



Caracterização do Clima de Ondas na Plataforma Continental do Rio Grande do Norte, NE/Brasil, Através do SMC-Brasil

Lívian Rafaely de Santana Gomes PINHEIRO¹, Daniel de Freitas GURGEL²,
José Eduardo Carneiro BARROS³, Anthony Francis Nunes TEIXEIRA⁴,
Ada Cristina SCUDELARI^{2,5}, Venerando Eustáquio AMARO^{4,5}

RESUMO: Neste trabalho, investiga-se a característica do clima de ondas ao longo da plataforma continental do Rio Grande do Norte (RN), em profundidades intermediárias, a partir da reanálise de ondas *Downscaling Ocean Waves* – DOW, entre os anos de 1948 e 2008, que integra o SMC-Brasil. Foram calculados pontos DOW em locais com notórios eventos de erosão costeira, a saber: Laguna de Guaraira, entre os municípios de Tibau do Sul e Senador Georgino Avelino; praia da Barreira do Inferno, município de Parnamirim; trecho entre as praias de Muriú e Jacumã, município de Ceará-Mirim; orla marítima do município de Galinhos; além da praia de Soledade e Ilha Ponta do Tubarão, município de Macau. A escolha de pontos DOW representativos dos trechos de estudo foi realizada com base nas tabelas de probabilidade de ocorrência. A comparação entre os pontos ocorreu por Regressão Linear com Coeficiente de Correlação de Pearson, da altura significativa (H_s) e período de pico (T_p) de onda, em condições de regime médio e de tempestade. As ondas chegam à plataforma oriental do RN vindas principalmente de leste-sudeste e de leste, com T_p entre 6 e 10 s e média de H_s variando entre 1,38 e 1,50 m. Na plataforma setentrional, as ondulações incidem entre as direções norte e leste-sudeste, com valores de T_p acumulados entre 5 e 15 s, alturas médias entre 1,10 e 1,20 m. Os ventos alísios conformam as principais direções de propagação de ondas que chegam ao RN, sendo que a plataforma oriental também recebe o escoamento oriundo do Sistema de Alta Pressão do Atlântico Sul e dos Distúrbios Ondulatórios de Leste. Os eventos extremos de H_s são mais severos na plataforma setentrional, podendo chegar a 3,4 m de H_s , enquanto que ondas com até 2,9 m são previstas para a plataforma oriental.

Palavras-Chave: Agitação Marítima; Plataforma Continental do RN; *Downscaling Ocean Waves*; SMC-Brasil.

¹ Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente – IDEMA/RN

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

³ Escola de Ciência e Tecnologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

⁴ Departamento de Geologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

⁵ Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Autor para correspondência: Lívian Rafaely de Santana Gomes Pinheiro

IDEMA - Av. Alm. Alexandrino de Alencar, S/N, Tirol, Natal/RN, Cep: 59015-350.

E-mail: livianrafaely@gmail.com

Recebido em 31 de Agosto de 2017 / Aceito em 06 de Dezembro de 2017.

ABSTRACT: *This paper aims to investigate the wave climate along the continental shelf of Rio Grande do Norte (RN), at intermediate depths, using the reanalysis of Downscaling Ocean Waves - DOW, between the years 1948 and 2008, which is a package of the SMC-Brasil. DOW points were calculated at hotspots of coastal erosion, being: Laguna de Guaraíra, between the municipalities of Tibau do Sul and Senador Georgino Avelino; beach of Barreira do Inferno, municipality of Parnamirim; stretch between the beaches of Muriú and Jacumã, municipality of Ceará-Mirim; seafront of the municipality of Galinhos; besides the beach of Soledade and Ponta do Tubarão Island, municipality of Macau. The determination of representative DOW points of the study areas was performed based on occurrence probability tables. The comparison between the points was achieved by Linear Regression with Pearson Correlation Coefficient of the significant height (H_s) and peak period (T_p), both in regular and storm conditions. The waves reach the oriental platform of the state coming mostly from east-southeast and east directions, with a T_p range from 6 to 10s and H_s varying between 1.38 and 1.50 m. In the northern shelf, the predominant directions of waves are from the north to the east-southeast quadrant, with T_p values ranging from 5 to 15 s, and average heights between 1.10 and 1.20 m. The trade winds patterns form the principal wave propagation directions that reach the RN, with the oriental platform also receiving the atmospheric flow from the South Atlantic High Pressure System and the Easterly Wave Disturbances. The extreme events of H_s are more severe on the northern shelf, reaching 3.4 m, meanwhile waves up to 2.9 m are predicted for the eastern shelf.*

Key-Words: *Sea Wave; Continental Shelf of RN; Downscaling Ocean Waves; SMC-Brasil.*

1. INTRODUÇÃO

Ao longo de todo o litoral do RN, forçantes meteoceanográficas – marés, ventos, ondas e correntes - vêm ocasionando picos de erosão costeira, com impactos sobre comunidades pesqueiras, aglomerados urbanos e setores econômicos estratégicos como Turismo, Indústria Petrolífera, Carcinicultura e Produtoras de Sal Marinho, muitas vezes em ambientes de alta sensibilidade e vulnerabilidade ambiental (SCUDELARI *et al.*, 2005; VITAL *et al.*, 2006; SANTOS-JR. *et al.*, 2011; FRANCO *et al.*, 2012; AMARO *et al.*, 2012; AMARO *et al.*, 2013; SANTOS e AMARO, 2013; BUSMAN *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2014; MATOS *et al.*, 2015; AMARO *et al.*, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2015).

O clima de ondas define parte significativa da energia de processos

exógenos que controlam depósitos marinhos e costeiros, a conformação do leito submarino e a forma da costa (SUGUIO, 2003; IH-CANTÁBRIA, 2012; PIANCA *et al.*, 2010).

Séries temporais de medições de ondas são escassas e irregulares no Nordeste do Brasil. Como solução, observações provenientes de boias, experimentos de laboratório, campanhas oceanográficas e radares orbitais vêm alimentando modelos numéricos e bases de reanálises globais de variáveis ambientais, para fins de reconstrução e preenchimento de séries temporais, com aplicação em previsão em tempo quase real, Oceanografia Operacional e planejamento de obras de Engenharia Costeira (CAIRES *et al.*, 2004; EMMANOUIL *et al.*, 2007; LEFÉVRE *et al.*, 2006; PIANCA *et al.*, 2010; MATOS

et al., 2013, ONEA e RUSU, 2016).

Neste trabalho, investiga-se a característica do clima de ondas ao longo da plataforma continental do Rio Grande do Norte (RN), em profundidades intermediárias, a partir do banco de dados de reanálise de ondas *Downscaling Ocean Wave - DOW* (CAMUS et al., 2013), que integra o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil).

2. ÁREA DE ESTUDO

A plataforma continental do RN estende-se entre as latitudes $-4,000$ a $-6,500$ e da longitude $-34,500$ e $-37,000$ aproximadamente, no extremo nordeste do Brasil. Está em ambiente tectônico de margem continental passiva em estágio evolutivo avançado, originada na abertura do Oceano Atlântico Sul (BAPTISTA-NETO e SILVA, 2004).

A pesquisa foi feita em pontos ao longo da plataforma continental do RN, adjacentes a praias e estuários com notórios eventos erosivos, relacionados a danos em equipamentos públicos e

edificações instalados na orla, ocasionados por forçantes meteorológicas e/ou mobilização de sedimentos (Figura 1), a saber: Laguna de Guaraíra, entre os municípios de Tibau do Sul e Senador Georgino Avelino; praia da Barreira do Inferno, município de Parnamirim; trecho das praias de Muriú, Porto Mirim e Jacumã, município de Ceará-Mirim; orla marítima do município de Galinhos; além da praia de Soledade e Ilha Ponta do Tubarão, município de Macau.

O contexto geológico do Litoral Oriental compreende a Bacia Pernambuco-Paraíba, limitada a norte com a Bacia Potiguar pelo Alto de Touros e a sul, com a Bacia Sergipe-Alagoas, pelo Alto de Maragogi (CÓRDOBA et al., 2007). A plataforma continental oriental tem extensão média de 40 km perpendicularmente à linha de costa e quebra a partir da isóbata de 100 m. A plataforma continental setentrional do RN está compreendida entre o alto estrutural de Touros à leste e adjacência do litoral de Tibau, à oeste. Sua largura varia entre

