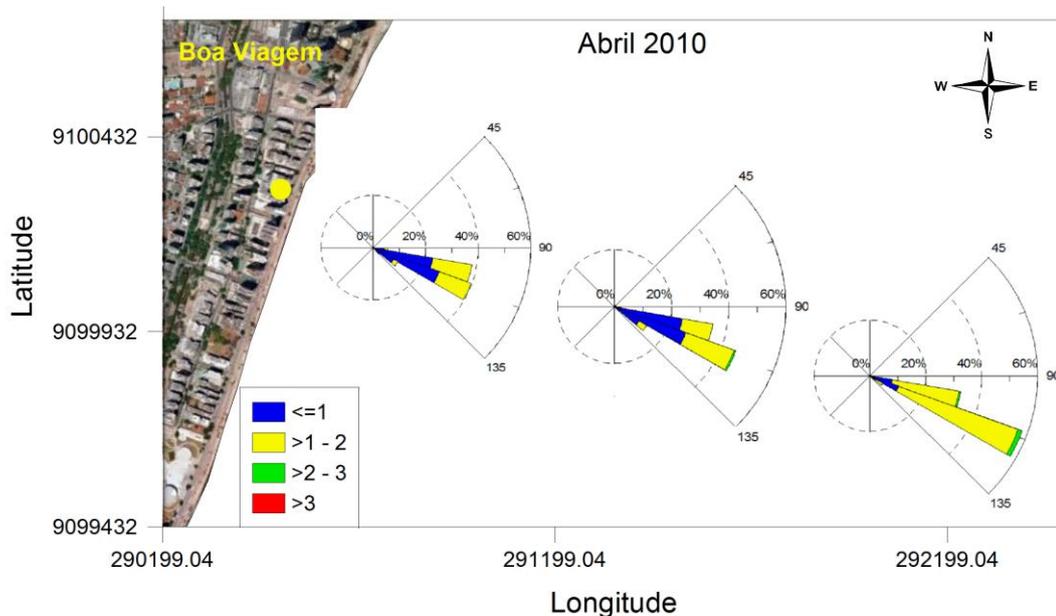


Figura 17: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de abril de 2010.

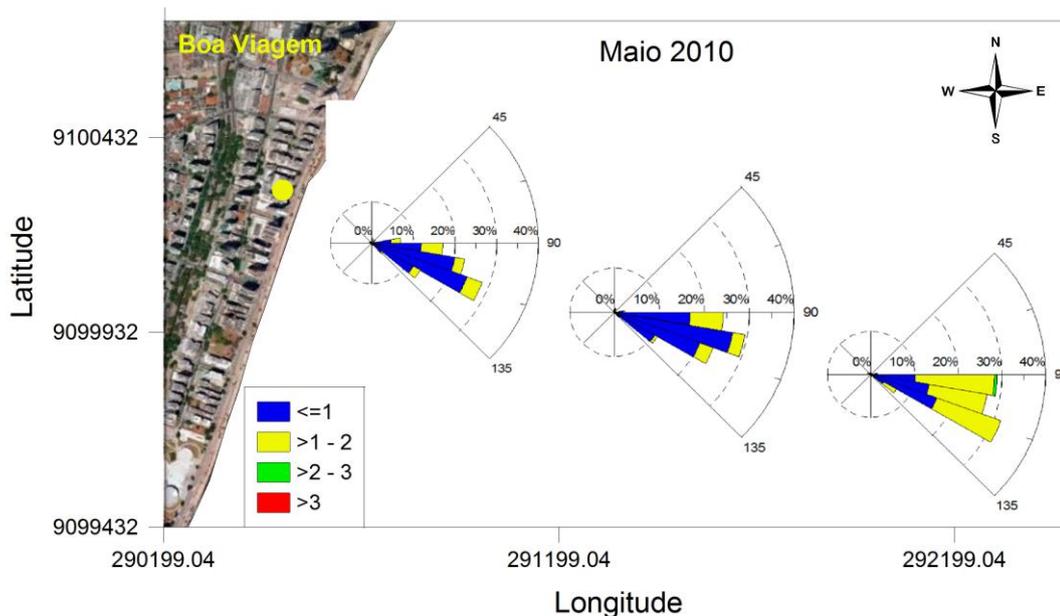


Figura 18: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de maio de 2010.

No mês de junho de 2010 (Fig. 19) a frequência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 120° reduziu da área 3 para a área 1; para as $\bar{\theta}$ entre 120° e 130° houve um pequeno aumento da área 3 para a área 2, porém essa frequência voltou a diminuir da área 2 para a área 1. Além disso, observou-se a ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° (6%) e entre 130° e 140° (4%) na área 1. A H_s de onda predominante na área 3 foi entre 1 e 2 m, com pequena

ocorrência de ondas entre 2 e 3 m; nas demais áreas, ondas com H_s de até 1 m foram mais expressivas, mas ainda com grande contribuição de ondas com 1 a 2 m.

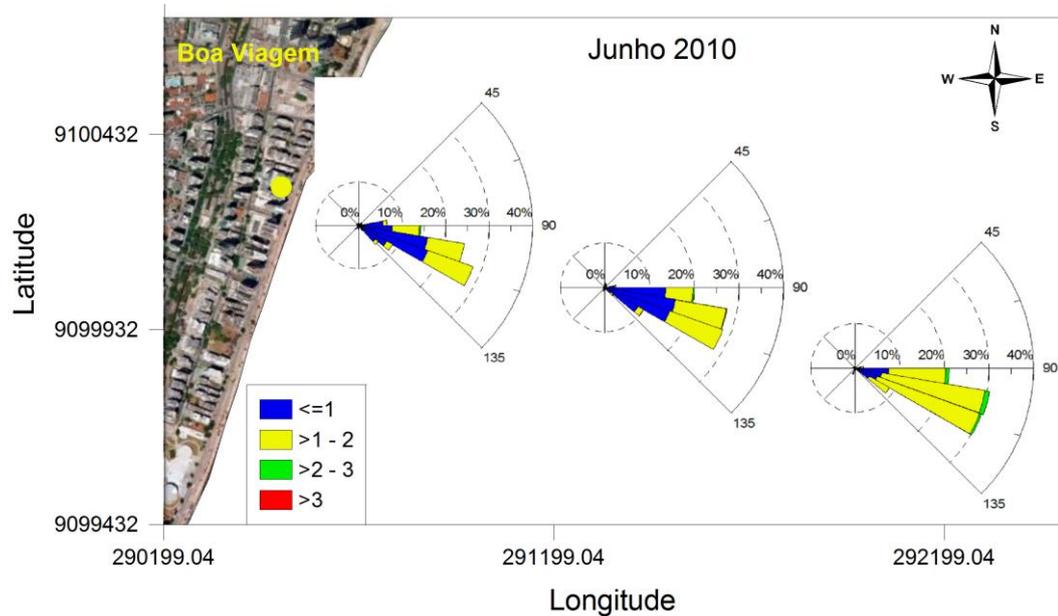


Figura 19: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de junho de 2010.

Em julho de 2010 (Fig. 20) a maior ocorrência foi de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° nas três áreas de análise sendo que esta frequência não sofreu grande variação ao longo das áreas. Porém ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° sofreram redução na frequência de ocorrência, pois na área 3 foi de aproximadamente 36%, na área 2 foi de 30% e na área 1 foi de 24%. Nas áreas 1 e 2 observou-se registros de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° e entre 120° e 130° . Para a H_s de onda, na área 3 houve ocorrência expressiva de ondas com H_s entre 2 m e 3 m, e nas demais áreas esta H_s apresentou uma frequência bastante reduzida. A H_s predominante nas três áreas foi entre 1 e 2 m, sendo que nas áreas 1 e 2 ondas com H_s de até 1 m apresentaram ocorrência maior do que na área 3, na qual esta variação de altura foi inferior a 5%.

Em agosto de 2010 (Fig. 21), na área 3, predominaram ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° , com frequência de 50%, a qual apresentou uma redução nas áreas 2 e 1 (45% e 37%, respectivamente). Em contrapartida, a frequência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° , a qual na área 3 esteve em torno de 33%, sofreu um suave aumento da área 3 para a área 1, obtendo nesta última, frequência de 39%. A frequência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° foi baixa, apresentando 12% na área 3, diminuindo para 9% na área 2 e 5% na área 1. A $\bar{\theta}$ entre 120° e 130° foi praticamente inexistente na área 3, contudo nas áreas 2 e 1 apresentaram frequência

de 6% e 9%, respectivamente. A H_s predominante neste mês foi entre 1 e 2 m para as três áreas. Na área 3 houve uma pequena ocorrência de ondas com H_s entre 2 e 3 m, assim como ondas com H_s de até 1 m. Nas áreas 2 e 1 a ocorrência de ondas de até 1 m foi bem mais expressiva do que na área 3.

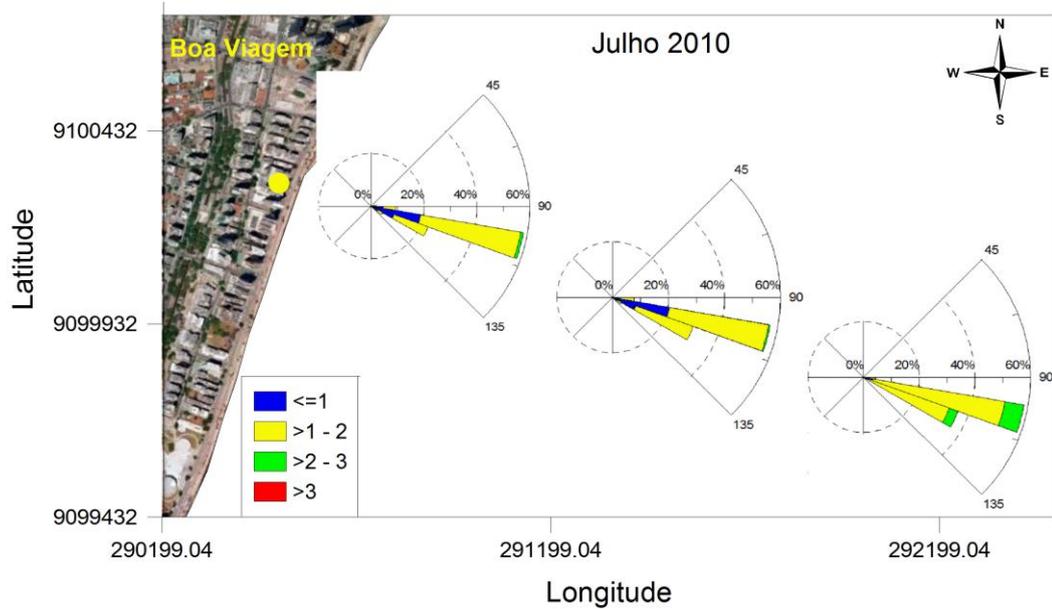


Figura 20: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de julho de 2010.

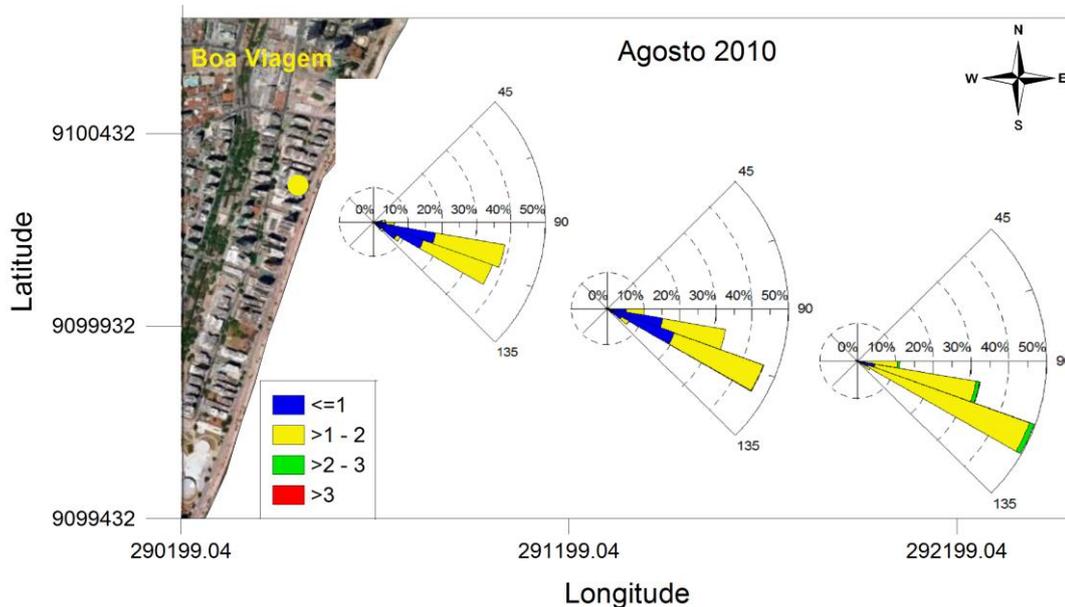


Figura 21: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de agosto de 2010.

Em setembro de 2010 (Fig. 22) houve uma diminuição da frequência de ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° e um aumento na frequência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° da área 3 para a área 1. A H_s predominante nas três áreas foi entre 1 e 2 m, sendo que na área 3 houve grande ocorrência de ondas entre 2 e 3 m, além de pequena ocorrência de ondas de até 1 m e acima de 3 m. Nas áreas 1 e 2, não houve registros de ondas acima de 3 m e ondas com H_s entre 2 e 3 m apresentaram baixa ocorrência, assim como ondas de até 1 m.

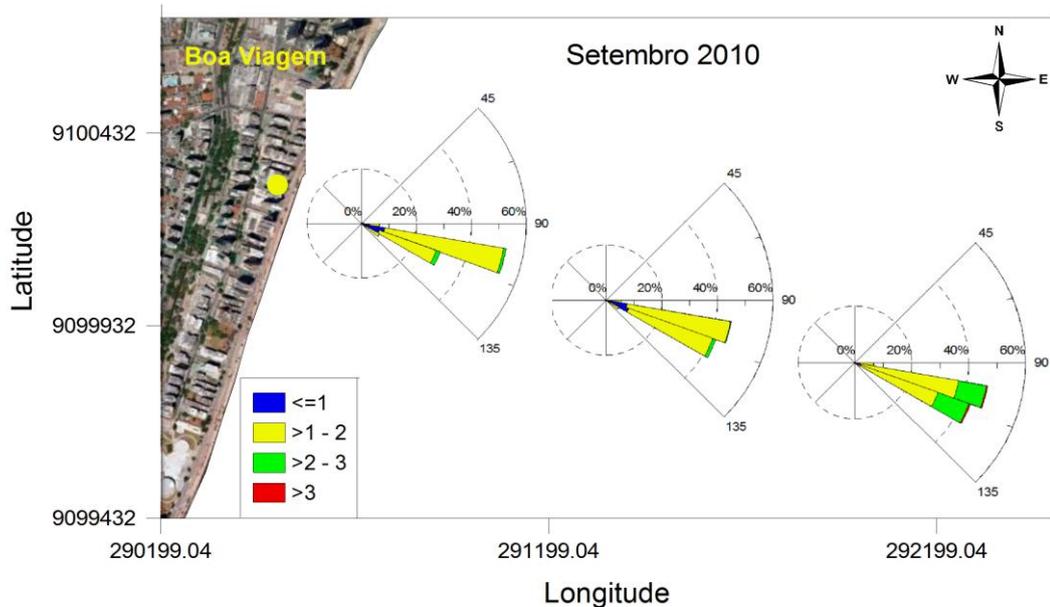


Figura 22: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de setembro de 2010.

Em outubro de 2010 (Fig. 23) houve redução na frequência de ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 120° e aumento na frequência de ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 120° e 130°, sendo que esta última aumentou de 8% para 22% da área 3 para a área 1. E a $\bar{\theta}$ entre 130° e 140° apresentou um pequeno aumento, com uma frequência de 7% na área 1. Quanto a H_s de onda, houve uma pequena ocorrência de ondas de até 1 m e entre 2 m e 3 m e predomínio de ondas com H_s entre 1 e 2 m na área 3. Nas áreas 1 e 2 o predomínio foi de ondas com até 1 m e menor ocorrência de ondas entre 1 m e 2 m.

Em novembro de 2010 (Fig. 24) predominaram ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° nas três áreas, porém da área 3 para a área 1 houve uma redução na frequência de ocorrência de aproximadamente 64% para 50%. De semelhante modo, para $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° houve uma pequena redução, inferior a 5%. Foi observado um aumento de aproximadamente 10% na frequência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 120° e 130° (de 12% na área 3 para 22% na área 1). A H_s da

ondas na área 3 foi predominantemente ente 1 m e 2 m, com pequena ocorrência de ondas com até 1 m. Nas áreas 1 e 2, essa predominância inverteu-se, ou seja, predominaram ondas com H_s de até 1 m, com pequena ocorrência de ondas entre 1 m e 2 m.

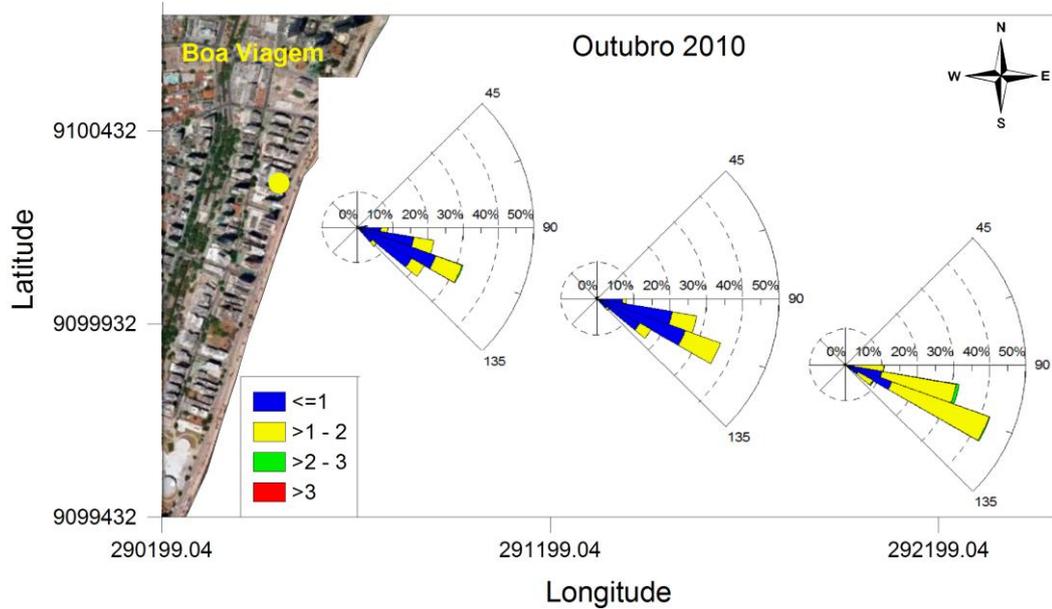


Figura 23: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de outubro de 2010.

