



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

NINA DORIAN ESTEVES GURGEL DO AMARAL SAMPAIO

**VARIABILIDADE TEMPORAL DO REGIME DE ONDAS NA PORÇÃO SUDOESTE
DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL**

FORTALEZA

2014

NINA DORIAN ESTEVES GURGEL DO AMARAL SAMPAIO

VARIABILIDADE TEMPORAL DO REGIME DE ONDAS NA PORÇÃO SUDOESTE
DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Graduação em Oceanografia.

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira

FORTALEZA

2014

NINA DORIAN ESTEVES GURGEL DO AMARAL SAMPAIO

VARIABILIDADE TEMPORAL DO REGIME DE ONDAS NA PORÇÃO SUDOESTE
DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira
LABOMAR – UFC
Orientador

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira
LABOMAR – UFC
Membro

Profa. Dra. Maria Oziléa Bezerra Menezes
LABOMAR – UFC
Membro

A meus pais, Dorian Sampaio Filho e
Denise Gurgel do Amaral Sampaio
À minha família.

“De todos os cantos do mundo, amo com um amor mais forte e mais profundo aquela praia extasiada e nua, onde me uni ao mar, ao vento e à lua.” (Sophia Andresen)

AGRADECIMENTOS

À, minha família, por todo o apoio prestado em toda minha vida, inclusive durante a graduação.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, pela excelente orientação, sendo claro em suas explicações e ajudando sempre que solicitado.

Aos professores participantes da banca examinadora Maria Oziléa Bezerra Menezes e Antônio Geraldo Ferreira pelo tempo e colaborações.

Ao meu amigo de graduação Francisco Thiago Franca Parente, por todo apoio prestado durante a fase final da graduação, estando sempre disponível quando solicitado.

Aos amigos de graduação Larissa Luana, Luana Castelo, Natália Castro, Pedro Calixto e Pedro Moraes pelo suporte, críticas e sugestões durante o período final da graduação.

RESUMO

O entendimento do clima de ondas é fundamental para melhor conhecimento dos agentes dinâmicos, processos costeiros e dinâmica local. A morfologia da costa e atividades antrópicas, tais como a pesca, atividade portuária e entretenimento, podem ser impactadas por quaisquer variações que possam ocorrer no comportamento das ondas. Para o estudo do clima de ondas da porção sudoeste do Oceano Atlântico Tropical foram feitas análises das características de direção, altura e período das ondas, através de 34 anos de dados diários gerados pelo modelo de reanálise ERA-Interim. Ao final desta análise pôde-se notar significativo aumento da altura das ondas e que elas estão tendendo a chegar por direções de leste. É visto que os principais forçantes para a geração da maioria dessas ondas são os ventos alísios de sudeste e nordeste, que são controlados pelo posicionamento da ZCIT. Já a ocorrência de ondas *swell*, está geralmente associada aos ciclones extratropicais no Atlântico Norte e frentes frias vindas de sudeste. A análise do clima de ondas através dos dados obtidos através do modelo numérico se mostraram capazes de reproduzir de forma confiável o clima de ondas da região.

Palavras-chave: ERA-Interim. Ciclo Interanual. Clima de ondas.

ABSTRACT

The knowledge of waves climate is essential for better understanding about dynamics forces, coastal processes and local dynamic. The coast morphology and human activities, such as fishing, port activity and entertainment, can be impacted by any variation of wave's behavior. To study waves climate of south-westward portion of Tropical Atlantic Ocean, analyzes of waves direction, height and period were made through 34 years of daily data generated by the ERA-Interim reanalysis model. At the end of this analyzes, it was saw a significant increase on wave's height and a shift to the east on wave's direction. The main forces on local waves generation are trade winds coming from the south-east and north-east, which are controlled by ZCIT position. In other hand, the occurrence of swell waves is generally associated to Atlantic North extratropical cyclones and cold fronts coming from the south-east. The present analysis was made through output data from ERA-Interim, which was considered capable to reproduce local wave's climate.

Keywords: ERA-Interim. Interannual Cicle. Wave Climate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Área de estudo.....	16
Figura 2 –	Mapa de média geral de direção entre os anos 1979 e 2012. Os círculos numerados mostram a localização dos pontos usados nas análises.....	26
Figura 3 –	Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 1.....	27
Figura 4 –	Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 5.....	28
Figura 5 –	Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 7.....	28
Figura 6 –	Mapa de média climatológica da altura de onda entre os anos 1979 e 2012.....	30
Figura 7 –	Histograma de média de altura de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 1.....	31
Figura 8 –	Histograma de média de altura de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 5.....	32
Figura 9 –	Histograma de média de altura de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 7.....	32
Figura 10 –	Média do período de ondas entre os anos 1979 e 2012.....	34
Figura 11 –	Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 1.....	36
Figura 12 –	Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 3.....	36
Figura 13 –	Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 5.....	37
Figura 14 –	Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 7.....	37
Figura 15 –	Mapas trimestrais de média de direção das ondas para os anos de.....	39
Figura 16 –	Mapas trimestrais de média de altura das ondas para os anos de 1979 a 2012.....	41

Figura 17 –	Mapas trimestrais de média de período das ondas para os anos de 1979 a 2012.....	43
Figura 18 –	Mapa de frequência média dos principais quadrantes de direção das ondas entre 1979 e 2012.....	46
Figura 19 –	Média de frequência de direção do quadrante 120-360 entre 1979 e 2012.....	47
Figura 20 –	Série temporal de direção das ondas do quadrante 0-30 no ponto 5 entre 1979 e 2012.....	49
Figura 21 –	Série temporal de direção das ondas do quadrante 30-60 no ponto 5 entre 1979 e 2012.....	49
Figura 22 –	Série temporal de direção das ondas do quadrante 60-90 no ponto 5 entre 1979 e 2012.....	50
Figura 23 –	Série temporal de direção das ondas do quadrante 90-120 no ponto 5 entre 1979 e 2012.....	50
Figura 24 –	Série temporal de direção das ondas do quadrante 120-360 no ponto 5 entre 1979 e 2012.....	51
Figura 25 –	Mapas do coeficiente de regressão linear (superior) e do fator R^2 do coeficiente de regressão (inferior) de frequência de ocorrência anual de direção de ondas do quadrante de direção 0-30 entre os anos 1979 e 2012. Os valores foram multiplicados pelo tamanho da série, de forma a representar o percentual de mudanças ao longo do período observado.....	53
Figura 26 –	Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 30-60 entre os anos 1979 e 2012.....	55
Figura 27 –	Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 60-90 entre os anos 1979 e 2012.....	57
Figura 28 –	Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 90-120 entre os anos 1979 e 2012.....	59
Figura 29 –	Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 120-360 entre os anos 1979 e 2012.....	61
Figura 30 –	Série temporal de altura de onda e coeficiente linear de tendência no ponto 5 entre os anos 1979 e 2012.....	62
Figura 31 –	Mapa do coeficiente de regressão linear (superior) e mapa de	

	fator R^2 (inferior) para altura de ondas entre 1979 e 2012.....	64
Figura 32 –	Série temporal de período de onda e coeficiente linear de tendência no ponto 5 entre os anos 1979 e 2012.....	65
Figura 33 –	Mapa do coeficiente de regressão linear (superior) e fator R^2 (inferior) para período de ondas entre 1979 e 2012.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os dados de frequência de direção das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o ano 2000.....	21
Tabela 2 – Comparação entre os dados de frequência de altura (Hs) das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o ano 2000.....	22
Tabela 3 – Comparação entre os dados de frequência de período das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o ano 2000.....	22
Tabela 4 – Comparação entre os dados médios de frequência de direção das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o período de 1979 a 2000.....	23
Tabela 5 – Comparação entre os dados médios de frequência de altura (Hs) das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o período de 1979 a 2000.....	23
Tabela 6 – Comparação entre os dados médios de de frequência de período das ondas provindos do ERA Interim e dados <i>in situ</i> para o período de 1979 a 2000.....	23
Tabela 7 – Localização dos pontos estudados.....	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Área de estudo	15
2 OBJETIVO	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Comparação com dados in-situ	20
4.2 Variabilidade espacial	24
4.2.1 Direção	24
4.2.2 Altura	29
4.2.3 Período	33
4.3 Variabilidade sazonal	38
4.3.1 Direção	38
4.3.2 Altura	40
4.3.3 Período	42
4.4 Variabilidade inter-anual e de longo periodo.	44
4.4.1 Direção	44
4.4.2 Altura	62
4.4.3 Período	65
5 CONCLUSÃO	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

Os processos costeiros são resultado das interações entre os agentes dinâmicos da costa e são fundamentais para entendimento da dinâmica local e para segurança da população e atividades presentes. O entendimento das condições de ondas, ventos, correntes, dentre outras variáveis, são a base para qualquer estudo sobre processos da zona costeira (VIEIRA et al., 2007).

Entre as atividades realizadas na plataforma continental, que são impactadas pelo regime de ondas, destacam-se a extração do petróleo, navegação e operação portuária, pesca, cultivo de organismos marinhos (maricultura) e entretenimento (banhistas e esportistas náuticos).

As ondas de gravidade oceânicas são movimentações da superfície dos oceanos geradas pelo atrito dos ventos. Estas ondas podem ser formadas pela ação local dos ventos ou por ventos remotos, normalmente associados a tempestades em regiões mais distantes. As ondas geradas pelas forçantes locais apresentam períodos irregulares e inferiores a 10 segundos e são chamadas de ondas vagas ou do tipo "sea", enquanto as ondas marulho (ou do tipo "swell") são ondulações maiores com período maior que 10 segundos. (DA SILVA et al., 2011).

As características de altura, período e direção das ondas variam em função da forma como são geradas, dependendo de três fatores de interação entre vento e superfície do oceano: intensidade do vento, período que o vento sopra e extensão da área de atuação do vento ("fetch") (VIEIRA et al., 2007). As condições de ondas observadas com mais frequência durante um certo intervalo de tempo definem o clima de ondas da região. Pode-se caracterizar o clima de ondas por base nas condições sazonais de direção representadas em histogramas e estatística básica, como o mínimo, máximo, média, variação e desvio padrão de valores para altura e período de onda. As ondas do tipo sea, em comparação com ondas do tipo swell, percorrem pequenas distâncias, enquanto as ondas swell viajam distâncias maiores em diferentes direções e velocidades e se somam. A geração de ondas deste tipo (swell) também está associada com o caminho que percorrem e a forma como elas se somam. O atrito com o fundo do mar e variação de declive são outros fatores que também influenciam nos parâmetros de onda.

Ao atingirem a zona costeira, a energia contida nas ondas é dissipada, interagindo com os demais processos dinâmicos da costa. Dessa forma, as ondas são importantes agentes que influenciam sob a morfologia da costa, geração de correntes, transporte de sedimento e materiais (VIEIRA et al., 2007).

Os processos dinâmicos que ocorrem na zona costeira envolvem o regime de ondas, correntes marítimas, vento e movimentação de sedimentos. A chegada de trens de ondas à costa pode formar correntes de deriva litorânea, causando movimento de água por influência de correntes de retorno ("*RIP currents*") e gerando correntes locais que transportam massas de água em direção à costa e depois retornam para o oceano (CERC, 1984).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é a região onde há confluência de ventos alísios por ser uma área de baixa pressão atmosférica. Este sistema desloca-se meridionalmente por causa da variação de incidência dos raios solares durante o ano. Durante os meses de janeiro a maio, a ZCIT se posiciona mais ao sul, enquanto que durante os meses de junho a dezembro, a ela fica posicionada mais ao norte da linha do equador (XAVIER et al. , 2003). Os ventos alísios de sudeste são mais intensos e predominam durante os meses de agosto a outubro, enquanto que durante os meses de março e abril os ventos apresentam menor intensidade e vêm da direção nordeste. (MAIA, 1998).

Este deslocamento altera sazonalmente o regime de ondas formadas sobre a região, mas de forma geral as ondas se propagam predominantemente da direção leste para a costa. Além disso, os eventos de tempestade do inverno no Hemisfério Norte, podem gerar ondas que chegam como *swell* na nossa região, principalmente vindas da direção norte (FERREIRA & MICHELETO, 2005).

A variabilidade inter-anual (> 1 ano) do clima de ondas é mais bem conhecida na literatura internacional e sabe-se, por exemplo, que as condições locais de ondas e vento são influenciadas por fenômenos climáticos como El Niño e Oscilação do Atlântico Norte. Seymour et. al. (1984) identificou significativo aumento na altura das ondas que atingem a costa da Califórnia, oeste dos Estados Unidos, durante o intenso El Niño ocorrido nos anos de 1982-1983. Allan and Komar (2002) ao investigarem eventos de tempestade na porção noroeste do Oceano Pacífico

durante o El Niño nos anos 1997-98 também perceberam aumento significativo da altura das ondas que atingiam a região.

No oceano Atlântico Tropical, eventos de variabilidade climática inter-anual, como o dipolo no Atlântico Tropical e o ENSO, podem influenciar no posicionamento da ZCIT, interferindo sob o sistema de ventos de toda a região (INNOCENTINI et. al. 2005 e SILVA et. al. 2011).

Apesar da importância ambiental e socioeconômica das ondas, ainda existem poucos trabalhos sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre o regime de ondas. Charles et. al (2012) observou alterações no regime de ondas na região da baía de Biscay, na França, em escalas sazonais e interanuais, relacionando a variabilidade temporal de longo período com mudanças climáticas. Outros estudos, realizados no Mar Mediterrâneo (LIONELLO e SANNA, 2005), na Nova Zelândia (LAING, 2000) e no Mar da Noruega (WOOLF et. al. 2002), também apresentam uma correlação entre o regime de ondas e mudanças climáticas.

Não existem estudos específicos para os efeitos de mudanças climáticas sobre o regime de ondas no Atlântico Tropical, porém o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2013) relatou pequeno aumento na altura das ondas e na intensidade dos ventos no Hemisfério Sul. O mesmo relatório indica um aumento da frequência de tempestades e ciclones no Atlântico Norte. Como as ondulações que chegam à região norte e nordeste do Brasil são resultantes destes tipos de fenômenos, é de se esperar que esteja havendo variações no regime de ondas da região.

Os estudos sobre ondas no Brasil se restringem a aspectos descritivos. Pianca et al. (2010) observaram que as ondas mais enérgicas atingem a costa sul e sudeste o país durante o inverno, enquanto no verão as ondas mais enérgicas atingem a costa norte e nordeste. Na costa do Ceará, de acordo com Da Silva et. al. (2011), foi identificado maior ocorrência de valores de altura de onda máxima durante o primeiro semestre em relação ao segundo durante os anos 1997, 2000 e 2001.

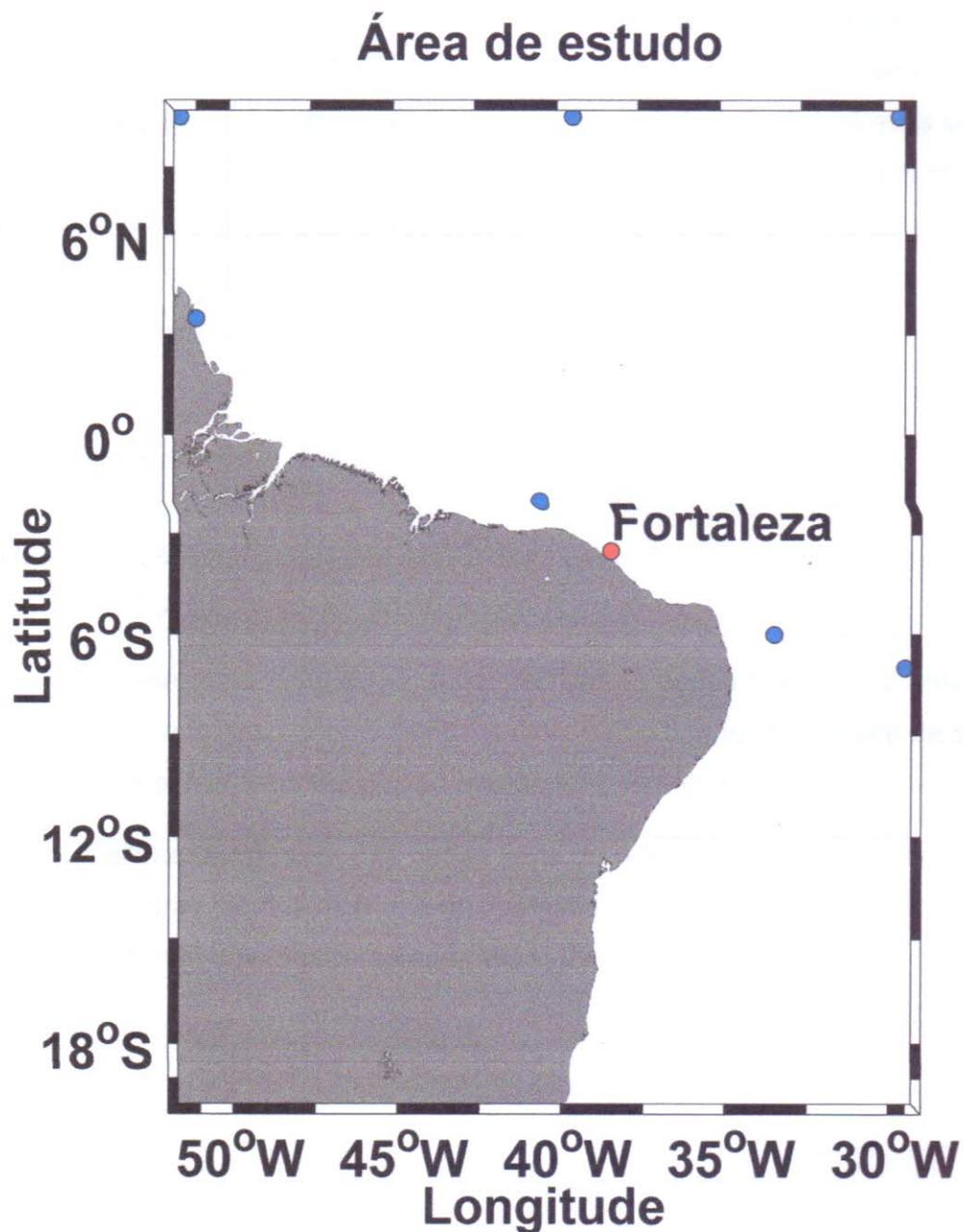
Não existem estudos sobre variações inter-anuais e possíveis efeitos de mudanças climáticas no regime de ondas. Neste sentido, este estudo propõe

preencher esta lacuna científica avaliando 34 anos de dados de ondas do modelo de reanálise ERA-Interim com o intuito de se analisar a variabilidade interanual e de longo termo no Atlântico Tropical. Os 34 anos são referentes ao período de 1979 a 2012.

1.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada entre as coordenadas geográficas 3°N 34°W a 6°S 52°W , na porção sudoeste do Oceano Atlântico Tropical, que se estende ao longo da costa dos estados Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (Figura 1). A região costeira próximo à capital do estado do Ceará, Fortaleza, será estudada mais detalhadamente.

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: O autor.

De forma geral a costa norte e nordeste brasileira é considerada calma por não apresentar agitações marítima de grande magnitude. O clima de ondas da região do Atlântico Tropical é fortemente influenciado pelo padrão de ventos locais. A altura dessas ondas podem variar de valores inferiores a 1 metro e chegar a 3 metros; período, de 6 a 21 segundos; e direções leste, nordeste, norte, noroeste e sudeste (PIANCA et al., 2010).