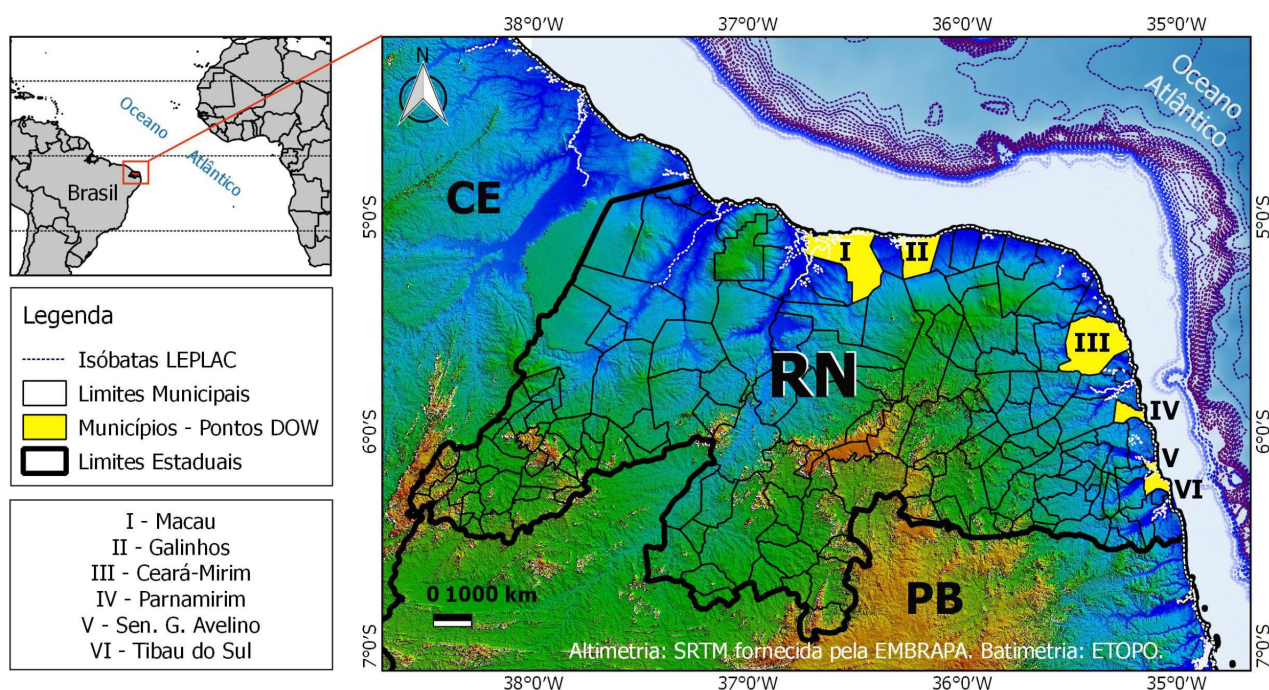


Figura 1. Plataforma continental do RN, com destaque para os municípios estudados.

30 e 40 km, com gradiente médio de 1:1.000, quebra a partir das isóbatas de 50 a 60 m (VITAL *et al.*, 2005). Tem substrato da Bacia Potiguar, de idade cretácea, superposto por depósitos quaternários costeiros que conformam a paisagem (PESSOA-NETO *et al.*, 2007).

Geomorfologicamente, os sedimentos terciários do Grupo Barreiras formam tabuleiros costeiros cortados por canais de drenagens e aparados em falésias pela ação do mar. Depósitos eólicos quaternários agregam-se em morros dunares com dezenas de metros de altura, entremeados por lagoas interdunares esporádicas – expressão da subida do lençol freático durante épocas de maior precipitação. As praias marítimas arenosas em estágios menos intensos de urbanização são ladeadas ora por dunas frontais ora falésias vivas. Vários trechos da linha de costa são contornados ainda por arenitos de praia que formam arrecifes alongados e segmentados (IDEC, 1995; SILVA e AMARO, 2008; MATOS *et al.*, 2015).

Em termos de dinâmica atmosférica, o Nordeste Brasileiro está sob intenso efeito dos ventos alísios de leste e sudeste, cuja confluência em baixos níveis está associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este é o principal sistema atmosférico de ampla escala que condiciona a precipitação principalmente no Litoral Setentrional do RN, que pode ser intensificada pela penetração de sistemas frontais até latitudes equatoriais (MOLION e BERNARDO, 2002; MELO *et al.*, 2009). A ZCIT tende a se posicionar nas regiões de máxima temperatura da superfície do mar ao longo do perfil meridional de aquecimento do Oceano Atlântico Tropical ou Dipolo do Atlântico (MELO *et al.*, 2009).

O Litoral Oriental sofre também o

efeito do sistema anticiclônico permanente de alta pressão atmosférica conhecido como Alta Pressão do Atlântico Sul (APAS), que atua nas regiões subtropicais próximo a 5°W/32°S durante o verão austral, movendo-se 800 km a norte durante o inverno, com centro alocado próximo a 10°W/27°S, controlando o escoamento superficial de baixos níveis do vento sobre o Oceano Atlântico Sul (PETERSON e STRAMMA, 1991; REBOITA *et al.*, 2012). Além da APAS, ocorrem Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), que são perturbações nos ventos equatoriais de leste, nucleados sobre a costa oeste da África (SPINOZA, 1996). No RN, atingem principalmente a costa leste do estado, intensificando eventos de escoamento em baixos níveis e precipitação.

A partir das estações meteorológicas mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Álvares *et al.* (2013) atualizaram a classificação de clima de Köppen para todo o Brasil. Segundo os autores, o Litoral Oriental do RN está em zona de clima tropical com verão seco e inverno chuvoso, do tipo As, com acumulados anuais de precipitação superiores a 700 mm, chuvas concentradas principalmente entre os meses de maio e junho. O Litoral Setentrional está em região de clima semi-árido quente de baixas latitudes e altitudes do tipo Bsh pelo sistema de Köppen, com precipitação acumulada anual inferior a 650 mm.

A circulação oceânica em superfície é dominada pela corrente Norte do Brasil, que se desloca de sul para norte no Litoral Oriental e de leste para oeste no Setentrional, controlando a deriva litorânea, formando-se a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial nas proximidades do litoral sul da Bahia (PETERSON e STRAMMA, 1991;

STRAMMA et al., 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O atrito entre o vento e a superfície do oceano produz ondulações marítimas. Ao saírem da área de geração ou área fonte, as frentes de ondas podem se propagar por longas distâncias sem perda significativa de energia até encontrarem uma praia, onde geram correntes que determinam a movimentação de sedimentos (JEFFREYS, 1925; HASSELMANN et al., 1973; STEWART, 2006). Entenda-se por profundidades intermediárias, aquelas em que a altura da coluna de água começa a se equiparar à metade do comprimento da onda que viaja em direção à costa, representando o início da interação entre a onda e o leito.

O DOW é um detalhamento do *Global Ocean Waves* - GOW (REGUERO et al., 2012), adaptado para a costa brasileira pela equipe do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria (IH-Cantábria) e inserido no SMC-Brasil. Reúne algoritmos de assimilação e tratamento estatístico que simulam séries temporais de parâmetros de ondas oceânicas entre os anos de 1948 e 2008, a cada 1 km ao longo da costa brasileira (IH-CANTABRIA, 2012).

Foi executado a partir dos modelos *Simulating Waves Nearshore* – SWAN (BOOIJ et al., 1999) e *Wavewatch-III* (TOLMAN, 2002), selecionando casos representativos por método de máxima dissemelhança. As 17 malhas retangulares têm resolução espacial de 1,11 km x 0,89km, com o leito representado pelas Cartas Náuticas da Marinha do Brasil. Os pontos DOW foram validados no Brasil tomando-se dados de boia ondógrafo instalada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, alocada na posição 29°59'58"S e 50°06'09"W, na cidade de Tramandaí

(RS), além de dados de satélites altímetros e resultados prévios de outros pesquisadores (IH-CANTABRIA, 2012).

Trata-se de uma biblioteca de casos reconstruídos que fornece análises estatísticas de parâmetros espectrais, em termos de sua probabilidade de ocorrência, a saber: altura significativa de onda (Hs), período de pico (Tp) e direção média de onda (Dir), em termos de regime médio e extremo das condições de mar (IH-CANTABRIA, 2012), todos calculados e ilustrados pelo módulo de Análise Matemática e Estatística de Variáveis Ambientais (AMEVA) do SMC-Brasil. As séries temporais reconstruídas são de propriedade do IH-Cantábria e o usuário tem acesso apenas aos gráficos dos resultados retornados pelo AMEVA.

A escolha de pontos DOW representativos dos trechos de estudo foi realizada com base nas tabelas de probabilidade de ocorrência fornecidas pelo AMEVA. Em função de limitações dos algoritmos SWAN nas regiões mais rasa – devido às complexas interações das ondas com o fundo oceânico –, nesta pesquisa, foram coletados pontos entre as cotas batimétricas de 10 a 20 m.

A comparação entre os pontos ocorreu por Regressão Linear de Hs e Tp nos seus diversos estados de mar. A Regressão Linear é utilizada quando se deseja estudar o comportamento de uma variável dependente em função de uma variável explanatória, ajustada pela equação de uma reta (MAGALHÃES e LIMA, 2013). A diferença entre os pontos observados e a reta é dada pelos erros ou termos de perturbação, que podem ser minimizados por diversos métodos, dentre os quais o mais comum é pela soma dos seus quadrados – ou Soma dos Quadrados dos Resíduos.

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r), que indica o qual próximo da

média estão as amostras e sendo uma medida da sua variabilidade, é dado pela Equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}}$$

onde, x é a variável resposta, y é a variável dependente, o índice $\bar{}$ de ambas indica suas respectivas médias, para n amostras disponíveis.

O Coeficiente de Determinação R^2 é então obtido a partir de r e representa a proporção em que a variável dependente é explicada pela variável resposta que se investiga, variando entre 0 para mínima correlação e 1, para máxima ou perfeita correlação. O R^2 equivale à redução proporcional do erro.

Como a análise estatística do SMC-Brasil é interna e apenas gráficos e tabelas de probabilidade dos parâmetros

espectrais de ondas são disponibilizadas ao usuário, testes de hipótese não puderam ser realizados para comprovar o nível de significância do ajustamento. Entretanto, foi possível estimar as cotas em que os dados DOW apresentaram variabilidade minimizada dos resultados. Pela ausência de séries longas e de boa qualidade de medições diretas de ondas no estado, não foi possível validar os resultados obtidos nesta pesquisa.