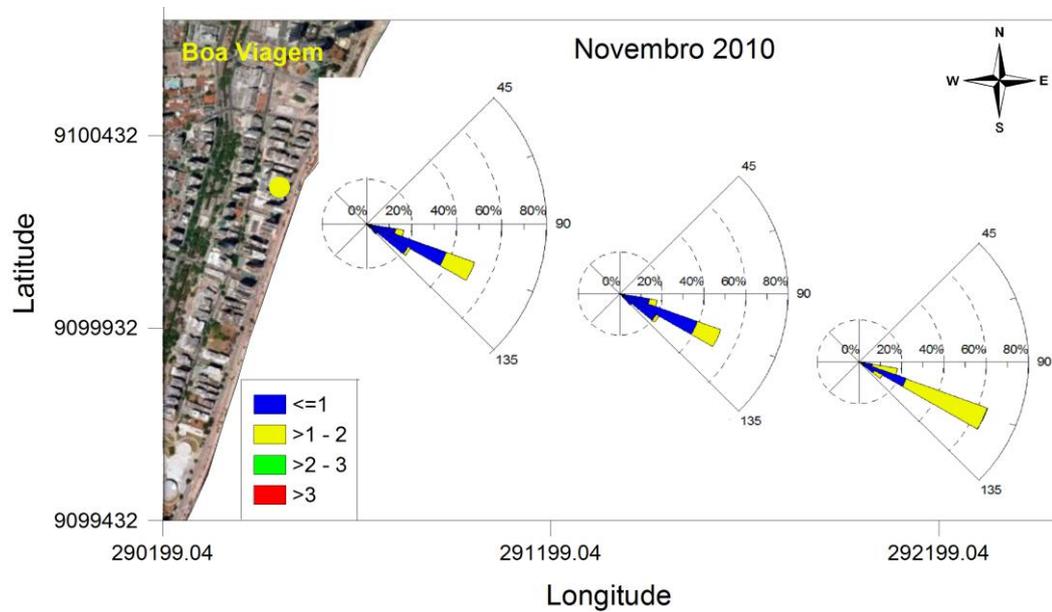


Figura 24: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de novembro de 2010.

Em dezembro de 2010 (Fig. 25) ocorreu uma redução de aproximadamente 18% na frequência de ocorrência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 120° da área 3 para a área 1, e um aumento em torno de 17% na frequência de ocorrência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 120° e 140°. Neste mês a H_s que predominou na área 3 foi entre 1 e 2 m, mas ainda com grande ocorrência de ondas de até 1 m. Por outro lado, nas áreas 1 e 2 houve baixa ocorrência de ondas com H_s entre 1 m e 2 m, predominando ondas de até 1 m.

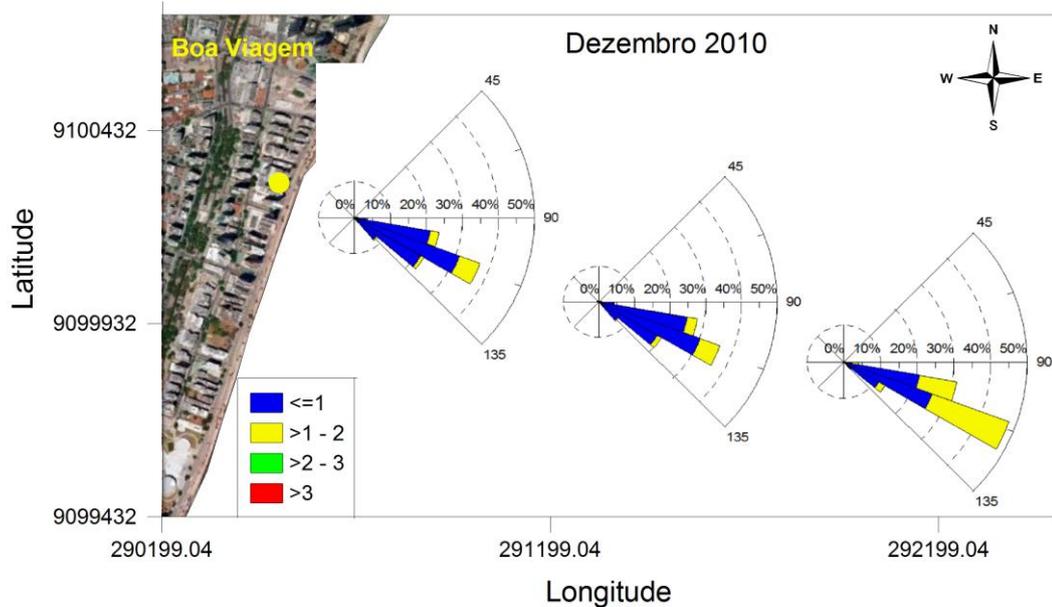


Figura 25: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de dezembro de 2010.

Semelhante ao mês anterior, no mês de janeiro de 2011 (Fig. 26) a frequência de ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ ente 100° e 120° reduziu progressivamente da área 3 para a área 1, enquanto que a frequência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° e entre 120° e 130° sofreu um pequeno aumento. A característica da variação da H_s das ondas também foi semelhante ao mês anterior.

Em fevereiro de 2011 (Fig. 27) a ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 120° sofreu redução, enquanto que a ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 120° e 140° aumentou significativamente da área 3 para a área 1. A H_s de onda predominante nas três áreas foi de até 1 m, sendo que na área 3 a ocorrência de ondas com H_s entre 1 e 2 m foi muito mais expressiva do que nas demais áreas, onde sua frequência foi muito baixa (inferior à 5%).

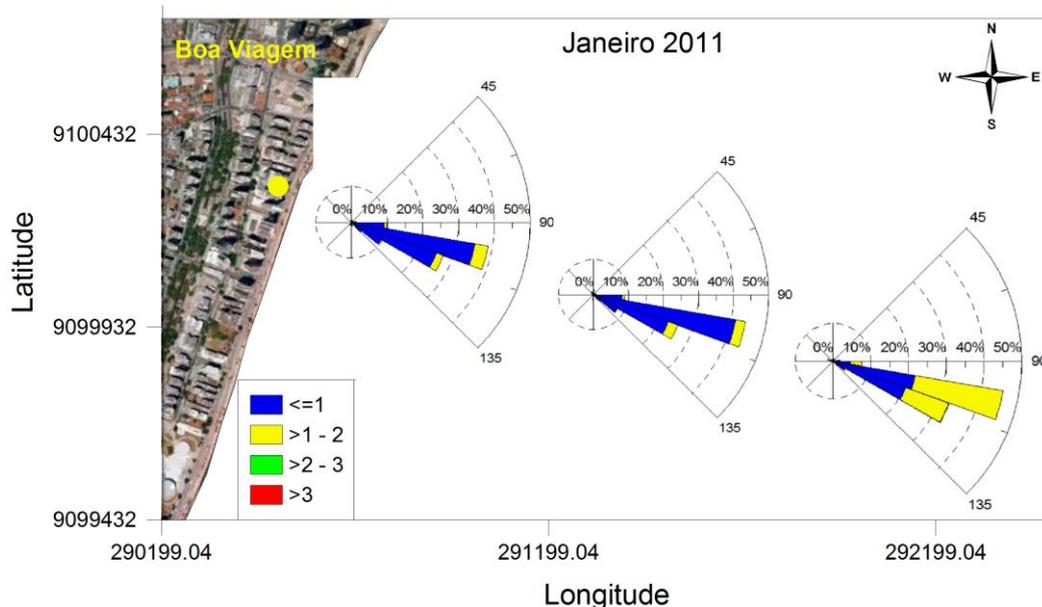


Figura 26: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de janeiro de 2011.

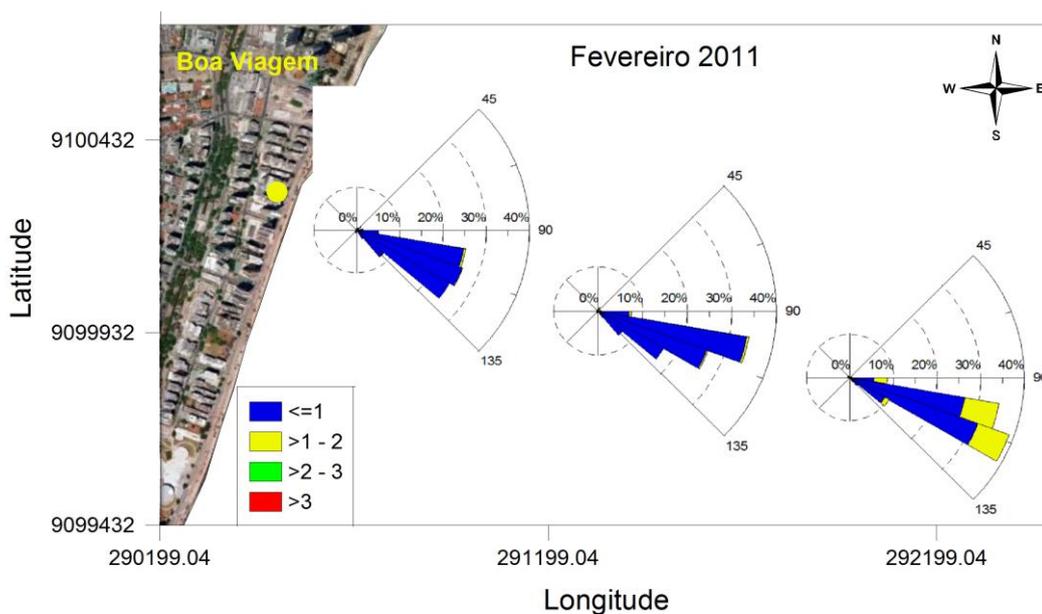


Figura 27: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de fevereiro de 2011.

Em março de 2011 (Fig. 28) houve uma grande redução na frequência das ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 110° e um aumento para a $\bar{\theta}$ entre 110° e 150° . Além disso, houve uma grande redução na ocorrência de ondas com H_s entre 1 e 2 m da área 3 para a área 1, tendo em vista que este intervalo de variação predominou apenas na área 3, e somente nesta área houve registro, baixíssima ocorrência, de ondas com H_s entre 2 e 3 m, além de ondas de até 1 m. Nas demais áreas predominaram ondas de até 1 m.

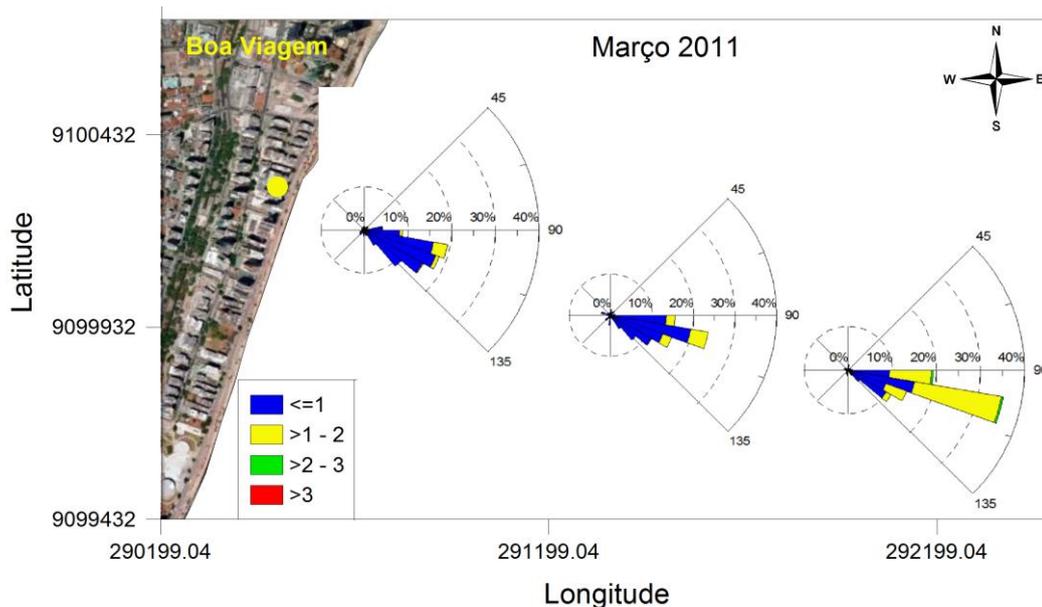


Figura 28: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de março de 2011.

Em abril de 2011 (Fig. 29) as ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 110° apresentaram diminuição na sua frequência de ocorrência, e as ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 130° apresentaram aumento, também da área 3 para a área 1. A H_s da onda diminuiu da área 3 para a área 1, tendo em vista a ocorrência de ondas entre 2 m e 3 m de altura na área 3 e ausência destas nas áreas 1 e 2, além da diminuição de registros de ondas com H_s entre 1 e 2 m e aumento de registros de ondas com até 1 m nesta áreas.

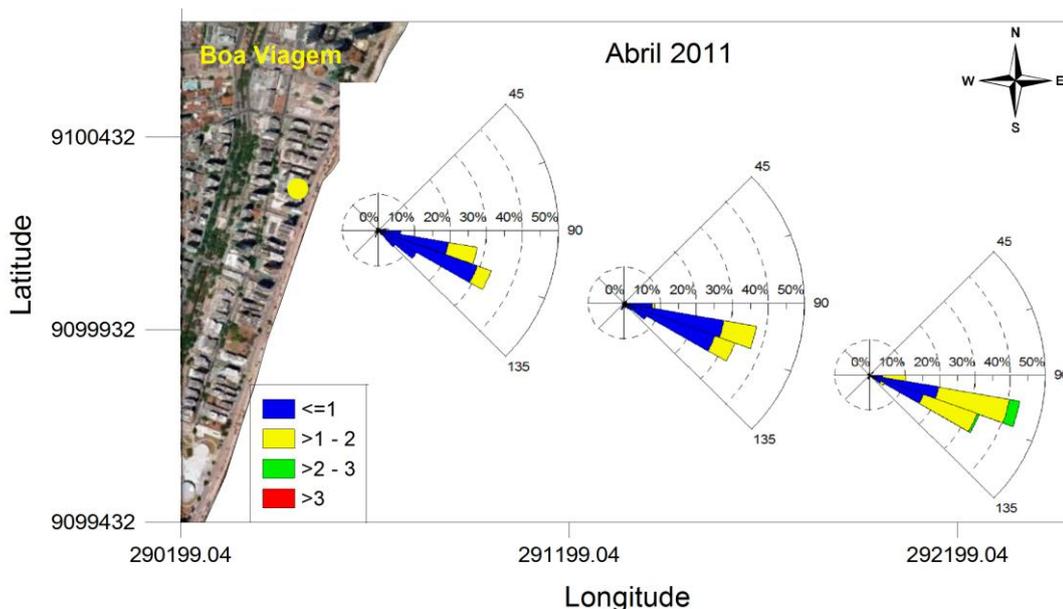


Figura 29: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas *wind sea* nas três áreas de análise para o mês de abril de 2011.

4.6 Análise Espacial de Ondas Swell

No mês de abril de 2010 houve baixa incidência de *swell* na área de estudo (Fig. 30), com predomínio de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° nas três áreas de análise, porém com algumas ocorrências de ondas provenientes das demais direções. A H_s de onda na área 1 e 2 foi essencialmente de até 1 m, sendo que na área 3 esta também foi predominante, além de ondas entre 1 e 2 m de altura.

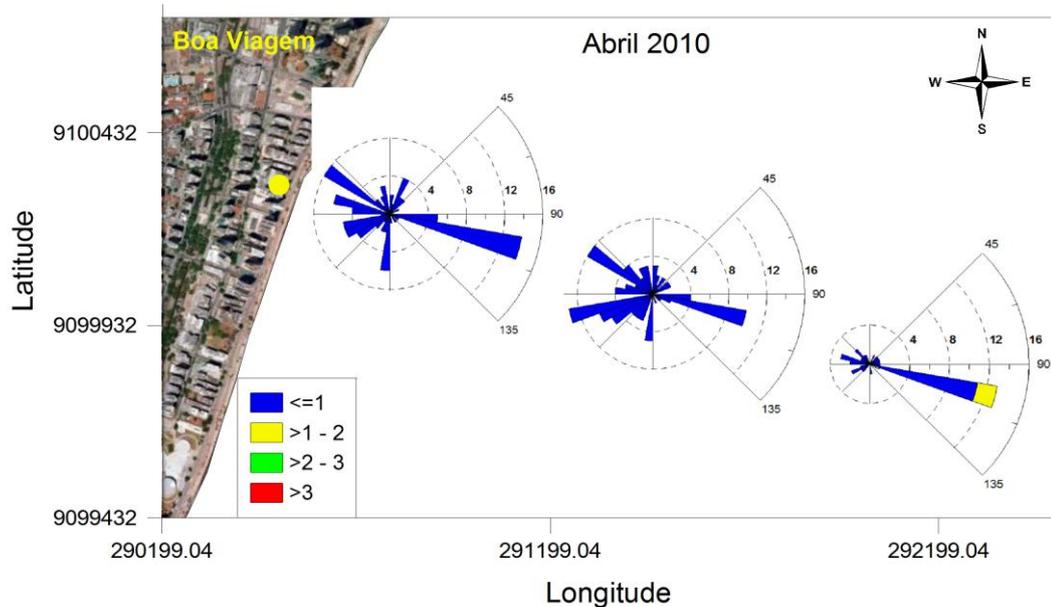


Figura 30: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de abril de 2010.

Em maio de 2010 (Fig.31) houve incidência de ondas provenientes de várias direções nas três áreas. Na área 1 e 2 observa-se um aumento na frequência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° assim como entre 100° e 110°. Na área 3 foram observadas ondas basicamente da $\bar{\theta}$ entre 90° e 110°. Quanto à H_s de onda, o predomínio nas três áreas foi de ondas com H_s de até 1 m, com registro de ondas superiores à 3 m na área 1 e 2.

Em junho de 2010 (Fig. 32), na área 3 houve incidência, basicamente, de ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 90° e 100°. Porém, na área 2 pode-se observar aumento na quantidade de ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° e uma diminuição na quantidade de ondas entre 90° e 100°, sendo que este padrão continuou até a área 1, mas com adição ao aumento de ocorrência de ondas entre 80° e 90°. Em todas as áreas predominaram ondas de

até 1 m de altura, com ocorrência de ondas entre 1 e 2 m nas áreas 1 e 2. Contudo, na área 3 foi registrada uma pequena ocorrência de ondas com H_s superior a 3 m.