As ondas na região podem ser dos tipos "sea" e "swell". As do tipo *sea* chegam predominantemente pela direção leste, enquanto as do tipo *swell* chegam principalmente de norte. Em geral, áreas com a costa voltada para o Hemisfério Norte na região apresentam mais ondas do tipo *swell* por estarem mais susceptíveis a receber ondulações geradas em locais mais distantes, no Atlântico Norte. Na costa do Ceará, foi identificado que a direção predominante das ondas é de 40-60° durante os meses de janeiro a abril, enquanto que durante os meses de junho a novembro as ondas chegam predominantemente no quadrante de 100-120° (DA SILVA et al., 2011).

Cerca de 80% das ondas que atingem o litoral do Ceará apresentaram período de pico entre 4 e 9 segundos, representando ondas do tipo *sea*. Os restantes 20% são compostos por ondas com períodos característicos de ondas do tipo *swell*. (DA SILVA et. al., 2011).

Nota-se maior frequência de ocorrência de ondas marulho durante o primeiro semestre do ano. Isso ocorre devido à diminuição dos ventos alísios de sudeste e o aumento de pistas *fetch* e agitação marítima no Atlântico Norte.

A altura significativa das ondas varia de 0,8 m a 1,5 m, com maior frequência entre as alturas de 1,1 m e 1,2 m. As maiores alturas de onda são identificadas durante o primeiro semestre do ano (MMA, 2006).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Investigar a variabilidade temporal do regime de ondas na porção sudoeste do oceano Atlântico Tropical (3°N 34°W a 6°S 52°W), que inclui a costa de alguns estados do Brasil, são eles: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar as variações sazonais da altura, período, direção das ondas que ocorrem na região;
- Analisar a variabilidade espacial do regime de ondas;
- Analisar a variabilidade interanual e de longo período do regime de ondas;
- Quantificar as diferenças entre os dados *in situ* do Porto do Pecém e os do modelo ERA-Interim para o ano de 2000;
- Verificar se os dados da reanálise ERA-Interim podem ser utilizados para gerenciamento costeiro e estudos de impacto ambiental na costa;
- Observar a relação entre clima de ondas da região e o padrão de ventos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizados 34 anos de dados de saída do modelo ERA-Interim disponibilizados online no site http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/.

Os parâmetros de onda analisados são direção, altura e período, referentes aos anos de 1979 a 2012 na porção sudoeste do Atlântico Tropical.

ERA-Interim é o mais atualizado modelo de reanálise atmosférica global produzido pelo Sistema Integrado de Previsões (*"Integrated Forecasting System"*, IFS) do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (*"The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts"*, ECMWF).

O modelo ERA-Interim foi desenvolvido para substituir o modelo ERA-40. Além de corrigir erros encontrados no ERA-40, o ERA-Interim apresentou avanços em aspectos técnicos como a melhoria na metodologia de assimilação de dados.

Os dados de ondas do ERA-Interim foram gerados através do *"Wave Model"* (WAM), um modelo de ondas que resolve a evolução do espectro bidimensional de ondas superficiais através da integração da equação de transporte de energia, com base nas condições atmosféricas de reanálise. O modelo assimila dados de altura e direção de ondas captados pelos satélites ERS-1, ERS-2, ENVISAT e Jason-1. A qualidade de dados usados no modelo é controlada através de comparações com observações dos satélites acima e de dados *in situ* de onda obtidos através de bóias, plataformas e navios de observação (BIDLOT et al., 2002).

O ERA Interim produz resultados a cada 3 horas para toda a superfície terrestre. O modelo usa uma grade numérica com resolução espacial de 1,5° latitude x 1,5° longitude. O espectro de ondas pode variar em 24 direções e 30 frequências. (DEE et al., 2008). Neste trabalho foram usados dados diários.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparação com dados in-situ.

Devido a batimetria usada no modelo do o ERA-Interim e a resolução espacial da grade, são esperadas diferenças com relação ao regime de ondas observados junto à costa. Para analisar estas diferenças, os parâmetros de ondas encontrados do ERA-Interim foram comparados com dados *in situ* coletados por um ondógrafo do Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH) localizado no Porto do Pecém.

Foram comparados dados médios do período de 1979 a 2012 e para o ano específico de 2000. Estes parâmetros dos dados foram obtidos através dos relatórios anuais de monitoramento ambiental da área marítima adjacente ao Pecém, feito pelo INPH.

O ondógrafo de coleta de dados fica localizado num ponto ao largo do Porto do Pecém, nas coordenadas 03° 29' 31" S e 38° 49' 03" W, enquanto que o ponto de grade do ERA-Interim, usado na comparação, está localizado cerca de 40 quilômetros do Porto do Pecém.

As tabelas 1, 2 e 3 mostram os dados de direção, altura e período das ondas do ano de 2000, obtidos através do modelo de reanálise e dos dados *in situ* do INPH. Nota-se uma superestimação pelo modelo ERA-Interim de ondulações vindas das regiões norte/nordeste e subestimação das que vêm de leste/sudeste ao comparar com a frequência dos dados *in situ* (Tabela 1).

Estas diferenças devem ocorrer porque o ponto de coleta do ondógrafo do Porto do Pecém está localizado próximo à costa, em águas rasas, tornando o local mais propício a receber ondulações de leste e sudeste, que são geradas pelo ventos alísios locais. Já os dados do modelo de reanálise são oriundos do ponto de grade utilizado no modelo, que está localizado aproximadamente a 40 km do local do ondógrafo, em águas profundas e por isso as ondulações de norte/nordeste são detectadas em maiores porcentagens.

Além disso, percebe-se que a frequência de ocorrência de ondas entre 0,5 m e 1,0 m no ERA-Interim é maior do que nos dados observados e menor para ondas entre 1,5 m e 2,0 m (Tabela 2). Isto ocorre porque as ondas aumentam de tamanho

devido ao efeito da diminuição da profundidade e portanto a estação do Pecém, localizada em águas rasas, possui uma maior frequência de ocorrência de ondas com maiores alturas.

A tabela de frequência de ocorrência do período de ondas mostra que o ERA-Interim subestima as ondulações do tipo *swell*, uma vez que a porcentagem de ondas com período superior a 10 segundos apresenta valores bem menores em comparação com os dados *in situ* (Tabela 3). Não encontramos uma explicação plausível para justificar tal ocorrência.

Tabela 1 – Comparação entre os dados de frequência de direção das ondas providos do ERA-Interim e dados *in situ* para o ano 2000.

Direção	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
0° - 15°	15,64%	0,18%	+15,46%
15° - 30°	14,25%	3,74%	+10,51%
30° - 45°	11,50%	13,45%	-1,95%
45° - 60°	12,57%	16,60%	-4,03%
60° - 75°	13,89%	5,08%	+8,81%
75° - 90°	19,90%	4,16%	+15,74%
90° - 105°	11,97%	28,03%	-16,06%
105° - 120°	1,09%	28,41%	-27,32%
120° - 135°	0%	0,36%	-0,36%

Fonte: O autor.

Tabela 2 – Comparação entre os dados de frequência de altura (Hs) das ondas provindos do ERA-Interim e dados *in situ* para o ano 2000.

Hs	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
0,5 m a 1,0 m	42,17%	7,19%	+34,98%
1,0 m a 1,5 m	53,48%	59,08%	-5,60%
1,5 m a 2,0 m	4,35%	30,56%	-26,21%
2,0 m a 2,5 m	0%	3,15%	-3,15%

Fonte: O autor.

Tabela 3 – Comparação entre os dados de frequência de período das ondas provindos do ERA-Interim e dados *in situ* para o ano 2000.

Período	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
4 a 9 s	98,63%	81,2%	+17,43%
10 a 20 s	1,37%	18,7%	-17,33%

Fonte: O autor.

As tabelas 4, 5 e 6 mostram a comparação entre a média dos parâmetros de onda encontrados entre os anos 1979 a 2012, obtidos através da reanálise ERA-Interim, com os dados *in situ* tirados do relatório estatístico de ondas do Porto do Pecém para o período entre março de 1997 e março de 2000. Esta comparação foi feita para analisar se as diferenças encontradas são restritas para o ano de 2000 ou se elas se estendem ao padrão climatológico.

Os resultados observados nas tabelas 4, 5 e 6 se assemelham aos observados nas tabelas 1, 2 e 3, onde ondulações vindas de norte e nordeste e com altura entre 0,5 m e 1,0 m são superestimadas pelo modelo, e a frequência de ocorrência de *swell* é subestimada.

Como já foi comentado, estes dados foram obtidos em diferentes localizações e profundidades, sendo esperadas as diferenças observadas entre os dados do modelo ERA-Interim e os dados *in situ*. O objetivo desta seção foi quantificar estas diferenças.

Tabela 4 – Comparação entre os dados médios de de frequência de direção das ondas providos do ERA-Interim e dados *in situ* para o período de 1979 a 2000.

Direção	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
0° - 15°	6,27%	0,44%	5,83%
15° - 30°	12,19%	4,88%	7,31%
30° - 45°	30,21%	11,27%	18,94%
45° - 60°	38,80%	14,06%	6,67%
60° - 75°	10,45%	3,78%	1,54%
75° - 90°	1,54%	3,49%	1,95%
90° - 105°	0,11%	28,42%	28,31%
105° - 120°	0%	33,22%	33,22%
120° - 135°	0%	0,46%	0,46%

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Comparação entre os dados médios de de frequência de altura (Hs) das ondas providos do ERA-Interim e dados *in situ* para o período de 1979 a 2000.

Hs	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
0,5 m a 1,0 m	24,57%	3,81%	20,76%
1,0 m a 1,5 m	40,50%	51,25%	10,75%
1,5 m a 2,0 m	26,31%	39,49%	13,18%
2,0 m a 2,5 m	7,24%	5,44%	1,80%
2,5 m a 3,0 m	1,20%	0%	1,20%
3,0 m a 3,5 m	0,16%	0%	0,16%

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Comparação entre os dados médios de de frequência de período das ondas providos do ERA-Interim e dados *in situ* para o período de 1979 a 2000.

Período	ERA	IN SITU	DIFERENÇA
4 a 9 s	98,57%	79,90%	18,67%
10 a 20 s	1,42%	20,10%	18,68%

Fonte: O autor.

4.2 Variabilidade espacial

A análise espacial da climatologia (média de todos os dados entre 1979 e 2012) de ondas da região foi feita através de mapas e histogramas de direção, altura e período para pontos específicos. Os pontos estudados são indicados no mapa da área de estudo (Figura 1) e suas posições geográficas encontram-se registradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Localização dos pontos estudados.

Pontos	Latitude	Longitude
1	10.0°N	51.5°W
2	9.5°N	39.5°W
3	9.5°N	29.5°W
4	3.5°N	51.0°W
5	3.5°S	38.5°W
6	6.0°S	33.5°W
7	7.0°S	29.5°W
8	2.0°S	40.5°W

Fonte: O autor.

4.2.1 Direção

A Figura 2 representa o mapa climatológico da direção de ondas. Nesta imagem, a barra de cor representa as direções de propagação das ondas em graus.

Ao analisar o mapa climatológico da direção de ondas, nota-se que na porção norte da área de estudo, onde estão localizados os pontos 1, 2, 3, 4 e 8, há maior frequência de ondas chegando por NE. Conforme é feita análise dos pontos localizados mais ao sul da área, observa-se maior predominância de ondas vindo de SE.

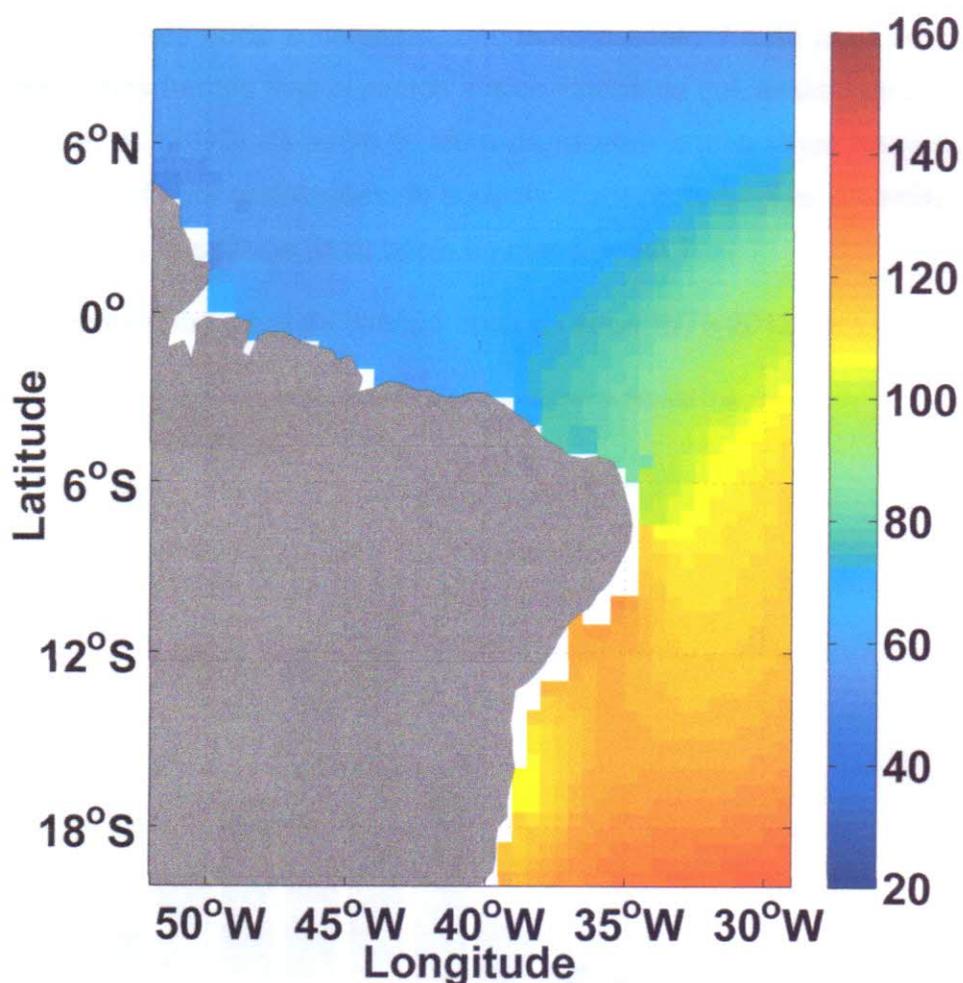
Este padrão de direção das ondas ocorre devido ao padrão de ventos e frentes frias que influenciam em cada ponto. Os pontos 6 e 7 recebem mais ondulações que chegam de SE, pois estão posicionados em locais que os tornam mais susceptíveis a receber ondas geradas pelas frentes frias e pelos fortes ventos de sul. Além disso, estes pontos estão expostos a eventos meteorológicos distantes,

como as ondas atmosféricas vindas de leste (distúrbios africanos), que tendem a gerar perturbações e interferir no regime de ondas, gerando principalmente ondulações do tipo *swell*. Este comportamento das ondas foi evidenciado também por Innocentini et al. (2005).

No ponto mais próximo da costa de Fortaleza, ponto 5, também há ocorrência de trens de ondas vindos de sudeste, mas com influência mais baixa devido a proteção da costa no local. Este padrão também foi observado por Pianca et al. (2010).

Os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 8 recebem, em maioria, ondulações vindas de norte a leste, mas há também baixa frequência de ondas chegando de sudeste no ponto 5. Assim como foi evidenciado por Pianca et al. (2010) e Maia (1998), os regimes de ondas desses pontos são fortemente influenciados pelos ventos alísios de nordeste e sudeste, controlados pela ZCIT, e por perturbações geradas por ciclones atmosféricos no Atlântico Norte.

Figura 2 – Mapa de média geral de direção entre os anos 1979 e 2012. Os círculos numerados mostram a localização dos pontos usados nas análises.



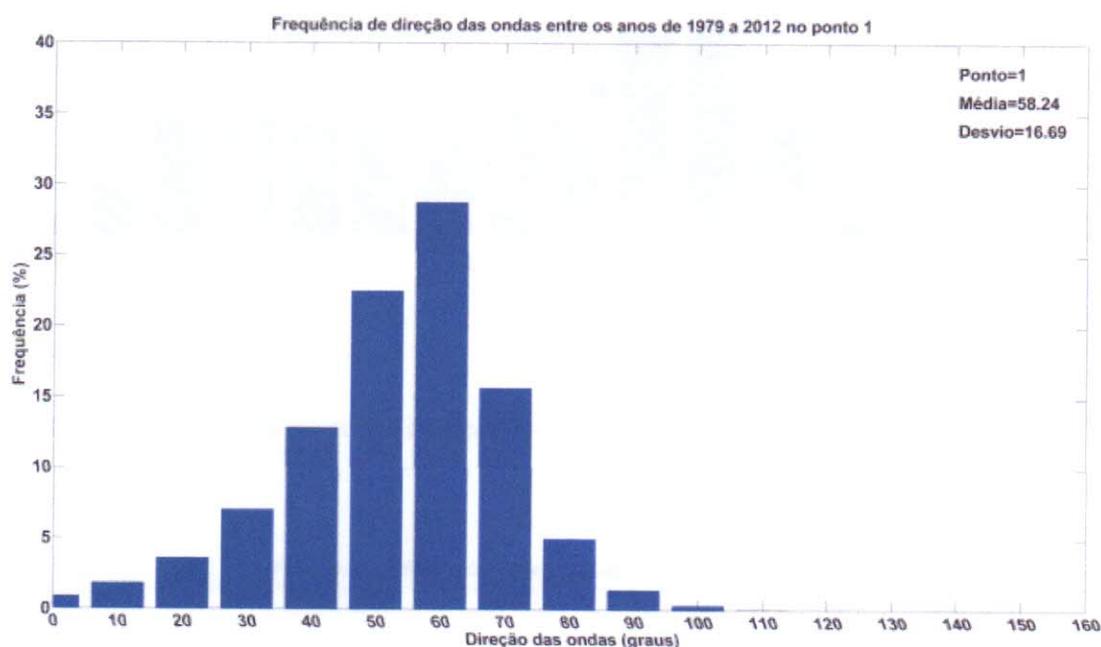
Fonte: O autor.

Este padrão fica evidente ao comparar os histogramas de distribuição de direções para os pontos 1, 5 e 7 (Figuras 3, 4 e 5). O eixo X destes histogramas representa a direção de propagação das ondas em graus, enquanto o eixo Y representa a porcentagem de ocorrência das ondas. Os histogramas dos demais pontos mostram um padrão similar e não foram apresentados.

No ponto 1 predominam-se ondas chegando de N-NE, no quadrante entre 40° e 70°. No ponto 5, a direção das ondas pode variar muito, chegando em direções que variam de 0° a 120° (norte a sudeste), mas chegam em maioria de leste e sudeste, variando entre 80° e 100°. Já no ponto 7, as ondulações podem chegar em um amplo quadrante de direções, variando entre 0° e 150°, mas a maioria das ondas chegam de sudeste, entre 110° e 130°.

