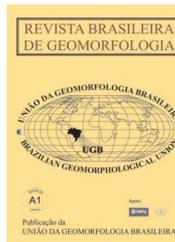


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 18, nº 2 (2017)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1153>



INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM NUMÉRICA (SWAN) E DADOS DE CAMPO NA DETERMINAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS NO LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE

INTEGRATION AMONG NUMERIC SIMULATING (SWAN) AND FIELD DATA ON WAVE CLIMATE DETERMINATION AT THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE NORTHERN COAST

Maria de Fátima Alves de Matos

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
Email: mfatimaalves.m@gmail.com

Ada Cristina Scudelari

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
Email: ada@ct.ufrn.br

Venerando Eustáquio Amaro

Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
Email: venerando.amaro@gmail.com

Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Avenida do Brasil, 101, Lisboa. CEP: 1700-066, Portugal
Email: jfortes@lnec.pt

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
27/09/2016
Aceito (Accepted):
07/02/2017

Palavras-chave:

Ondas; ADCP; Ventos;
Nordeste do Brasil.

Keywords:

Wave; ADCP; Wind;
Northeastern Brazil.

Resumo:

Este artigo apresenta os resultados da aplicação do modelo numérico *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) com análises comparativas das medidas obtidas a partir dos resultados de modelagem e de medições durante as campanhas de campo em 2010 e 2012 no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (NE do Brasil). O objetivo principal do presente estudo foi aplicar e validar o modelo numérico SWAN na determinação do clima de ondas, avaliar seus pontos fortes e limitações para a região de interesse. Os dados de campo realizados em dois pontos próximo da costa em profundidades de 3 m (PT_1) e 6 m (PT_2) por meio do uso de dois adcp: AWAC e AQUADOPP. Os dados adquiridos com estes equipamentos foram processados e permitiram a realização de análises espectrais de altura significativa, HS (m), período médio, Tmed (s), e direção média, DIR (°). Para a implementação do modelo SWAN foram empregados para as condições de contorno os dados de agitação a partir do modelo de 3ª geração de escala oceânica

Wavewatch III. Para o refinamento e aplicabilidade do modelo, foram introduzidos dados de ventos e maré locais, corrigidos com base no Manual de Engenharia Costeira (CEM), permitindo assim, melhor ajuste dos resultados da modelagem. O domínio de cálculo foi referenciado para as dimensões da carta náutica 720, com três malhas regulares de diferentes dimensões e resolução: externa, intermediária e interna, sendo esta última, utilizada para fornecer os parâmetros de propagação da onda ao longo da costa. As configurações usadas para o SWAN foram as padrões em modo estacionário, com as formulações KOMEN, a dissipação devido à rebentação induzida pelo fundo com atrito de fundo usando a formulação JONSWAP com coeficiente de atrito $C = 0.015\text{m}^2\text{s}^{-3}$ em condições *wind sea*, e a formulação *whitecapping* ou excesso de declividade, as interações entre tríades de ondas e interações onda-onda quádrupla. As estatísticas descritivas foram analisadas para todos os conjuntos de dados, erro percentual absoluto, o erro médio quadrático, o índice de concordância e a dispersão dos dados dos valores medidos e dos valores numéricos como forma de precisão e avaliação. Concluímos que o modelo SWAN conseguiu reproduzir e determinar o clima de ondas para o litoral setentrional do RN, os resultados mostram tendência semelhante com as medidas *in situ* das variações temporais de altura significativa (HS, m), entretanto, os resultados paramétricos das estatísticas se mostraram baixos para as estimativas dos períodos médios das ondas (Tmed, s) na maioria dos períodos analisados em comparação os dados do PT_1 e PT_2 (pontos de medição), e alternância das alturas significativas de ondas, em alguns momentos superestimando com a sobreposição ocasional de episódios de picos.

Abstract:

This article presents results from the application of the numeric model Simulating Waves Nearshore (SWAN) with comparative analysis among measures from modeling and measurements obtained at a field campaign, done between 2010 and 2012, at the northern coast of Rio Grande do Norte (Northeast of Brazil). The main purpose of the study was to apply and validate the numeric model (SWAN) in wave climate determination, evaluate strong and weak points at the limits for the region of interest. The field data were obtained in two points close to the coast, at 3 m (PT_1) and 6 m (PT_2) under water with two adcp: AWAC and AQUADOPP. The acquired data with these two equipment were processed and enabled the realization of significant high spectral analysis, HS (m), average period, Tmed (s), and average direction, DIR (°). For the SWAN model implementation, the stirring data from third generation model of the ocean scale Wavewatch III were applied as boundary conditions. Wind and local tide data, after being corrected with the Coastal Engineering Manual (CEM), were introduced resulting in better modeling results adjustment and also model refinement and applicability. The calculus dominance was referred to nautical chart 720, with three regular mesh with different dimensions and resolution: external, intermediary and internal, the last one used to give wave propagation parameters through the coast. The configuration used to SWAN were the steady mode standards, with KOMEN formulations, dissipation from the seabed induced flushing from seabed friction using the JONSWAP formulation, with a friction coefficient $C = 0.015\text{m}^2\text{s}^{-3}$ in wind sea conditions and whitecapping or excess slope formulation, triad waves interactions and quadruple wave-wave interactions. The described statistics were analyzed by all data groups, absolute percent error, average squared error, concordance indication, along with the dispersion of the measured and numerical values data as a form of precision and evaluation. Finally, the SWAN model could reproduce and determine the northern coast wave climate from RN, the results presented a similar trend with the *in situ* time variation significant high measures (HS, m), however, statistics parametric results were under the waves average period estimative (Tmed, s) in almost every analyzed period, comparing the data from measured points PT_1 and PT_2, and the wave significant high alternation were overestimated with the occasional superposition of peaks episodes.