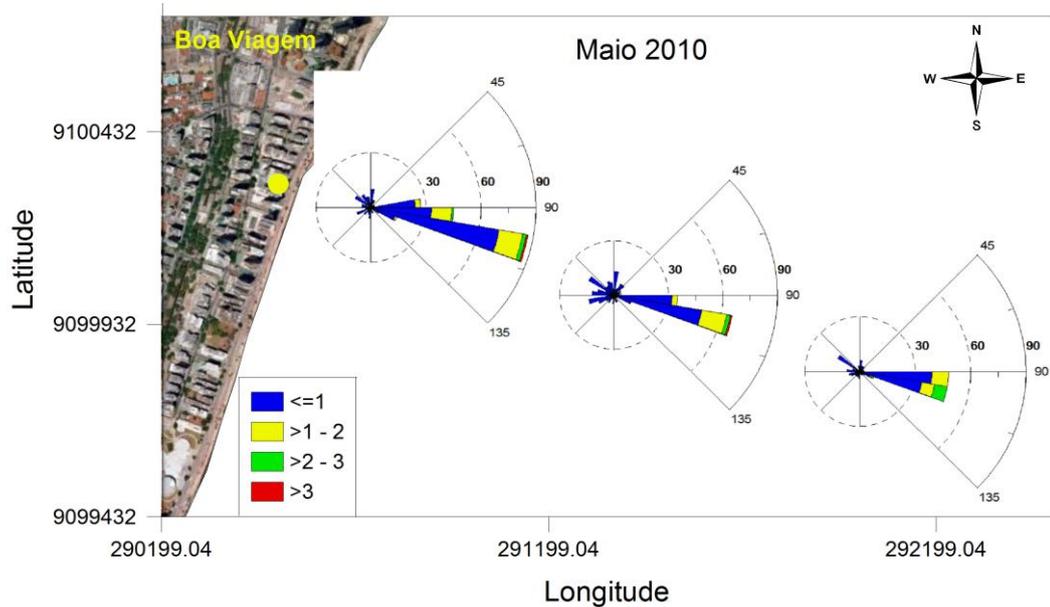


Figura 31: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de maio de 2010.

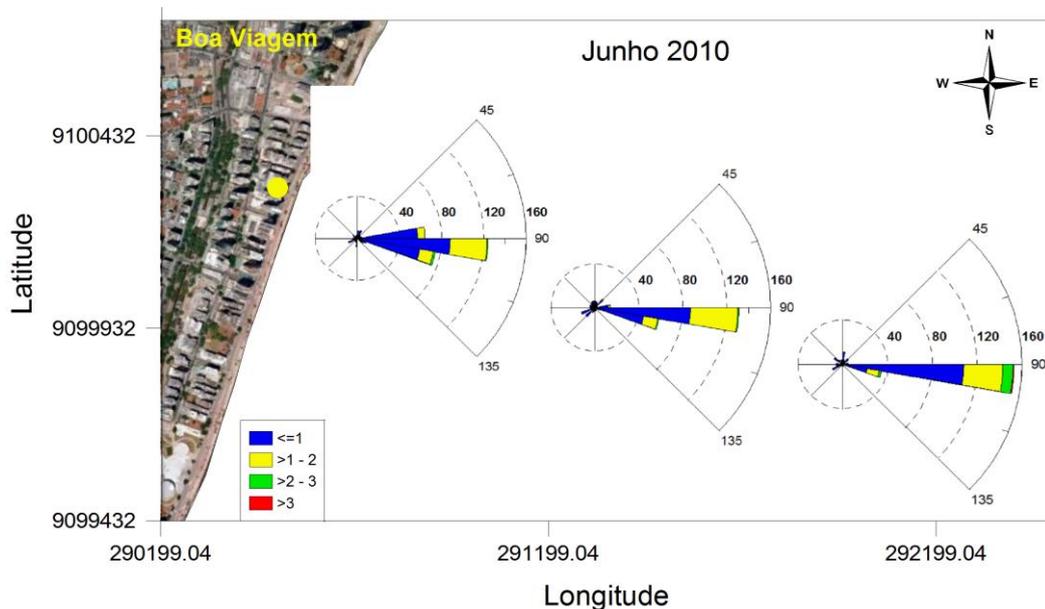


Figura 32: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de junho de 2010.

Em julho de 2010 foi registrada baixa ocorrência de *swell* em todas as áreas de análise (Fig. 33). As ondas registradas para a área 1 apresentaram $\bar{\theta}$ predominante entre 80° e 110° , enquanto que nas demais áreas houve predomínio de ondas entre 90° e 100° . Houve maior

ocorrência de ondas com H_s de até 1 m, com pequena ocorrência de ondas entre 1 e 2 m de altura.

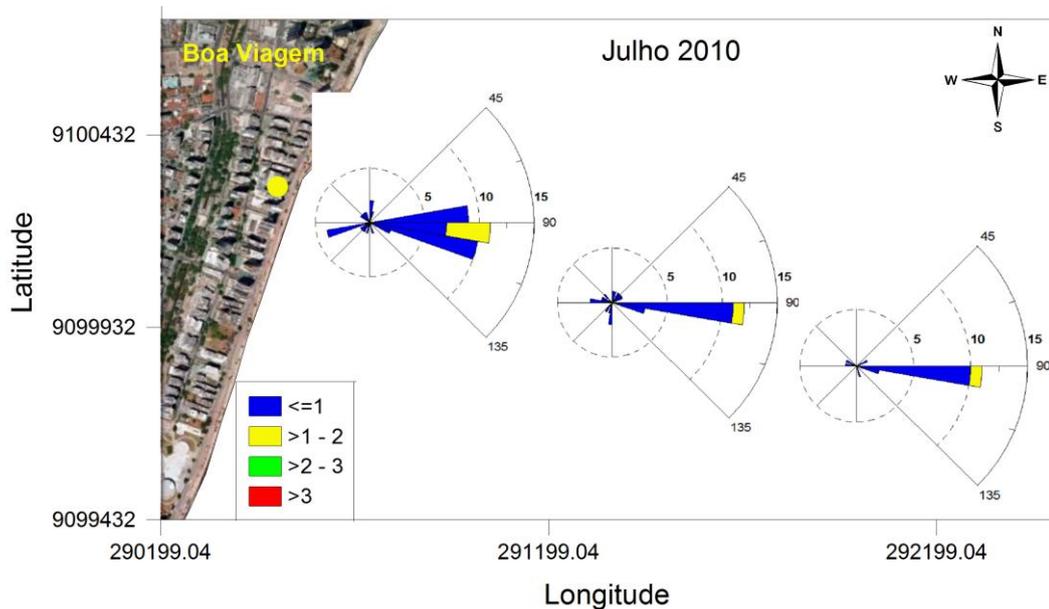


Figura 33: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de julho de 2010.

No mês de agosto de 2010 (Fig. 34) o padrão de variação da frequência de ocorrência em relação à $\bar{\theta}$ das ondas foi semelhante ao mês anterior. Desta forma, na área 3 predominaram ondas de $\bar{\theta}$ entre 90° e 100°, com baixa ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110°; na área 2 observa-se que houve uma pequena redução na frequência das ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 90° e 100°, assim como um aumento quanto às ondas provenientes da direção entre 100° e 110°; e na área 1 houve um aumento na frequência das ondas com direção entre 90° e 100° bem como das ondas com $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° e entre 100° e 110°. Ondas com H_s entre 2 e 3 m foram observadas apenas na área 3, porém ondas menores que 2 m foram observadas em todas as áreas de análise, com predomínio de ondas de até 1 m.

Em setembro de 2010 (Fig. 35) a $\bar{\theta}$ das ondas foi preferencialmente entre 90° e 100°, na área 3 observa-se também uma pequena ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 100° e 110°, sendo que a frequência deste intervalo de $\bar{\theta}$ aumentou da área 3 para a área 1, assim como as ondas com $\bar{\theta}$ entre 110° e 120° e entre 80° e 90°. Neste mês houve maior ocorrência de ondas acima de 1 m nas três áreas de análise, sendo que na área 3 houve registro de ondas com altura superior a 3 m.

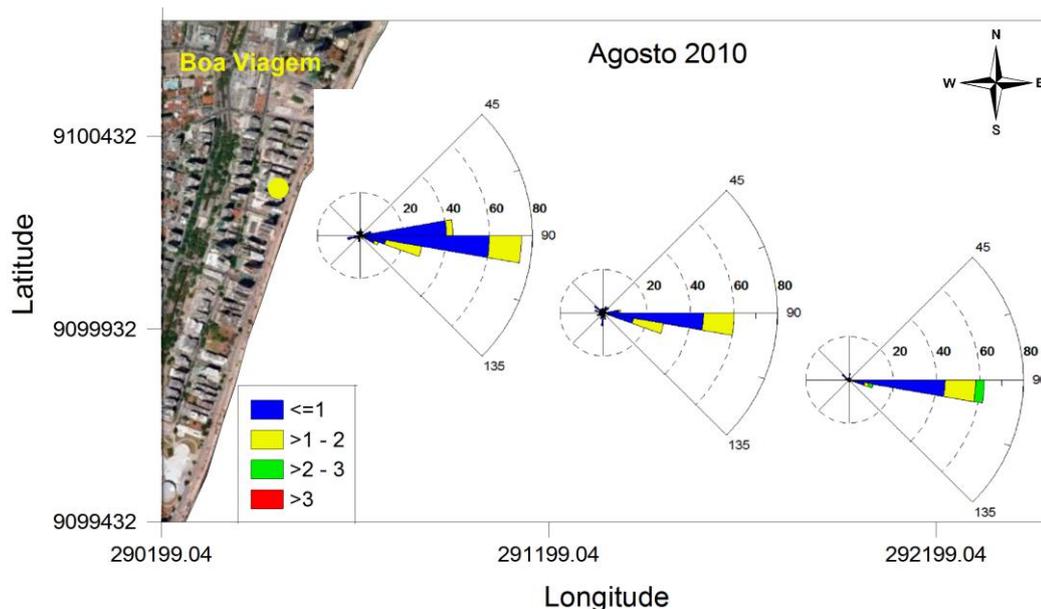


Figura 34: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de agosto de 2010.

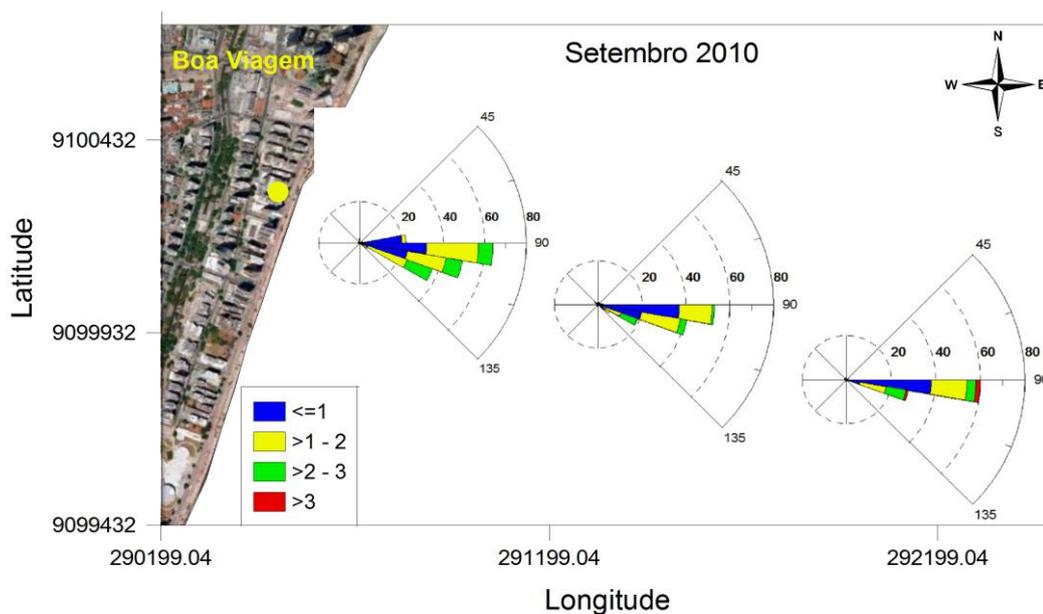


Figura 35: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de setembro de 2010.

Em outubro de 2010 (Fig. 36), houve maior incidência de ondas de $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° em toda a área de estudo. Pode-se observar o crescente aumento da ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° e entre 110° e 120° , além disso na área 1, especificamente, observa-se também a presença de ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° . Ondas provenientes das demais direções também foram registradas, porém com uma frequência muito pequena. A H_s

de onda que predominou neste mês foi de até 1 m, sendo que da área 3 para a área 1 a ocorrência de ondas com esta H_s foi crescente, porém houveram ondas com altura entre 1 e 2 m e em menor escala ondas entre 2 e 3 m. Além disso foi registrada a ocorrência de ondas com H_s superior a 3 m na área 3.

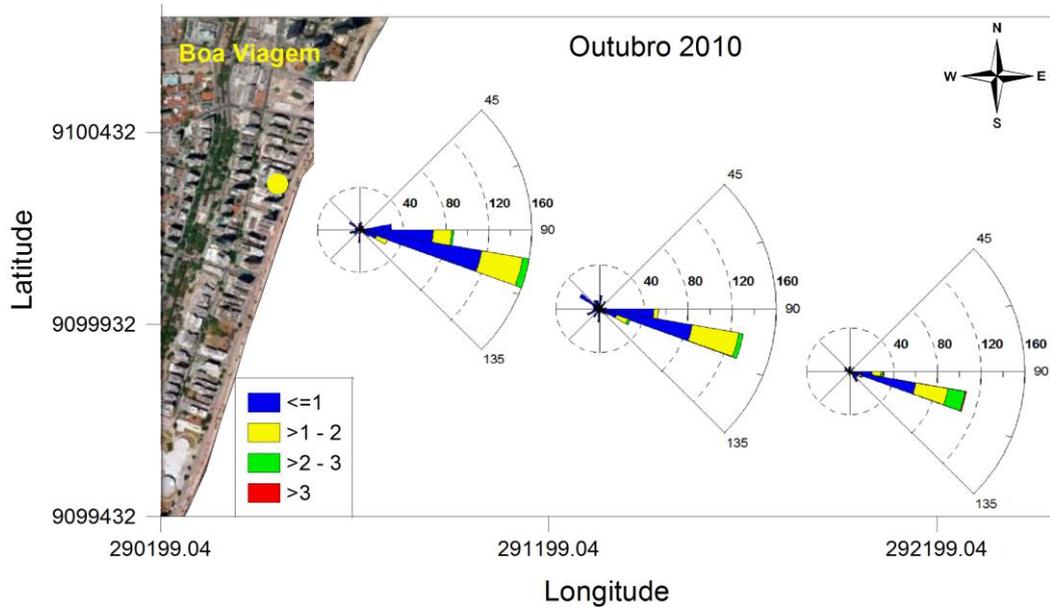


Figura 36: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de outubro de 2010.

Em novembro de 2010 (Fig. 37), na área 3, incidiram ondas basicamente da $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° , apesar de que neste mês a ocorrência de *swell* foi baixa. Nas demais áreas houve uma redução de ondas provenientes da $\bar{\theta}$ já citada e houve um aumento na ocorrência de ondas de direções distintas, provenientes dos quatro quadrantes, sendo que na área 1 observa-se um aumento expressivo na quantidade de ondas com $\bar{\theta}$ entre 80° e 90° . Neste mês a H_s de onda foi de até 1 m, com pequena ocorrência de ondas com H_s entre 1 e 2 m nas três áreas.

Em dezembro de 2010 (Fig. 38) predominaram ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 90° e 110° , ocorrendo um pequeno aumento do número de ondas vindo da $\bar{\theta}$ entre 100° e 110° da área 3 para a área 2. Neste mês observa-se um maior número de ondas provenientes de várias outras direções, principalmente quando se analisa a área 2. A H_s das ondas registradas para este mês foi predominantemente de até 1 m com pequena quantidade de ondas com H_s entre 1 e 2 m.

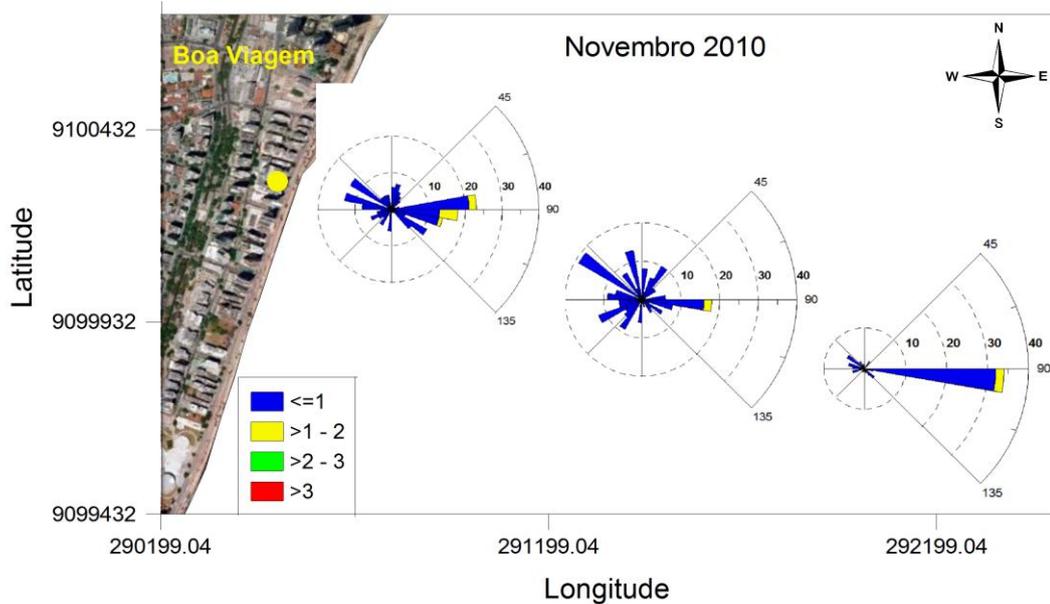


Figura 37: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de novembro de 2010.