Estes padrões ocorrem devido a localização de cada ponto. O ponto 1 está mais exposto aos ventos alísios controlados pela ZCIT, e portanto ocorrem mais ondas chegando de norte e nordeste, enquanto o ponto 7 está mais susceptível a ser afetado pelas frentes frias e ventos alísios vindos de sul, assim como observado por Pianca et al. (2010). O ponto 5, além de receber ondas vindo de norte a leste também é atingido por ondulações de sudeste e por perturbações oriundas da costa africana, mas em frequência mais baixa do que o ponto 7.

Figura 3 – Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 1.



Fonte: O autor.

Figura 4 – Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 5.



Fonte: O autor.

Figura 5 – Histograma geral de direção entre os anos 1979-2012 para o ponto 7.



Fonte: O autor.

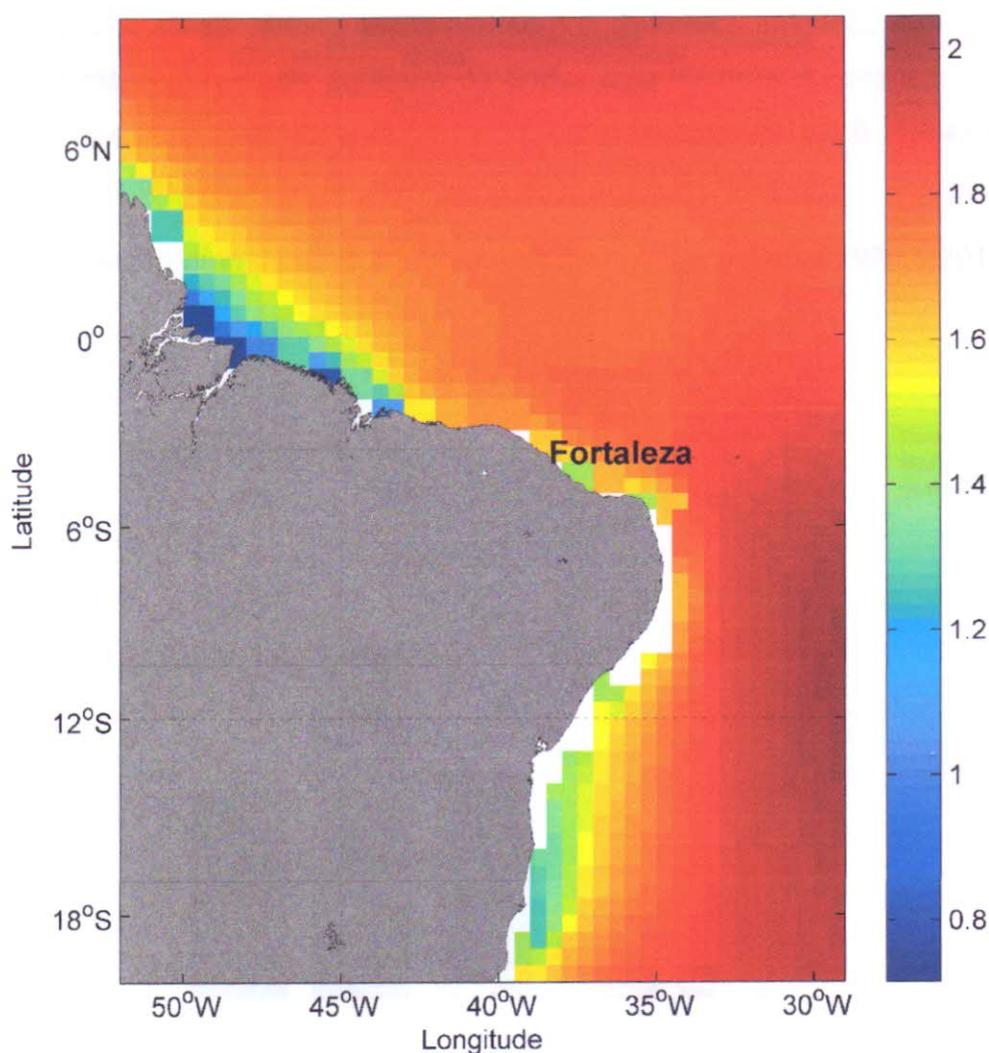
4.2.2 Altura

A Figura 6 representa o mapa climatológico de altura das ondas, onde a barra de cores representa a média da altura das ondas ao longo dos 34 anos estudados em metros.

O mapa climatológico de altura de ondas (Figura 6) mostra média de ondas variando entre 1,5 m e 2,0 m, porém as porções mais próximas à costa apresentam menor tamanho, podendo chegar a 1,0 m ou menos. Existe um máximo de altura de ondas próximo ao ponto 7, que provavelmente se deve às ondas geradas na costa oeste da África.

Há um padrão geral decrescente de altura de ondas da direção sul ao norte da costa do Brasil. Este comportamento se dá por conta dos diferentes fatores que podem influenciar sob regime das ondas em cada localidade. Os pontos 1, 2 e 3 são influenciados pelo regime dos ventos alísios de nordeste e por ondas remotas que são oriundas do Atlântico Norte, enquanto os pontos 6 e 7 estão mais expostos aos ventos alísios de sudeste e ondas de leste vindas do continente africano. Os pontos localizados mais próximos à costa, 4 e 5, apresentam menores ondas com relação às observadas em locais mais distantes do continente. Isso ocorre por causa do atrito das ondas com o fundo, que acontece por causa da redução de profundidade e varia de acordo com o declive. Tais observações também foram feitas por Innocentini (2005); Pianca et al. (2010); e Maia (1998).

Figura 6 – Mapa de média climatológica da altura de onda entre os anos 1979 e 2012.

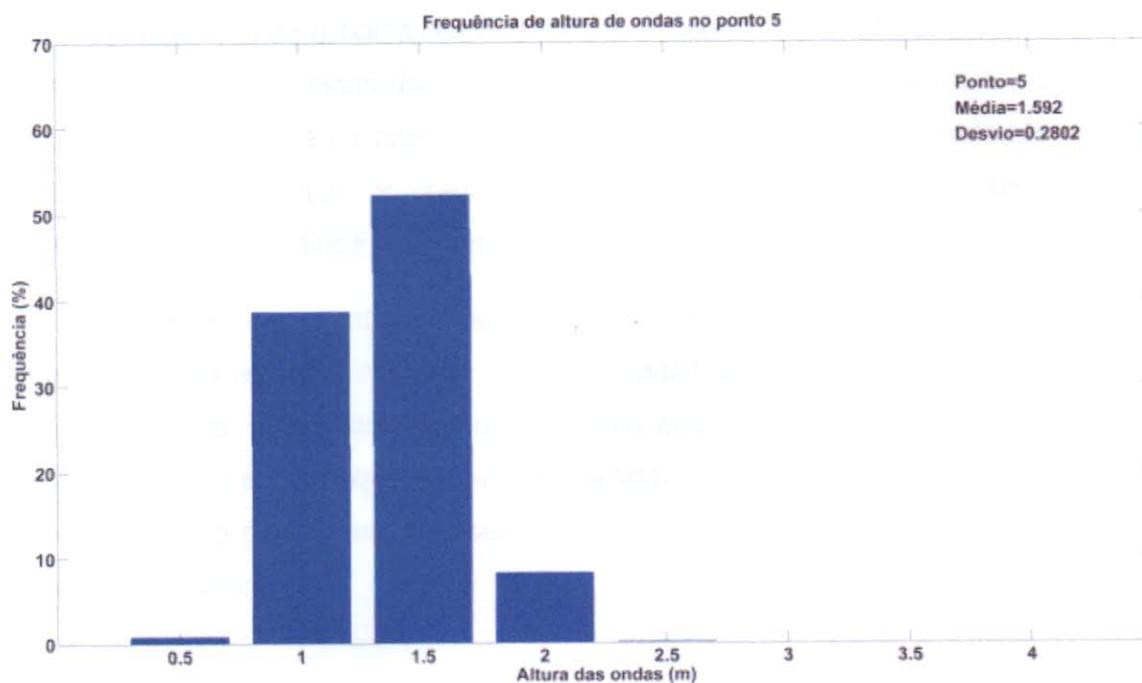


Fonte: O autor.

Os histogramas dos pontos 1, 5 e 7 (Figuras 7, 8 e 9) mostram a frequência de altura das ondas em cada altura de onda variando em 0,5 metros. O eixo X representa a altura das ondas em metros e o eixo Y o percentual de frequência de ocorrência das ondas. Com isto, foi visto que a altura predominante em todos os pontos é 1,5 m, mas que o ponto 7 possui maior frequência de ocorrência de ondas maiores que este valor.

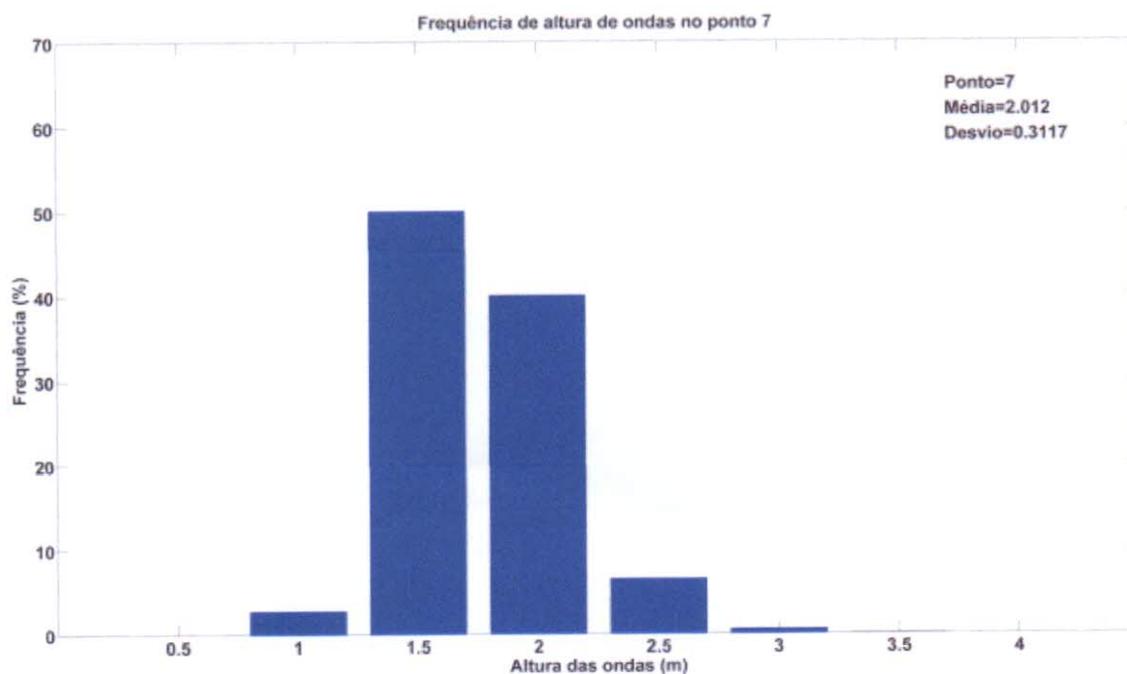
Os padrões avistados nos pontos 1, 5 e 7 diferem entre si principalmente devido às diferentes localizações em que se encontram e conseqüentemente são influenciados por diferentes padrões de ventos e sistemas meteorológicos. Os 3

Figura 8 – Histograma de média de altura de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 5.



Fonte: O autor.

Figura 9 – Histograma de média de altura de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 7.



Fonte: O autor.

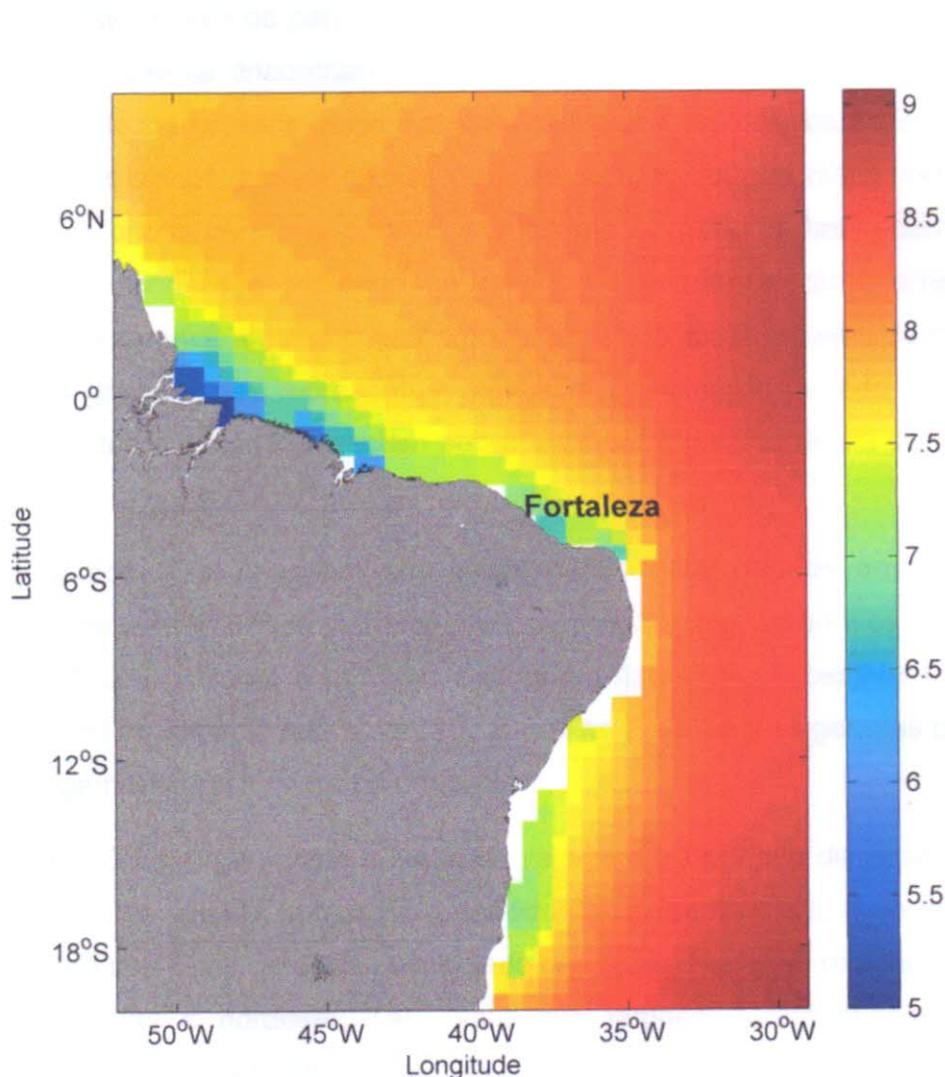
2.14134969 4

4.2.3 Período

Na figura 10 é apresentada a distribuição de período climatológico médio das ondas da região, onde a barra colorida indica a média de período das ondas. Neste mapa nota-se que as ondas da região possuem um período médio entre 7,8 s a 8,5 s, mas ao aproximar-se da costa, os períodos ficam bem menores, podendo chegar a 5,5 s. Há também duas porções localizadas em regiões mais distantes da costa onde o período pode atingir média de até 9 s.

Em geral, os pontos mais distantes do continente são atingidos por ondulações com períodos maiores em comparação aos observados nos pontos mais próximos à costa. Isso ocorre porque à medida que as ondas viajam, elas tendem a perder a energia e conseqüentemente o período diminui. Então, ondulações mais próximas à costa geralmente apresentam períodos menores do que ondulações em regiões mais distantes.

Figura 10 – Média do período de ondas entre os anos 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

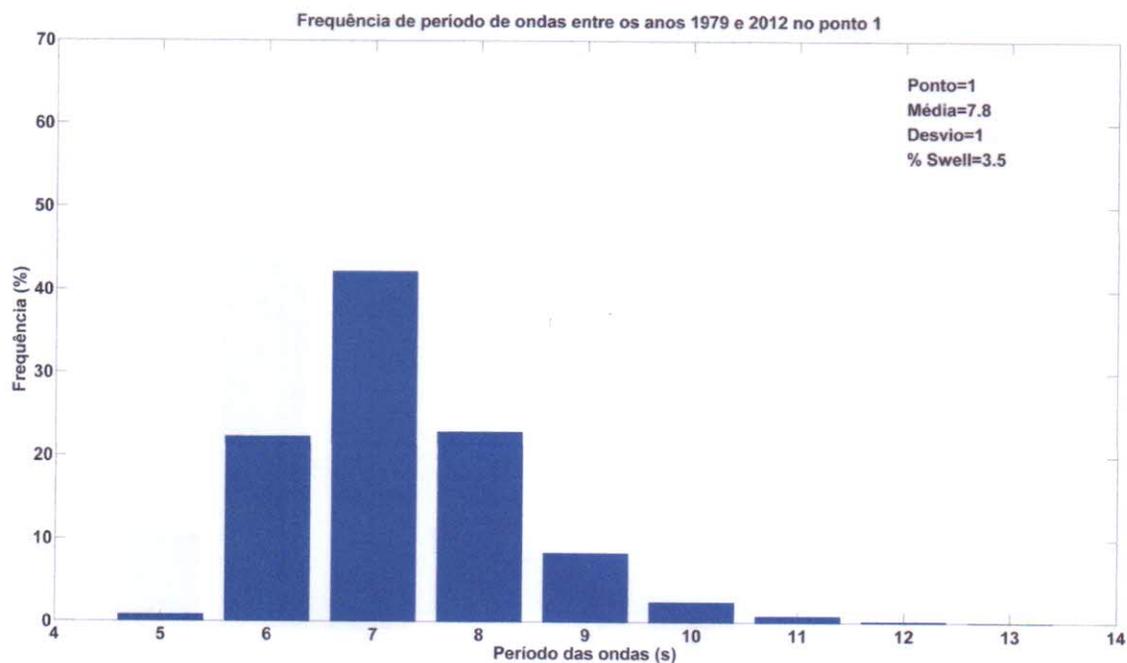
Os histogramas dos pontos 1, 5 e 7 (Figuras 11, 13 e 14) apresentam a frequência de ocorrência de ondas através da porcentagem do eixo Y para cada período de onda variando em 1 segundo do eixo X e mostram a porcentagem de *swell* em cada ponto. Percebe-se que o ponto 1, mais ao norte, e o ponto 7, mais ao sul, possuem uma maior porcentagem relativa de *swell*. Isto se deve a propagações de ondas geradas no Hemisfério Norte e na costa oeste da África. O ponto 5 (ponto de grade mais próximo à Fortaleza) possui um valor menor de *swell* por estar mais distante destes dois sistemas. Por outro lado, o ponto 3 (Figura 12) possui a maior ocorrência de *swell* (~10%) por estar mais próximo a estes dois sistemas.

A localização dos pontos 1, 3 e 7 pode ser a razão pela qual estes 3 pontos apresentam maior média de período (7,8 s, 8,7 s e 8,5 s, respectivamente) do que o ponto 5 (7,1 s), pois se encontram em locais mais distantes da costa, ficando mais expostos aos efeitos gerados pelos sistemas ciclônicos e distúrbios de leste. Estes eventos meteorológicos, apesar de não ocorrerem em frequência diária, influenciam na geração de ondas de forma pontual, aumentando o período das ondas quando estes eventos ocorrem e afetando na média de frequência de ocorrência do parâmetro. A ocorrência destes eventos pode ser evidenciada através da presença de picos nos gráficos, que representam elevação repentina do período das ondas. Além disso, estes eventos influenciam sob a frequência de ocorrência de *swell* em cada local.