Introdução

A importância das zonas litorâneas é reconhecida há muito tempo pela comunidade científica e também pelas sociedades que se desenvolveram nesses ambientes (MOEINI e ETEMAD-SHAHIDI, 2007). Do ponto de vista científico, as zonas costeiras constituem

ambientes de alta complexidade, caracterizados por diferentes tipos litológicos e arcabouços tectônicos submetida a processos oceanográficos e meteorológicos de alta dinâmica, tais como ondas, ventos, correntes e marés.

No decorrer das últimas décadas, com a ampliação

das atividades econômicas instaladas em ambientes marinhos e costeiros aumentaram as exigências na obtenção de dados de longo prazo sobre as condições ambientais, incluindo os dados de propagação de ondas. Assim, quando na análise dos problemas costeiros, que envolve o entendimento das feições estruturais, do transporte de sedimentos e da erosão costeira, deve se considerar o conhecimento do clima de ondas de ventos, além de sua variedade de aplicações (MOEINI e ETEMAD-SHAHIDI, 2007; AKPINAR *et al.*, 2012). Contudo, devido às poucas medições de longo prazo em regiões litorâneas, as características de ondas são estimadas para esse setor utilizando especialmente os modelos numéricos (MOEINI e ETEMAD-SHAHIDI, 2007).

Os progressos recentes na capacidade de previsão e melhorias na precisão de campos de vento (*hindcast*) têm permitido implementar modelos mais precisos de 3ª geração, incluindo condições *offshore* e *nearshore* (AKPINAR *et al.*, 2012). Este fato tem contribuído para estudos de eventos passados, a partir das simulações dos dados atmosféricos pretéritos (*hindcasting*), assim, na previsão de cenários futuros, utilizando os modelos para condições de análises voltadas para previsões (*forecasting*) (CUCHIARA *et al.*, 2006).

Estudos realizados no litoral do Brasil mostram que a origem, desenvolvimento e modificações de feições morfológicas costeiras ocorrem a partir da ação de processos físicos que controlam sua dinâmica, envolvendo a interação entre as ondas, as correntes, as marés e a topografia da plataforma continental (MORTON, 1991; CUCHIARA *et al.*, 2006). No litoral setentrional do Rio Grande do Norte foram realizadas algumas tentativas de implementação de modelos para estudos de hidrodinâmica costeira e análises ambientais. Scudelari *et al.* (2007) aplicou inicialmente os modelos REFDF (DALRYMPLE e KIRBY, 1991) e SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999) para modelar diferentes condições incidentes do litoral de Galinhos e Guamaré. Góis *et al.* (2009) estudou a circulação hidrodinâmica da zona costeira frontal a Galinhos e Guamaré por meio do módulo 2DH do modelo hidrodinâmico SisBAHIA (ROSMAN, 1987). Moura (2009) utilizou o modo 2DH do SisBAHIA para analisar a influência dos modelos digitais de terreno sobre os resultados da circulação hidrodinâmica. Fortes *et al.* (2011) aplicou o modelo SWAN ao litoral setentrional do Rio Grande do Norte e comparou com as medições *in situ* realizadas por

Matos *et al.* (2011). Ângelo (2012) utilizou o modelo SWAN na caracterização marítima na zona adjacente ao Estuário de Diogo Lopes no litoral norte do RN e testou duas formulações de rebentação parcial (regime estacionário e não estacionário), como forma de aprofundar o conhecimento das condições de aplicação do modelo SWAN na região.

O objetivo geral deste trabalho é aplicar e validar o modelo SWAN com configurações e formulações pré-definidas pelos testes dos trabalhos acima mencionados para estudo do clima de ondas na extensão plataformal no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, do trecho entre os municípios de Guamaré a Areia Branca, com base em análises estatísticas e medições em estações de coletas. Diferentemente dos trabalhos já realizados anteriormente, neste, propõem-se a execução para dados de uma série contínua de simulação, com aplicação dos algoritmos testados, bem como a validação para dois pontos de medições em várias campanhas de campo realizadas entre os anos de 2010 e 2012 no litoral Setentrional do Rio Grande do Norte (NE, Brasil).

O trabalho inclui os perfis do modelo de previsão de ondas aplicados para o período entre Novembro de 2010 e Dezembro de 2012. No decorrer desse período, foram realizadas oito campanhas de campo em duas estações de medições, uma em profundidade variável 3 - 4 m e a outra entre 7 e 8 m. O desempenho do modelo SWAN foi avaliado considerando os diferentes períodos de ondas para cada estação de medição, com as quantificações das diferenças entre os parâmetros de ondas modelados e as medições de campo. Ainda foram realizadas comparações das previsões do SWAN com as previsões da agitação marítima do modelo WAVEWATCH III (TOLMAN, 2002) baseada na bóia posicionada na costa do Nordeste. Algumas questões foram abordadas sobre a variação da maré, condições de ventos para o litoral estudado, pois há necessidade de um bom ajustamento do modelo aos dados direcionais de ondas, reforçando a confiabilidade de aplicação generalizada em relação os estudos da costeira.

Área de Estudo

O Rio Grande do Norte possui uma costa aberta, para norte e a leste, exposta às condições marítimas do Oceano Atlântico. Devido sua localização, na região equatorial de máxima temperatura superficial do mar e onde corre a convergência dos ventos alísios, caracte-

riza-se a Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, responsável principalmente pelo regime de ventos neste litoral e geração de uma ondulação predominante de nordeste e sudeste ao longo do ano, caracterizando assim, uma agitação marítima com certa constância devido à variabilidade sazonal.