4. RESULTADOS

4.1 Litoral Oriental

4.1.1 Laguna de Guaráira

Os 12 pontos DOW defrontes à Laguna de Guaráira (PGu), situada no limite entre os municípios de Senador Georgino Avelino/RN e Tibau do Sul/RN, foram tomados entre as cotas batimétricas de 19,26 e 13,52 m (Figura 2). Destes, 6 foram calculados em cotas próximas de 15 m.

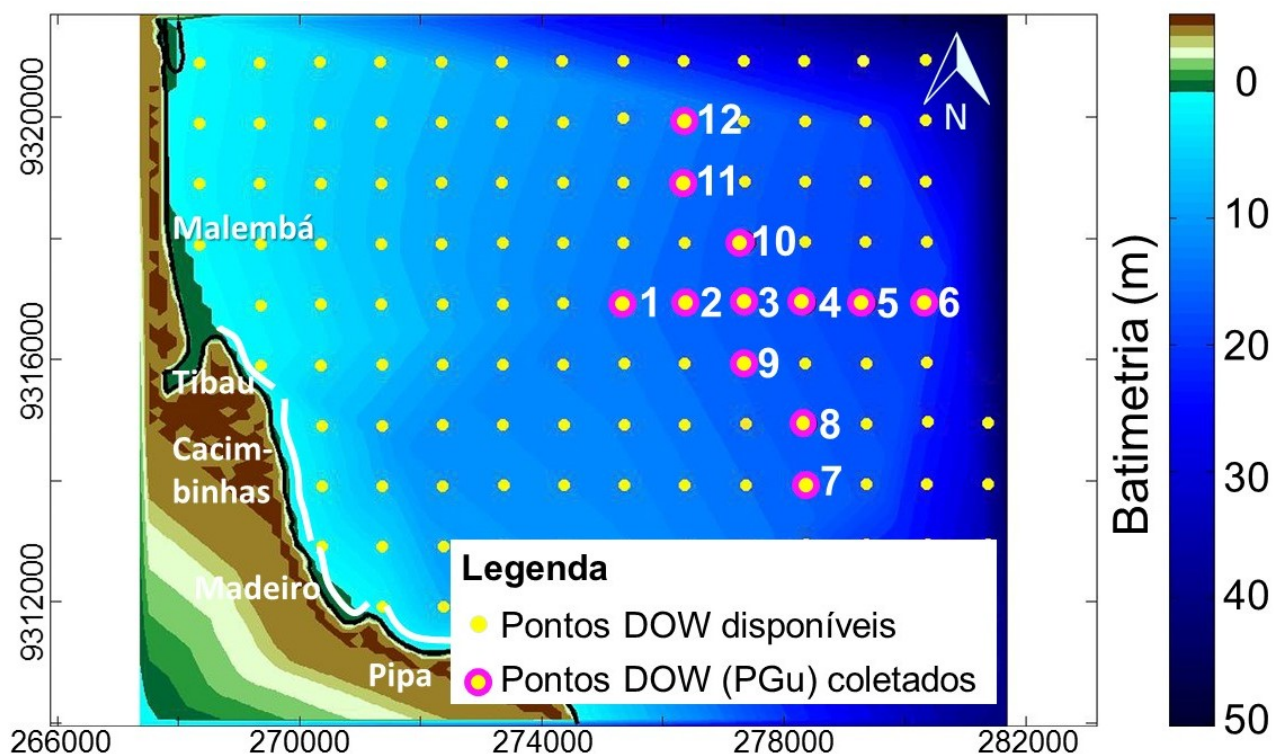


Figura 2. Localização dos pontos DOW PGu calculados na plataforma continental adjacente à Laguna de Guaráira.

Todos os pontos PGu apresentaram R2 muito próximos de 1 para todos os parâmetros de onda analisados, inclusive aqueles de cota mais rasa com relação ao PGu-06, tomado em profundidade de 19,26 m. Pela sua semelhança com os demais PGu e sua localização central com relação ao trecho de orla marítima entre o Distrito de Pipa (Tibau do Sul) e a praia de Malembá (Sen. G. Avelino), foi adotado o PGu-04 como representativo da área (em coordenada latitude/longitude -6,176 e -35,003; à profundidade de 16,98 m).

As ondas nesta área vêm principalmente de leste-sudeste e leste, nesta ordem de frequência, somando juntas 96,7% da probabilidade de ocorrência no local (Figura 3a). Ondas de leste-nordeste, sudeste e nordeste ocorrem com 3,3% de frequência somadas. A maior parte dos valores de Hs estão entre 1 e 2 metros, com distribuição quase simétrica em torno de 1,5 m e raramente ultrapassando 2,5 m. As ondas inferiores a 1,58 m representam 75% dos estados de mar na região. Durante tempestades, as ondulações atingem entre Hs 1,89 e 2,59 m no PGu-04.

A maior ocorrência dos valores de Tp se encontra na faixa entre 5 e 10 s, raramente ultrapassando 20 s (0,1% de

chance de ocorrerem ondas com 20,40 s vindas de nordeste, em tempestades). O histograma apresenta certa simetria em torno de 7,5 s (Figura 3b). O gráfico da função de distribuição deste parâmetro (não representado) indica 75% dos estados de mar apresentados por ondas com períodos inferiores a 8,3 s. Os períodos recorrentes em tempestades vão de 8,26 a 18,77 s.

A maré astronômica no PGu-04 tem variação semidiurna entre 1,49 m e 1,4 m acima e abaixo, respectivamente, do nível médio local estimado pelo marégrafo do Porto de Cabedelo/PB. A maré meteorológica tem contribuição da ordem de 0,1 m na série.

Apesar da baixa frequência das ondas de nordeste e leste-nordeste, neste quadrante há ocorrência de ondulações com longos períodos e alturas consideráveis, relevantes quanto ao clima de ondas, podendo significar fortes ondulações em condições extremas. A Tabela 1 sintetiza o tempo de retorno de Hs e Tp entre 5 e 100 anos, segundo o ajustamento por Distribuição Generalizada de Extremos (GEV) realizado pelo AMEVA. O tempo de retorno indica a probabilidade de recorrência de um determinado estado de agitação marítima, ou seja, eventos extremos com Hs de 2,5 m têm recorrência decadal no PGu-04.

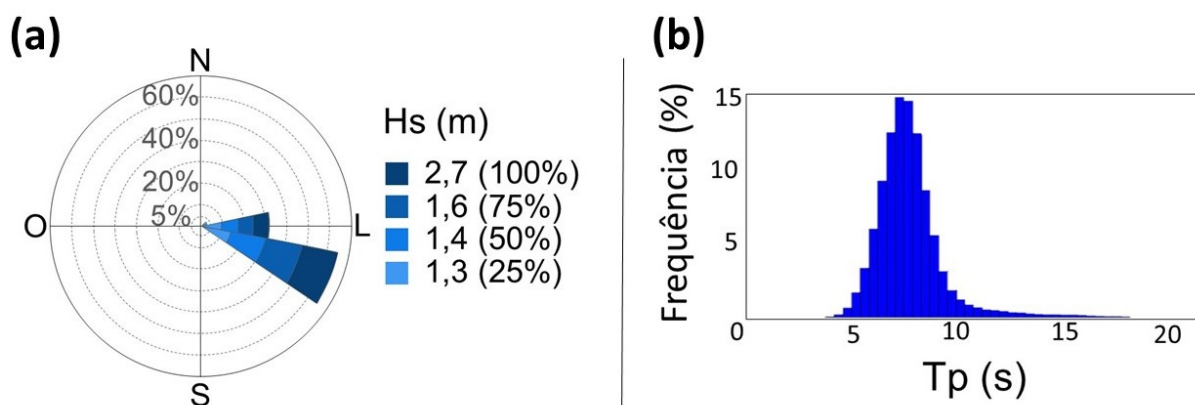


Figura 3. (a) Diagrama de rosa de Hs e (b) histograma de Tp do ponto PGu-04, na área da Laguna de Guaraira.

Tabela 1. Parâmetros de onda por tempo de retorno ajustado por GEV no SMC-Brasil, no ponto DOW PGu-04.

Tempo Retorno (anos)	Hs (m)	Tp (s)
2	2,26	17,81
5	2,38	18,92
10	2,47	19,58
50	2,65	20,64
100	2,72	20,95

4.1.2 Barreira do Inferno

A análise de regressão linear de 9 pontos DOW na região da praia da Barreira do Inferno, município de Parnamirim/RN, aqui doravante tratados como pontos PBI, foi realizada como referência a cota batimétrica próxima de 15 m (Figura 4).

O ponto PBI-06 foi escolhido pela baixa variabilidade em relação aos demais, localizado na coordenada

latitude/longitude -5,931 e -35,048 à profundidade de 15,59 m. Apresentou coeficientes R2 superiores a 0,90 dos parâmetros de onda, em relação aos demais pontos PBI, além da localização central para a porção da orla da Barreira do Inferno e plataforma adjacente.

A incidência de ondas na região vem primordialmente de leste e leste-sudeste, somando 97% de ocorrência na série temporal (Figura 5a), além de ondas de leste-nordeste e sudeste, com 3,29 % de probabilidade. O valor de Hs em condições médias de estados de mar varia 1,38 e 1,46 m - atingindo 2,39 m durante tempestades. O regime médio tem maior parte das ocorrências Tp entre 7,41 s e 8,08 s (Figura 5b) e variando para até 15,64 s durante eventos extremos de baixíssima frequência (< 1%).