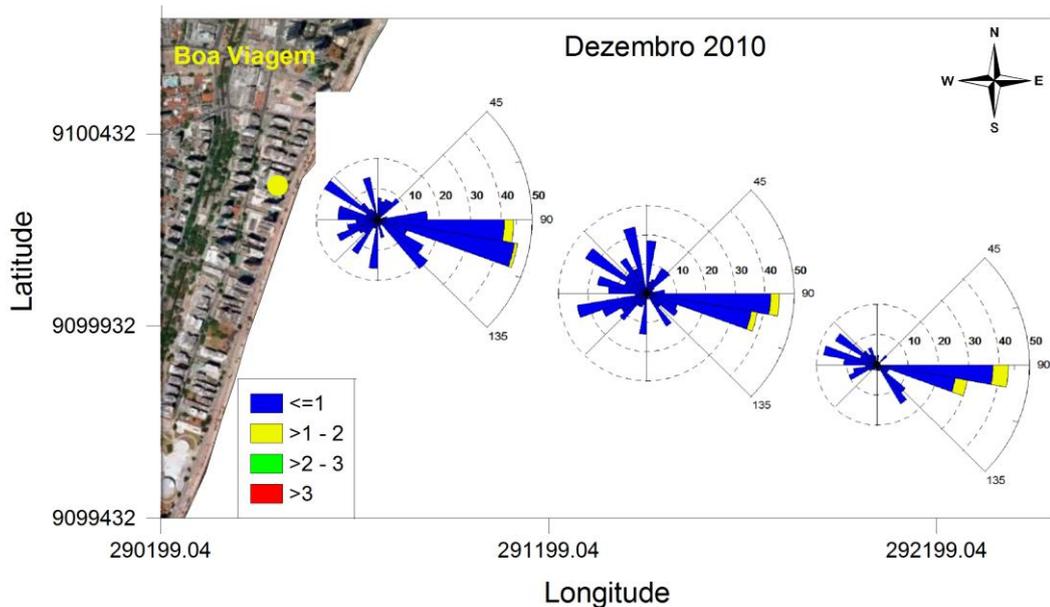


Figura 38: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de dezembro de 2010.

Em janeiro de 2011 (Fig. 39) a incidência de ondas do tipo *swell* foi baixa, com ondas provenientes de direções distintas, sendo que na área 3 a maior ocorrência foi de ondas com $\bar{\theta}$ entre 130° e 150° , na área 2 foi entre 0° e 10° e na área 2 foi entre 100° e 110° . A H_s das ondas foram de até 1 m.

Em fevereiro de 2011 (Fig. 40), na área 3, predominaram ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 140° e 150°, sendo que a quantidade de ondas desta direção reduziu bastante da área 3 para a área 1, tendo em vista que na área 3 foram registradas cerca de 65 ondas, enquanto que na área 1 há apenas 21 registros de onda. Por outro lado, houve um aumento principalmente na quantidade de ondas provenientes da $\bar{\theta}$ entre 80° e 140°. A H_s das ondas neste mês foi basicamente de até 1 m.

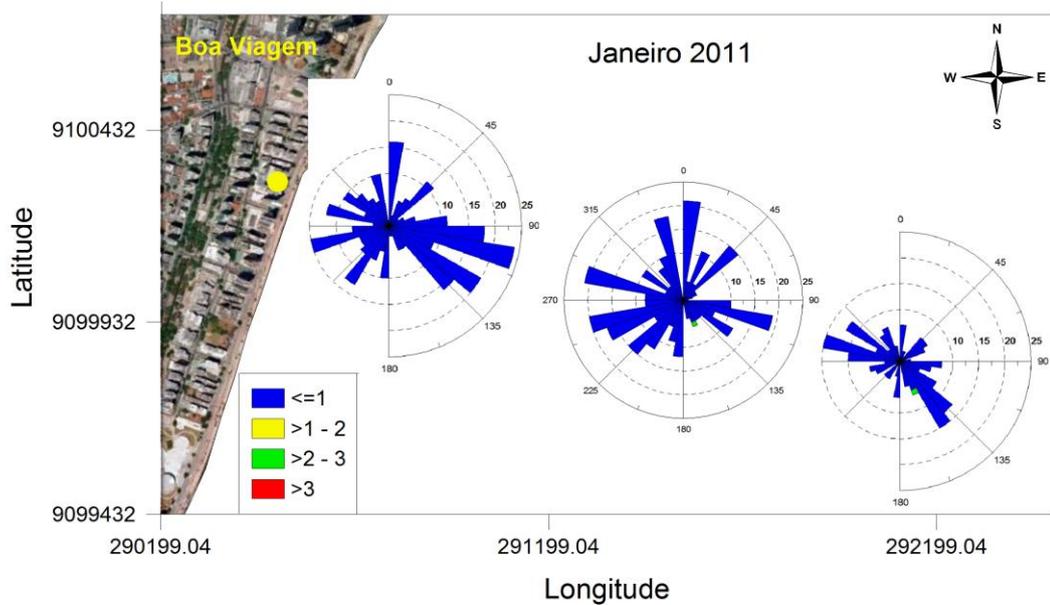


Figura 39: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de janeiro de 2011.

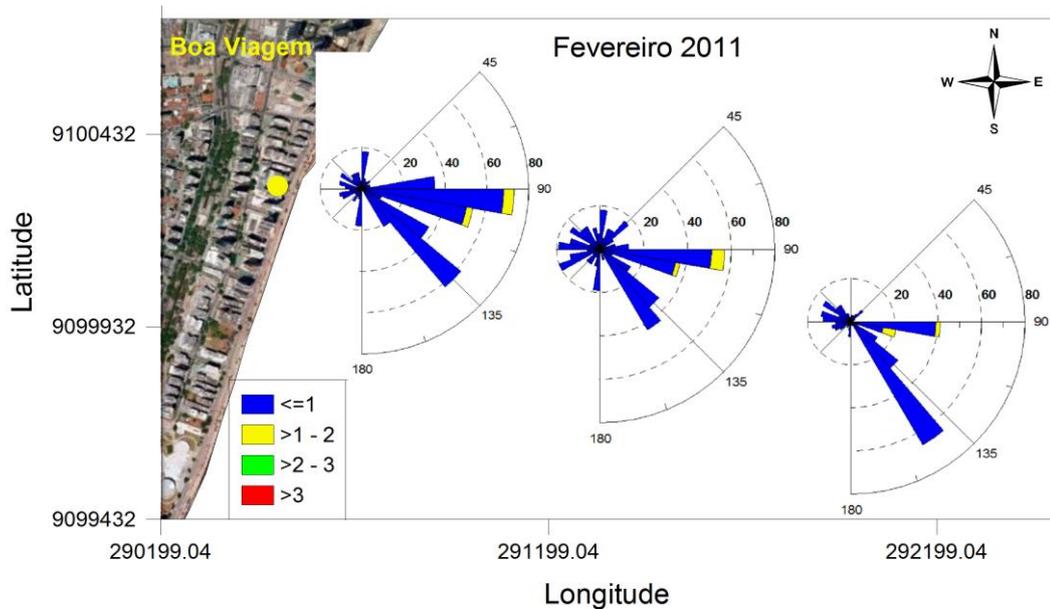


Figura 40: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de fevereiro de 2011.

Em março de 2011 (Fig. 41) predominaram ondas provenientes de $\bar{\theta}$ entre 90° e 110°, tendo em vista que na área 1 foi onde houveram mais registros de onda, ocorrendo também nesta área, assim como na área 2, ondas provenientes de $\bar{\theta}$ entre 80° e 90°. Neste mês predominaram ondas com H_s inferior à 2 m, com ocorrência de ondas entre 2 e 3 m, e na área 3 foram registradas também ondas acima de 3 m.

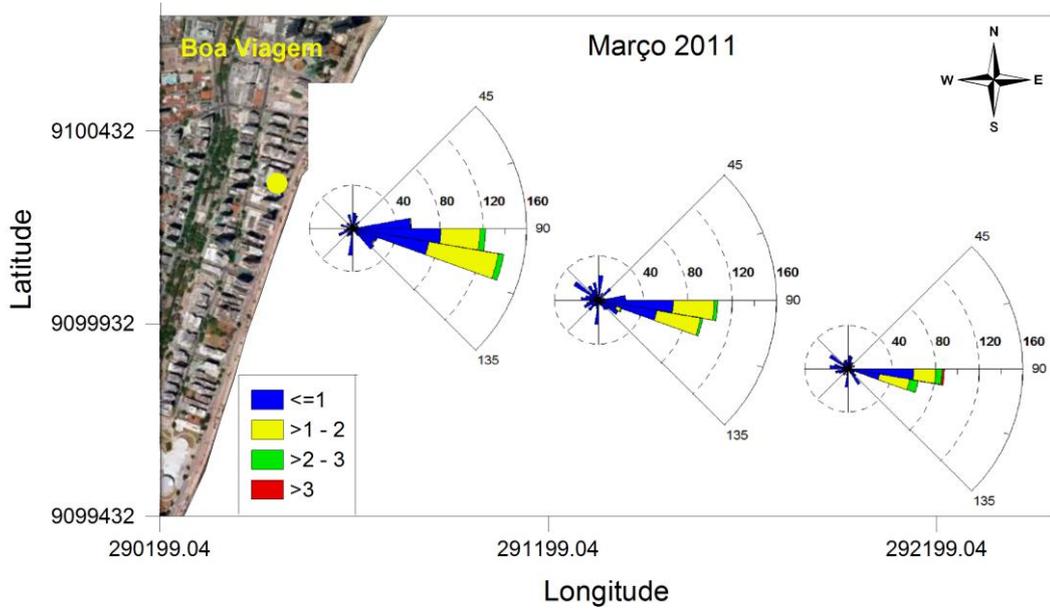


Figura 41: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de março de 2011.

Em abril de 2011 (Fig. 42) predominaram ondas provenientes de $\bar{\theta}$ entre 100° e 110°, sendo que há um aumento na quantidade de ondas registradas da área 3 para a área 1. Além destas ondas, foi observada baixa ocorrência de ondas com $\bar{\theta}$ entre 90° e 100° e entre 110° e 120°. Neste mês houveram registros de ondas com H_s acima de 3 m nas três áreas, porém o predomínio foram de ondas entre 1 e 2 m.

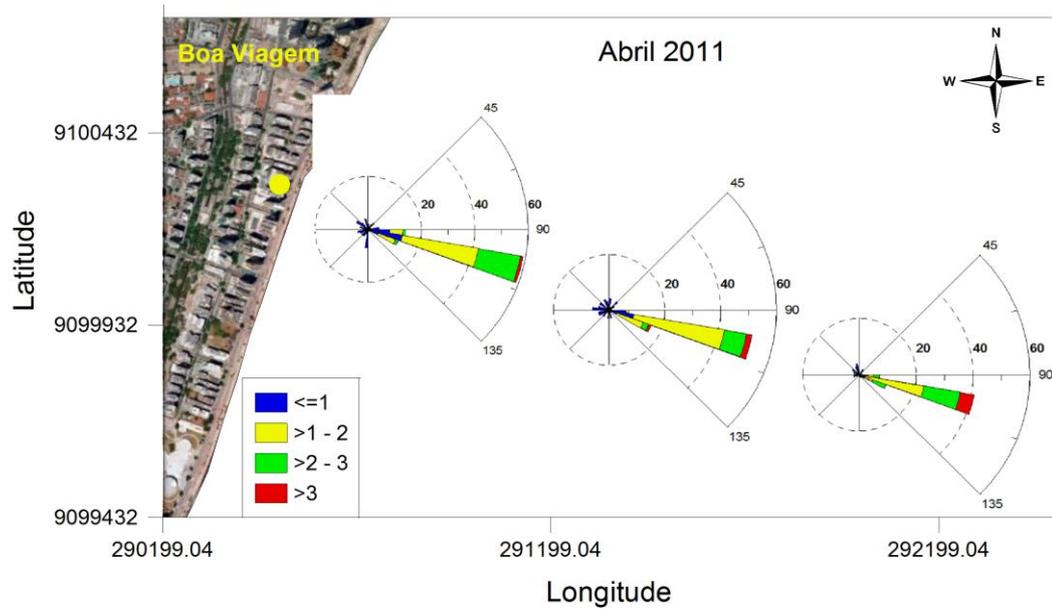


Figura 42: Mapa de variação da direção, altura significativa e frequência de ocorrência de ondas do tipo *swell* nas três áreas de análise para o mês de abril de 2011.

4.7 Análise Espaço-Temporal de Corrente

A velocidade da corrente foi analisada para duas áreas, a área 1 corresponde à região do canal e a área 3 corresponde à região mais externa da área de estudo, sobre o recife de arenito. Pode-se observar uma variação na velocidade da corrente entre as duas áreas ao longo de todos os meses, enquanto que a direção não apresenta diferença marcante.

Entre os meses de abril e agosto de 2010 (Fig. 43 (a, b, c, d, e)) a velocidade da corrente na área 1 foi predominantemente inferior a 1 m.s^{-1} e na área 2 a velocidade foi maior, sendo inferior a $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. A direção mostra a corrente indo preferencialmente para Leste-Sudeste (E-SE), porém com variação para Sudeste e Nordeste em ambas as áreas.

No mês de setembro de 2010 (Fig. 44a) observa-se uma maior velocidade na área 1, ultrapassando 1 m.s^{-1} , mas ainda com predomínio de corrente com velocidade inferior a 1 m.s^{-1} e para a área 2 a velocidade foi basicamente inferior a 2 m.s^{-1} e a direção está bem definida entre E-SE para ambas as áreas.

Em outubro, novembro e dezembro de 2010 (Fig. 44 (b, c, d)) a área 1 foi caracterizada por correntes com velocidade de até $0,75 \text{ m.s}^{-1}$ enquanto que a área 2 foi marcada por velocidades predominantes de até $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Nestes meses a direção também apresentou grande variação, sendo esta entre E e S.

Nos meses de janeiro (Fig. 45a) e fevereiro (Fig. 45b) de 2011 foram observadas baixas velocidades, sendo que neste período predominaram correntes com velocidade de até $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ na área 1 e velocidade predominante de até 1 m.s^{-1} na área 2. A direção esteve definida entre E e S. Já em março (Fig. 45c) e início de abril (Fig. 45d) de 2011 apesar de ainda predominarem velocidades de até $0,75 \text{ m.s}^{-1}$ na área 1 e $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ na área 2, ocorreram vários registros de corrente com velocidades maiores que as citadas. No mês de março a direção modificou bastante (entre 45° e 180°) e no início de abril a variação torna a ser entre E e S.

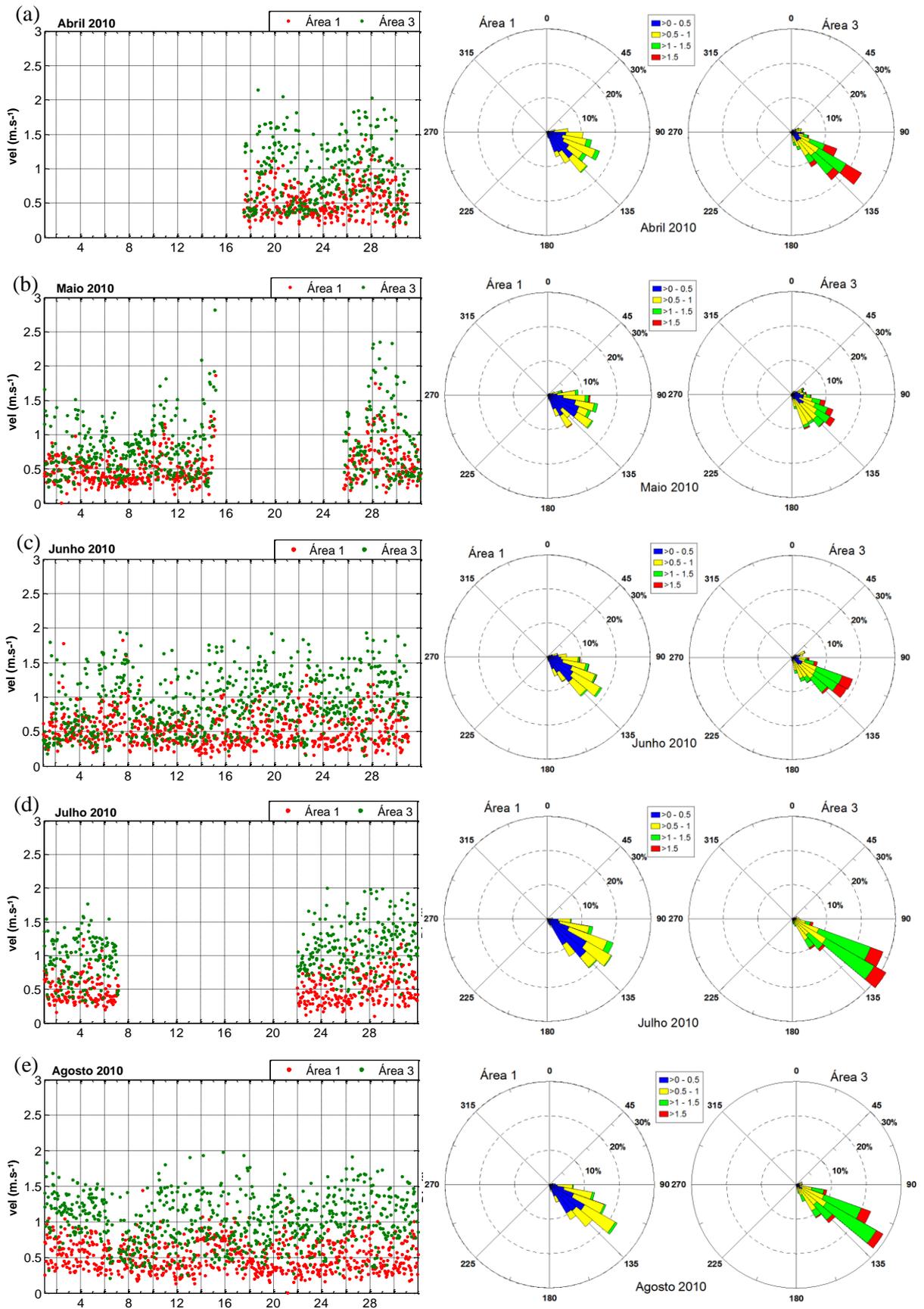


Figura 43: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de abril (a), maio (b), junho (c), julho (d) e agosto (e) de 2010.