A área de estudo está situada no litoral setentrional do Rio Grande do Norte (Figuras 1 e 2), assinalada por plataforma extensa, rasa e mista, composta por cobertura de sedimentos siliciclásticos, biosiliciclásticos e carbonáticos (VITAL *et al.*, 2008) e os estudos de Gomes e Vital (2010). Conforme estes autores, a porção interna

da plataforma continental adjacente é limitada pela isóbata de 15 m, de relevo suave e extensos campos de dunas longitudinais à costa, predominantemente composta por sedimentos siliciclásticos; na porção média da plataforma, entre os limites das isóbatas de 15 e 25 m predominam sedimentos mistos e dunas transversais à costa; sendo que em sua porção mais externa, a partir da isóbata de 25 m até a quebra do talude continental os sedimentos são bioclásticos. Estes e outros fatores como a configuração geológica da Bacia Potiguar e a relevância socioeconômica e ambiental deste setor litorâneo justificam sua escolha para aplicação da modelagem e instalação das estações de medições próximas à costa

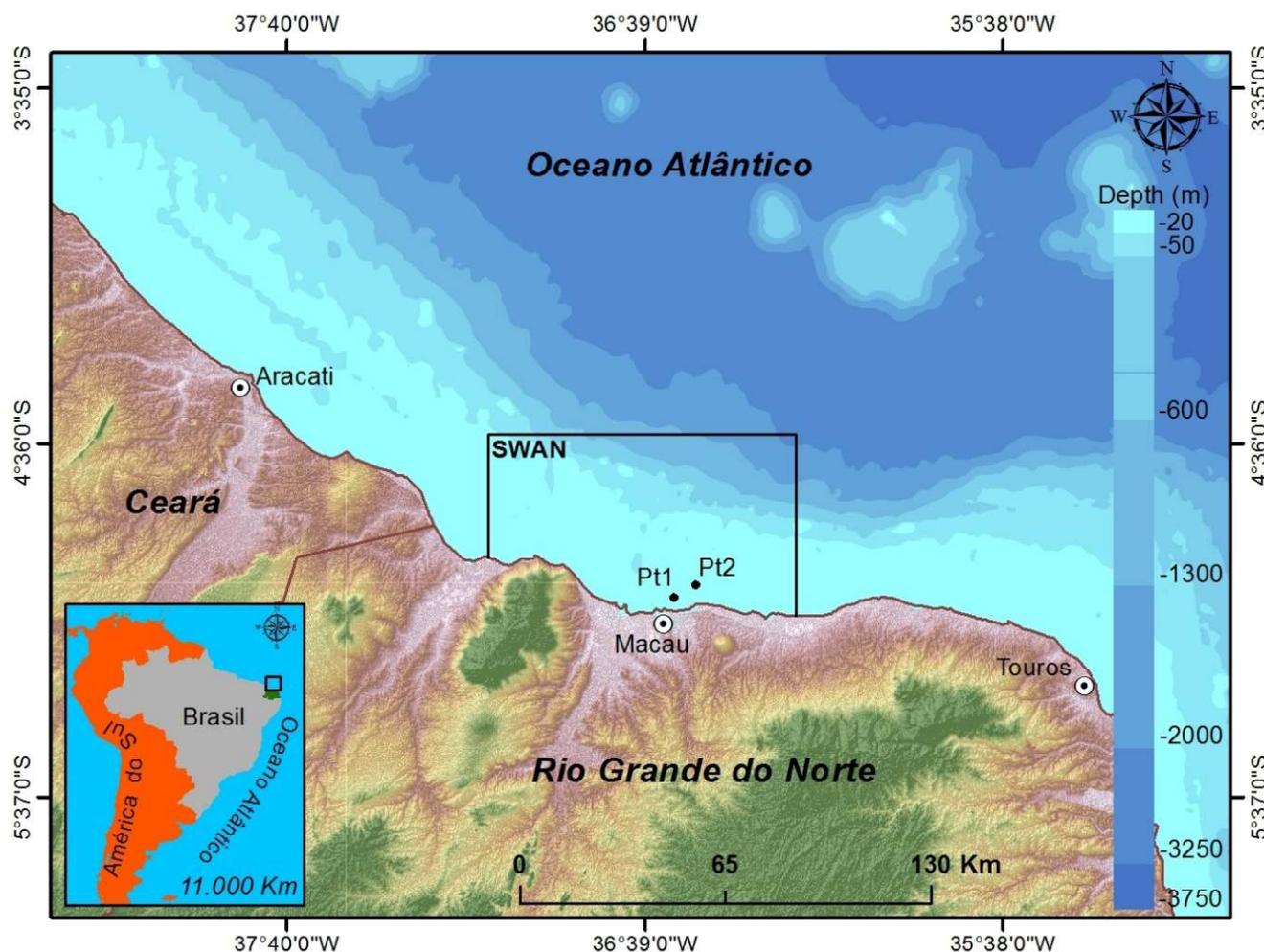


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, o ponto de localização do WAVEWATCH III.

Aspectos geomorfológicos

Vital *et al.* (2005) reconheceram e caracterizaram as diferentes feições submersas de grande escala na plataforma continental do RN: fundo oceânico homogêneo e plano em águas rasas (abaixo de 10 m).