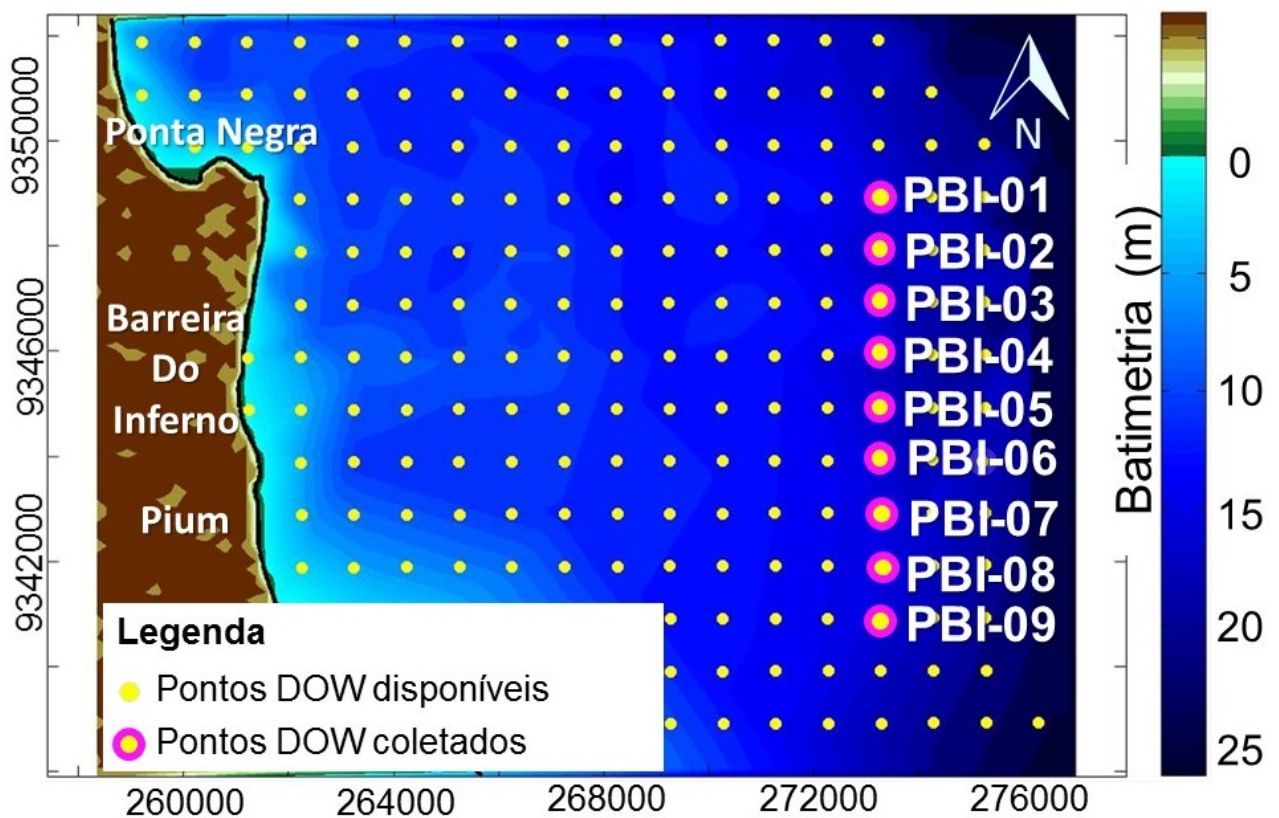


Figura 4. Localização dos pontos DOW PBI calculados na plataforma continental adjacente à praia da Barreira do Inferno.

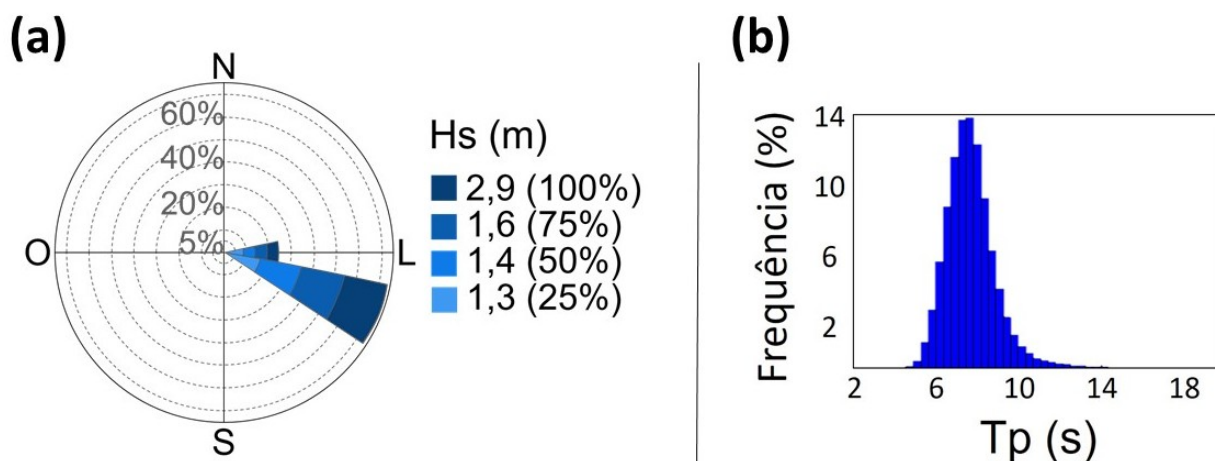


Figura 5. (a) Diagrama de rosa de Hs e (b) histograma de Tp do ponto PBI-06, na área da praia da Barreira do Inferno.

Para caracterização do clima de ondas da praia de Ponta Negra – avizinhada à norte da Barreira do Inferno –, município de Natal, capital do RN, Almeida *et al.* (2015) calcularam ponto DOW também próximo à cota de 20 m, chegando a valores semelhantes aos do PBI-06. Os autores, entretanto, abordaram a sazonalidade da incidência de ondas durante a série, com ondas de leste-sudeste mais constantes e ondas de leste aparecendo principalmente durante os meses de verão austral.

Araújo (2015) realizou análise semelhante, mas com abrangência para todo o trecho de orla entre a praia de Ponta Negra e a praia do Forte, no litoral sul de Natal. O autor selecionou ponto DOW em cota batimétrica de 19,39 m e distante aproximadamente 16 km da linha de costa. Seus resultados encontraram ondas levemente mais curtas (Tp entre 7,19 e 7,99 s) e de Hs semelhantes (1,37 a 1,50 m) nas condições médias de mar. A ondulação de tempestade apresentou também Tp mais longos, atingindo 17,78 s em ondas de leste-sudeste, com altura de 2,34 m.

Para o ponto PBI-06, os níveis da preamar e baixamar da maré astronômica variam semidiurnamente entre 1,45 m e 1,42 m, acima e abaixo respectivamente

do nível médio local dado pelo Marégrafo do Porto de Natal, com contribuição de apenas 0,1 m da maré meteorológica.

De acordo com o ajustamento dos eventos extremos por GEV (Tabela 2), ondas com mais de 2,56 m de Hs são recorrentes a partir de uma escala de tempo decadal no PBI-06 – ondas mais altas que aquelas de tempestade e superadas em 12 horas por ano.

Tabela 2. Parâmetros de onda por tempo de retorno ajustado por GEV no SMC-Brasil, no ponto DOW PBI-06.

Tempo Retorno (anos)	Hs (m)	Tp (s)
2	2,37	15,16
5	2,49	16,68
10	2,56	17,77
50	2,70	20,10
100	2,74	21,03

4.1.3 Praias de Muriú, Porto Mirim e Jacumã

Foram calculados 5 pontos DOW para estabelecer o clima de ondas na plataforma adjacente às praias de Muriú, Porto Mirim e Jacumã, município de Ceará-Mirim/RN, doravante intitulados PM; tomados próximos das cotas de 20 m (Figura 6).