Os pontos 3 e 7 podem ser influenciados pelos efeitos dos distúrbios atmosféricos de leste oriundos da África, mas o ponto 3 sente também os efeitos dos ciclones do Atlântico Norte, e por isso este ponto fica mais susceptível a receber ondulações do tipo *swell* do que o ponto 7, já que as perturbações geradas por estes eventos atingem o ponto 3 na forma de *swell*.

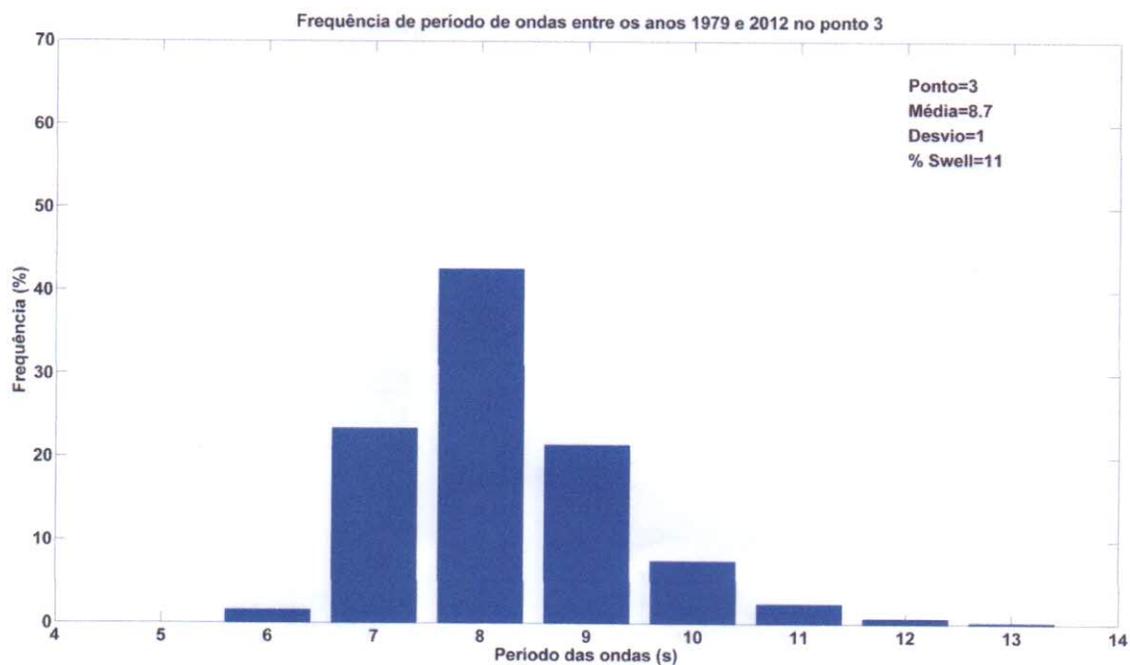
O ponto 5 foi o que mostrou menores valores para período de onda. A razão para ocorrência de valores baixos para período de ondas no ponto 5 se dá porque este ponto tem seu clima de ondas controlado principalmente pelo regime de ventos alísios de sudeste e nordeste. Tais resultados também foram observados por Innocentini (2005) e Maia (1998).

Figura 11 – Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 1.



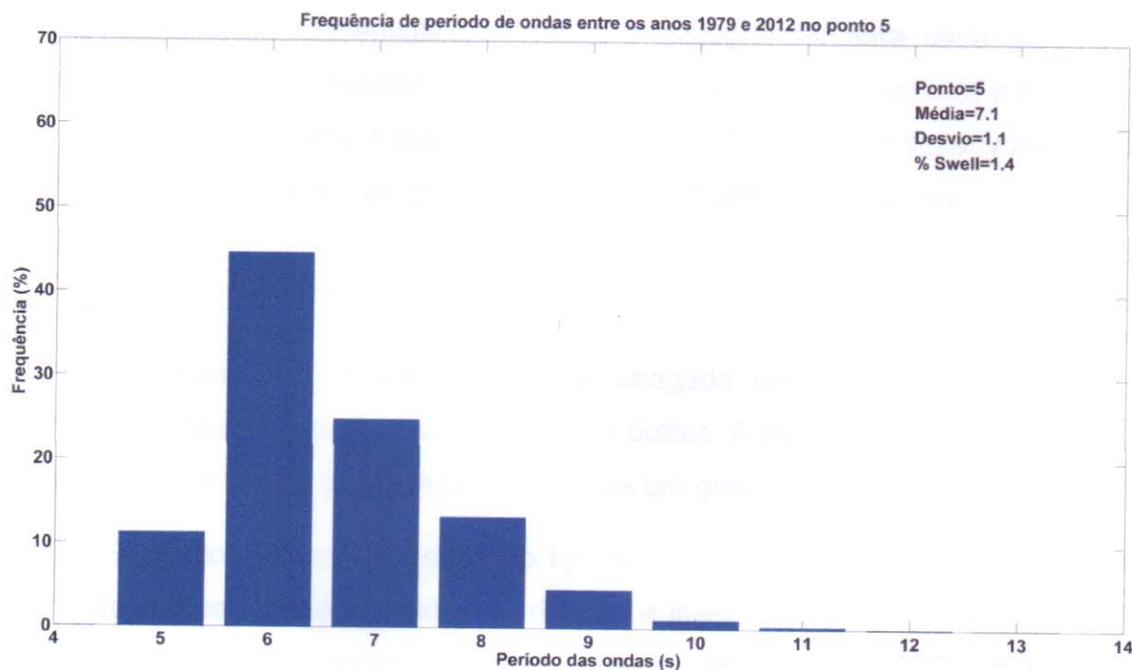
Fonte: O autor.

Figura 12 – Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 3.



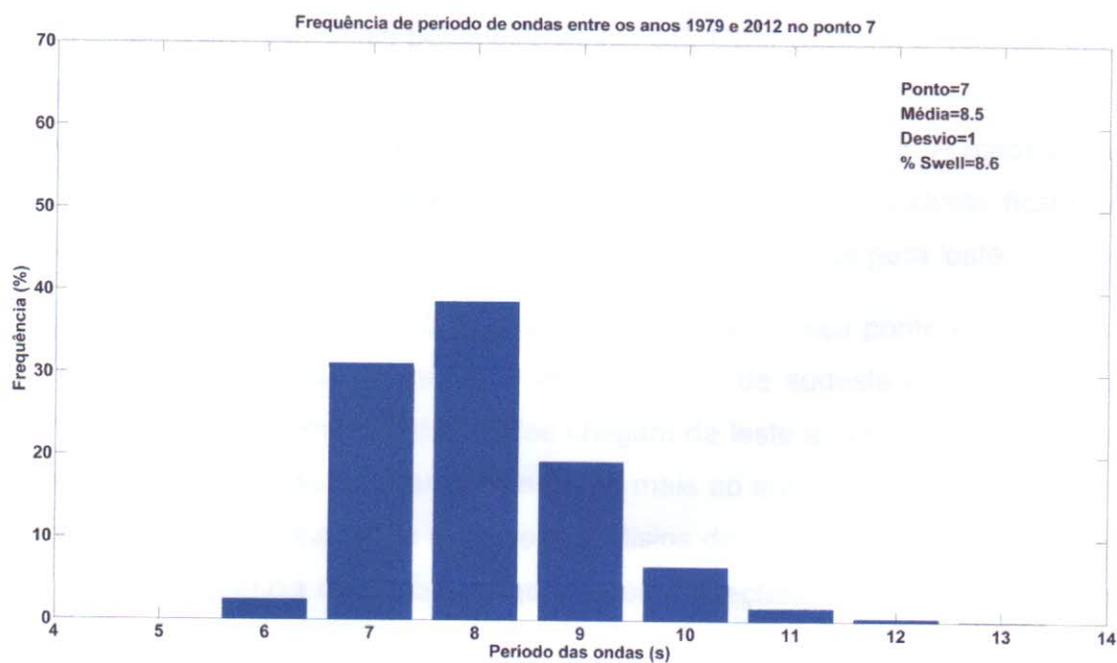
Fonte: O autor.

Figura 13 – Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 5.



Fonte: O autor.

Figura 14 – Histograma de média de período de onda entre os anos 1979 e 2012 para o ponto 7.



Fonte: O autor.

4.3 Variabilidade sazonal

Para a análise sazonal de direção, altura e período de ondas entre os anos 1979 e 2012, foram desenvolvidos mapas e histogramas para cada parâmetro, dividindo o ano em 4 trimestres: janeiro a março (1 a 3), abril a junho (4 a 6), julho a setembro (7 a 9) e outubro a dezembro (10 a 12). Os histogramas desenvolvidos são relativos ao ponto 5, ponto de grade mais próximo à costa de Fortaleza.

4.3.1 Direção

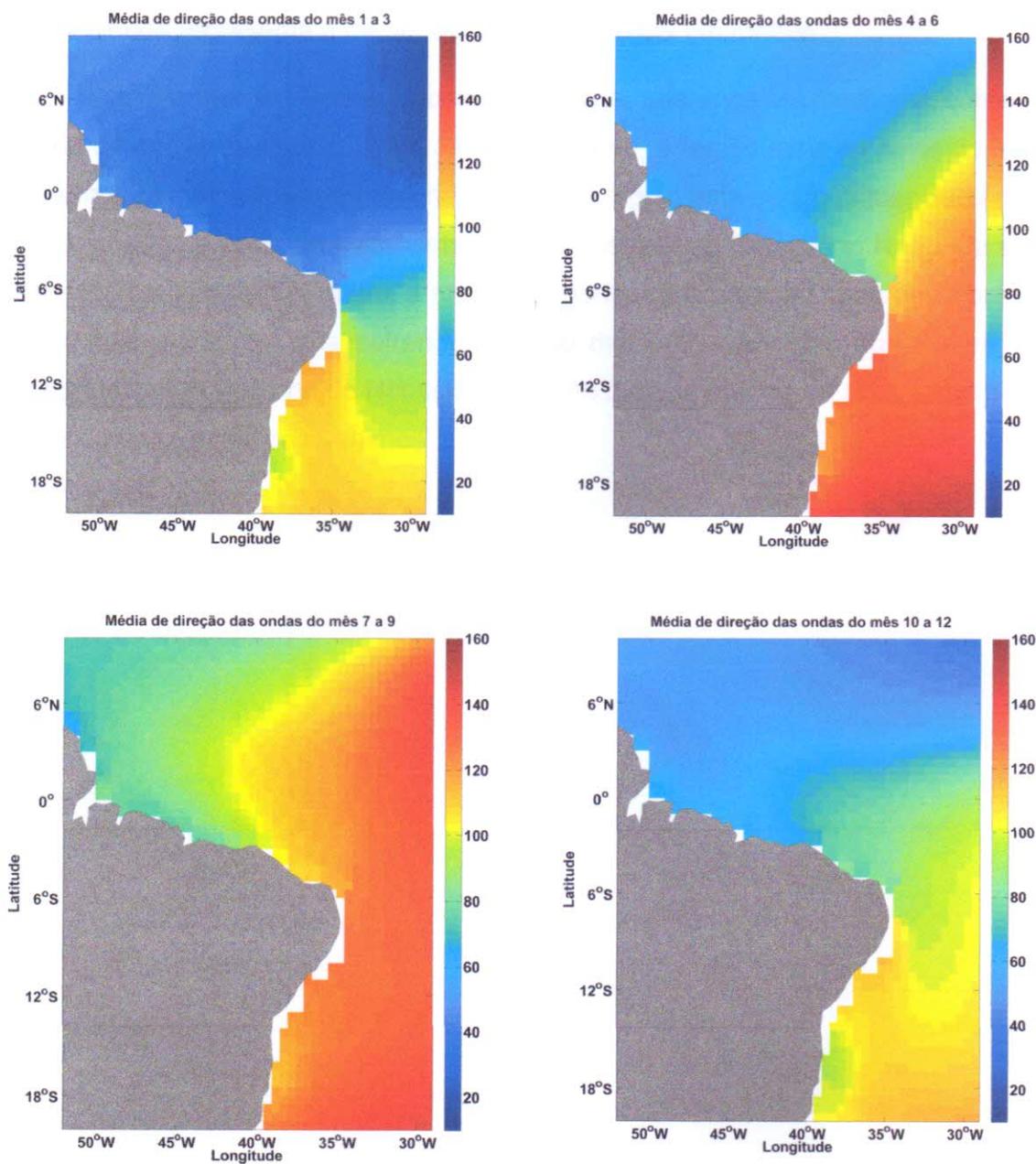
Os mapas com direção média de chegada de ondulações (Figura 15) mostram padrões trimestrais distintos uns dos outros. A barra colorida de cada mapa representa a direção de propagação das ondas em graus.

A variação sazonal de ondas do tipo *sea* na costa do Ceará está ligada ao regime de ventos e suas variações de direção e intensidade. O regime de ventos e ondas da região é controlado pelo posicionamento da ZCIT, que muda latitudinalmente em um ciclo anual.

De janeiro a março, nota-se maior frequência de ondas chegando pelas direções N-NE na porção norte, tendendo para chegada de ondas na direção leste em direção ao sul do nordeste brasileiro. Entre abril e junho, percebe-se que as ondas tendem a chegar mais pelas direções E-SE. Essa variação ocorre em função do posicionamento da ZCIT. De janeiro a março, quando a ZCIT está localizada em seu ponto mais ao sul, predominam-se ondas chegando de N-NE. À medida que a ZCIT vai movimentando-se para o norte, os ventos de leste e sudeste ficam mais intensos, então as ondas tendem a variar a direção de chegada para leste.

De julho a setembro, a ZCIT já está localizada em seu ponto mais ao norte. Isso favorece a chegada de intensos ventos alísios de sudeste e é durante esse mesmo período que a maioria das ondas chegam de leste a sudeste. Com o passar do tempo, a ZCIT tende a voltar para o ponto mais ao sul, protegendo a região dos alísios de sudeste e recebendo mais ventos alísios de N-NE. Então, entre outubro e dezembro a frequência de ondas chegando pelas direções norte e nordeste volta a aumentar.

Figura 15 – Mapas trimestrais de média de direção das ondas para os anos de 1979 a 2012.



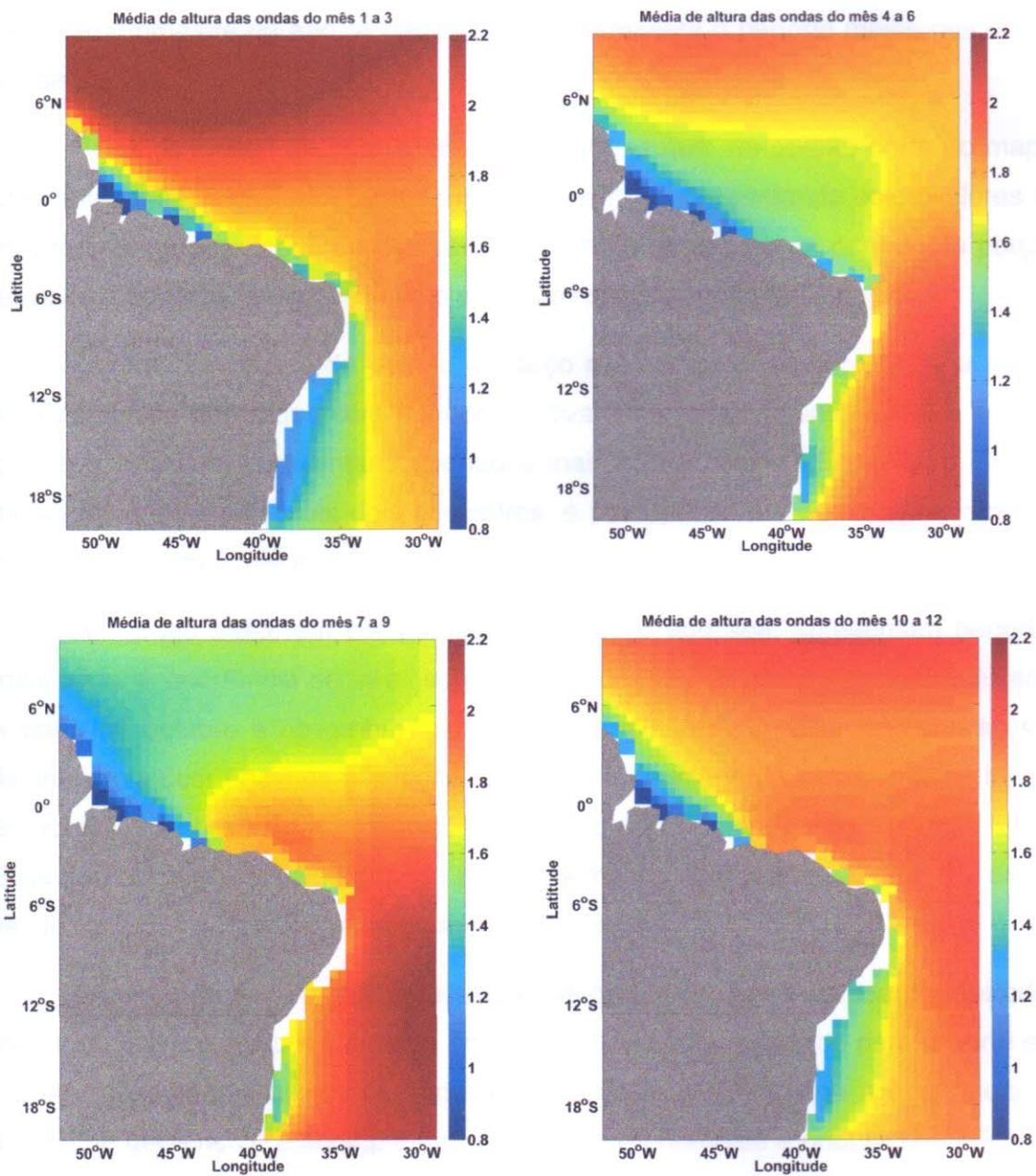
Fonte: O autor.

4.3.2 Altura

A Figura 16 mostra mapas de altura de onda para cada trimestre do ano. A barra colorida representa a média de altura das ondas em metros.

Através destas figuras, observa-se uma diferença sazonal marcante no regime de ondas da região. Entre Janeiro e Março, a região mais ao norte do mapa apresenta as maiores alturas de onda pois esta região está sendo influenciada pelas ondas geradas a partir das tempestades que ocorrem no Hemisfério Norte. Já entre os meses de Julho a Setembro, a região sul do mapa possui os maiores valores de altura, pois a mesma está sofrendo o efeito das ondas geradas por frentes frias características do inverno do Hemisfério Sul. As demais épocas do ano marcam uma transição entre estes dois regimes.

Figura 16 - Mapas trimestrais de média de altura das ondas para os anos de 1979 a 2012.



Fonte: O autor.

4.3.3 Período

A Figura 17 mostra o período médio observado durante os anos 1979 a 2012 para cada trimestre do ano. A barra colorida representa o período médio das ondas em segundos.

Entre os meses de abril a setembro, nota-se que, na porção norte do mapa, predominam-se ondas com período entre 6,5 e 7,5 s, aumentando estes valores ao movimentar-se para leste. É observado entre maiores valores de período na porção norte do mapa nos meses de julho a setembro do que entre abril e junho.