Röber (2001) registrou campos de dunas longitudinais subaquosas muito grandes encontradas entre 1,5 e 12 km costa afora, em geral assimétricas e apresentando entre 2 a 3,5 m de altura. Próximo à costa as dunas subaquosas longitudinais são aproximadamente lineares e estão orientadas na direção ENE-WSW, com cerca

de 12 km de comprimento. Porém, no sentido costa afora as dunas subaquosas apresentam extensão de mais de 20 km, estando separadas uma das outras por uma distância mais ou menos uniforme de 1 a 1,5 km e com 300 a 500 m de largura (RÖBER, 2001). As dunas subaquosas longitudinais podem ser subdivididas em bem visíveis a leste (em frente à Guamaré-Galinhos) e menos visíveis a oeste (direção à Macau); campos de dunas transversais muito grandes, as quais apresentam orientação NE-SW, extensão da ordem de 5 a 10 km, 300 a 400 m de largura e altura média de 3 m, são observadas a profundidades maiores que 10m; recifes bordejando as dunas transversais e separa-as de área mais profundas; vale inciso em frente a Macau, marcado por uma margem leste relativamente íngreme e pronunciada, e uma margem oeste com um declive suave, sendo a profundidade do canal principal de 18 m em relação ao fundo (SCHWARZER *et al.*, 2006).

Aspectos Oceanográficos e Meteorológicos

A plataforma continental norte riograndense está sujeita a ação da Corrente Sul Equatorial, combinada a ventos alísios fortes e variação de maré moderada a alta e/ou ondas (VITAL *et al.*, 2010). Embora estudos hidrodinâmicos sistemáticos sejam ausentes na plataforma continental norte, dados recentes registram localmente correntes de marés de altas velocidades, da ordem de 100 cm/s (VITAL *et al.*, 2005).

As principais correntes marítimas que margeiam a costa do RN são a Corrente do Brasil, que acompanha o litoral do RN ao Rio Grande do Sul, direção norte-sul, com temperatura média de 22° C e a Corrente Equatorial que vai do Rio Grande do Norte ao Amapá, com direção leste-oeste e temperatura média de 25° C. Estas correntes influenciam o clima em todo o litoral brasileiro (ROSSO, 2007).

A maré local é semidiurna, onde o nível médio (Z_0) estabelecido é 139 cm acima do RN (Nível de Redução) com médias de preamares de sizígia de 234 cm acima do RN, média de preamares de quadratura de 221 cm, média de baixa-mares de sizígia de 43 cm abaixo do RN e média das baixa-mares de quadratura de 56 cm (MATOS *et al.*, 2011).

Lima *et al.* (2012) mediram ondas de NE com período médio (T_{med}) de 6,05 s e altura significativa (HS) de 0,89 m, podendo chegar a períodos de 8 s e 2,2 m de altura. Esses autores ainda observaram que as

correntes de maré vazante são predominantemente para o de SW com velocidade média de 0,10 m/s, enquanto as correntes de maré enchente (mais intensas) são de NW a NE, com velocidade média de 0,12 m/s. As maiores velocidades de correntes (até 0,37 m/s) ocorrem durante as marés de sizígia durante os meses que os ventos sopram de NE, certamente influenciando nas maiores intensidades das marés enchente, que atingem de fevereiro a abril e de setembro a outubro as maiores amplitudes médias (0,94 m).

As ondas de maiores períodos propagam-se entre o intervalo de 05h00 e 08h00, com médias máximas de 6,67 s e 7,84 s, sendo as mais frequentes as ondas com períodos médios entre 4,3 s e 5,5 s na região mais próxima à costa. Na região mais distante da costa, os maiores períodos médios variam em horários de 05h00 e 10h00, com valores entre 6,9 s e 8,1s, sendo os períodos médios mais frequentes entre 3,3 s e 4,5 s. Tais valores indicam que as ondas são predominantemente geradas por ventos locais (MATOS *et al.*, 2011).

Os valores médios direcionais indicaram que as ondas mais frequentes são as de direções entre 179° a 269°, predominantemente de SW, seguidas das direções NW, com valores entre 269° a 359° no ponto mais próximo à costa e, no mais distante, 78% das direções médias variaram entre 0,15° a 90°, caracterizando as ondas neste ponto predominantemente de NE (MATOS *et al.*, 2011).

Associados aos processos oceanográficos, o clima na área de estudo apresenta acentuada variabilidade interanual, particularmente na precipitação, com alguns anos extremamente secos e outros extremamente chuvosos. Está sob a influência dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Atlântico Norte (ASAN) e do cavado equatorial. Os ventos de baixos níveis associados aos sistemas de pressão são os Alísios de sudeste, na borda norte do ASAS, e de nordeste, na borda sul do ASAN, os quais apresentam velocidades médias de 6,7 cm/s, com amplitude entre 2,6 - 13,4 cm/s. No eixo do cavado equatorial está a ZCIT, cujas variações em posição e intensidade estão diretamente relacionadas às alterações nas posições e intensidades do ASAS e do ASAN. De modo que a ZCIT no Atlântico está na região de convergência dos alísios de nordeste e sudeste, apresentando movimentos ascendentes, baixas pressões, nebulosidade e chuvas abundantes, e segue as regiões onde a temperatura da superfície do mar (TSM) é mais elevada. Esses são os principais fatores

dinâmicos que determinam a precipitação sazonal da região (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Materiais e Métodos

O modelo SWAN

O SWAN, baseado na equação de balanço espectral de variância (BOOIJ *et al.*, 1999), surge da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direcional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras.