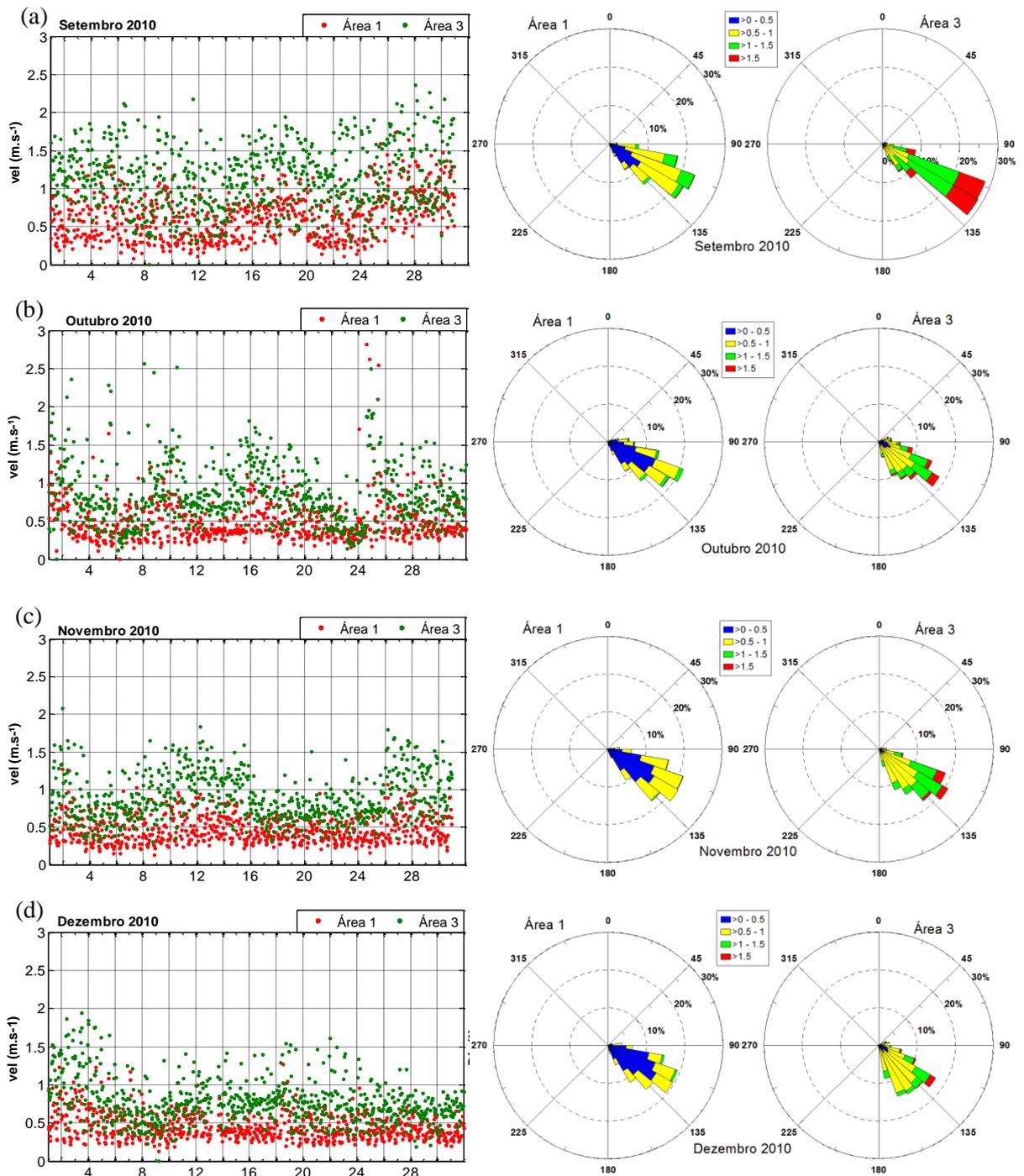


Figura 44: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de setembro (a), outubro (b), novembro (c) e dezembro (d) de 2010.

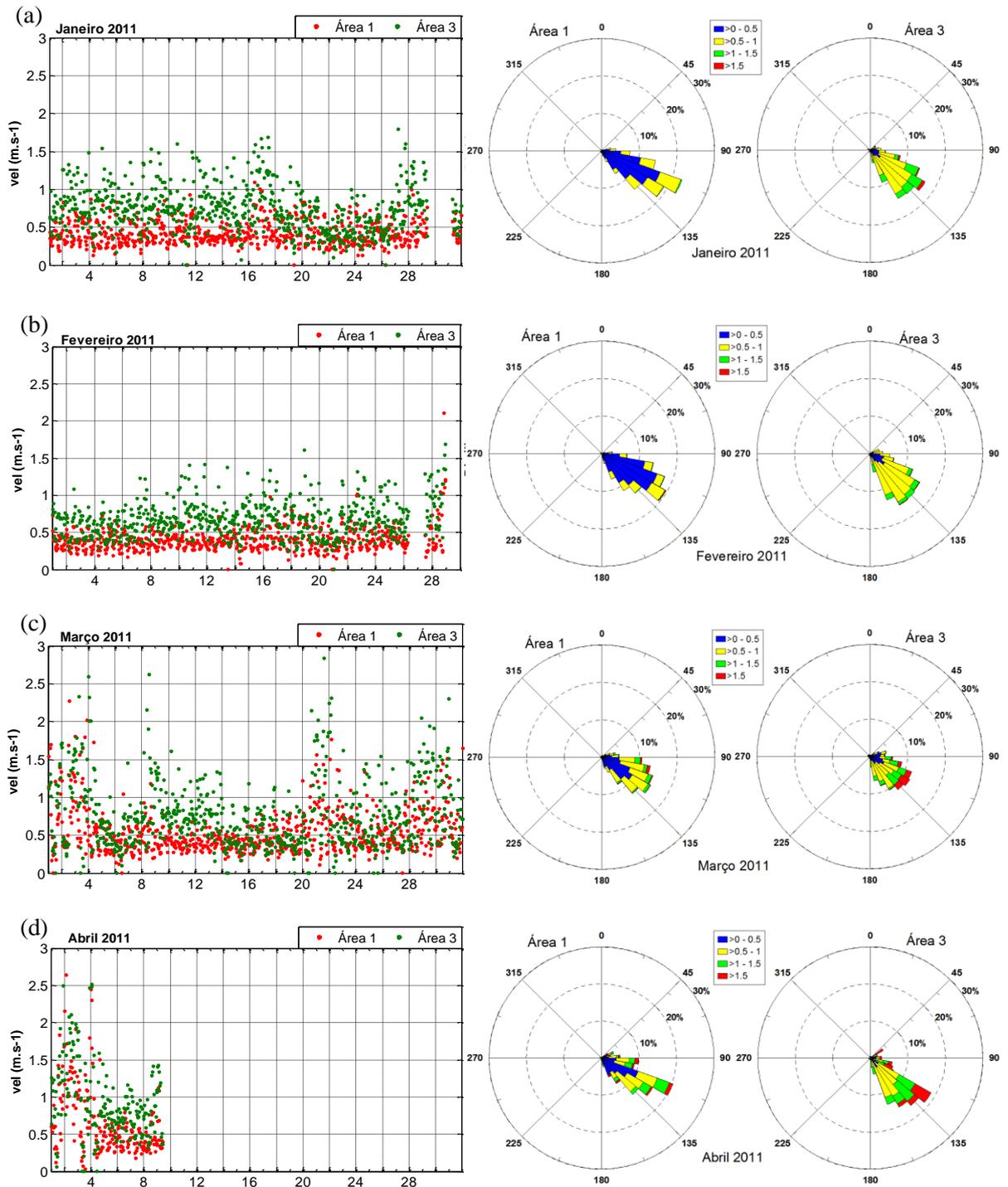


Figura 45: Gráficos de velocidade e direção de corrente para os meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d) de 2011.

CAPÍTULO V – DISCUSSÃO

5.1 Variabilidade Temporal

5.1.1 Altura Máxima das Ondas (H_{max})

O mês que apresentou maiores ondas foi o mês de setembro, sendo este portanto o mês mais energético e em contrapartida os meses que apresentaram menores alturas foram os meses de janeiro e fevereiro de 2011, sendo os meses menos energéticos. Porém apesar do mês de setembro ser o mais energético, foi em abril de 2011 que a maior altura de onda foi registrada, de 4,3 m, estando associada a uma onda do tipo *swell*. Os meses em que foi observada maior ocorrência de ondas maiores estão associados juntamente aos meses em que se tem maior predomínio de ventos com intensidade superior a 6 m.s^{-1} .

Os resultados para a altura máxima assemelham-se com Silva et al. (2011), em estudo no Ceará, em que as maiores ondas (maiores valores de H_{max}) ocorreram no segundo semestre do ano, preferencialmente entre julho e outubro.

5.1.2 Ondas do Tipo *Wind sea*

A altura das ondas *wind sea* no litoral de Recife está intimamente relacionada com a intensidade dos ventos atuantes na região, pois as maiores intensidades do vento foram observados a partir da segunda metade do mês de julho até o início do mês de outubro, período em que o vento sofre uma intensificação devido à migração da ZCIT para uma posição mais ao Norte. Neste período foram observadas também ondas de maior altura, e em contrapartida as menores alturas foram encontradas no início do ano, associadas à velocidades dos ventos de menor intensidade.

A maior H_s de *wind sea* registrada (3,9 m) foi em setembro de 2010, sendo que neste mês houve maior incidência de ondas com altos valores de H_s . Por outro lado, os meses de janeiro e fevereiro de 2011 foram caracterizados pelas menores alturas de onda. Os períodos

de onda mais frequentes foram de 6 s à 7,9 s totalizando 65,97% de ocorrência ao longo de todo o período estudado.

Comparando os resultados encontrados neste estudo com outros trabalhos realizados na mesma área de estudo pode-se dizer que estes resultados estão de acordo com Rollnic (2008), o qual estudou o litoral de Recife a partir de dados obtidos por um ondógrafo InterOcean S4AWI, onde foram observadas maiores alturas de onda em agosto e setembro. E em comparação com outras regiões do nordeste brasileiro, estes resultados acompanham um padrão de variação que pode se assemelhar ao estudo de Cunha (2004), o qual estudou as ondas no litoral de Natal, onde as menores H_s de onda ocorrem no início do ano e as maiores alturas de junho à setembro, assim como observado também por Silva et al. (2011) no litoral do Ceará, apesar destes dois litorais estarem sujeitos a forçantes ambientais diferentes da área de estudo deste trabalho, principalmente devido a orientação geográfica.

Além da caracterização da altura das ondas, tem-se que 94,86% das ondas registradas ao longo do período estudado apresentaram $\bar{\theta}$ preferencial E-SE ($90^\circ - 135^\circ$) estando de acordo com o resultado obtidos por Rollnic (2008), as quais estão diretamente relacionadas aos ventos alísios de sudeste influenciados pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), tendo em vista que este sistema exerce influência sobre a costa brasileira com ventos significativos provenientes de leste, sendo que no início do ano os ventos no litoral do Nordeste é de leste-nordeste, porém em meados do ano com a intensificação sobre o continente da ASAS o litoral nordestino é atingido por ventos de sudeste (Moscati, 1991).

5.1.3 Ondas do Tipo *Swell*

Os *swells* provenientes de leste e sudeste, nos meses de maio e junho, podem estar relacionados à incursão de, pelo menos, quatro sistemas frontais que penetraram na região equatorial a partir de 20 maio de 2010. Além disso a ocorrência de *swell* pode estar associada à Tempestades tropicais, as quais segundo Fialho e Molion (2011) não são raras na costa leste do NE do Brasil e ocorrem principalmente entre junho e agosto, quando a ZCIT está deslocada mais para o Norte de sua posição média e com as águas na costa leste do Nordeste acima de 28°C . Embora não se tenha um registro a longo prazo, as tempestades tropicais parecem ser mais comuns em anos de La-Niña (Molion e Bernardo, 2002). Sua gênese está

associada à penetração de sistemas frontais, ou seus restos, que conseguem atingir latitudes equatoriais nessa época do ano. Em adição, vale ressaltar que o período estudado (ano de 2010) estava sob influência de um evento La-Niña forte (Melo, 2010).

A ocorrência de *swell* proveniente de norte e nordeste apresentou uma frequência de ocorrência muito baixa. Porém deve-se ressaltar que as ondas, até chegarem à área analisada, devem ter sofrido o processo de refração devido à batimetria da plataforma continental de Pernambuco, justificando esta baixa ocorrência. Esta ocorrência pode estar associada a eventos desenvolvidos no Hemisfério Norte. Innocentini et al. (2005) descreveu que os ciclone extratropicais desenvolvidos no Atlântico Norte e os distúrbios ondulatórios de leste são responsáveis por gerarem ondas que incidem sobre o litoral do NE do Brasil. Este distúrbios, segundo Molinari et al. (1997), são acompanhados por depressões e tempestades tropicais que em muitos casos representam a condição inicial de geração de ciclones tropicais no Atlântico Norte, contudo antes da geração dos ciclones há o desenvolvimento de pistas no oceano com fortes ventos propícios à formação de ondas de gravidade.

De acordo com o Centro Nacional de Furacões (NHC) o período de ocorrência de furacões no Atlântico Norte vai de junho a novembro. Porém foi entre agosto e outubro que houve maior desenvolvimento de furacões na área mais central do Atlântico Norte que possivelmente podem ter influenciado as ondas atuantes sobre o litoral do NE do Brasil, o que pode justificar a alta ocorrência de *swell* no mês de outubro de 2010.

Melo et al. (1995) observaram que no litoral do NE do Brasil (Ceará) há maior incidência de *swell* de dezembro à março, assim como observado mais recentemente nos anos de 1997, 2000 e 2001 por Silva et al. (2011). Estas ondas segundo estes autores estavam associadas a eventos extratropicais no Oceano Atlântico Norte. Melo e Alves (1993), analisando eventos de *swell* em janeiro de 1992, confirmam a chegada de *swell* do hemisfério Norte no litoral do NE brasileiro (região do Ceará). Estes estudos corroboram com os resultados obtidos neste artigo, tendo em vista a grande quantidade de *swell* observados entre dezembro de 2010 e março de 2011.

5.1.4 *WaMoS II* vs Ondógrafo S4ADWi

Comparando os dados obtidos pelo sistema *WaMoS II* com os dados obtidos através do ondógrafo S4ADWi (Fig. 46), é possível observar que ambos respondem as mesmas forçantes ambientais, sendo observado um aumento e uma diminuição em ambas as curvas do gráfico. Desta forma, pode-se dizer que há uma boa concordância entre as duas técnicas de medição, o que é confirmado a partir da aplicação do teste estatístico, o qual mostra que não há diferença significativa entre as medições ($p > 0,05$).

Porém, apesar do teste estatístico mostrar que não houve diferença significativa entre os dados, deve-se salientar que a diferença entre as medições presentes no gráfico, pode estar relacionada à questão de que o radar fornece dados médios para uma área enquanto que o ondógrafo fornece dados pontuais.

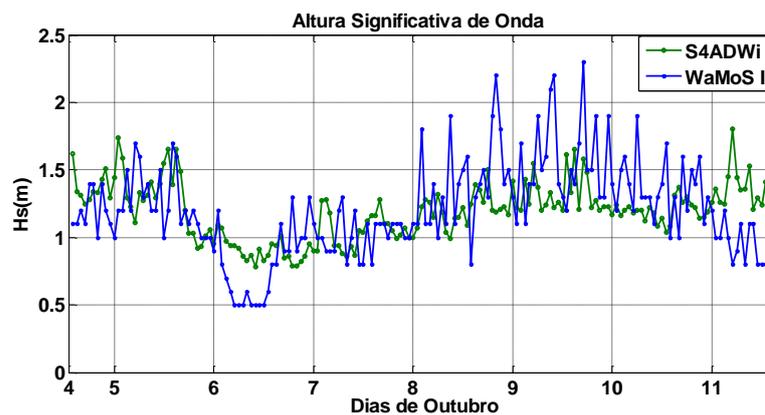


Figura 46: Gráfico de comparação de dados de altura significativa de onda obtidos pelo sistema *WaMoS II* (azul) e ondógrafo S4ADWi (verde)

Vários trabalhos foram realizados a fim de testar a eficiência do radar *WaMoS II* em medir ondas, a partir de dados obtidos *in situ* por ondógrafos, em áreas costeiras, tais como Nieto Borge et al. (1999), Hessner et al.(2006), Reichert e Lund (2007) , Hessner e Hanson (2010). Nestes trabalhos os resultados obtidos pelo sistema de radar apresentaram uma boa concordância com os dados obtidos através do ondógrafo, assim como verificado neste estudo.

5.1.5 WaMoS II vs Modelo Wavewatch III

De semelhante modo, foi realizada comparação de dados de altura significativa de onda obtidos pelo Radar e pelo modelo *Wavewatch III* (Fig. 47). A partir do gráfico pode-se verificar que os dados simulados pelo modelo estão praticamente sempre acima dos dados obtidos pelo radar, ou seja, observa-se que o modelo superestima os dados de altura de onda, fato este comprovado a partir da aplicação do teste estatístico, o qual mostra que há diferenças significativas entre os dois conjuntos de dados, mostrando também que a média de altura de onda do modelo é maior que a do radar ($p < 0,05$). Mas deve-se considerar que modelo é forçado para uma área mais afastada da costa, sendo um modelo para águas profundas.

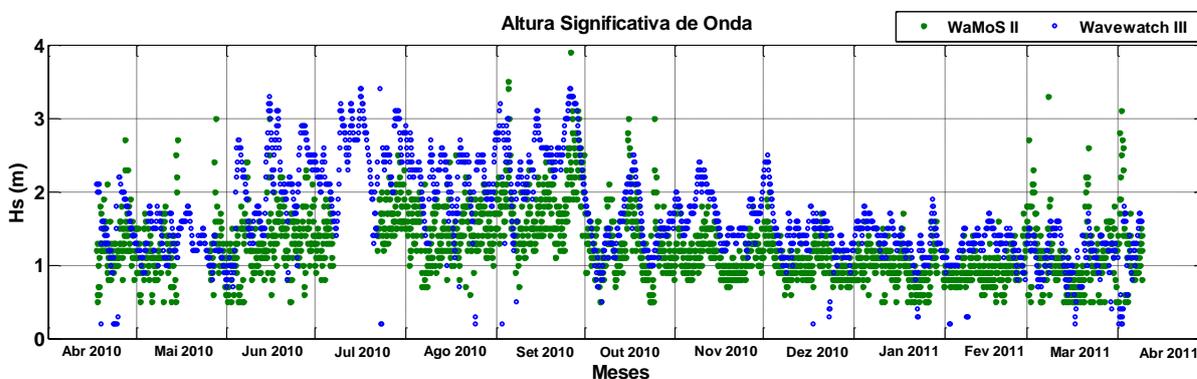


Figura 47: Gráfico de altura significativa de onda a partir de dados de Radar (verde) e do modelo *Wavewatch III* (azul).

Comparações com modelo *Wavewatch III* também são feitas com dados de ondógrafos (*in situ*), como verificado em Abadie et al. (2006) e Adrioni et al. (2009), e nestes trabalhos também foi observado que o modelo superestima os dados de onda, porém não foram encontrados registros de comparações feitas com radar, fato este que pode estar relacionado devido ambos representarem métodos indiretos de se obter dados de onda para uma dada região.