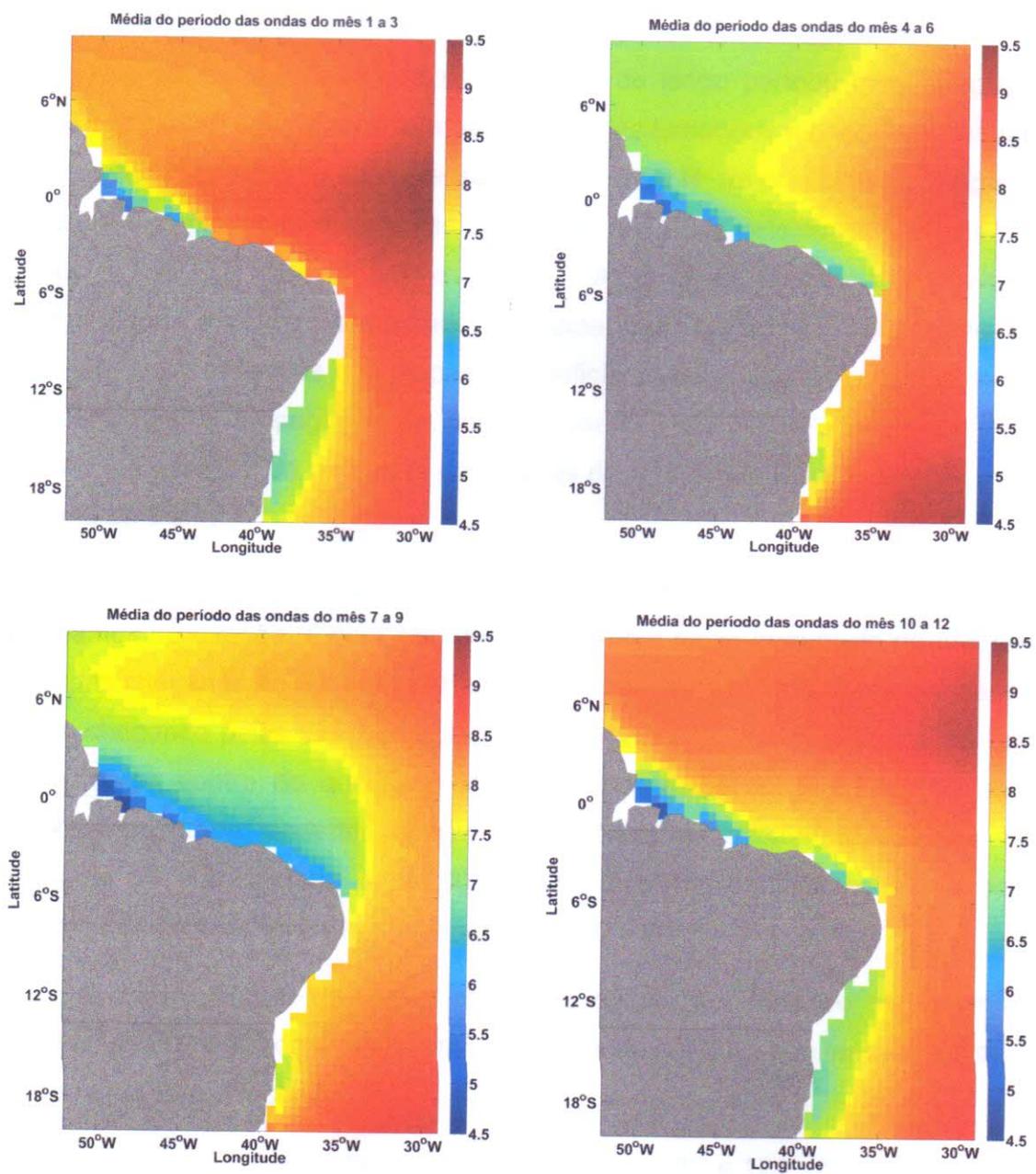
Durante os meses de janeiro a março e outubro a dezembro toda a região está dominada por ondas com período relativamente alto, variando entre 8 s e 9 s com pequena área apresentando períodos mais baixos, entre 6,5 s e 7,5 s. Apesar da semelhança entre estes dois semestres, é perceptível que no primeiro trimestre do ano o período é maior.

As ondas *swell*, em comparação com as do tipo *sea*, apresentam períodos mais altos. A ocorrência de *swell* se concentra durante o primeiro semestre do ano. A partir de outubro e novembro, a ZCIT passa movimentar-se em direção ao sul, diminuindo a ocorrência de alísios de sudeste e aumentando a incidência dos alísios de nordeste e chegada de ondulações oriundas de turbulências no Atlântico Norte. Esse padrão permanece durante os primeiros meses do ano e o período das ondas vai diminuindo conforme o meio do ano se aproxima.

Entre os meses de abril e setembro, as ondas tendem a apresentar períodos menores. Isso ocorre porque nesta época a ZCIT já está migrando para o norte e a incidência de ventos alísios de sudeste aumenta, o que restringe a ocorrência de *swell*, que geralmente é acompanhado de alísios de nordeste e ondulações oriundas do Atlântico Norte, que, por sua vez, são geradas principalmente nos meses de dezembro a fevereiro (inverno no Hemisfério Norte).

Estas observações também foram notadas por Maia (1998), Pianca, Mazzini e Siegle (2010) e Silva et al.,(2011).

Figura 17 - Mapas trimestrais de média de período das ondas para os anos de 1979 a 2012.



Fonte: O autor.

4.4 Variabilidade inter-anual e de longo período.

4.4.1 Direção

A análise de variabilidade inter-anual e de longo período para direção das ondas entre 1979 e 2012 foi feita através de séries temporais e mapas de frequência de ocorrência, coeficiente de regressão linear e fator R^2 do coeficiente de regressão linear para os principais quadrantes de direção de ondas detectados para a área de estudo: 0° - 30° , 30° - 60° , 60° - 90° e 90° - 120° . Além disso, também foi gerado uma série temporal e os mesmos mapas para uma visão geral para o quadrante 120° - 360° . As barras coloridas dos mapas de coeficiente de regressão mostram quantos por cento (%) a propagação de ondas aumentou ou diminuiu no quadrante de direção em questão. Já as barras dos mapas de R^2 representam o valor de R^2 , que só varia de 0 a 1.

Ao analisar os mapas de frequência média de ocorrência dos principais quadrantes de direção (Figura 18), percebe-se uma baixa frequência de ocorrência de ondas chegando no quadrante 0° - 30° (~10% na costa de Fortaleza), enquanto há ondas chegando pelas direções entre 30° - 60° na porção norte do mapa. As ondas que chegam dentro do quadrante de 60° a 90° estão concentradas na porção noroeste do mapa, podendo chegar a frequência de ocorrência de 30 a 50%, enquanto as que chegam entre 90° e 120° ocorrem principalmente na porção sudeste do nordeste brasileiro, variando entre 30 e 50%.

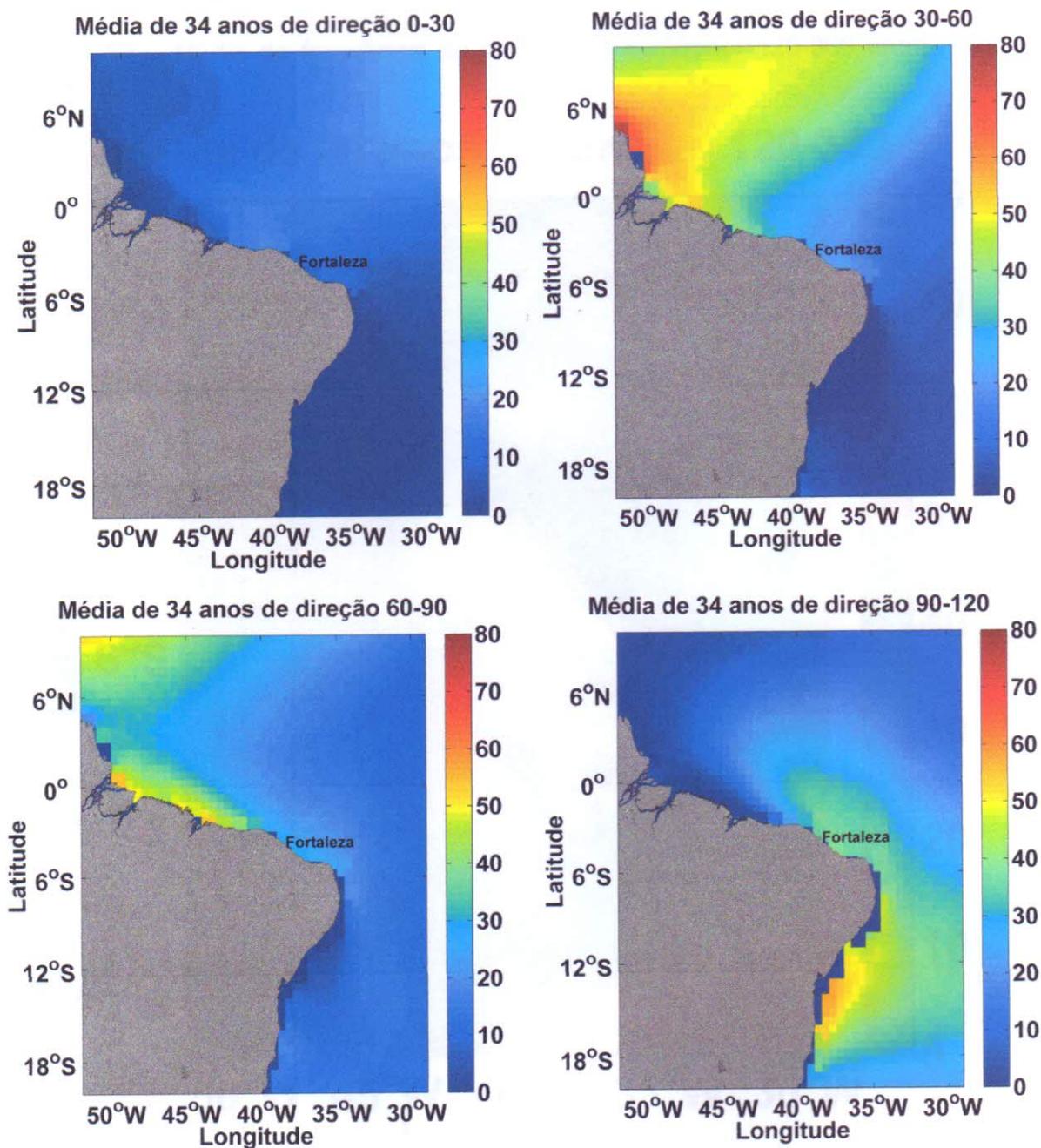
A predominância de ondas chegando na porção norte do mapa entre as direções de 30° a 90° dá-se aos ventos que vêm de N-NE-E, que tendem a propagar as ondas nessas direções.

As ondulações que chegam de sudeste, entre 90° e 120° , ficam concentradas na porção sudeste do mapa e atingem significativamente a costa de Fortaleza. Isto ocorre devido a proteção que a própria costa do Brasil faz, impedindo que as ondulações vindas de sudeste se propaguem para norte. Estas ondulações ainda conseguem atingir a costa de Fortaleza por serem geradas pelos intensos ventos alísios de sudeste e também sofrem influência das frentes frias do sudeste/sul do país.

As ondas que chegam de norte, 0° - 30° , aparecem com a menor das frequências de ocorrência pois esta direção é característica de ondulações do tipo *swell*, que ocorrem em proporção bem menor do que ondas do tipo *sea* e se concentram em um curto período, no início do ano. Mesmo com a baixa frequência de ocorrência em toda a área, nota-se que há maior presença de ondas chegando nessa direção na porção norte do que na porção sudeste do mapa e isso acontece devido a proteção que a costa faz, impedindo que as ondulações vindas de norte cheguem à porção sudeste.

O comportamento que as ondas da região têm de seguir o padrão dos ventos alísios também foi observado por Maia (1998), Innocentini et al. (2005), Pianca, Mazzini e Siegle (2010) e Silva et al. (2011).

Figura 18 – Mapa de frequência média dos principais quadrantes de direção das ondas entre 1979 e 2012.

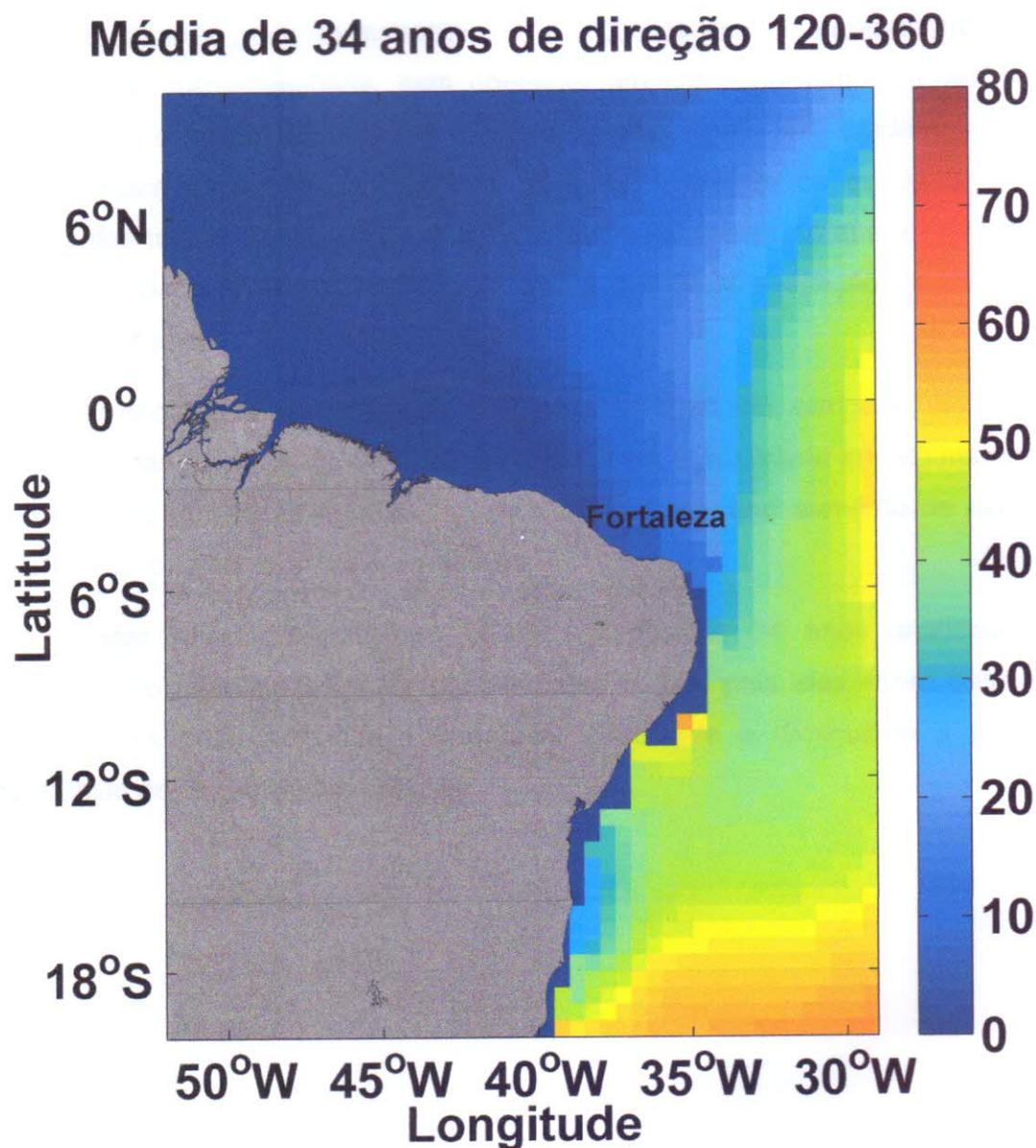


Fonte: O autor.

O mapa com frequência média de ondas vindas em direções entre 120° e 360° apresenta uma concentração destas ondas na parte sudeste do mapa, aumentando em direção ao sul (Figura 19). A parte norte do mapa é pouco afetada por ondulações vindas nesta direção devido a proteção que o continente faz. A costa age como uma barreira, impedindo que as ondas se sudeste e sul cheguem ao norte

da plataforma, mas conseguem atingir a porção nordeste porque não há nenhum tipo de barreira que impeça que essas ondas viajem.

Figura 19 – Média de frequência de direção do quadrante 120-360 entre 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

As séries temporais mostram as oscilações de frequência de direção das ondas para os 4 quadrantes principais e apresentam uma linha vermelha que mostra a tendência linear de aumento ou diminuição da ocorrência de ondas do quadrante em questão. As séries foram construídas com a frequência de ocorrência anual de

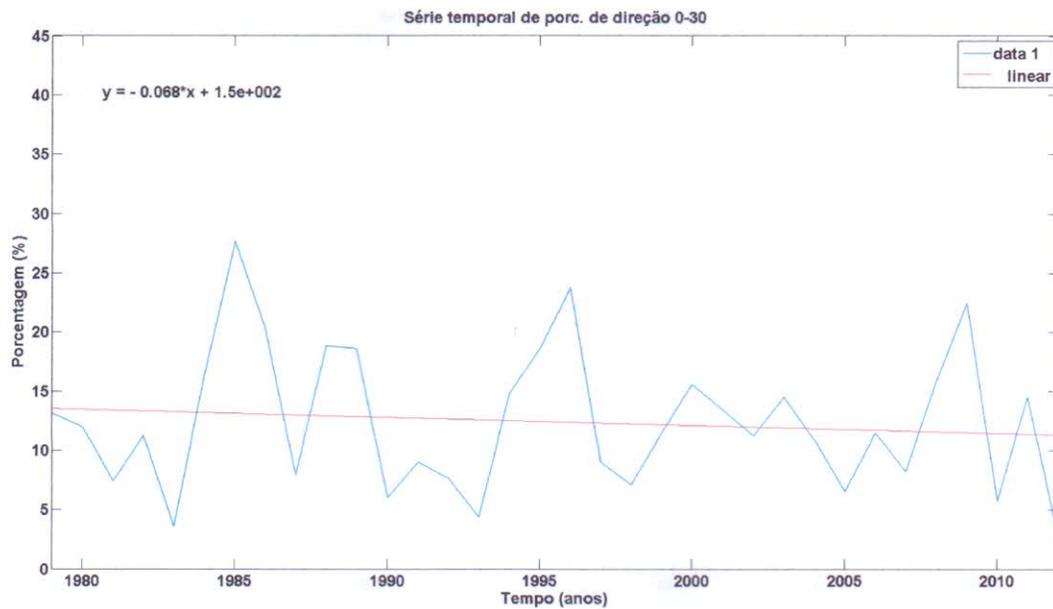
cada um dos quadrantes (Figuras 20 a 23) e são referentes ao ponto 5, ponto de grade mais próximo à costa de Fortaleza.