O modelo SWAN calcula o desenvolvimento de um estado de mar por meio da densidade de ação $N(\sigma, \theta)$, em vez de por meio da variação de densidade $E(\sigma, \theta)$, com a presença de correntes a densidade de ação é conservada enquanto a densidade de variação não é. A densidade de ação é igual à densidade de variância dividida pela frequência relativa ($N = E/\sigma$) (BOOIJ *et al.*, 1999). As variáveis independentes são as frequências relativas e a direção da onda. No modelo de onda SWAN, a evolução do espectro da onda é descrita por uma formulação Euleriana do balanço de densidade de energia da onda, por meio do qual, o balanço de energia da onda é considerado em células pré-definidas em um sistema de grade.

A aplicação deste princípio conduz à seguinte expressão (Equação 1), válida para todos os componentes de frequência na direção do espectro, que é conhecida como a equação de equilíbrio de energia, para águas profundas e na ausência de correntes.

$$\frac{\partial}{\partial t} E + \frac{\partial}{\partial x} (c_x E) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y E) = S(\sigma, \theta; x, y, t)$$

(Equação 1)

onde c_x e c_y são x , y componentes de um grupo de velocidade corrigido para a propagação de uma corrente com velocidade e $S(\sigma, \theta; x, y, t)$ é o termo origem que representa todos os efeitos de geração e dissipação (BOOIJ *et al.*, 1999; WESTHUYSEN *et al.*, 2007).

Se a equação do balanço de energia é aplicada a regiões costeiras rasas e na presença de correntes, ela é convertida para a equação de equilíbrio de ação

espectral para águas rasas da seguinte forma, conforme a Equação 2.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

(Equação 2)

O primeiro termo, do lado esquerdo da equação, representa a taxa de variação da ação no tempo e o segundo e terceiro termos representam a propagação de ação no espaço geográfico (x, y). O quarto e quinto termos representam o desvio de frequência e refração induzida pela profundidade e correntes, respectivamente. O termo fonte $S(\sigma, \theta)$, engloba todas as fontes e sumidouros associados aos fenômenos físicos que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda e pode ser decomposto (Equação 3) na geração de energia devido ao vento $S_{in}(\sigma, \theta)$ nas interações não lineares $S_{nl}(\sigma, \theta)$ e na dissipação da energia $S_{diss}(\sigma, \theta)$.

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta)$$

(Equação 3)

O termo $S_{diss}(\sigma, \theta)$ descreve ainda três fenômenos: o atrito do fundo $S_{diss,b}(\sigma, \theta)$, a rebentação induzida pela diminuição da profundidade $S_{diss,br}(\sigma, \theta)$, e a rebentação parcial $S_{diss,w}(\sigma, \theta)$ (WAMDI GROUP, 1988).

Detalhes desses processos podem ser encontrados no manual do SWAN (SWAN TEAM, 2012).

No presente estudo, o modelo SWAN é aplicado no modo estacionário para uma área de grandes dimensões geográficas, onde a escala de tempo de propagação da onda é maior do que a escala de tempo das alterações no vento forçado devido à dimensão da área de interesse.

Configuração do modelo SWAN

A partir das condições de fronteira (batimetria, agitação ao largo, campos de ventos e maré), foram realizadas a construção e manipulação dos arquivos para o SWAN, interface da ferramenta SOPRO (PINHEIRO *et al.*, 2005; FORTES *et al.*, 2007), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.

As simulações do modelo SWAN foram realizadas na versão 40.72 AB, no modo estacionário de terceira geração para cada um dos processos, e nas formulações descritas. Ambos os crescimento linear (KOMEN *et*

al., 1984) e exponencial de entrada do vento foram incluídos no modelo. A dissipação devido à rebentação induzida pelo fundo é tratada por Battjes e Janssen (1978) com a formulação espectral com $\alpha = 1$, o atrito de fundo é modelado usando a formulação JONSWAP (HASSELMANN *et al.*, 1973) com coeficiente de atrito $C = 0.015\text{m}^2\text{s}^{-3}$ em condições *wind sea*, e Komen *et al.* (1984) para a formulação *Whitecapping* ou excesso de declividade é aplicado $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$, e um coeficiente de rebentação constante igual a $0.65 \text{m}^2\text{s}^{-3}$.

As interações entre tria de ondas e interações onda-onda quádrupla foi usado às definições padrões de LTA – *Lumped Triad Approximation*, (ELDEBERKY, 1996) e DIA – *Discrete Interaction Approximation*, (HASSELMANN *et al.*, 1985). O uso destas configurações padrões em regime estacionário resulta, principalmente, em simulação mais econômica em termos de tempo, considerando que o processamento foi realizado continuamente ao longo de todos os meses.

As condições de agitação ao largo do modelo de 3ª geração WAVEWATCHIII, da bóia localizada na costa nordeste do Brasil (coordenadas: 787460,84 E/9666781,81 S) foram usadas para forçar o modelo. Estas estimativas contêm os seguintes parâmetros de onda seguintes: HS (onda significativa), T_p (período médio) e DIR (direção média para a frequência de pico), obtidas a cada 6 horas, para os meses de novembro e dezembro de 2010; janeiro a maio – outubro a dezembro de 2011, e, todos os meses de 2012.

A partir destes valores integrais, HS e T_p definiu-se um espectro JONSWAP com $\gamma = 3.3$ para representar a dependência de frequência. O espectro direcional foi seccionado em 23 intervalos de baixa frequência, variando entre 0,04 Hz e 1,0 Hz, com distribuição logarítmica. A discretização em direção abrange 360° , dividida em 90 intervalos.