5.2 Variabilidade Espacial

A partir dos gráficos espaciais mensais para ondas do tipo *wind sea* foi possível observar a ocorrência do fenômeno de refração (Fig. 48), pois os mapas mostram uma clara diminuição da frequência de ocorrência das ondas provenientes principalmente de direções entre 90° e 120° e aumento da frequência das ondas com direções entre 120° e 130° e em menor escala entre 130° e 140° . Este caso é mais nitidamente observado nos meses de Maio e Outubro de 2010. Assim pode-se dizer que as ondas *wind sea* que incidem em sua maioria de direção leste sofrem processo de refração tendendo a se aproximar da linha de costa com direção sudeste.

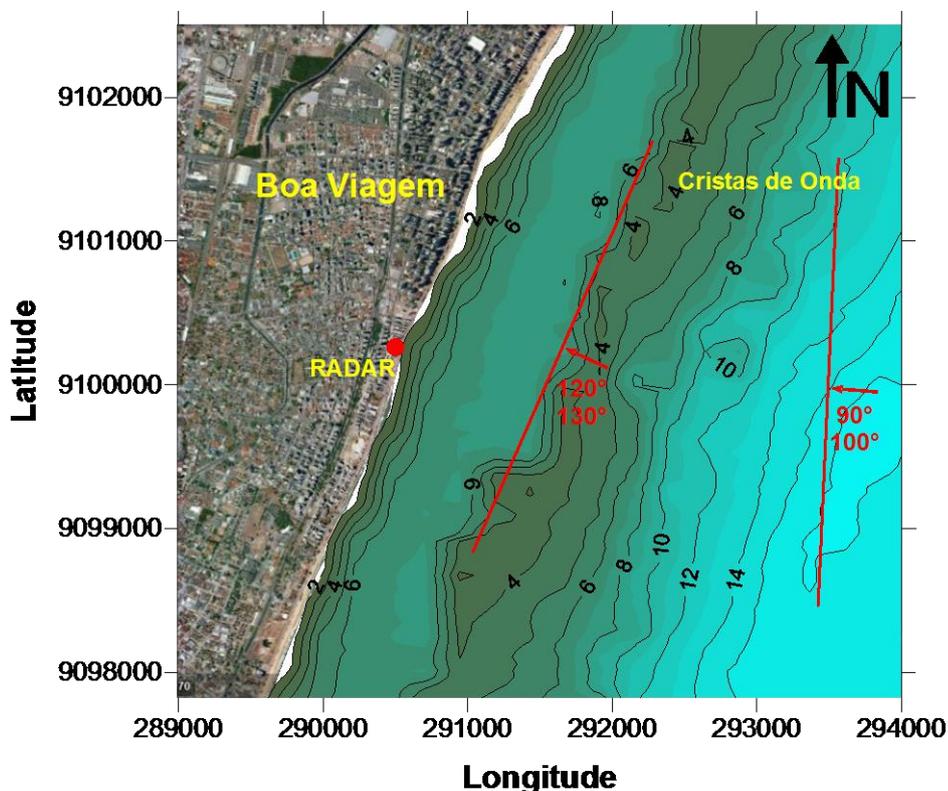


Figura 48: Mapa esquemático mostrando a refração das ondas no litoral de Boa Viagem (Recife – PE). Fonte da batimetria: FINEP/UFPE, 2009

O fenômeno da refração é muito comum em áreas costeiras, tendo em vista que a onda tende a tornar-se paralela a linha de costa devido a influência da variação da batimetria (World Meteorological Organization, 1998). Além disso os recifes de arenito no litoral de Recife, que estão dispostos paralelamente a linha de costa, atenuam este processo, considerando as ondas que ultrapassam esta barreira natural.

Foi possível observar também a variação no que se refere a altura das ondas, pois na área mais afastada da costa, no presente estudo, as ondas apresentaram alturas maiores que 2 m e nas demais áreas mais próximas da costa estas ondas raramente continuavam presente, limitando-se em quase sua totalidade à área 3. Nas demais áreas houve o predomínio de ondas de até 1 m, com exceção dos meses de Julho, Agosto e Setembro de 2010, em que na área 1 e 2 predominaram ondas entre 1 m e 2 m de altura. A variação na altura das ondas em áreas de recifes também foi estudada por Brander et al. (2004) na Austrália.

Em áreas sem influência de recifes, onde a batimetria reduz gradativamente conforme se aproxima da linha de costa, naturalmente as ondas ganham altura, além de outras alterações. Porém, como o litoral de Recife conta com a presença de recifes de arenito, e mais ainda como uma área mais profunda, o canal, entre a praia e o recife, percebe-se que as ondas não sofrem um aumento na sua altura. Porém, ocorre redução da altura das ondas que conseguem ultrapassar a linha de recife, o que conseqüentemente reduz a energia das ondas que irão dissipar na praia.

A partir desta observação é possível inferir que os recifes de arenito atuam dissipando grande parte da energia das ondas, sendo este fato corroborado com o trabalho de Costa (2010) realizado a partir de dados medidos com ondógrafo nesta mesma região. A mesma autora sugere que o banco recifal submerso atua como um quebra-mar submerso. Silva et al. (2007) também observou a ocorrência do processo de refração das ondas em praias no Sul da Bahia.

Em Jeanson et al. (2013) pode-se observar a eficiência das barreiras de recifes em dissipar a energia das ondas mesmo diante de eventos de grande energia, como os ciclones, pois estes autores, em estudo na Ilha de Mayotte, verificaram que a altura significativa das ondas na região externa ao recife foi de até 1,8 m, enquanto que na praia abrigada pelo recife, não ultrapassou 0,9 m. Além disso, estes autores mostram que quanto maior a altura das ondas maior é a atenuação.

Neste estudo, a altura das ondas foi comparada estatisticamente para as três áreas de análise. Desta forma, foi observada que há diferenças significativas da área 3 para as demais áreas ($p < 0,05$), porém não há diferença significativa entre a área 1 e 2 ($p > 0,05$), podendo verificar que na área 3 os valores de H_s foram maiores que nas demais áreas.

Ao analisar os mapas espaciais de *swell*, observa-se que estas ondas não mantêm esse padrão ao longo das três áreas de análise. O que é observado claramente é que o número de

ondas está aumentando da área 3 para a área 1, além de que não há alteração na altura das ondas, e no que se refere à direção, esta por sua vez passa a ser bastante variável na área 1 e 2.

5.3 Variabilidade Espaço-Temporal da Corrente

As velocidades das corrente obtidas através do radar mostram uma tendência de máximos e mínimos seguindo o período de ventos mais intensos e menos intensos, respectivamente, além de direções preferenciais para ESSE. Porém de acordo com resultados de outros autores em estudos de correntes no litoral de Pernambuco, indicam uma direção preferencial no sentido norte-sul, bem como velocidades de até $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ (Borba (1999), Manso et al. (2006) e Rollnic (2008)). Além disso, observa-se variações sazonais da direção das correntes, fato este não observado no presente estudo. É importante afirmar que as medições de corrente através do sistema WaMoS II são realizadas na superfície e os dados obtidos *in-situ* pelo equipamento S4ADWi foram obtidos a 1 m de distância do fundo, não sendo possível fazer uma comparação entre os resultados.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES

O clima de ondas para o litoral de Recife foi estudado a partir de dados obtidos pelo sistema *WaMoS II*, através dos quais foi possível constatar a presença conjunta de ondas do tipo *swell* e *wind sea* em todos os meses estudados, sendo que as ondas do tipo *swell* foram expressivas em alguns meses específicos, enquanto que as ondas *wind sea* predominam na região em todos os meses do ano.

As ondas *wind sea* apresentaram altura significativa predominante entre 1 e 1,5 m, com valores maiores 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 e 8 s.

As ondas *swell* apresentaram 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 e 13 s, e altura significativa predominante baixa, variando de 0,5 a 0,7 m, porém com valores altos no mês de abril de 2011, de 4,1 m. A maior ocorrência de *swell* foi proveniente da direção leste, representando 45,72% das ocorrências ao longo de todo o período estudado, relacionadas a eventos mais energéticos ocorrentes no Oceano Atlântico Sul. Porém havendo registro de ondas provenientes do Oceano Atlântico Norte (*swell* de norte 6,97% e *swell* de nordeste 4,38%).

A altura máxima de onda que predominou foi entre 1,2 e 2,1 m, com os maiores valores mensais entre 2,9 e 5,9 m, sendo que o valor mais alto corresponde a um *swell* que incidiu no mês de abril de 2011. A *Hmax*, assim como *Hs* de *wind sea*, apresentou maiores valores nos meses de julho a outubro de 2010.

De acordo com os mapas direcionais de altura significativa foi possível observar a atenuação da altura das ondas incidentes na área 3, onde foram registrados valores de *Hs* acima de 2 m, sendo que nas áreas 1 e 2 o domínio foram de ondas de até 1 m. Além disso, pode-se observar o fenômeno da refração das ondas, modificando sua direção predominante de leste para sudeste, tendendo tornar-se paralela a linha de costa.

Os resultados deste estudo demonstram grande eficiência na aquisição dos parâmetros físicos de ondas através do sistema radar *WaMoS II*, quando comparados com dados

observacionais obtidos *in-situ* (ondógrafo) e resultados de modelo numérico, se apresentando como uma ferramenta eficiente para a medição de parâmetros físicos de ondas em regiões costeiras.

Por outro lado, os resultados obtidos para corrente não foram satisfatórios, tendo em vista que registros de dados *in situ* diferem dos resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abadie, S., Butel, R., Mauriet, S., Morichon, D., Dupuis, H., 2006. Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast. *Continental Shelf Research* 26 (16), 1924-1939.
- Adrioni, M., Oliveira, E.R., Parkinson, R., Gormann-Matheson, G., 2009. Análise de campos climatológicos de ondas no oeste do Atlântico Sul utilizando resultados do WW3. VIII Simpósio sobre ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite - OMAR-SAT., Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1-4.
- Andrade, G.O., Lins, R.C., 1971. Os climas do nordeste. In: J. Vasconcelos Sobrinho (Editor), *As regiões naturais do nordeste: O meio e a civilização*, Conde-PE, Recife, pp. 95 - 138.
- Araújo, C.E.S., Franco, D., Melo, E., Pimenta, F., 2003. Wave regime characteristics of southern brazilian coast. VI International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Colombo, Sri Lanka, pp. 1-15.
- Araújo, M.C.B.d., 2008. Praia de Boa Viagem, Recife-PE: Análise sócio-ambiental e propostas de ordenamento. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 279 pp.
- Araújo, T.C.M., Seoane, J.C.S., Coutinho, P.N., 2004. Geomorfologia da plataforma continental de Pernambuco. In: E.E. Leça, S. Neumann-Leitão and M.F. Costa (Editors), *Oceanografia - um cenário tropical*. Ed. Bagaço, Recife, pp. 39-57.
- Bird, E., 2008. Coastal process. In: E. Bird (Editor), *Coastal geomorphology: An introduction*. John Wiley e Sons Ltd, England, pp. 13-38.
- Borba, A.L.S., 1999. Estudos sedimentológicos, morfodinâmicos e da vulnerabilidade das praias de Piedade, Candeias e Barra das Jangadas - município do Jaboatão dos Guararapes - PE. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 146 pp.
- Branco, F.V., 2005. Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 154 pp.
- Brander, R.W., Kench, P.S., Hart, D., 2004. Spatial and temporal variations in wave characteristics across a reef platform, Warraber Island, Torres Strait, Australia. *Marine Geology* 207 (1-4), 169-184.
- Candella, R.N., 1997. Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 80 pp.

Carneiro, M.C.d.S.M., Sá, L.A.C.M.d.,Gomes, E.T.A., 2003. O monitoramento da erosão costeira - estudo a partir das praias de Casa Caiada e Rio Doce - Olinda. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte, Brasil, pp. 1-9.

Chini, N. et al., 2010. The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: A case study for east Anglia (UK). *Coastal Engineering* 57 (11-12), 973-984.

Chiu, F.-C., Huang, W.-Y.,Tiao, W.-C., 2013. The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan. *Renewable Energy* 52 (0), 218-221.

Costa, M.B.S.F., 2010. Influência da estrutura recifal na transformação das ondas do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes / PE-Brasil. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 92 pp.

Costa, M.B.S.F., Pontes, P.M.,Araújo, T.C.M.d., 2008. Monitoramento da linha de preamar das praias de Olinda – PE (Brasil) como ferramenta à gestão costeira. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 8 (2), 101-112.

Coutinho, P.N., 1976. Geologia marinha da plataforma continental de Alagoas-Sergipe. Tese de Livre Docência, Universidade Federal de Pernambuco, 119 pp.

Cuchiara, D.C., Fernandes, E.H., Strauch, J.C., Winterwerp, J.C.,Calliari, L.J., 2009. Determination of the wave climate for the southern brazilian shelf. *Continental Shelf Research* 29 (3), 545-555.

Cunha, E.M.S., 2004. Evolução atual do litoral de Natal-RN (Brasil) e suas aplicações a gestão integrada. Tese, Universidade de Barcelona, Barcelona, 393 pp.

Fialho, W.M.B.,Molion, L.C.B., 2011. Estudo de caso de chuvas extremas no NEB: Recife (PE) - abril de 2011. IV Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa, Paraíba, Brasil, pp. 1-6.

FINEP/UFPE, 2009. Monitoramento ambiental integrado (MAI-PE). 1, 2, 3, Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, Recife-PE.

Gorrell, L., Raubenheimer, B., Elgar, S.,Guza, R.T., 2011. Swan predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry. *Coastal Engineering* 58 (6), 510-516.

Gregório, M.d.N., Araújo, T.C.M.d., Mendonça, F.J., Rocha, C.P.d.,Santos, F.A.d., 2010. Avaliação morfológica do litoral da cidade do Recife (NE - Brasil). III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, pp. 1-4.

Gruber, N.L.S., Barbosa, E.G.,Nicolodi, J.L., 2003. Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: Subsídios para gestão integrada da zona costeira. *Gravel* 1 (1), 81-89.

Guerra, N.C.,Manso, V.A.V., 2002. Os beachrocks como controle ambiental. XLI Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa.

Hessner, K., 2007. WaMoS II wave analysis method, limitations, and definitions, Ocean Waves GmbH, Lüneburg.

Hessner, K., Hanson, J.L., 2010. Extraction of coastal wavefield properties from x-band radar. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, pp. 4326-4329.

Hessner, K., Reichert, K., Dannenberg, J., 2006. 2d surface elevation measurements by means of x-band radar. IX International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Victoria, BC, Canada, pp. 1-13.

Innocentini, V., Arantes, F.O., Ferreira, R.J., Micheleto, R.G., 2005. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. Revista Brasileira de Meteorologia 20 (3), 367-374.

Innocentini, V., Prado, S.C.S.C., Pereira, C.S., Arantes, F.O., Brandão, I.N., 2001. Ocorrência de vagas no arquipélago de São Pedro e São Paulo: Caso 24 de outubro de 1999. Revista Brasileira de Meteorologia 16 (2), 177-186.

Jeanson, M., Anthony, E.J., Dolique, F., Aubry, A., 2013. Wave characteristics and morphological variations of pocket beaches in a coral reef-lagoon setting, Mayotte Island, Indian Ocean. Geomorphology 182 (0), 190-209.

Manso, V.d.A.V., Coutinho, P.d.N., Guerra, N.C., Soares Jr, C.d.A., 2006. Pernambuco. In: D. Muehe (Editor), Erosão e progradação do litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Pernambuco, Brasil, pp. 180-196.

MCT/UFPE, 2010a. Mapeamento sonográfico e batimétrico da plataforma continental interna adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes-PE para a caracterização da dinâmica erosiva da região da região - MAPLAC. Relatório final, Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT, Recife-PE.

MCT/UFPE, 2010b. Processos erosivos na costa dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil - PROCOSTA. Relatório final, Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT, Recife-PE, Brasil.

Melo, A.B.C.d., 2010. Infoclima: Boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Cachoeira Paulista.

Melo, E., Alves, J.-H.G.M., 1993. A note on the arrival of long traveled swell at the Brazilian coast. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado, Brasil, pp. 362-369.

Melo, E., Alves, J.-H.G.M., Jordan, V., Zago, F., 1995. Instrumental confirmation of the arrival of North Atlantic swell to the Ceará coast. Proceedings of the IV International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1984-1996.

Molinari, J., Knight, D., Dickinson, M., Vollaro, D., Skubis, S., 1997. Potential vorticity, easterly waves, and eastern Pacific tropical cyclogenesis, *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society, pp. 2699.

Molion, L.C.B., Bernardo, S.d.O., 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 17 (1), 1-10.

Moscatti, M.C.L., 1991. Variabilidade da precipitação no litoral leste da região nordeste do Brasil. Dissertação, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 222 pp.

Nieto Borge, J.C., Reichert, K., Dittmer, J., 1999. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument. *Coastal Engineering* 37 (3-4), 331-342.

Ogawa, H., Dickson, M.E., Kench, P.S., 2011. Wave transformation on a sub-horizontal shore platform, Tatapouri, North island, New Zealand. *Continental Shelf Research* 31 (14), 1409-1419.

Oliveira, F.S.B.F., 2002. Wave climate modelling south of Rio de Janeiro in Brazil. *Continental Shelf Research* 22 (14), 2021-2034.

Parise, C.K., 2010. Estudo da variabilidade de ondas no oceano Atlântico Sul e a contribuição energética de um ciclone extratropical intenso nos espectros das ondas ao largo do Rio Grande do Sul. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 65 pp.

Pianca, C., Mazzini, P.L.F., Siegle, E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography* 58 (1), 53-70.

Pontes da Silva, B.F., Rocha, R.P.d., Brito, B.M.d., 2010. Distúrbios ondulatórios de leste em maio de 2006: Análise sinótica de dois eventos. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém-Pará.

Reichert, K., Lund, B., 2007. Ground based remote sensing as a tool to measure spatial wave field variations in coastal approaches. *Proceedings of the IX International Coastal Symposium*, Gold Coast, Australia, pp. 1-5.

Rollnic, M., 2008. Dinâmica das ondas e circulação no litoral da região metropolitana do Recife - implicações para o transporte de sedimentos e estabilidade da costa. Tese, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 124 pp.

Sabique, L., Annapurnaiah, K., Balakrishnan Nair, T.M., Srinivas, K., 2012. Contribution of Southern Indian Ocean swells on the wave heights in the Northern Indian Ocean - a modeling study. *Ocean Engineering* 43 (0), 113-120.

Siegel, S., Castellan Jr., N.J., 2006. Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento, Porto Alegre: Artmed, 448 pp.

Silva, A.C.d., Façanha, P., Bezerra, C.S.,Araújo, 2011. Características das ondas sea e swell observadas no litoral do Ceará-Brasil: Variabilidade anula e inter-anual.Tropical oceanography. Tropical Oceanography 39 (2), 17-26.