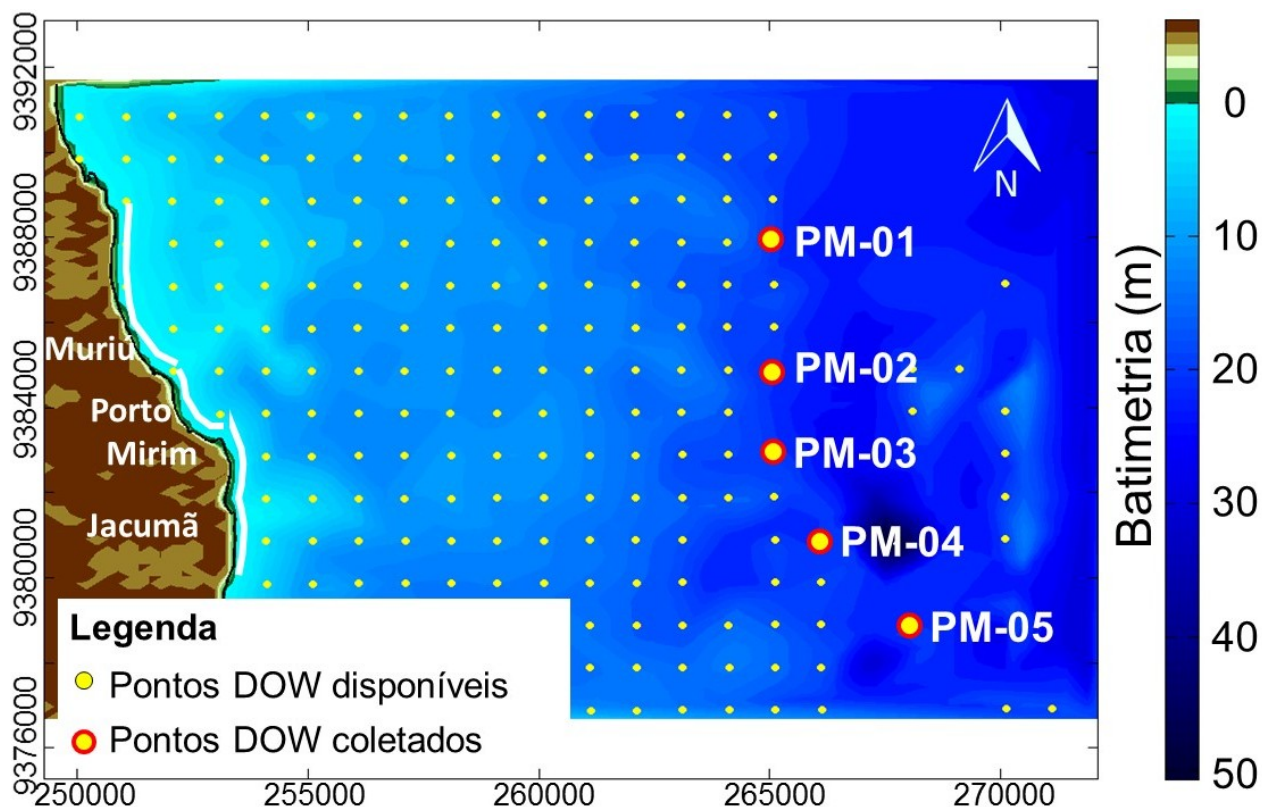


Figura 6. Pontos DOW PM calculados na plataforma continental adjacente às praias de Muriú, Porto Mirim e Jacumã.

A partir da análise de regressão, chegou-se ao PM-05 como sendo o ponto com menor variabilidade dos dados e representativo da região ($R^2 > 0,89$) alocado na coordenada geográfica -5,597 e -35,111; em cota batimétrica de 19,90 m, distante aproximadamente 12,5 km da porção sul da praia de Jacumã.

No PM-05, as ondas de leste-sudeste e de leste contabilizam juntas mais de 98% das ocorrências na série temporal, com frequências de 71,5% e 24% respectivamente (Figura 7a). Há registro em pequena proporção de ondas de leste-nordeste e de sudeste. Desses casos, mais de 75% são de ondas menores que 1,7 m, com média de 1,42 m nesse ponto. No entanto, com a análise do histograma (não representado), observa-se que a distribuição dos dados possui uma leve obliquidade positiva, indicando uma probabilidade menor de ocorrência de ondas maiores. Em casos

de tempestade, o Hs chega a média de 2,29 m, raramente atingindo 2,5 m de altura significativa.

O Tp obtido varia entre 7,7s e 8,0s, com a distribuição oblíqua positiva, tal como o Hs (Figura 7b). Nas situações de tempestade a média dos períodos gerados fica entre 11,88s e 15,64s.

No que diz respeito às marés, a maré astronômica é o principal, fator na variação semidiurna do nível do mar, com amplitude de aproximadamente de 1,48 m acima do nível médio local. Por outro lado, os efeitos da maré meteorológica são quase insignificantes, com amplitude máxima de 0,09 m.

O tempo de retorno previsto para ondas de 3,0 m é superior a 100 anos no PM-05 (Tabela 3), entretanto valores de 2,66 m e 2,75 m podem ocorrer a cada 5 e 10 anos, respectivamente, sendo uma onda de Hs muito superior à média da região.

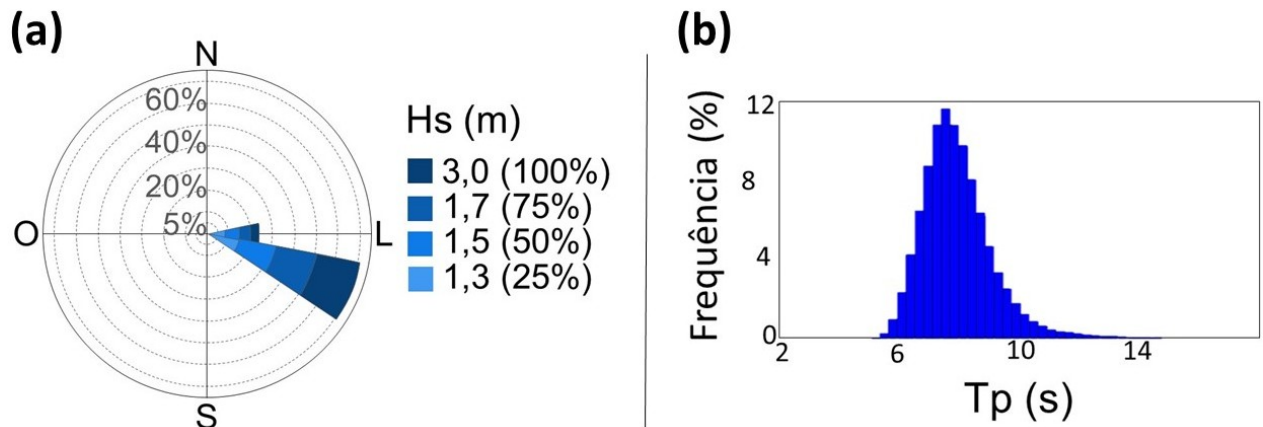


Figura 7. (a) Diagrama de rosa de Hs e (b) histograma de Tp do ponto PM-05, na região das praias de Muriú e Jacumã.

Tabela 3. Parâmetros de onda por tempo de retorno ajustado por GEV no SMC-Brasil, no ponto DOW PM-05.

Tempo Retorno (anos)	Hs (m)	Tp (s)
2	2,53	15,54
5	2,66	16,37
10	2,75	16,85
50	2,91	17,62
100	2,96	17,84

4.2 Litoral Setentrional

4.2.1 Galinhos

Os pontos DOW adjacentes à orla do município de Galinhos/RN (doravante anotados como PGa) foram coletados entre as cotas de 10,22 e 19,38 m (Figura 8), distribuídos em amplo espaço da plataforma continental adjacente à orla do município.

Para a região de Galinhos, o PGa-08 foi escolhido como representativo, pois ajustou-se bem ao PGa-05 (em profundidade de 19,38 m), com valores de R2 sempre superiores a 0,95 – equilibrando pouca variabilidade dos parâmetros de onda e localização central com relação ao município. Está localizado em coordenada latitude/longitude -4,960 e -36,191.

As ondas incidem na região do PGa-08 em um range direcional que vai de norte até leste-sudeste (Figura 9a),

com Hs em condições médias entre 0,83 e 1,20 m e Tp variando de 9,18 a 11,79 s. Em tempestades, a ondulação passa a incidir com até 2,79 m e 17,67 s (vinda principalmente de norte). O histograma de Tp é simétrico, com a maior parte das ocorrências em torno de 10 s (Figura 9b). O montante de 75% dos casos de agitação marítima da série DOW no PGa-08 tem ondas com 1,10 m ou menores e Tp de 11,42 s ou mais curtos.

A maré astronômica nesse ponto atinge até 1,49 m acima do nível médio do marégrafo do Porto de Guamaré, em situações de sizígia, com baixa-mares de até 1,47 m abaixo do zero da régua. A maré meteorológica raramente ao longo da série contribuiu em mais do que 0,1 m de elevação ou rebaixamento, especialmente a partir da década de 70.