Batimetria

A propagação das ondas em áreas costeiras é influenciada pela profundidade e formas de fundo e para obter a representação real desses efeitos é necessário aumentar a resolução espacial em direção à costa (PEREIRA, 2008). Assim, as simulações do SWAN são realizadas utilizando um esquema de malhas, como está representado na Figura 2, onde o domínio do cálculo abrange três malhas regulares com diferentes dimensões e resoluções (Figura 2A, B e C). A batimetria utilizada foi a da carta náutica n. 720, fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN, 2012).

O modelo SWAN efetua os cálculos de cada domínio considerando a área total. O modelo inicia calculando os parâmetros correspondentes aos pontos da malha total, malha exterior, utilizando-os posteriormente como novas condições de fronteira para indução da malha intermediária. Após os cálculos da malha intermediária, os parâmetros gerados são transferidos para a fronteira da malha interior. Da mesma forma como ocorre com o processo de passagem descrito para as malhas externa e intermediária, o modelo SWAN é novamente rodado, para fornecer os parâmetros de agitação marítima junto à costa. Essa estruturação em malhas encaixadas fornece melhores resultados e reduz os erros que poderão resultar da inexistência de condições de fronteira nos limites laterais (este e oeste) do domínio exterior (PIRES SILVA *et al.*, 2000; TELES *et al.*, 2012; ÂNGELO, 2012). Para o espaço espectral foi definida a resolução direcional de $\Delta\theta = 4^\circ$ (valor aconselhado pelo manual do SWAN na presença de *swell*) cobrindo 360° em direção, e um intervalo de frequência de $\Delta f = 0.04 \text{ Hz}$. Assim, na Tabela 1, é apresentado um resumo das características das malhas utilizadas.

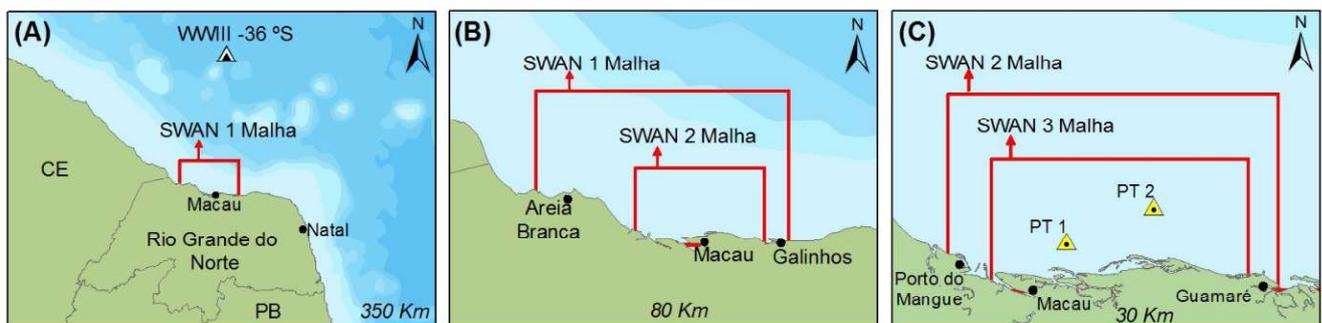


Figura 2 - Grelha computacional. A) Malha exterior com resolução de 1000 x 1000 m; B) Malha intermediária de resolução de 500 x 250 m; e C) Malha interior com resolução de 100 x 50 m.

Tabela 1: Características dos domínios computacionais definidos para as malhas.

Malhas	X inicial	Y inicial	Dimensão (km)	Resolução (x,y)
Malha 1	710000	9436000	100 x 62	(1000, 1000)
Malha 2	750000	9440000	50 x 20	(500, 250)
Malha 3	753000	9440000	30 x 10	(100, 50)

Caracterização do Campo de Ventos

Os campos de ventos introduzidos no domínio computacional são caracterizados pelos valores de velocidade (m/s) e direção do vento (θ) para o conjunto de meses considerados e foram obtidos na Estação Meteorológica de Macau, do Instituto Nacional de Meteorologia –INMET (2011). A estação meteorológica foi a escolhida por estar mais próxima à área de estudo. O fato da estação estar localizada em terra, gera a necessidade de corrigir a velocidade dos ventos medidos para uma correspondente sobre o mar. Para tal utilizou-se a curva de Resio e Vicent (1977), adaptado de Rosman (2006).

O posicionamento do anemômetro da estação meteorológica de Macau encontra-se a 4 m de altura, ou seja, abaixo do nível de referência de 10 metros. Necessitando de uma segunda correção junto a velocidade dos ventos medidos (ÂNGELO, 2012).

Após a correção, os valores de velocidade e direção dos ventos foram interpolados de hora a hora para

cada ciclo de seis horas, o que permitiu a introdução destes nos dados de agitação no modelo SWAN. Na Tabela 2 são apresentados os resultados das estatísticas descritivas do conjunto total dos dados válidos de ventos da Estação Meteorológica do INMET de Macau, inseridos na modelagem e aqueles corrigidos conforme proposição de CEM (2002).

Como se pode observar pelas estatísticas (Tabela 2), a velocidade máxima alcançou 11,84 m/s, a média das velocidades foi de 7,4 m/s, sendo o valor mínimo 1,71 m/s. Comparando os valores não transformados com os transformados, a variação máxima entre as velocidades foi de 2,04 m/s, resultando numa boa correlação entre os valores como indica o gráfico de dispersão (Figura 3), permitindo assim, uma maior aceitação dos valores para as condições ao largo.

Tabela 2: Estatística descritiva relacionando os ventos da base do INMET em relação os corrigidos.

	V_1* (m/s)	V_2* (m/s)	Dir (°)
Máximo	9.80	11.84	359
Média	4.83	7.40	107
Mínimo	0.30	1.71	1.00
Erro Padrão	0.04	0.05	0.92
Desvio Padrão	1.97	2.31	44.72

*V_1: dados originais do INMET; V_2: dados corrigidos.