Silva, F.L.M., Barreto, A.M.F.,Correa, A.C.B., 2006. Geomorfologia e sedimentologia dos beachrocks da praia de Boa Viagem - Recife - PE. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia, p.^pp. 1.

Silva, I.R., Bittencourt, A.C.d.S.P.,Dominguez, J.M.L., 2007. Modelagem de ondas como subsídio para a gestão ambiental das praias da costa do Descobrimento, sul do estado da Bahia. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, pp. 4691-4697.

Talley, L.D., Pickard, G.L., Emery, W.J.,Swift, J.H., 2011. Gravity waves, tides, and coastal oceanography. In: L.D. Talley, G.L. Pickard, W.J. Emery and J.H. Swift (Editors), Descriptive physical oceanography Academic Press, Boston, pp. 223-244.

Tolman, H.L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III tm version 3.14, Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction.

Wave Monitoring System, 2007. Operating manual version 3.03, installation guide, Ocean Waves GmbH, Lüneburg.

World Meteorological Organization, 1998. Guide to wave analysis and forecasting, N° 702. 2ª edição. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva – Switzerland, 168 pp.

Wright, J., Colling, A.,Park, D., 1999. Waves, tides and shallow-water processes, 2ª edição. Walton Hall: Butterworth-Heinemann: the Open University, Oxford, 228 pp.

Zhang, K., Douglas, B.,Leatherman, S., 2004. Global warming and coastal erosion. Climatic Change 64 (1-2), 41-58.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Pós-processamento das imagens polares a partir do software WinWaMoS

O processamento e saída de dados do Radar ocorre a partir do software WinWaMoS. Este software permite a realização do pós-processamento das imagens polares, onde foram selecionadas as áreas de interesse para análise e, por conseguinte obter dados de onda de diferentes subáreas dentro da área de abrangência do radar.

Assim, a partir destas imagens foram selecionadas as áreas de análise, que são subáreas retangulares, escolhidas segundo o objetivo do trabalho. Estas subáreas foram selecionadas no menu *control* > menu item *Configuration WaMoS* > menu sub-item *Cartesian Transformation*. O número, tamanho e posição destas áreas também foram selecionados nesta seção. Assim, foram selecionadas três subáreas de análise com tamanho de 128 x 128 pixels. Cada subárea apresenta uma área de aproximadamente 1000 km².

Selecionada a área de análise, foi realizada a transformação cartesiana a partir do menu *Analysis*, gerando os arquivos cartesianos (*.CAR). Dada a leitura destes arquivos, realizada no mesmo menu, foram gerados outros tipos de arquivos que contêm as informações sobre as características das ondas e correntes superficiais (arquivos *.D1S, *.D1M, *.D2S, *.D2M, *.FTH, *.FTM). Dentre os arquivos gerados, foram utilizados arquivos *.D1S, pois estes apresentam a média dos dados somente da área de análise.

A partir dos arquivos D1S foram elaboradas rotinas computacionais para extração dos dados e posterior confecção de planilhas mensais, e então criação do banco de dados. Assim, foram criados diferentes gráficos de altura significativa, período e direção de ondas, bem como gráficos de direção e velocidade das correntes segundo objetivo de cada capítulo.

APÊNDICE B: Altura máxima das ondas

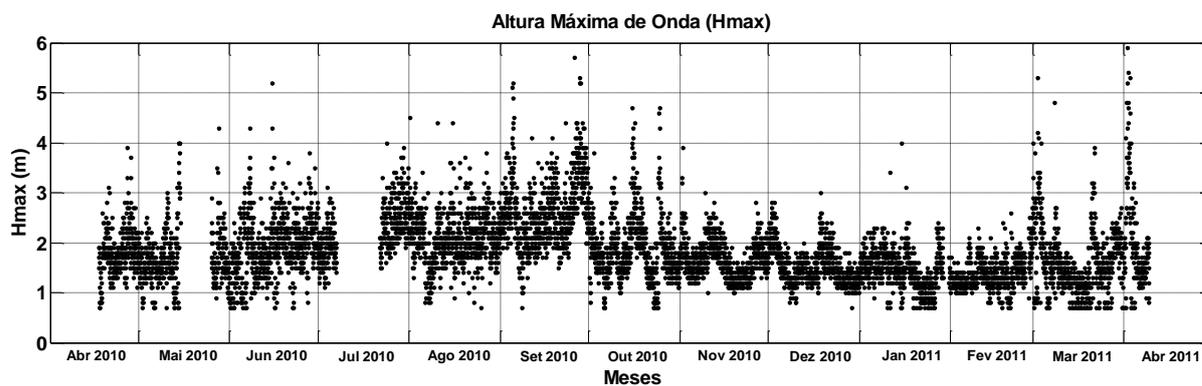


Figura B1: Gráfico de altura máxima de onda ao longo do período estudado

Tabela B1: valores médios, mais frequentes, máximos e mínimos de altura máxima para cada mês estudado

Meses	Média	Moda	Máximo	Mínimo
Abril 2010	1,8	1,9	3,9	0,7
Mai 2010	1,7	1,6	4,3	0,7
Junho 2010	1,9	1,6	5,2	0,7
Julho 2010	2,2	2,1	4	1,1
Agosto 2010	2,1	1,8	4,5	0,7
Setembro 2010	2,6	2,1	5,7	0,7
Outubro 2010	1,9	1,5	4,7	0,7
Novembro 2010	1,7	1,5	3,9	1
Dezembro 2010	1,5	1,4	3	0,7
Janeiro 2011	1,4	1,5	4	0,7
Fevereiro 2011	1,4	1,2	2,9	0,7
Março 2011	1,6	1,3	5,3	0,7
Abril 2011	2,0	1,3	5,9	0,7

APÊNDICE C: Ondas *wind sea*

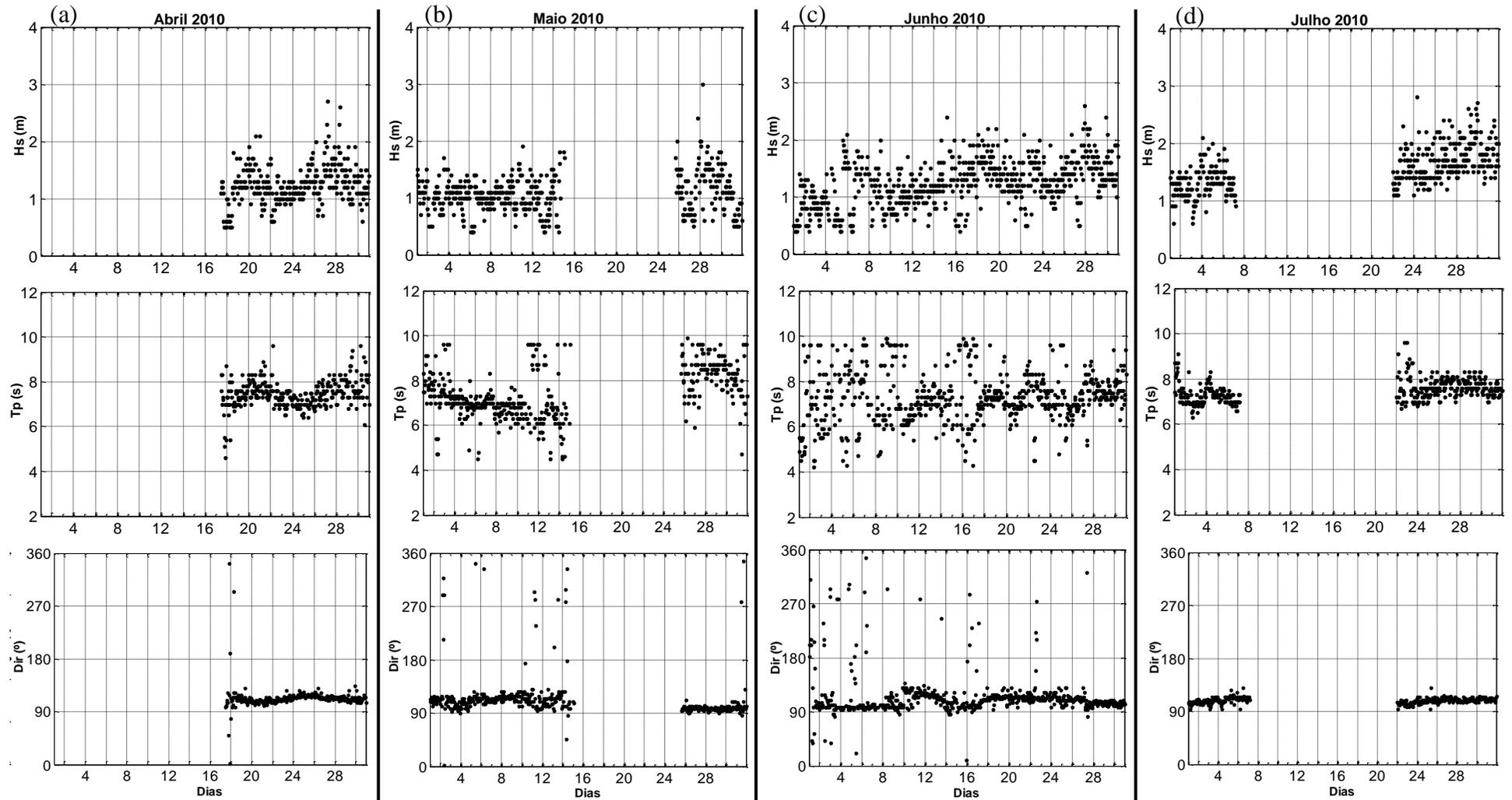


Figura C1: Variação das características das ondas *wind Sea* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para os meses de abril(a), maio (b), junho (c) e julho (d) de 2010.

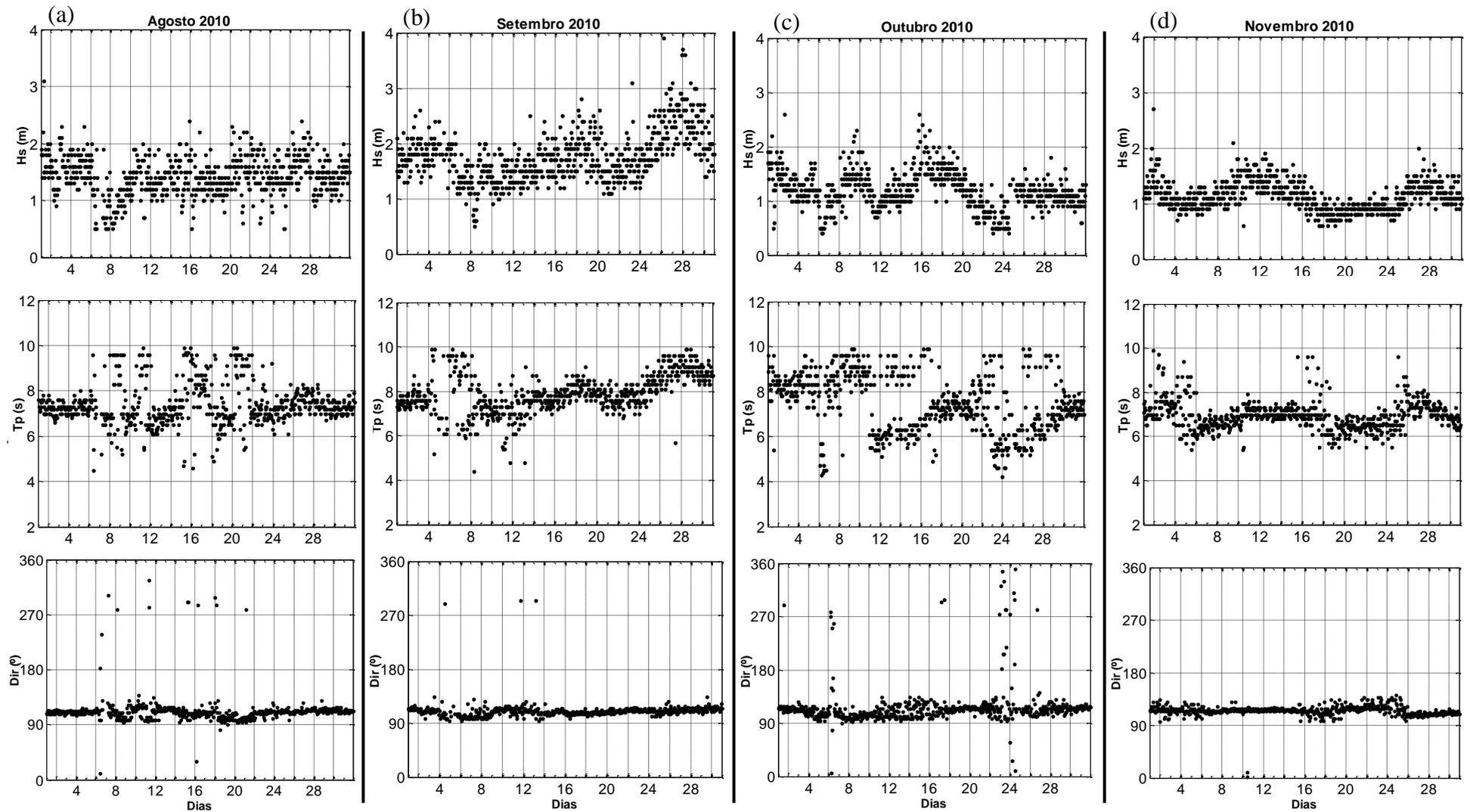


Figura C2: Variação das características das ondas *wind Sea* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para os meses de agosto (a), setembro (b), outubro (c) e novembro (d) de 2010.

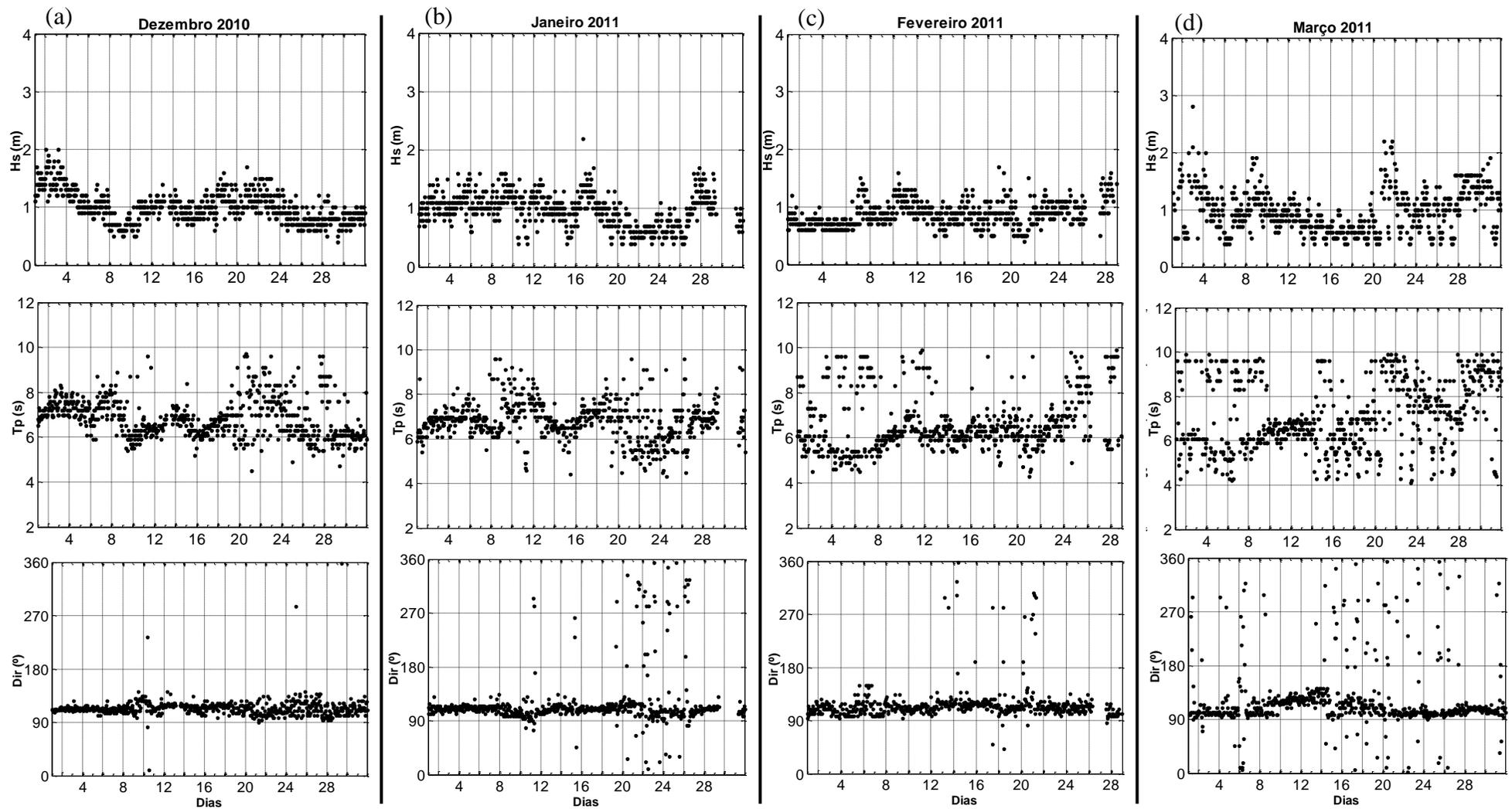


Figura C3: Variação das características das ondas *wind Sea* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para os meses de dezembro(a) de 2010, janeiro (b), fevereiro (c) e março (d) de 2011.

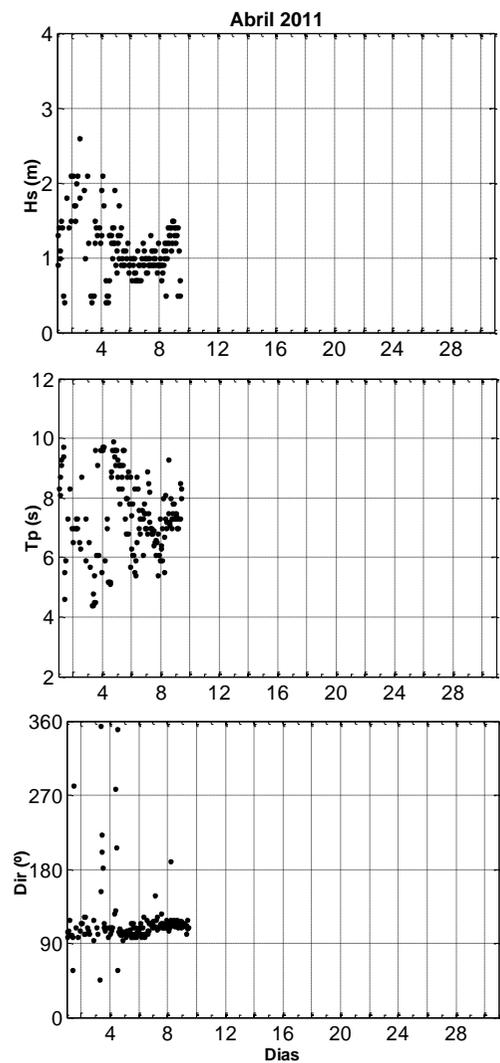


Figura C4: Variação das características das ondas *wind Sea* (altura significativa - H_s , período - T_p , direção - Dir) para o mês abril de 2011.