Ao longo dos 34 anos estudados, percebe-se uma grande variabilidade quanto à frequência de ocorrência de ondas chegando nestes quatro quadrantes em questão, exibindo picos de aumento e diminuição na frequência de ocorrência. Isso acontece de forma aleatória, sem obedecer um comportamento padrão. Nota-se também que as ondas chegando pelo quadrante 0° - 30° tendem a diminuir aproximadamente 2.3% ao final dos 34 anos, enquanto os outros 3 principais quadrantes tendem a aumentar, mas em velocidade menor do que a diminuição do primeiro quadrante. O maior aumento foi de 0.85% para direção de 90° - 120° ao longo de 34 anos.

As ondas que chegam entre 120° e 360° (Figura 24), em geral, afetam pouco a região, mas há picos de chegada de ondas nesse quadrante em alguns anos. As ondas deste quadrante também apresentam um pequeno aumento de ocorrência (0.30%) ao longo dos 34 anos de análise.

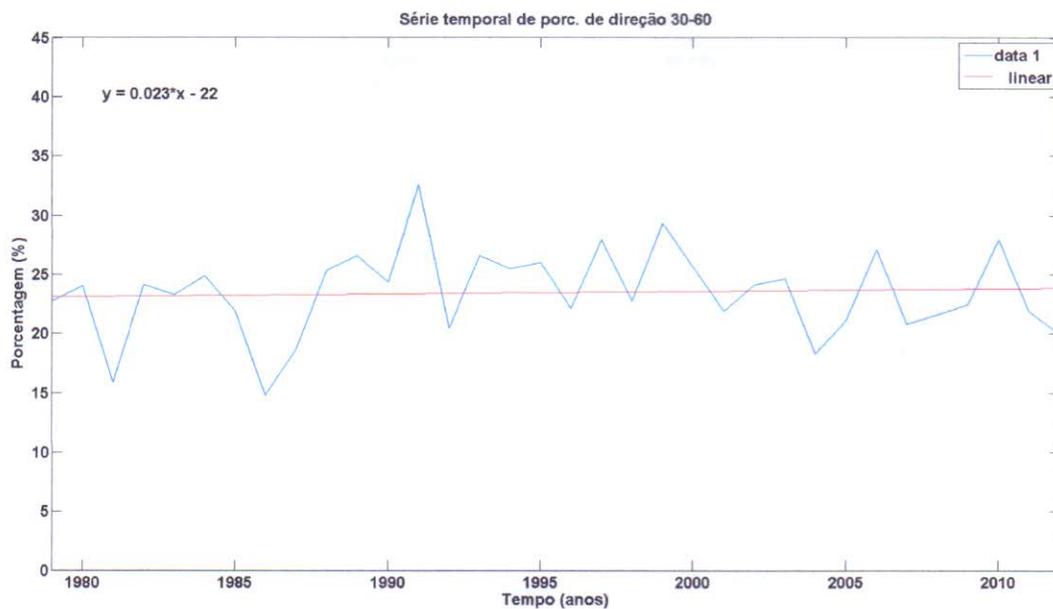
Estes resultados mostram que ao longo dos 34 anos analisados está acontecendo uma mudança na chegada das ondas, pois elas estão passando a chegar mais pelas direções de nordeste a sudeste e diminuindo a frequência ocorrência de ondas vindas de norte.

Figura 20 – Série temporal de direção das ondas do quadrante 0°-30° no ponto 5 entre 1979 e 2012.



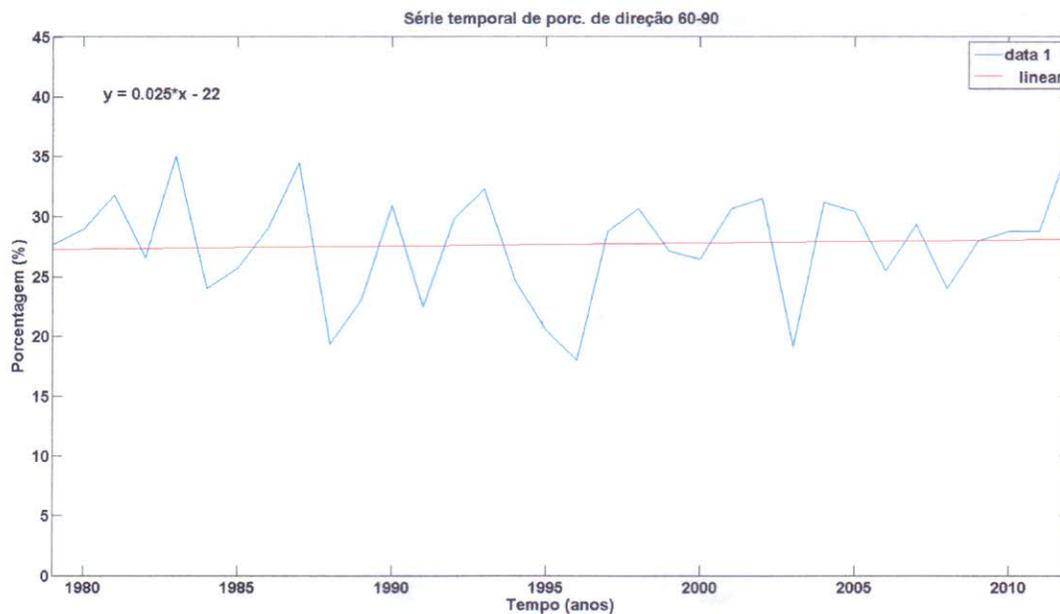
Fonte: O autor.

Figura 21 – Série temporal de direção das ondas do quadrante 30°-60° no ponto 5 entre 1979 e 2012.



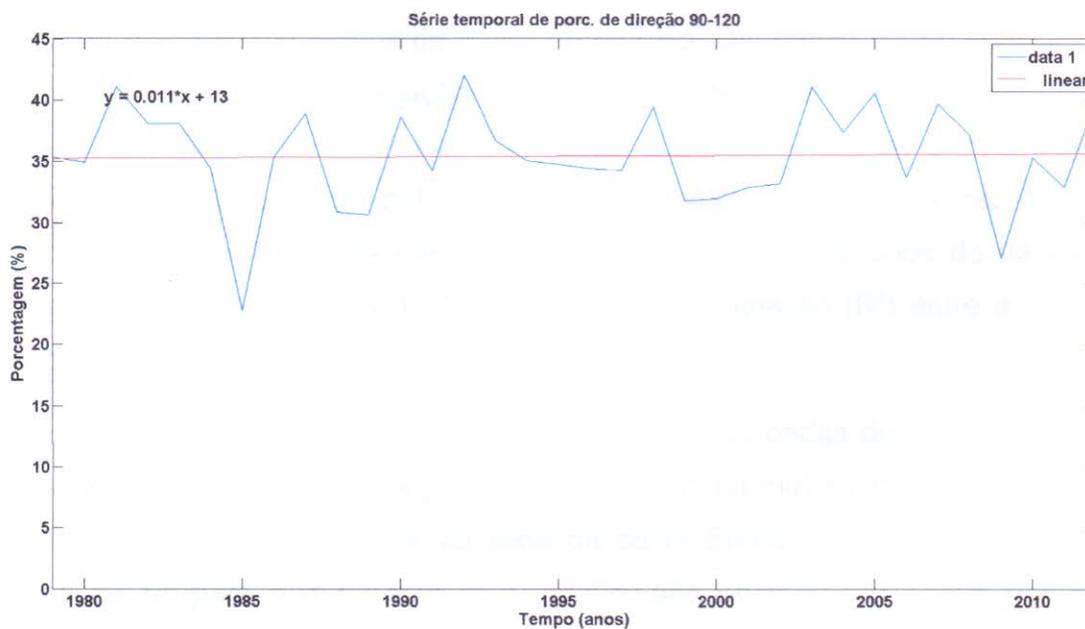
Fonte: O autor.

Figura 22 – Série temporal de direção das ondas do quadrante 60°-90° no ponto 5 entre 1979 e 2012.



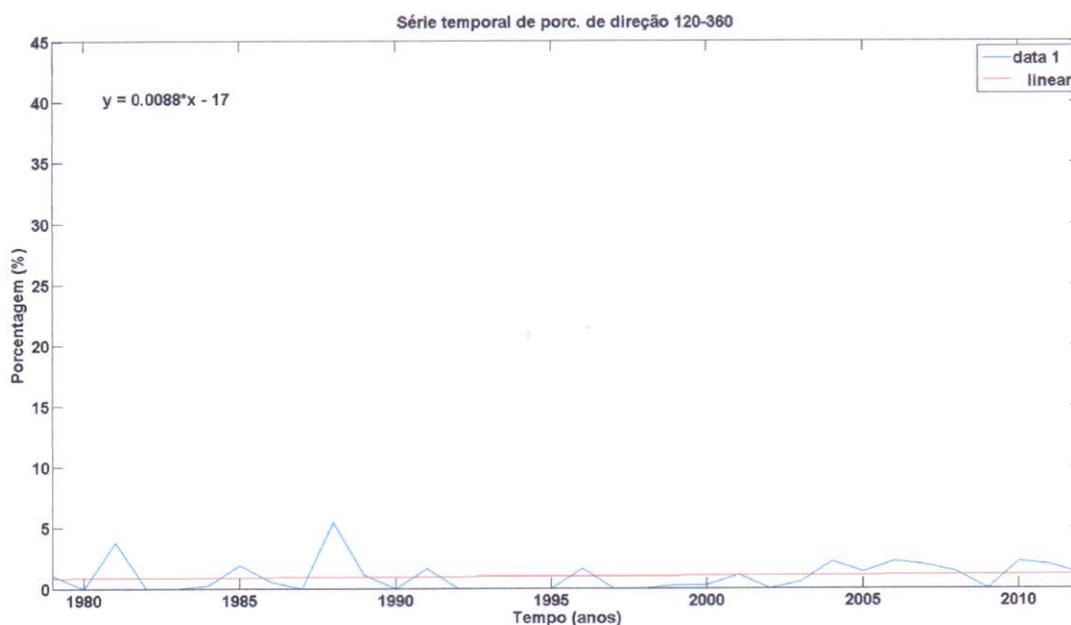
Fonte: O autor.

Figura 23 – Série temporal de direção das ondas do quadrante 90°-120° no ponto 5 entre 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

Figura 24 – Série temporal de direção das ondas do quadrante 120°-360° no ponto 5 entre 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

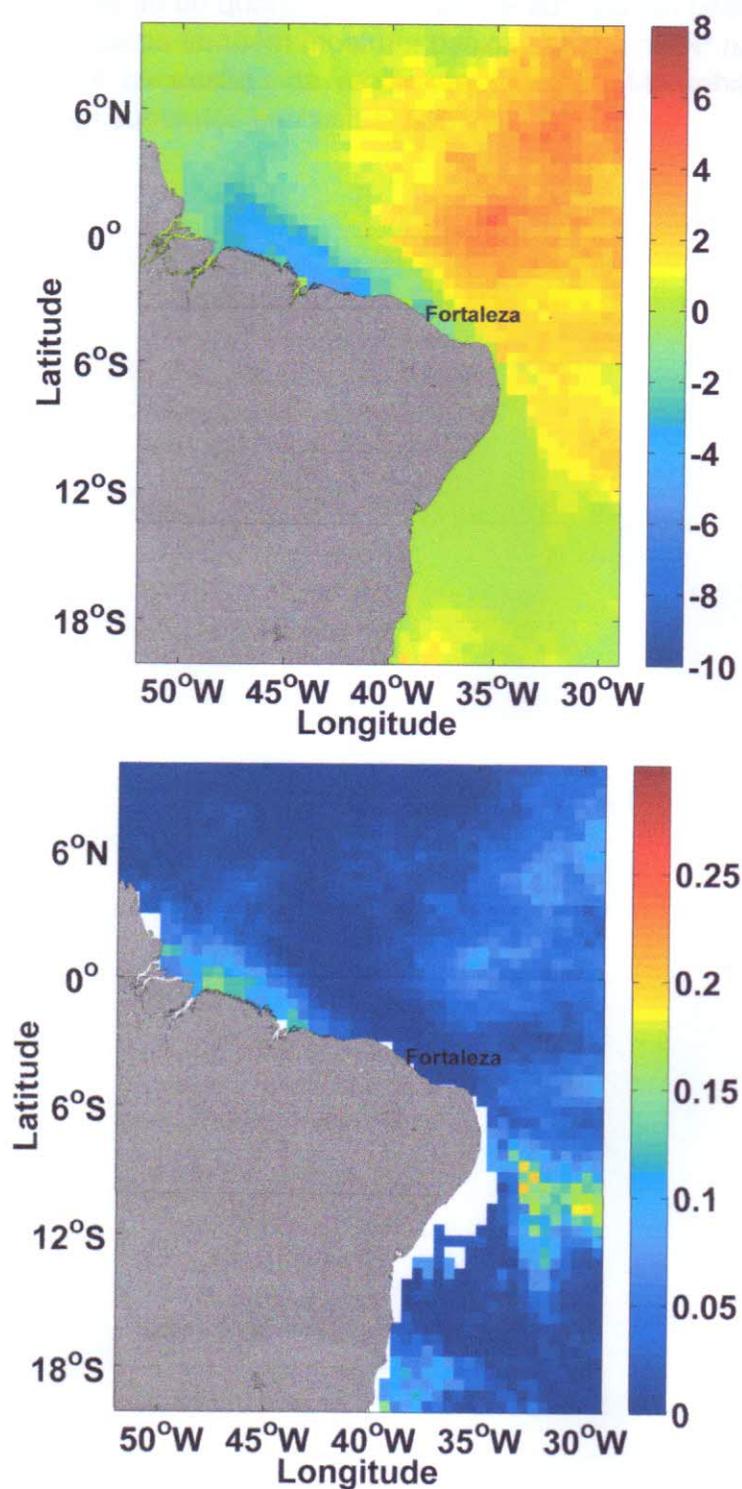
O procedimento de regressão linear exemplificado para o ponto 5 acima, foi aplicado em todos os pontos de grade do modelo. Os mapas com o coeficiente de regressão linear para as variações de frequência de ocorrência anual de cada um dos quadrantes é mostrado nas figuras 25 a 29. Nos mapas, o coeficiente de regressão é multiplicado pelo período observado, de forma a representar o percentual de mudança da direção das ondas nos 34 anos de dados. São mostrados ainda os mapas do coeficiente de determinação (R^2) entre a regressão linear e os dados.

O mapa do coeficiente de regressão linear das ondas de 0°-30° (Figura 25) mostra aumento de ondas chegando nesta direção na maior parte da região. Existe uma diminuição local próxima ao leste da costa Equatorial Brasileira. Porém, no mapa de R^2 para o quadrante mencionado, são encontrados baixos valores de significância da regressão linear dos dados analisados em toda a área estudada. Apesar da análise ser estatisticamente significativa, estes resultados devem ser usados com cautela.

1998-1999
1999-2000
2000-2001
2001-2002
2002-2003
2003-2004
2004-2005
2005-2006
2006-2007
2007-2008
2008-2009
2009-2010
2010-2011
2011-2012
2012-2013
2013-2014
2014-2015
2015-2016
2016-2017
2017-2018
2018-2019
2019-2020
2020-2021
2021-2022
2022-2023
2023-2024
2024-2025



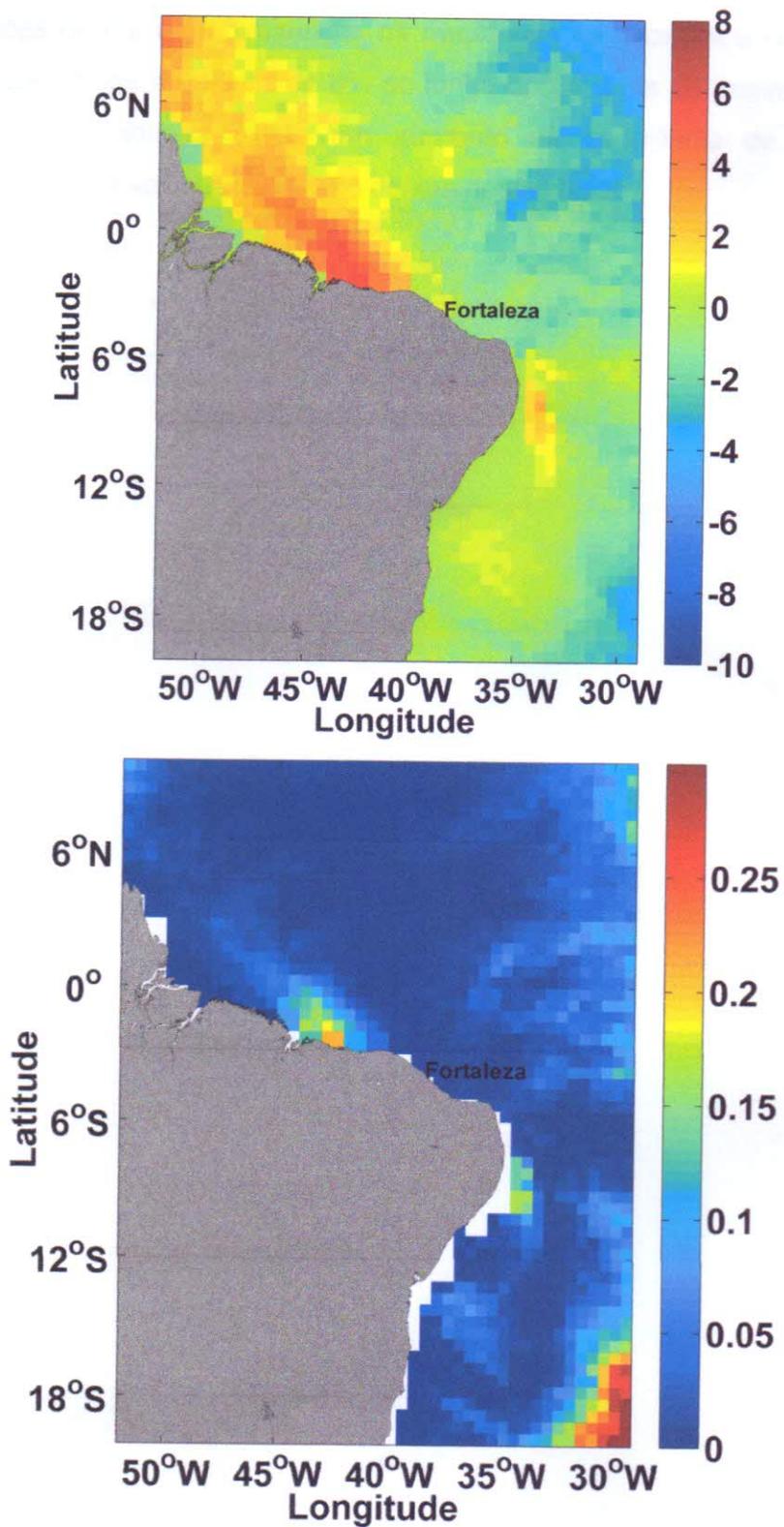
Figura 25 – Mapas do coeficiente de regressão linear (superior) e do fator R^2 do coeficiente de regressão (inferior) de frequência de ocorrência anual de direção de ondas do quadrante de direção 0° - 30° entre os anos 1979 e 2012. Os valores foram multiplicados pelo tamanho da série, de forma a representar o percentual de mudanças ao longo do período observado.



Fonte: O autor.