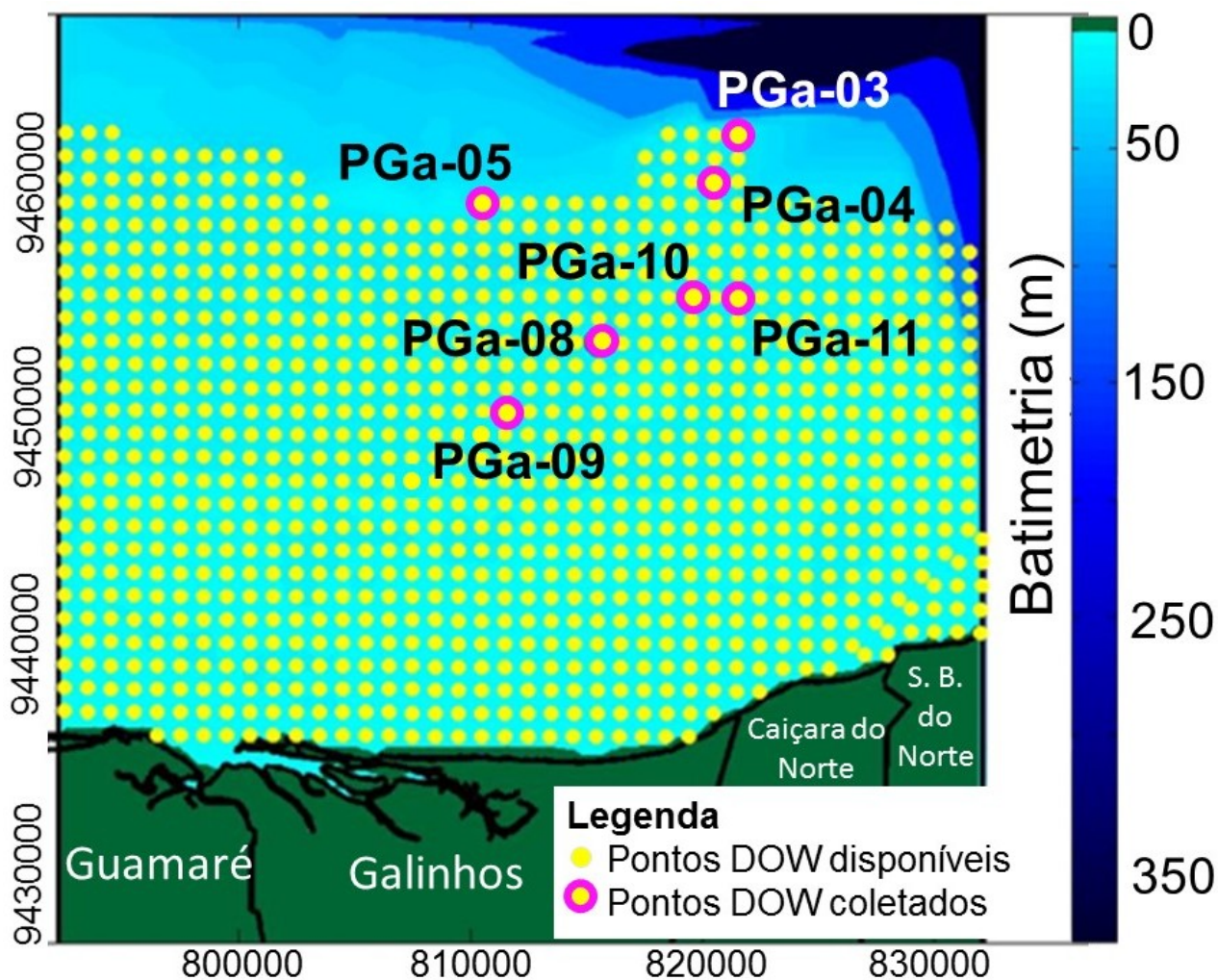


Figura 8. Pontos DOW analisados na plataforma continental adjacente à orla do município de Galinhos/RN.

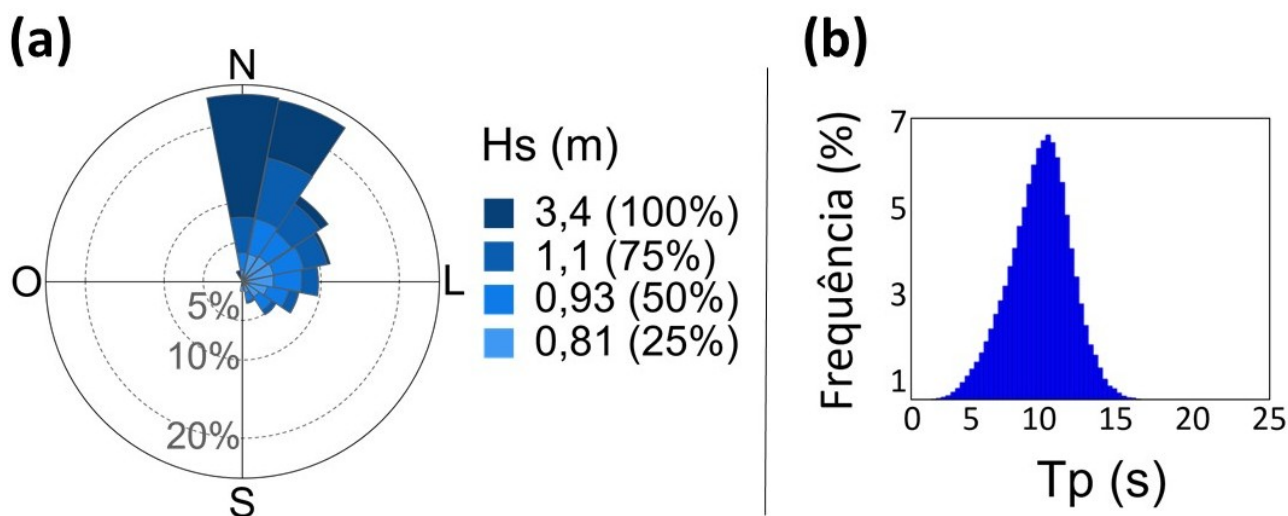


Figura 9. (a) Diagrama de rosa de Hs e (b) histograma de Tp do ponto PGa-08, na região da orla marítima do município de Galinhos.

Eventos de variabilidade decadal superam as ondas médias de tempestade na região de Galinhos, segundo o ajuste por GEV da série do ponto PGa-08 (Tabela 4). Ondas longas e com mais de 3,00 m podem atingir sobre a área em eventos extremos de ressaca marinha pelo menos a cada 50 anos.

Tabela 4. Parâmetros de onda por tempo de retorno ajustado por GEV no SMC-Brasil, no ponto DOW PGa-08.

Tempo Retorno (anos)	Hs (m)	Tp (s)
2	2,35	17,54
5	2,62	18,22
10	2,81	18,68
50	3,23	19,57
100	3,40	19,89

4.2.2 Praia de Soledade – Ponta do Tubarão

Os sete pontos DOW coletados

nas adjacências da Praia de Soledade e Ilha Ponta do Tubarão (doravante anotados como PS), município de Macau/RN, foram alocados entre as profundidades de 45,51 m e 18,86 m, próximo à foz do Estuário Piranhas-Açu. Selecionou-se todos os pontos fora do cânion submarino relacionado ao estuário (Figura 10), evitando-se efeitos de refração desta feição na ondulação simulada em SWAN.

Os pontos calculados apresentaram pouca variação dos parâmetros de onda com relação ao PS-05 ($R^2 > 0,95$). Sendo assim, o PS-04 (latitude/longitude -4,815 e -36,470; em profundidade de 19,02 m) foi adotado como representativo da plataforma continental da região, tendo em vista sua localização central em relação à linha de costa desta área.

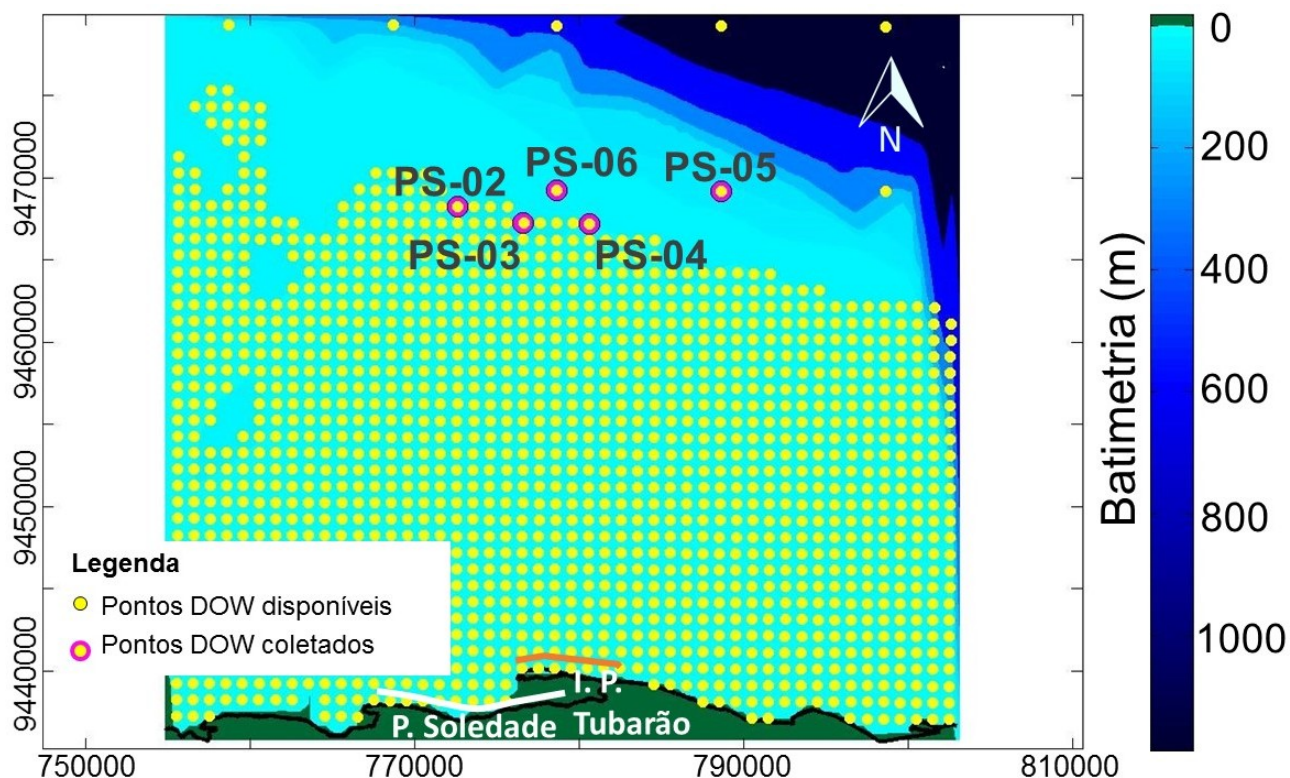


Figura 10. Pontos DOW analisados na plataforma continental adjacente à Praia de Soledade e Ilha Ponta do Tubarão.