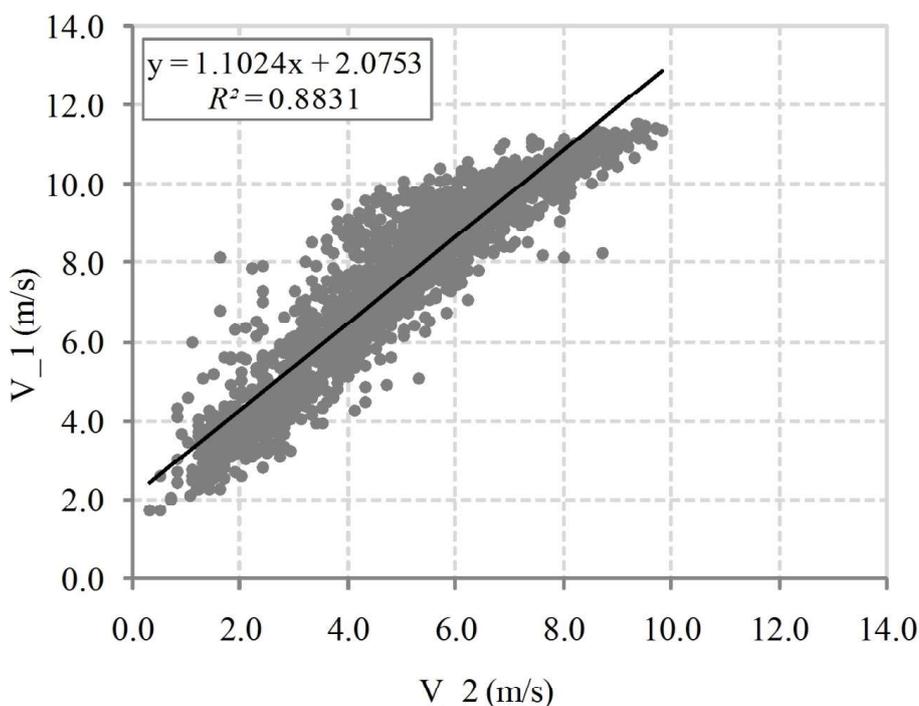


Figura 3 - Gráfico de dispersão das velocidades dos ventos da estação do INMET em relação os dados corrigidos.

Resultados e Discussões

Parâmetros estatísticos e medidas de erro

Para o conjunto dos dados resultantes das previsões do modelo global WAVEWATCH III, das previsões com o SWAN e das estações de medições dos PT_1 e PT_2 (ADCP) foram aplicados estatística descritiva para avaliação dos parâmetros: altura significativa, HS (m), período médio, Tmed (s), e direção média, DIR (°), de todo o conjunto dos dados válidos. Na Tabela 3 segue em detalhe a estatística descritiva, indicando o número de dados de amostragem, os valores máximo, mínimo, médio, o erro e desvio padrão para a quantidade das amostras das previsões e medições.

Para avaliação quantitativa do grau de precisão dos resultados do modelo, o parâmetro da Média do Erro Percentual Absoluto (MAPE), do valor erro médio quadrático (RMSE) e do índice de concordância ou reajuste, representado pela letra *d* foram empregados para a comparação dos valores previstos e medidos (WILMOTT, 1981). Os parâmetros estatísticos foram calculados conforme indicado abaixo.

Média do Erro Percentual Absoluto - MAPE (*Mean Absolute Percentual Error*)

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|(O_i - P_i)|}{O_i} \quad \text{(Equação 4)}$$

Erro Médio Quadrático – RMSE (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P)^2} \quad \text{(Equação 5)}$$

Índice de Concordância “*d*” (WILMOTT, 1981)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{(Equação 6)}$$

onde, *d* é o índice de concordância, *O_i* são os valores medidos, *P_i* são os valores dos modelos numéricos, \bar{o} é a medida do valor experimental e *n* é o número de observações. Este índice varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo do 1, menor será o erro atribuído.

Esta seção descreve o desempenho do modelo SWAN em comparação com o modelo de escala oceânica de 3ª geração e propagação de ondas WAVEWATCH III, para a bóia localizada no ponto, X=753257E/Y=9668067N. Os dados do WAVEWATCH III foram às condições de fronteira pelo modelo SWAN. A Tabela 4 mostra as medidas de erro.

Tabela 3: Estatística descritiva para o conjunto de dados obtidos pelo modelo global (WWIII), pelo modelo numérico (SWAN) e dos dados das estações de medições (ADCP).

Parâmetros	WWIII			SWAN			ADCP_PT 1			ADCP_PT 2		
	HS	Tm02	DIR	HS	Tm02	DIR	HS	Tm02	DIR	HS	Tm02	DIR
	(m)	(s)	(°)	(m)	(s)	(°)	(m)	(s)	(°)	(m)	(s)	(°)
Média	1.85	7.72	84.6	57.4	1.75	58.1	0.68	4.13	161	0.98	4.46	91.6
Máximo	3.18	13.65	360	2.30	7.55	360	2.59	10.3	359	2.04	12.9	359
Mínimo	0.97	5.66	0.31	0.16	1.85	0.22	0.11	1.69	0.17	0.21	2.5	50.3
Erro Padrão	0.01	0.02	1.22	0.01	0.01	0.84	0.01	0.03	3.01	0.01	0.01	1.67
Desvio Padrão	0.31	1.25	57.4	0.31	0.60	41.1	0.33	1.18	100	0.32	0.73	97.7

Tabela 4: Concordância dos dados (MAPE, RMSE e *d*) para o conjunto de dados obtidos pelo modelo numérico SWAN e modelo WAVEWATCH III, para os parâmetros: HS (m), Tm02 (s) e DIR (°).