A porção ao norte do Maranhão é a área com maior aumento de frequência de ondas chegando por direções do quadrante entre 30° - 60° (Figura 26). A porção sudeste da imagem continua apresentando diminuição da frequência de ondas chegando no quadrante em questão, mas em menor proporção do que a observada para ondas chegando entre 0° e 30° . O mapa de R^2 para as direções entre 30° e 60° se assemelha bastante ao do quadrante entre 0° e 30° , exceto pela porção sudeste do mapa. Estes resultados também mostram baixos valores de R^2 na maior parte da área de estudo, com exceção da região ao norte do Maranhão que é a que apresenta os maiores aumentos percentuais de mudança.

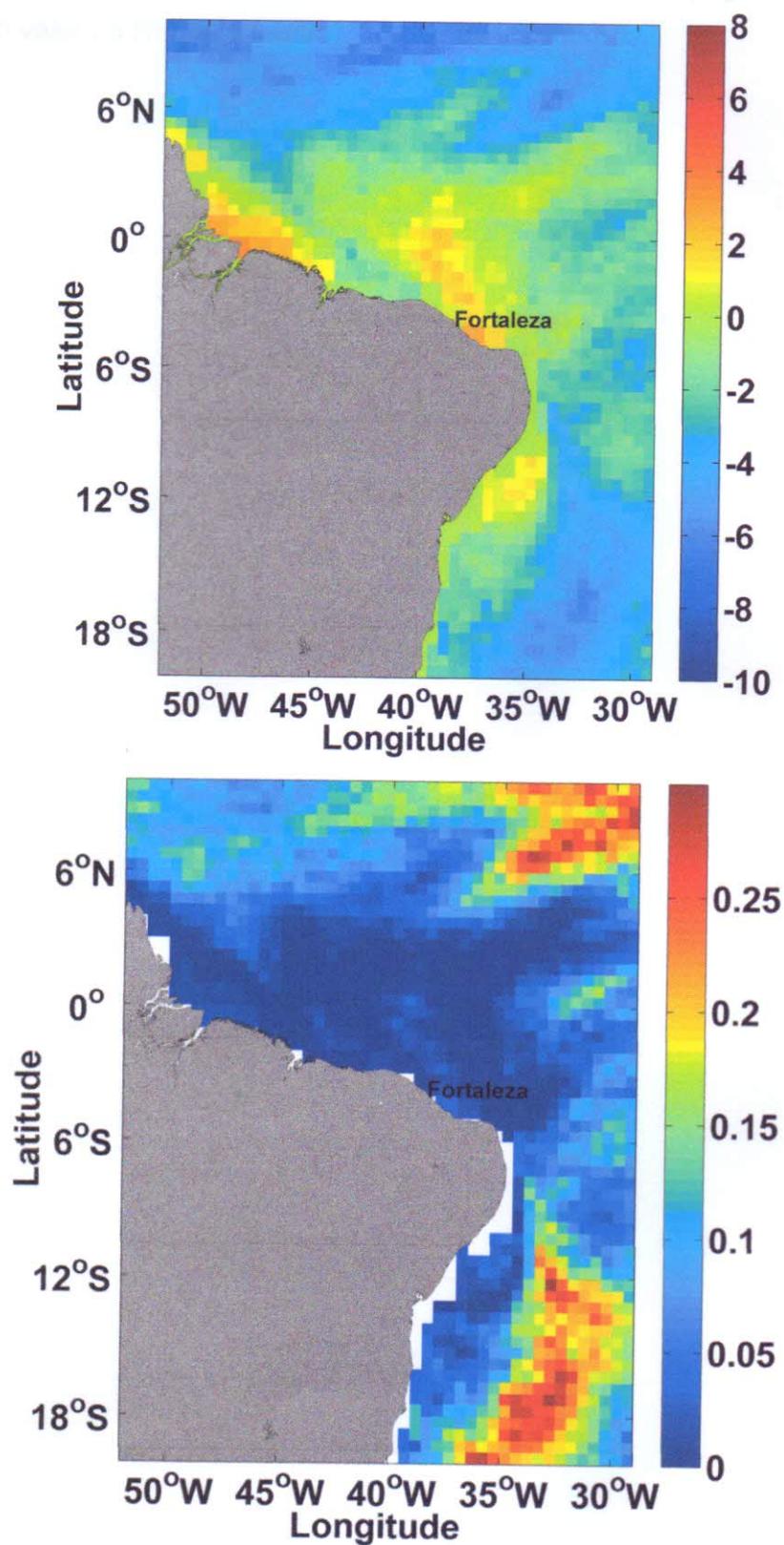
Figura 26 – Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 30°-60° entre os anos 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

No caso das ondas do quadrante de direção de 60° a 120°, as áreas ao norte de 6 N e ao sul de 6 S apresentam boa significância de regressão linear (Figura 27). Nestas regiões ocorre uma diminuição na frequência de ocorrência de ondas deste quadrante, que chega a valores de 8% ao longo de 34 anos de análise. Próximo a costa equatorial brasileira existe um aumento na ocorrência de ondas neste quadrante, porém os valores de R^2 são baixos nesta região.

Figura 27 – Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 60°-90° entre os anos 1979 e 2012.

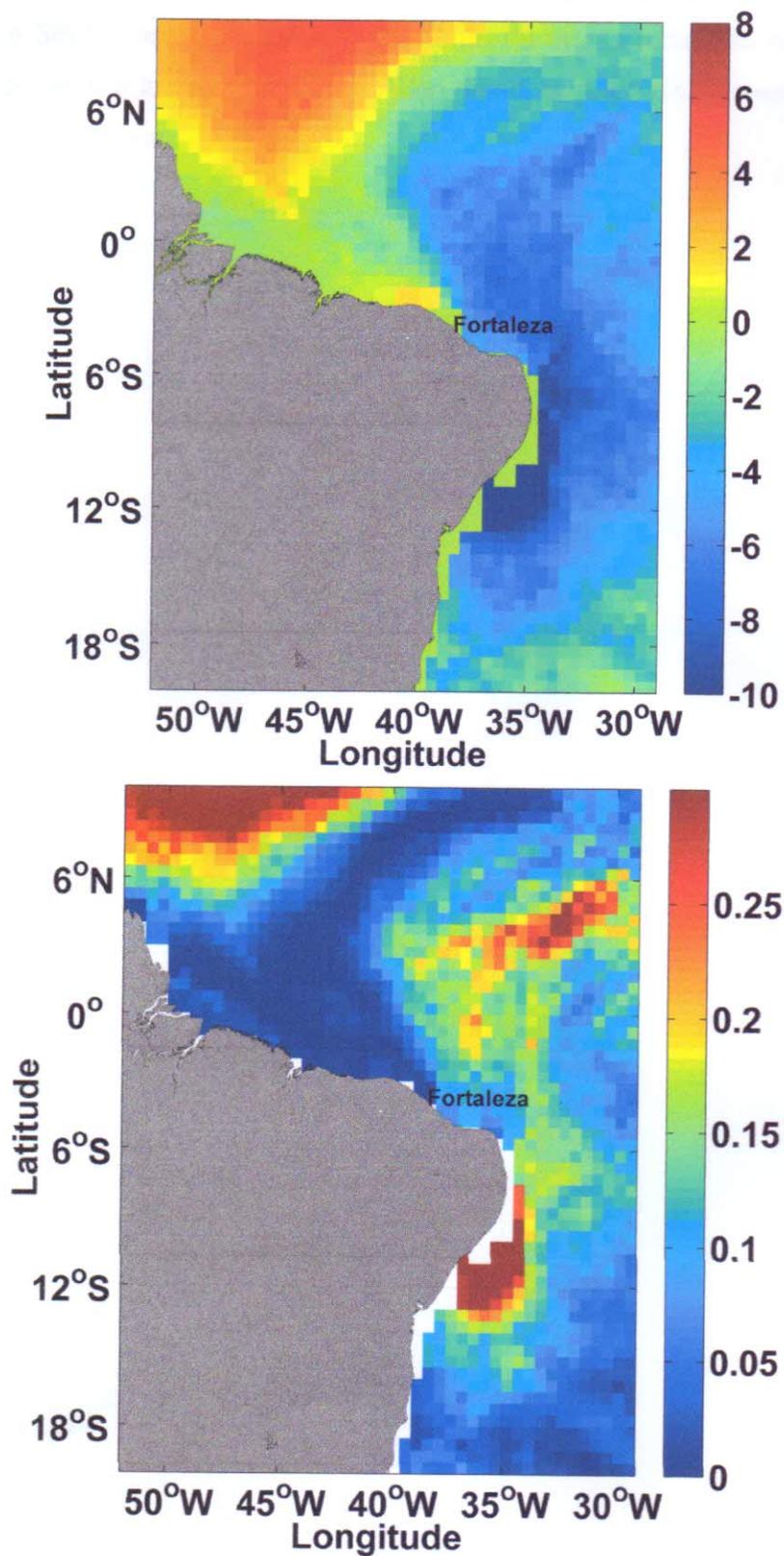


Fonte: O autor.

Já as ondas que chegam no quadrante entre 90° e 120° estão diminuindo a frequência na porção sudeste do mapa, na costa de Fortaleza (Figura 28). É notado um elevado valor de R^2 nesta região.



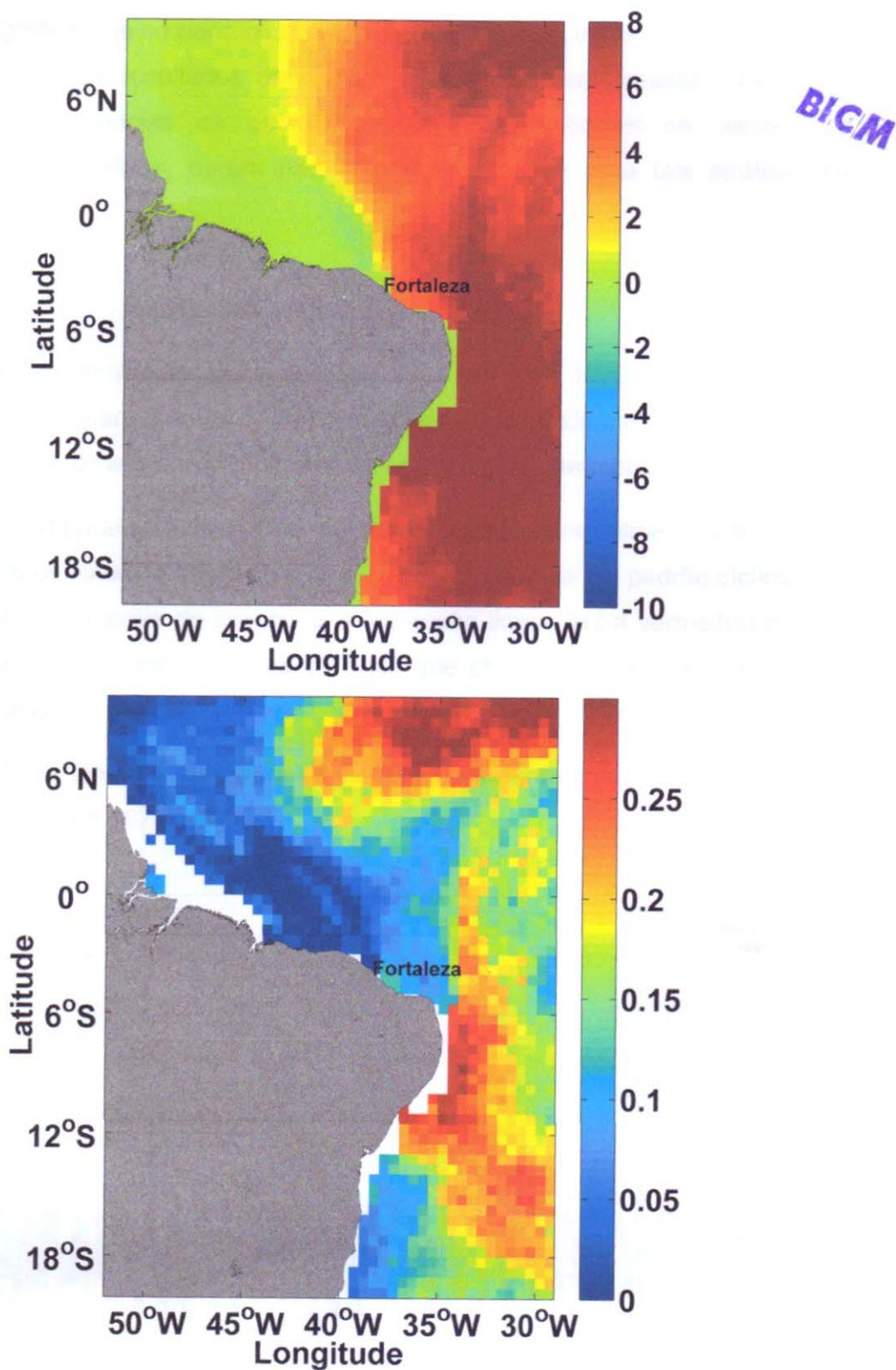
Figura 28 – Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 90°-120° entre os anos 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

O mapa do coeficiente de regressão linear (Figura 29) para ondas chegando entre 120° e 360° mostra um elevado aumento de ondas incidindo nestas direções na porção sudeste e leste do imagem. Além disso, o mapa de R^2 mostra valores de até 30% nestas regiões.

Figura 29 – Similar à figura 25, porém para direções do quadrante de direção 120-360 entre os anos 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

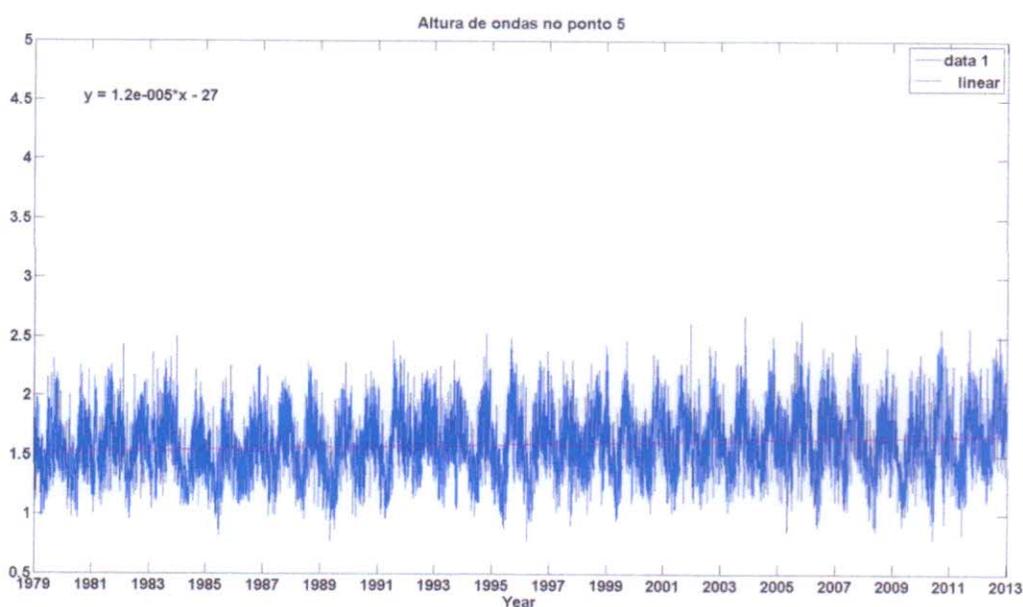
A direção de ondas é um fator muito importante para o transporte de sedimentos na zona costeira e de forma geral os resultados acima mostram mudanças significativas no padrão de propagação de ondas, porém os valores de R^2 são pequenos e os resultados devem ser observados com cautela. Talvez a utilização de frequências de ocorrência mensal melhorem os valores de significância das análises, porém não houve tempo hábil para tais análises no presente trabalho.

4.4.2 Altura

A série temporal para altura de onda entre os anos 1979-2012 (Figura 30). mostra os registros para o ponto 5, ponto de grade mais próximo a Fortaleza. O eixo X representa os anos e o eixo Y mostra a altura das ondas em metros.

A série temporal mostra a altura de onda variando principalmente entre 1,0 m e 2,0 m, porém os valores podem chegar a 2.5 m. Percebe-se um padrão cíclico com maiores ondas nos meses de inverno e a regressão linear (linha vermelha) mostra uma tendência de aumento na altura de onda que chega a 15 cm de aumento ao longo dos 34 anos de análise.

Figura 30 – Série temporal de altura de onda e coeficiente linear de tendência no ponto 5 entre os anos 1979 e 2012.



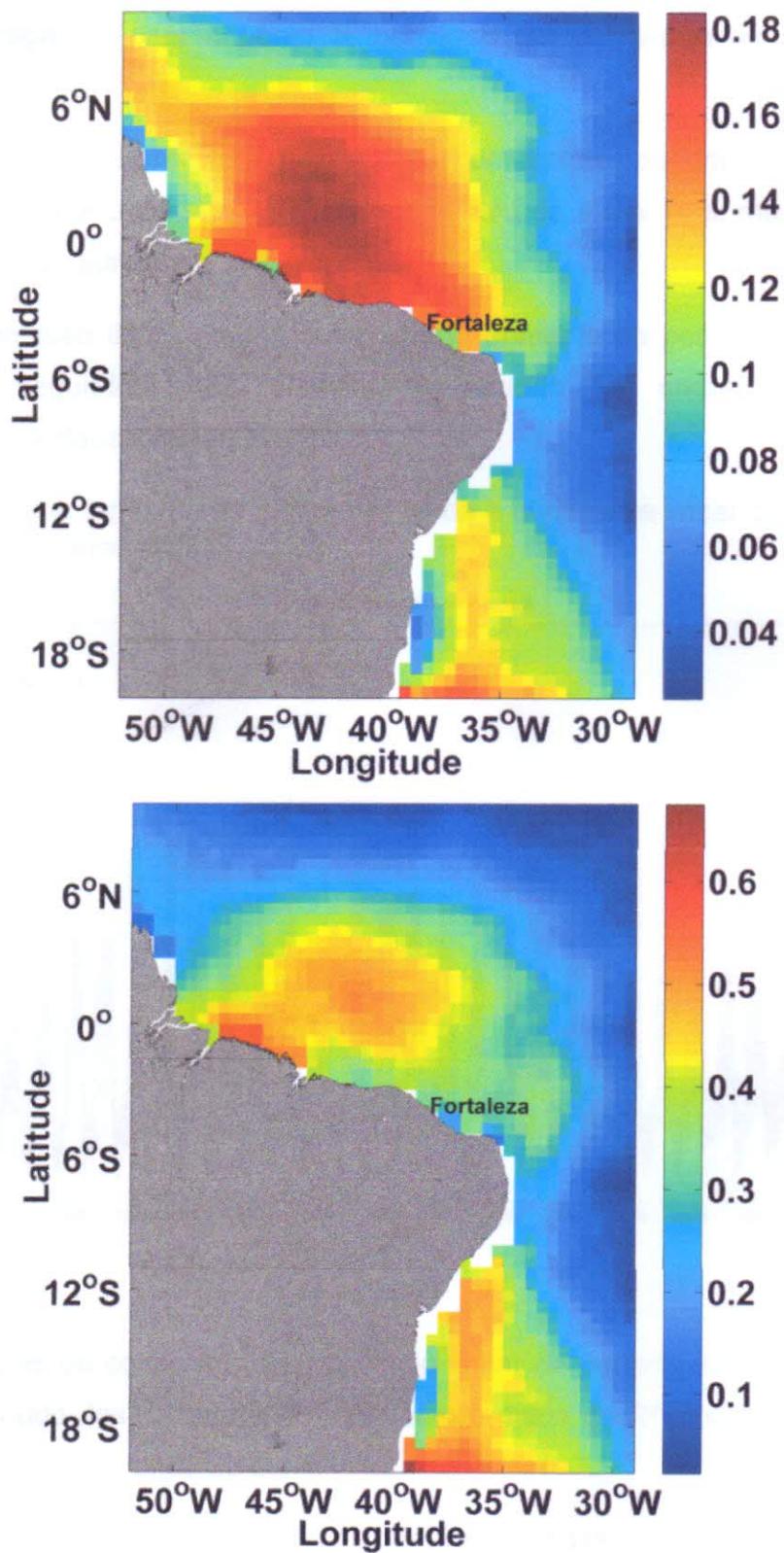
Fonte: O autor.