Tabela C1: Valores médios, mais frequentes, máximos e mínimos das ondas *wind sea* para cada mês estudado.

WIND SEA												
Meses	Média			Moda			Máximo			Mínimo		
	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir
Abril 2010	1,24	7,46	113,3	1,3	7,3	114	2,7	9,6	342	0,5	4,6	2
Mai 2010	1,06	7,41	113,3	1,1	7	98	3	9,9	346	0,4	4,5	2
Junho 2010	1,22	7,28	115,1	1,2	7	98	2,6	9,9	346	0,4	4,2	10
Julho 2010	1,55	7,5	108,8	1,5	7,6	108	2,8	9,6	130	0,6	6,3	94
Agosto 2010	1,41	7,4	112,6	1,4	7	110	3,1	9,9	326	0,5	4,5	10
Setembro 2010	1,77	7,9	110,5	1,5	7,6	110	3,9	9,9	294	0,5	4,4	94
Outubro 2010	1,18	7,5	115,9	1,1	8,3	114	2,6	9,9	350	0,4	4,2	6
Novembro 2010	1,13	6,94	115,4	1	7	118	2,7	9,9	142	0,6	5,4	2
Dezembro 2010	0,99	6,8	114,0	1	6,1	110	2	9,7	358	0,4	4,5	10
Janeiro 2011	0,96	6,8	117,3	1	7	110	2,2	9,6	354	0,4	4,3	10
Fevereiro 2011	0,87	6,6	116,9	0,9	6,1	114	1,7	9,9	358	0,4	4,3	42
Março 2011	0,95	7,1	120,7	0,5	9,6	98	2,8	9,9	354	0,4	4,1	2
Abril 2011	1,09	7,3	116,2	0,9	7,3	110	2,6	9,9	354	0,4	4,4	46

APÊNDICE D: Ondas *swell*

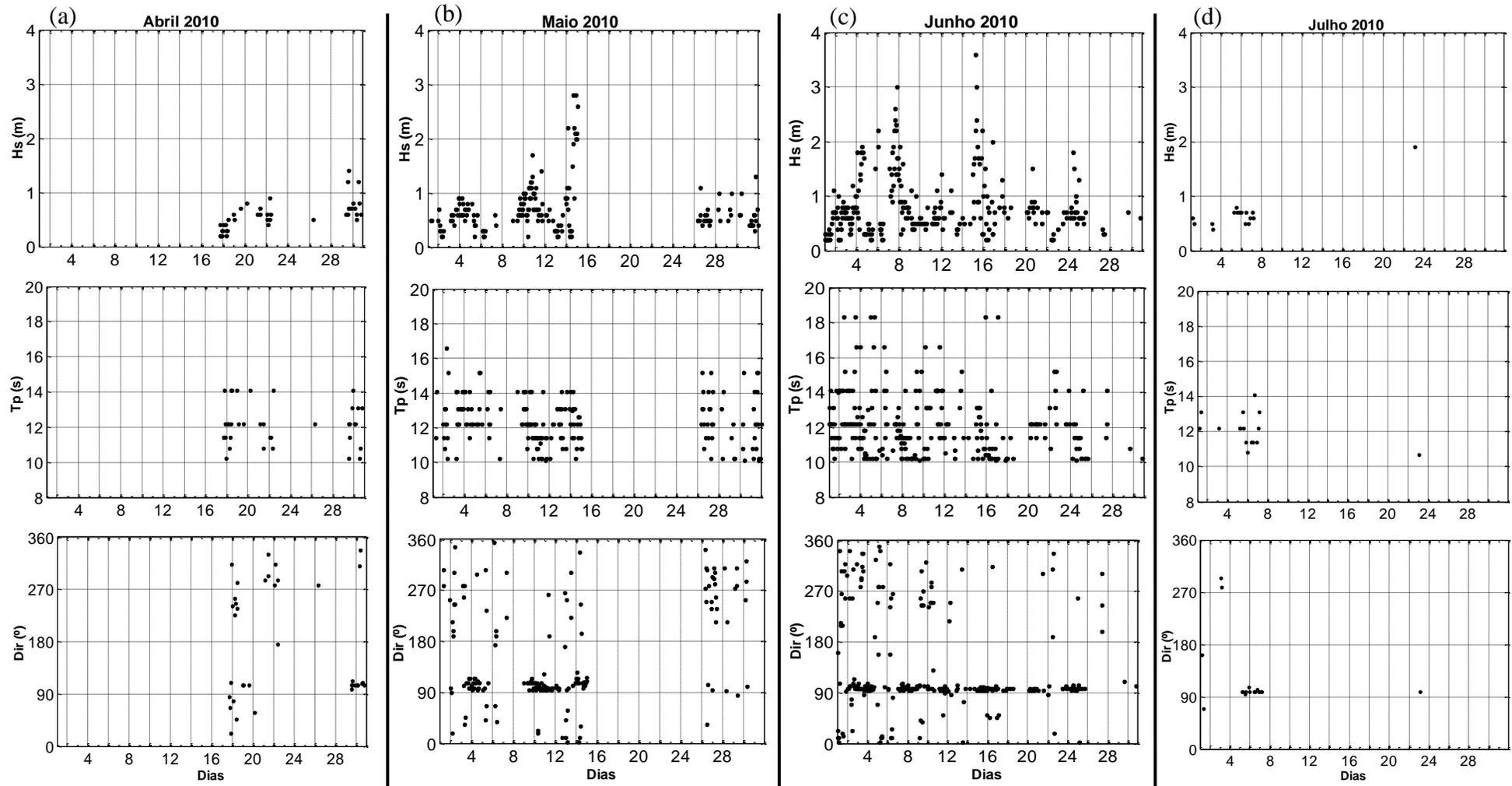


Figura D1: Variação das características das ondas *swell* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para os meses de abril(a), maio (b), junho (c) e julho (d) de 2010.

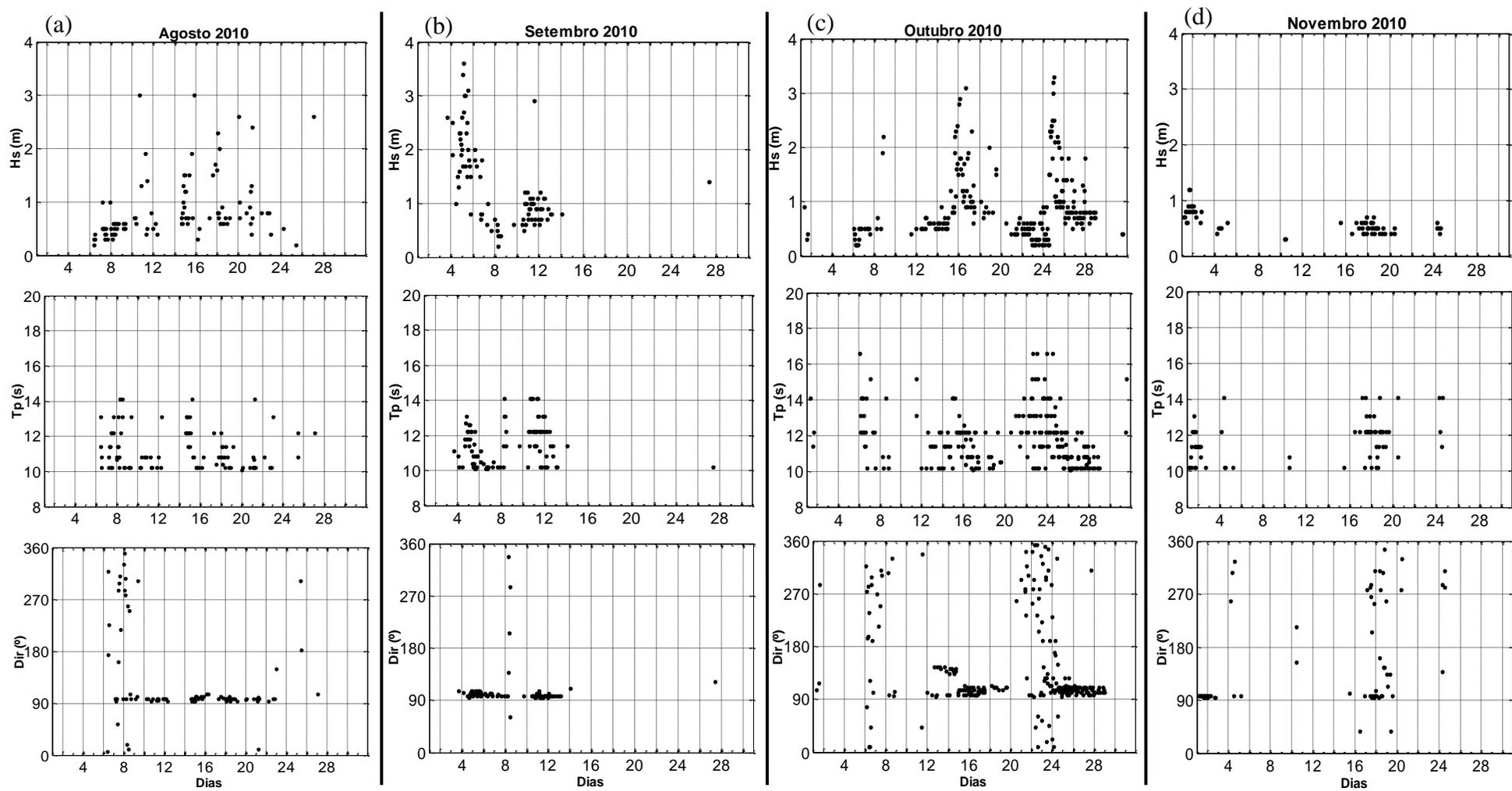


Figura D2: Variação das características das ondas *swell* (altura significativa - H_s , período - T_p , direção - Dir) para os meses de agosto (a), setembro (b), outubro (c) e novembro (d) de 2010.

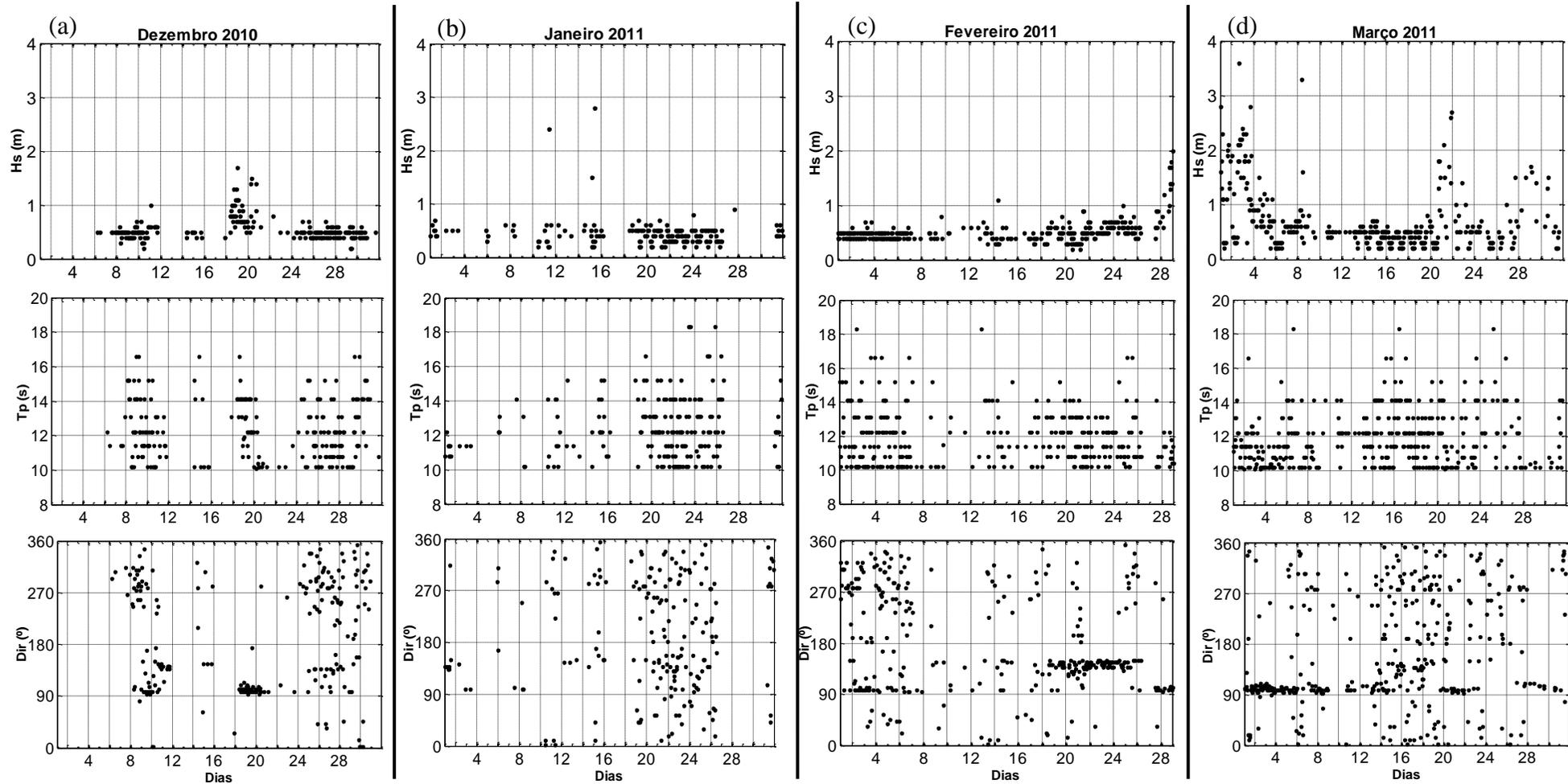


Figura D3: Variação das características das ondas *swell* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para os meses de dezembro(a) de 2010, janeiro (b), fevereiro (c) e março (d) de 2011.

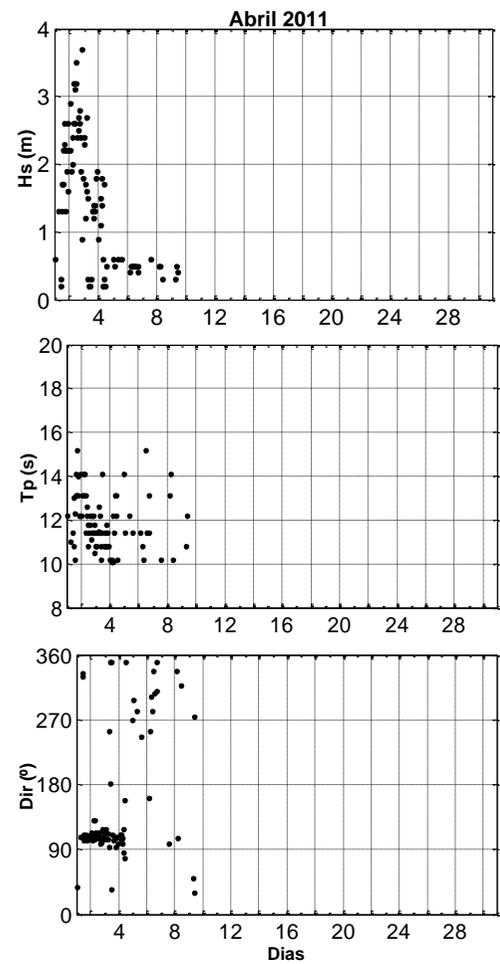


Figura D4: Variação das características das ondas *swell* (altura significativa - Hs, período - Tp, direção - Dir) para o mês abril de 2011.

Tabela D1: Valores médios, mais frequentes, máximos e mínimos das ondas *swell* para cada mês estudado.

SWELL												
Meses	Média			Moda			Máximo			Mínimo		
	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir
Abril 2010	0,56	12,1	182,3	0,6	12,2	106	1,4	14,1	338	0,2	10,2	22
Mai 2010	0,7	12,2	150,9	0,6	12,2	98	2,8	15,2	354	0,2	10,1	2
Junho 2010	0,79	12	130,7	0,6	12,2	98	3,6	18,3	350	0,2	10,1	2
Julho 2010	0,69	12,1	122,7	0,7	12,2	98	1,9	14,1	294	0,4	10,7	70
Agosto 2010	0,84	11,2	129,5	0,6	10,2	98	3	14,1	350	0,2	10,1	6
Setembro 2010	1,31	11,5	105,2	0,7	12,2	98	3,6	14,1	338	0,2	10,1	62
Outubro 2010	0,89	11,8	141,9	0,5	12,2	106	3,3	16,6	354	0,2	10,1	10
Novembro 2010	0,58	11,7	163,4	0,5	12,2	98	1,2	14,1	346	0,3	10,2	38
Dezembro 2010	0,55	12,3	187,3	0,5	12,2	98	1,7	16,6	354	0,2	10,1	2
Janeiro 2011	0,43	12,6	186,9	0,5	12,2	138	2,8	18,3	354	0,2	10,2	2
Fevereiro 2011	0,51	11,9	176,2	0,5	10,2	98	2	18,3	354	0,2	10,2	2
Março 2011	0,66	11,8	160	0,5	10,2	98	3,6	18,3	354	0,2	10,1	2
Abril 2011	1,43	11,9	151,5	0,5	11,4	106	4,1	15,2	350	0,2	10,1	30

APÊNDICE E: Registros de ondas *wind sea* e *swell*.

Tabela E1: registro do número de ocorrência de ondas do tipo *wind sea* e *swell* em cada área de análise para cada mês estudado.

MESES	WIND SEA			SWELL		
	Área 1	Área 2	Área 3	Área 1	Área 2	Área 3
Abril 2010	325	323	321	82	94	38
Mai 2010	464	475	474	290	289	196
Junho 2010	654	656	670	377	339	287
Julho 2010	385	388	388	48	30	17
Agosto 2010	688	703	717	206	155	97
Setembro 2010	630	677	692	186	134	94
Outubro 2010	677	699	703	431	408	246
Novembro 2010	711	715	719	193	200	67
Dezembro 2010	730	727	726	365	403	230
Janeiro 2011	696	696	693	298	322	194
Fevereiro 2011	632	632	631	475	481	320
Março 2011	610	658	695	591	570	404
Abril 2011	147	153	166	144	139	89