As ondulações em profundidades intermediárias da plataforma de Macau vêm predominantemente de norte, norte-nordeste, nordeste, leste-nordeste e leste, somando 97% de probabilidade de incidência. Ali, as ondas de norte têm apenas 6% de probabilidade, entretanto, apresentam os maiores valores de Hs (Figura 11a), podendo chegar a 3,07 m em situações de tempestade. A maior faixa de ocorrência de Hs ao longo da série é de aproximadamente 1,20 m; com amplitude de 1,08 a 1,04 m em condições médias e de 1,51 a 2,83 m em tempestade (excetuando-se as ondas de norte). O histograma de Tp (Figura 11b) é razoavelmente simétrico, com a maior

quantidade de registros com valores próximos de 10 s. Em 75% dos estados de mar considerados, as ondas apresentaram Hs inferiores a 1,37 m e Tp mais curtos que 11,05 s.

O intervalo de maré astronômica está na faixa de 1,5 e -1,4 m com relação ao nível médio do marégrafo do Porto de Macau, com contribuição média de 0,09 m da maré meteorológica.

O ajustamento GEV indicou que a onda no PS-04 não tende a se alongar em seu Tp, no entanto, o Hs atinge valores significativos, principalmente com tempo de retorno acima de 10 anos (Tabela 5).

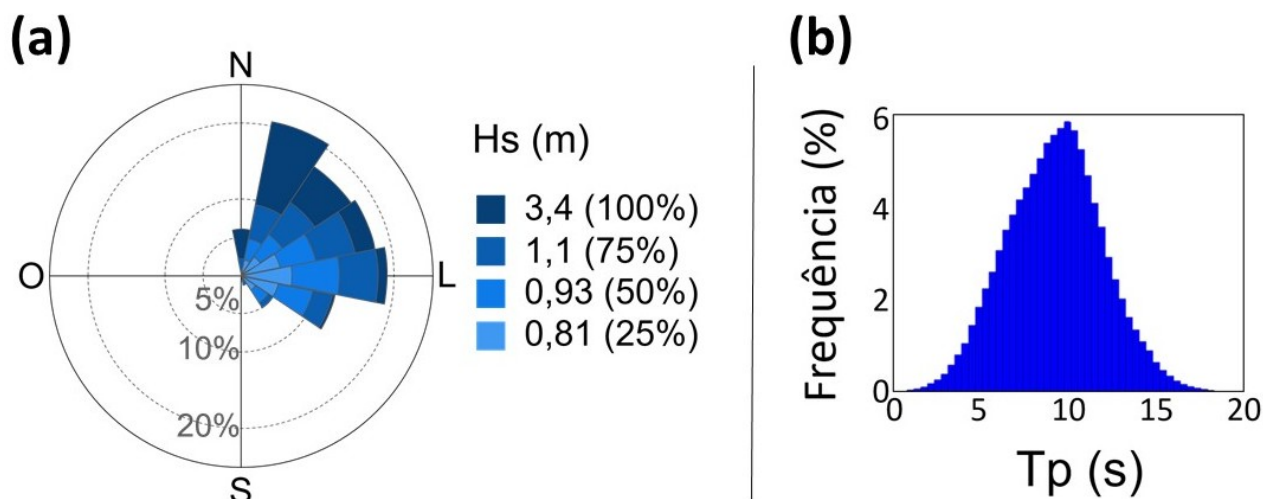


Figura 11. (a) Diagrama de rosa de Hs e (b) histograma de Tp do ponto PS-04, na plataforma continental adjacente à Praia de Soledade e Ilha Ponta do Tubarão.

Tabela 5. Parâmetros de onda por tempo de retorno ajustado por GEV no SMC-Brasil, no ponto DOW PS-04.

Tempo Retorno (anos)	Hs (m)	Tp (m)
2	2,57	17,49
5	2,80	17,71
10	2,96	17,79
50	3,29	17,85
100	3,41	17,86

5. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a série temporal dos pontos DOW analisados, as ondas chegam à plataforma continental oriental do RN principalmente vindas de leste-sudeste e de leste, com intervalo bem definido de probabilidades para essas direções de propagação. A plataforma setentrional, no entanto, é alcançada por um range direcional mais amplo, oriunda principalmente do quadrante nordeste (Figura 12).

Em termos de sistemas de circulação atmosférica geral, estes padrões acompanham os ventos alísios, que cisalham com a superfície do mar e transferem momentum de formação das ondulações. O deslocamento meridional

da ZCIT imprime as ocorrências de ondas de leste-sudeste e sudeste nos pontos PGa-08 e PS-04 – plataforma setentrional –, tendo em vista que quando a faixa convectiva está deslocada para o Hemisfério Norte o ramo de sudeste dos alísios afetam a região.

Nesse trecho do Oceano Atlântico, o trânsito anual da ZCIT ocorre muito perto da Linha do Equador, de maneira que os alísios de nordeste afetam pouco as ondulações marítimas na plataforma oriental do RN. Nesta região, o escoamento atmosférico em baixos níveis oriundo do núcleo de alta pressão da APAS e dos eventos de DOL, intensifica sobremaneira a ondulação marítima vinda de leste-sudeste e de leste.

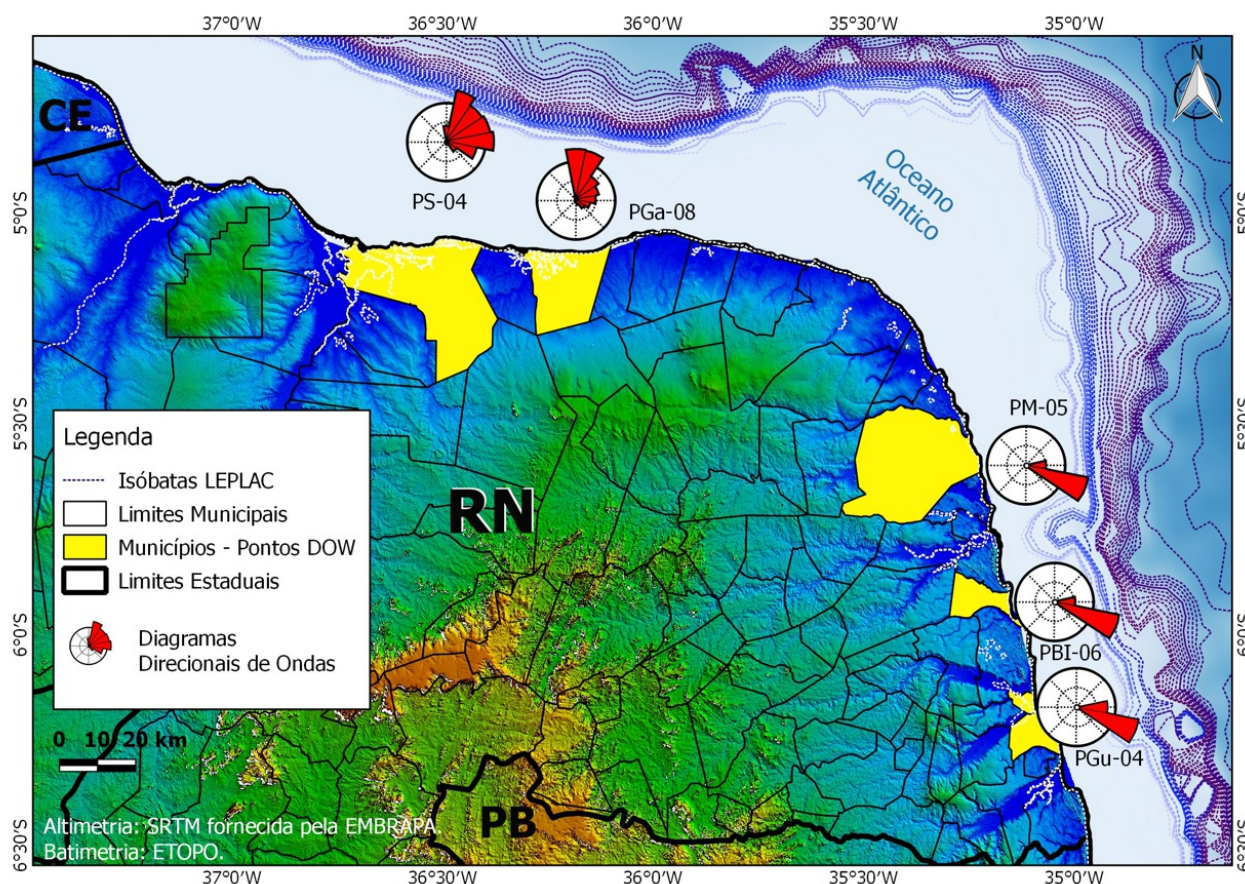


Figura 12. Mapa dos diagramas direcionais de ondas oriundos de pontos DOW, na plataforma continental do RN.