O mapas do coeficiente de regressão linear de altura das ondas mostra o percentual de variação de altura em metros ao longo do período de 1979 a 2012 e o mapa de R^2 mostra a significância destes resultados, variando de 0 a 1 (Figura 31). De forma geral, percebe-se que existe uma tendência no aumento da alturas das ondas nas regiões mais próximas à costa, onde foi notado maior elevação das ondas do que em regiões mais distantes. Na porção 0° S 45° W, há o maior aumento de altura de onda, chegando a até 18 cm de mudança. As regiões com os maiores valores de R^2 são exatamente estas regiões de aumento da altura. As regiões que mostram diminuição (limite leste da área de estudo) apresentam baixos valores de R^2 .

Dupuis et al. (2006) e Bertin et al. (2012), ao estudarem o clima de ondas da Baía de Biscay – França e do Oceano Atlântico Norte também notaram aumento da altura das ondas nestas regiões. .

Como ressaltado por Dodet et al. (2010), o aumento da altura das ondas, representado pela figura 35, pode ser resultado no aumento da ocorrência de fenômenos como os ciclones e tempestades extratropicais oriundas do Atlântico Norte. Segundo o quarto e o quinto relatórios do IPCC, existe uma tendência de aumento da frequência de ocorrência destes eventos desde meados do século XX (IPCC 2007 e 2013).

Figura 31 – Mapa do coeficiente de regressão linear (superior) e mapa de fator R^2 (inferior) para altura de ondas entre 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

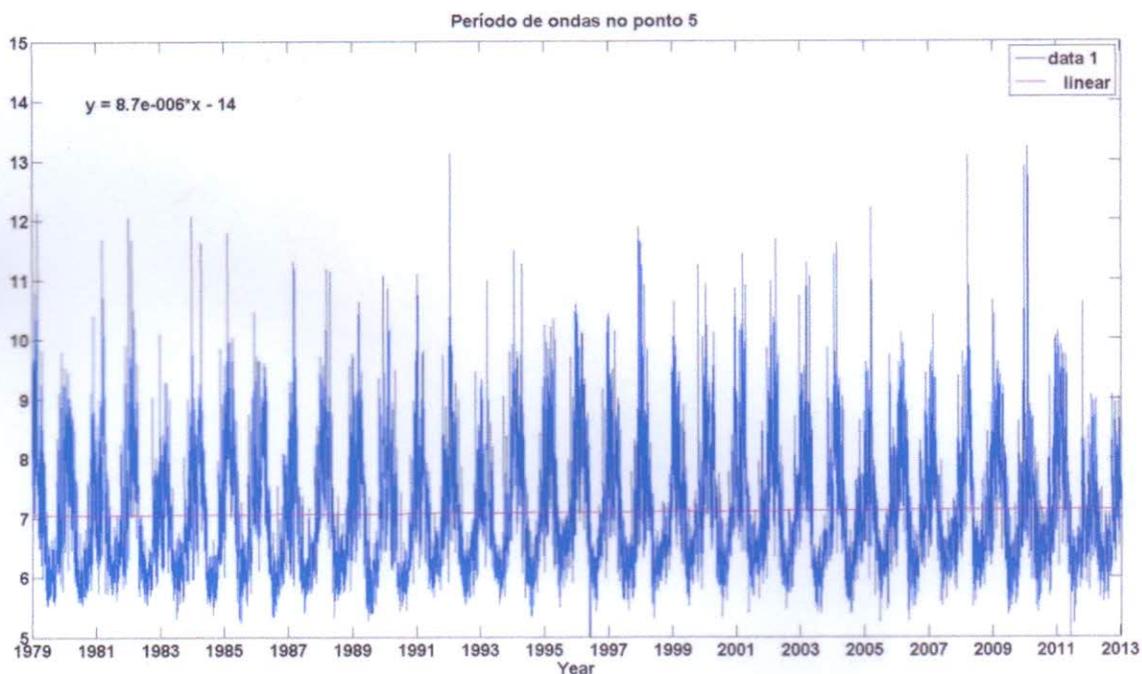
4.4.3 Período

A série temporal para período de onda entre os anos 1979-2012 (Figura 32) mostra os registros para o ponto 5, ponto de grade mais próximo à costa de Fortaleza.

A série temporal mostra um ciclo anual com maiores períodos durante o verão e menores durante o inverno. Os períodos variam de 4 s a 14 s, mas ocorrem em maior frequência entre 6 s e 10 s.

A regressão linear mostra um pequeno aumento do período das ondas na região (0.2 segundos). Este aumento do período das ondas também foram observadas por Bousserelle et al. (2011).

Figura 32 – Série temporal de período de onda e coeficiente linear de tendência no ponto 5 entre os anos 1979 e 2012.



Fonte: O autor.

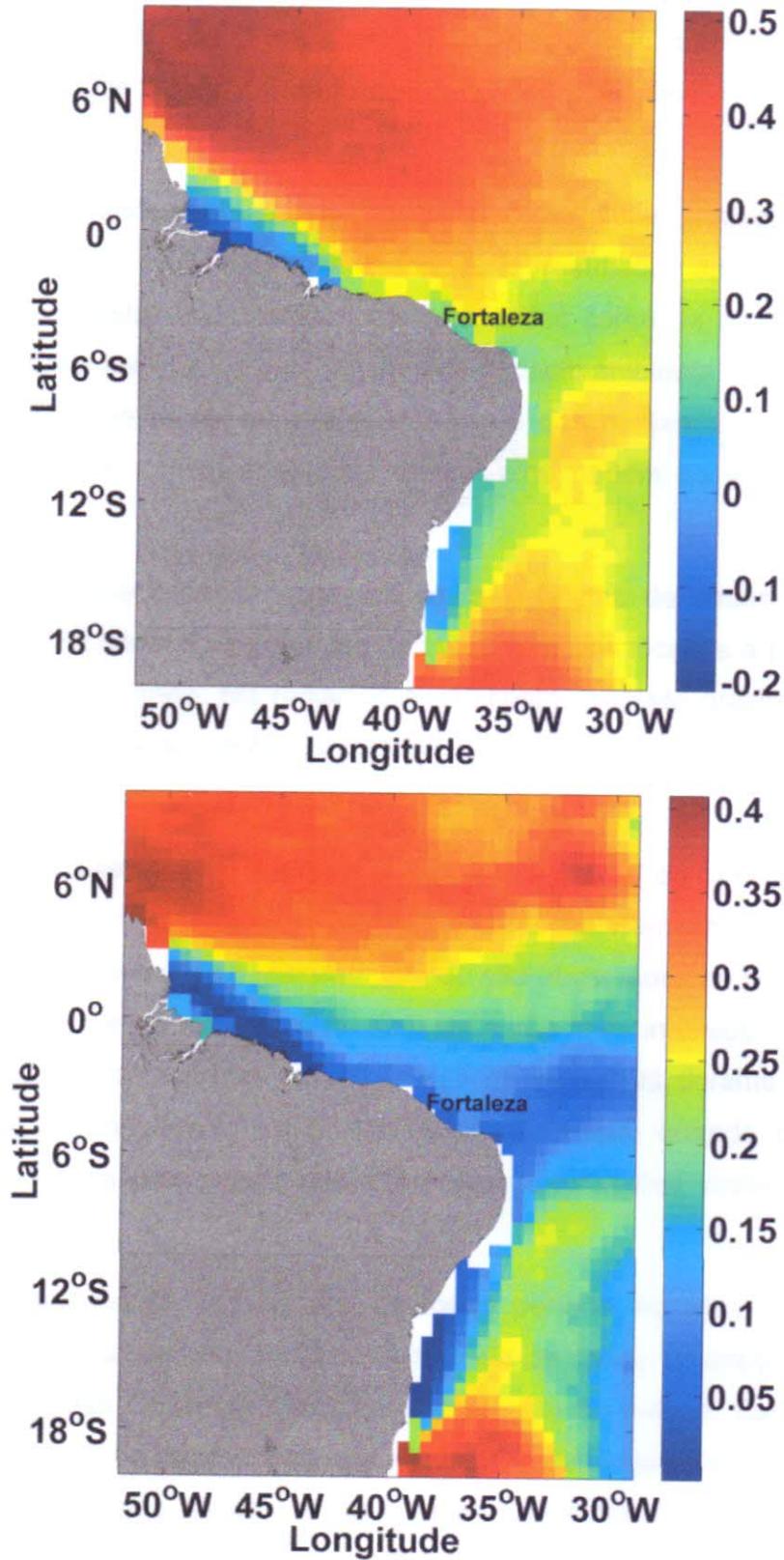
O mapas do coeficiente de regressão linear de período das ondas mostra o quanto o período das ondas variou, enquanto o mapa de R^2 mostra a significância destes resultados, variando de 0 a 1.

Foi notado um maior aumento do período de ondas na região ao norte de 3°N e ao sul de 15°S , estas regiões também apresentam os maiores valores de R^2 . A

região próxima a plataforma da Amazônica mostra uma diminuição do período de ondas, porém os valores de R^2 são muito baixos.



Figura 33 – Mapa do coeficiente de regressão linear (superior) e fator R^2 (inferior) para período de ondas entre 1979 e 2012.



5 CONCLUSÃO

Para a realização do presente estudo foram usadas saídas da reanálise ERA-Interim para obtenção dos dados. O uso de modelo numérico foi a melhor opção para o estudo de variabilidade do clima de ondas, devido a inexistência de dados *in situ*.

Como esperado, existe uma diferença entre os valores produzidos pelo ERA-Interim e os dados costeiros observados. Este resultado, apesar de óbvio, é importante pois mostra quantitativamente que dados como os da reanálise ERA-Interim não devem ser usados para estudos de impacto ambiental ou gerenciamento costeiro. Porém deve-se ter em mente que muito das mudanças que ocorrem no clima de ondas das regiões profundas afetam e/ou podem ser aplicadas a zona costeira.

Com a análise espacial, observou-se que o clima de ondas da região do Atlântico Tropical obedece aos padrões dos ventos alísios locais e a propagação de ondas do hemisfério norte. Na região leste da costa nordeste brasileira, além dos ventos alísios, observa-se também a influência das ondas vindas da costa oeste da África e sul do Brasil.

Para a análise sazonal, foi observado um ciclo anual do comportamento das ondas, dividido em duas épocas, o inverno e verão do Hemisfério Sul. Durante o inverno, maiores ondulações e maiores período são observados na porção sudoeste do mapa, quando os ventos alísios de sudeste estão mais intensos e se somam à energia oriunda de frentes frias características da época. Já durante o verão, são notadas maiores ondulações na porção norte do mapa, quando os alísios de nordeste estão mais presentes juntamente com perturbações vindas do Atlântico Norte.

Com a análise de variabilidade de longo período, foi observado que está havendo um aumento na frequência de ocorrência de ondas de direções leste e na altura e período das ondas na maior parte da região de estudo. Estas mudanças podem estar ocorrendo em resposta aos efeitos de mudanças climáticas na região, que estão apresentando maiores e mais frequentes casos de eventos extremos, como fortes tempestades e ciclones extratropicais vindos do norte, leste e sudeste, conforme apresentado nos últimos relatórios do IPCC.

O estudo mostra a possibilidade de se estudar o regime de ondas através do uso de modelos numéricos, uma vez que este método já vêm sendo utilizado por outros autores e os dados gerados pelo modelo já terem sido validados em outras regiões do planeta. Infelizmente não existem dados observacionais de ondas na região de estudo para validar de forma adequada os dados do ERA-Interim. .

Apesar da melhora da eficiência dos modelos numéricos, a coleta de dados *in situ*, mesmo sendo mais custosa, é essencial para a validação dos dados e para monitoramento do clima de regiões costeiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allan, J.C., Komar, P.D., 2002. Extreme storms on the Pacific Northwest Coast during the 1997–98 El Niño and 1998–99 La Niña. *Journal of Coastal Research* 18, 175–193.

ALVES, Jose-Henrique GM. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, 2006, 11.1: 98-122.

BENGTSSON, Lennart; HODGES, Kevin I.; KEENLYSIDE, Noel. Will extratropical storms intensify in a warmer climate?. *Journal of Climate*, 2009, 22.9.

BERTIN, Xavier et al. Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, v. 42, p. 16-30, 2012.

BIDLOT J-R, HOLMES DJ, WITTMANN PA, LALBEHARRY R, CHEN HS. 2002. Intercomparison of the performance of operational wave forecasting systems with buoy data. *Weather and Forecasting* 17: 287–310.

BOSSERELLE, Cyprien; PATTIARATCHI, Charitha; HAIGH, Ivan. Inter-annual variability and longer-term changes in the wave climate of Western Australia between 1970 and 2009. *Ocean Dynamics*, v. 62, n. 1, p. 63-76, 2012.

BRANCO, Fabrício Vasconcelos. *Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira*. 2005. PhD Thesis. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

CERC (1984) Shore protection manual. U.S. Army Corps of Eng. Res. Center, U.S. Govt., Washington D.C

CHARLES, Elodie, et al. Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 2012, 62.6: 831-848.

DA SILVA, Alex Costa; FAÇANHA, Patrícia. CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS “SEA” AND “SWELL” OBSERVADAS NO LITORAL DO CEARÁ-BRASIL: VARIABILIDADE ANUAL E INTER-ANUAL.

DE ARAGÃO, José Oribe Rocha. O impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. *Bull. Inst. fr. études andines*, 1998, 27.3: 839-844.

DE FARIAS, Eduardo Guilherme Gentil; DE SOUZA, João Marcos Azevedo Correia. CHEGADA DISPERSIVA DE CAMPOS DE ONDAS Swell NA COSTA OESTE DO ESTADO CEARÁ-BRASIL.

DEE, C.F., MAJLIS, B. YEOP & SALLEH, M. Mat. 2008. Electrical characterization of cross-linked ZnO nanostructures grown on Si and Si/SiO₂ substrates. *Sains Malaysiana* 37(3): 281-283.

DEE, D. P., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137.656: 553-597.

DIAS, Francisco José da Silva. *Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações*. 2011. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

DODET, Guillaume; BERTIN, Xavier; TABORDA, Rui. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 2010, 31.3: 120-131.

DUPUIS, Hélène; MICHEL, Denis; SOTTOLICHIO, Aldo. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of Marine Systems*, v. 63, n. 3, p. 105-114, 2006.

FERREIRA, Antonio Geraldo; DA SILVA MELLO, Namir Giovanni. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil ea influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2005, 1.1.

FERREIRA, Raquel Johansson; MICHELETO, RoBeRta GoulaRt. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2005, 20.3: 367-374.

HEMER, Mark A.; CHURCH, John A.; HUNTER, John R. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. *International Journal of Climatology*, 2010, 30.4: 475-491.

INNOCENTINI, Valdir; ARANTES, F. O.; CUNHA PRADO, S. C. S. Modelo de ondas aplicado ao caso 5-8 de maio de 2001. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2002.

PARISE, Cláudia Klose. Estudo da variabilidade de ondas no oceano Atlântico sul ea contribuição energética de um ciclone extratropical intenso nos espectros das ondas ao largo do Rio Grande do Sul. 2010.

LAING, A. K. 2000: New Zealand wave climate from satellite observations. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 34:727-744.

LIONELLO, P. and A. SANNA. – 2005. Mediterranean wave climate variability and its links with NAOand Indian Monsoon. *Clim. Dyn.*, 25(6): 611-623.

MAGALHÃES, Gledson Bezerra; ZANELLA, Maria Elisa. COMPORTAMENTO CLIMÁTICO DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA (dynamics of climate of Metropolitan Region of Fortaleza). *Revista Mercator*, 2011, 10.23: 129 a 145.

MAIA, Luís Parente. Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona

litoral. *Unpublished Ph. D. Thesis, Faculty of Geology, University of Barcelona, Spain, 1998.*

MARIOTTI, Mara Terezinha, et al. *Análise arima de dados meteo-oceanográficos.* 2003.

MORAIS, J. O., et al. *Ceará. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006, 132-154.*

Mori N, Shimura T, Yasuda T, Mase H (2013) Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—Future change of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering.* doi:10.1016/j.oceaneng.2013.02.016i

OLIVEIRA DE SOUZA, Dr. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO REGIME DE ONDAS AO LONGO DA REGIÃO MARÍTIMA DO PORTO DO PECÉM.

OSTRITZ, Frederico Francisco. *ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO GERADO POR ONDAS NA COSTA DO BRASIL COM ÊNFASE NO ESTADO DO CEARÁ.* 2012. PhD Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PAULA, D. P., et al. High-rise development of the sea-front at Fortaleza (Brazil): Perspectives on its valuation and consequences. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 77: 14-23.

PIANCA, Cássia; MAZZINI, Piero Luigi F.; SIEGLE, Eduardo. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2010, 58.1: 53-70.

REGUERO, B. G.; MÉNDEZ, F. J.; LOSADA, I. J. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 70-84.

Quarto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. IPCC, 2007.

Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. IPCC, 2013.

SEN GUPTA, Alexander, et al. Projected changes to the Southern Hemisphere ocean and sea ice in the IPCC AR4 climate models. *Journal of Climate*, 2009, 22.11.

SEYMOUR, R. J., STRANGE III, R. R., CAYAN, D. R. & NATHAN, R. A., 1984. Influence of El Niños on California's wave climate. *Proceedings 19th Coastal Engineering Conference, ASCE, September 57, 1984, Houston, TX 1,577-592.*

STERL, Andreas; CAIRES, Sofia. Climatology, variability and extrema of ocean waves: The Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25.7: 963-977.

STOPA, Justin E., et al. Patterns and cycles in the climate forecast system reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling*, 2013, 70: 207-220.

VIEIRA, Luiz A. de Almeida., PITOMBEIRA, Erasmo da Silva., e SOUZA, Raimundo Oliveira. Análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do porto do Pecém. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

XAVIER, T. M. B. S., et al. Interrelações entre eventos ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico ea chuva nas bacias hidrográficas do Ceará. *Revista Brasileira Recursos Hídricos*, 2003, 8.2: 111-126.

YOUNG, I. R. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *International Journal of Climatology*, 1999, 19.9: 931-950.

YOUNG, I. R.; ZIEGER, S.; BABANIN, A. V. Global trends in wind speed and wave height. *Science*, v. 332, n. 6028, p. 451-455, 2011.

Woolf, D. K., P. G. Challenor, and P. D. Cotton (2002), Variability and predictability of the North Atlantic wave climate, *J. Geophys. Res.*, 107(C10), 3145.