Tais resultados corroboram com Pianca et al. (2010), que utilizaram séries temporais do modelo Wavewatch-III entre os anos de 1997 e 2007, tomando no extremo Nordeste do Brasil, um ponto na plataforma oriental do Estado de Pernambuco e outro sobre a plataforma do Estado do Ceará. Segundo esses autores, no litoral oriental nordestino, as ondas oceânicas predominam nas direções de leste e sudeste durante os meses de primavera e verão, acompanhando os ventos alísios. No entanto, durante os meses de outono e inverno observaram ondas vindas de sul, as de maior potência energética na região, revelando a influência de ventos fortes oriundos de frentes frias e polares, além das oscilações sazonais da APAS. Para a costa equatorial do Nordeste, os autores encontraram ondas vindas principalmente de norte e nordeste durante o verão austral e de leste durante os meses de inverno e outono, também influenciadas pelos ventos alísios.

Outro aspecto relevante do clima de ondas no RN é que a plataforma setentrional é mais extensa e tem inclinação mais suavizada, onde incidem ondas mais longas nas profundidades intermediárias, com valores de T_p acumulados entre 5 e 15 s nos pontos PGa-08 e PS-04. Como a plataforma oriental é mais estreita e a mudança de profundidade é relativamente mais abrupta, as ondas se formam mais perto da costa, atingindo a plataforma rasa com períodos mais curtos e conseqüentemente de maior frequência de oscilação, concentrados entre 6 e 10 s nos pontos PGu-04 e PBI-06, ainda com características dos trens próximos da área fonte.

Os eventos extremos de Hs são mais severos nos pontos DOW da plataforma setentrional, em escala

decadal do tempo de retorno, podendo chegar a 3,4 m no PGa-08 e no PS-04; quando no PGu-04 e PBI-06 chegam a 2,7 m; atingindo até 2,9 m no PM-05. Para a teoria linear de ondas, o Hs está diretamente relacionado com a densidade de energia por área da ondulação incidente (STEWART, 2006). Essa energia dissipa-se, promovendo a suspensão e transporte longitudinal de sedimentos, relacionados aos processos costeiros de erosão e acresção em praias.

A proposta deste trabalho foi apresentar uma caracterização preliminar em escala regional do clima de ondas que atinge a plataforma continental do RN, nos seus trechos oriental e setentrional. Buscou-se lançar bases para que se desenvolva o entendimento das variáveis relacionadas à agitação marítima que atinge o litoral do RN e os processos costeiros relacionados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério do Meio Ambiente do Brasil e Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA) pela transferência da ferramenta SMC-Brasil à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por bolsas de Iniciação Científica aos alunos envolvidos com a pesquisa. Aos Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA) e Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) da UFRN, pela infraestrutura física e operativa de treinamento de recursos humanos, bem como de processamento dos dados pertinente a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 15, p. 17, 2015.
- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013
- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra beach, Natal City, Northeast Brazil. *Marine Geodesy*, v. 38, p. 1-25, 2015.
- AMARO, V. E.; LIMA, F. G. F.; SANTOS, M. S. T. An Evaluation of Digital Elevation Models to Short-Term Monitoring of a High Energy Barrier Island, Northeast Brazil. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, p. 317-324, 2013.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. *Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão*. Natal: Edição do autor, 118p., 2012.
- ARAÚJO, D. J. C. Transporte longitudinal de sedimento na zona costeira de Natal/RN. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 141p, 2015.
- ARAÚJO, D. J. C.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. A. Evolução decadal da taxa de transporte longitudinal de sedimento em praias urbanas da zona costeira de Natal/RN. *Anais do VIII Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Aveiro: APRH. p. 1-15, 2015.
- BAPTISTA-NETO, J. A.; SILVA, C. G. 2004 Morfologia do fundo oceânico. In BAPTISTA NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. *Introdução à Geologia Marinha*. Rio de Janeiro: Interciência, Cap. 3, p. 31-51, 2004.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.
- BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; PRUDÊNCIO, M. C. Comparison of prognostic models in different scenarios of shoreline position on Ponta Negra beach in Northeast Brazil. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 8, p. 17-21, 2014.
- CAIRES, S.; STERL, A.; BIDLOT, J. -R.; GRAHAM, N.; SWAIL, V. Intercomparison of different wind-wave reanalyses. *Journal of Climate*, v. 17, n. 10, p. 1893-1913, 2004.
- CAMPOS, E.; BUSALACCHI, A.; GARZOLI, S.; LUTJEHARMS, J.; MATANO, R.; NOBRE, P.; OLSON, D.; PIOLA, A.; TANAJURA, C. The South Atlantic and the Climate. First International Conference on the Ocean Observing System for Climate OCEANOBS99. St Raphaël: IOC-INF/UNESCO. p. 20, 2001.
- CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C.. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, v. 72, p. 56-68, 2013.

- CÓRDOBA, V. C.; JARDIM DE SÁ, E. F.; SOUZA, D. C.; ANTUNES, A. F. Bacia de Pernambuco-Paraíba. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 391-403, nov. 2007.
- EMMANOUIL, G.; GALANIS, G.; KALLOS, G.; BREIVIK, L. A.; HEIBERG, H.; REISTAD, M. Assimilation of RADAR Altimeter Data in Numerical Wave Models: an impact study in two different wave climate regions. *Annales Geophysicae*, v. 25, p. 581-595, 2007.
- FRANCO, C. G. M.; AMARO, V. E.; SOUTO, M.V.S. Prognóstico da erosão costeira no litoral setentrional do Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040. *Revista de Geologia, Fortaleza*, p. 37-54, 2012.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D. E.; ENKE, K.; EWING, J. A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D. E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MÜLLER, P.; OLBERS, D. J.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Hamburgo*, v. Suplemento: Linha A (8), n. 12, p. 94, 1973.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE - IDEC. Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 88p., 1995.
- INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE CANTÁBRIA -IH CANTÁBRIA. Documento Temático de Ondas. Universidade de Cantábria. Santander, 155p., 2012.
- JEFFREYS, H. On the formation of water waves by wind. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Londres*, v. 107, p. 189-206, 1925. Disponível em: <<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/107/742/189>>. Acesso em: setembro 2016.
- LEFÉVRE, J. M.; AOUF, L.; SKANDRANI, C.; QUEFFEULOU, P. Contribution of Satellite Altimetry to Wave Analysis and Forecasting. ESA Special Publication. Veneza: European Space Agency. p. 40-43, 2006.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. Noções de probabilidade e estatística. 7ª. ed. São Paulo: EDUSP, 408p., 2013.
- MATOS, M. F. A.; FORTES, C. J. E. M.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Análise comparativa da agitação obtida com o modelo numérico SWAN na modelagem de ondas do Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil, e dados de campo. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 13, n. 3, p. 283-299, 2013.
- MATOS, M. F. A.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; ALVES, A. S. S.; SALES, M. L. C. Análise evolutiva da taxa de erosão da linha de costa do Litoral Leste do RN, Brasil. XII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. Brasília: APRH Lisboa. p. 10, 2015.
- MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 2, p. 25-41, 2009.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, p. 1-10, 2002.

- ONEA, F.; RUSU, E. Coastal protections provided by energy farms in the romanian nearshore. *Mechanical Testing and Diagnosis*, v. 2, n. 6, p. 5-14, 2016.
- PESSOA-NETO, O. C.; SOARES, U. M.; SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORÊNCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369, 2007.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26, n. 1, p.1-73, 1991.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 Reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, n. 1, p. 53-70, 2010.
- REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terra e Didática*, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.
- REGUERO, B. G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F. J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I. J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, v. 65, p. 38-55, 2012.
- SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Terrestrial laser scanner applied to monitoring beach morphological changes in a high energy coastal zone in Northeast Brazil. *Annals of 7th International Terrestrial Laser Scanning User Meeting*. Rome: Optech. p. 13, 2014.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 14, n. 2, p. 151-162, 2013.
- SANTOS-JR., O. F.; SCUDELARI, A. C.; COSTA, Y. D.; COSTA, C. M. Sea cliff retreat mechanisms in Northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. SI 64, p. 820-824, 2011.
- SCUDELARI, A. C.; BRAGA, K. G.; COSTA, F.A.A.; SANTOS-JR.; O. F., O. Estudo dos processos erosivos instalados na praia de Pipa - RN. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 9, n. 1, p. 31-37, 2005.
- SILVA, D.R.V.; AMARO, V.E. Integração entre dados óticos e de RADAR (SRTM) para caracterização geoambiental do litoral setentrional do Rio Grande do Norte. *Revista Geográfica Acadêmica*, v.2, n.2, 2008.
- SPINOZA, E. Distúrbios Ondulatórios de Leste na Região Tropical. In: (ORG.) *Climanálise Especial - Edição Comemorativa de 10 Anos*. 1ª Edição. ed. Cachoeria Paulista: CPTEC/INPE, v. 1, Cap. 18, 1996.
- STEWART, R. H. Ocean Waves. In: STEWART, R. H. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas: A & M University, Cap. 16, p. 271-292, 2006.
- STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P.; SCHOTT, F. Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. *Elsevier Oceanography Series*, v. 68, p. 1-22, 2003.
- SUGUIO, K. Ambientes de sedimentação e fácies sedimentares. In: SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. 1a. ed. São Paulo: Blücher, Cap. 8, p. 205-288, 2003.
- TOLMAN, H. L. Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing*, v. 28, p. 35-52, 2002.
- VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E., MELO, F. T. L.; SOUZA, F. E. S.; LIMA, Z. M. C.; FRAZÃO. E. P., TABOSA, W. F. Rio Grande do Norte.

In: MUEHE, D. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Cap. 5, p. 155-172, 2006.

VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira - área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 3, p. 233-241, 2005.