Modelo SWAN – Modelo WWIII	HS (m)	Tm02(s)	DIR (°)
MAPE	57.12	69.69	66.40
RMSE	1.15	5.47	64.87
<i>d</i>	0.29	0.27	0.56

Medições locais das ondas

Para a caracterização do regime de ondas do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, foram utilizados parâmetros de ondas medidos com equipamentos ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), posicionados em dois pontos de monitoramento, PT_1 (Lat: -5°2'37.76"S, Long: -36°35'38.64"W) e PT_2 (Lat: -4°59'50.49"S, Long: -36°28'37.57"W), em profundidades de 3 e 6 m, respectivamente (Figura 1). No total foram efetuadas oito campanhas entre os anos de 2010 a 2012, na Tabela 5 apresenta-se a síntese das estatísticas descritiva para todo o conjunto de dados das estações de medições que seriram para avaliar a modelagem com o modelo SWAN.

Em condições normais, os parâmetros de ondas, como a altura significativa (HS), o período médio de onda (Tmed) e a direção média de onda (DIR) são produzidos

a cada 30 minutos, com base em 10 min de duração de aquisição. Os dados adquiridos sob condições de agitação nas estações PT_1 e PT_2 foram registrados em: novembro a dezembro de 2010; janeiro a fevereiro de 2011 e maio, abril e agosto de 2012.

Dos resultados obtidos (Figura 4), observaram-se estados de forte agitação associados a períodos de ondas elevados: os valores de HS atingiram 2 m nas medições dos dois pontos (apenas em agosto de 2012). A média dos valores de Tmed, com 4,13 s e 4,46 s, indica ondas de períodos curtos.

No campo das direções, observa-se uma oscilação muito forte nas medições do PT_1, enquanto nas medições do PT_2, nota-se uma incidência mais predominante de nordeste, exceto para o período do mês de agosto, indicando frentes de ondas de leste e sudeste.

Tabela 5: Estatística descritiva para os parâmetros descritos da agitação marítima das estações de medições relacionadas ao PT_1 e PT_2.

Parâmetros	PT_1			PT_2		
	HS (m)	Tmed (s)	DIR (°)	HS (m)	Tmed (s)	DIR (°)
Média	0.69	4.13	161	0.98	4.46	91
Mínimo	0.11	1.69	0.17	0.21	2.55	0.31
Máximo	2.49	10.34	359	2.04	12.91	359
Classe de Freq.	0.6-1.0	2-4	60-180	0.8-1.0	4-5	40-80

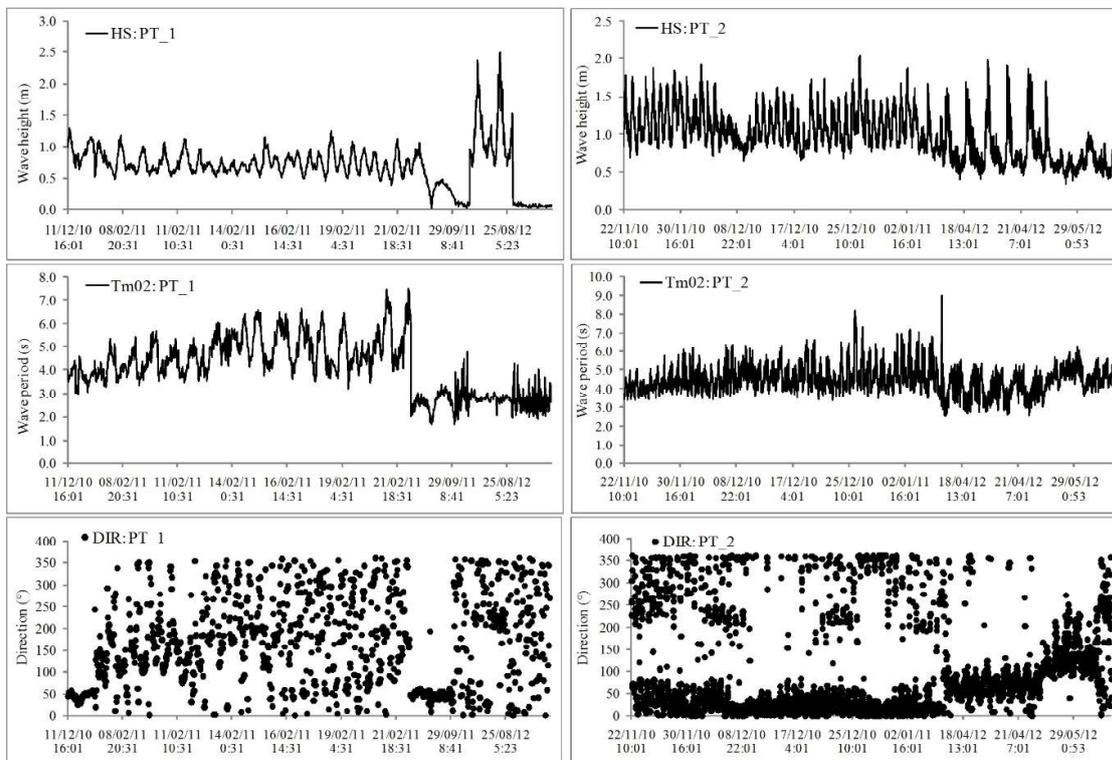


Figura 4 - Regime de ondas do PT_1 e PT_2: frequência de ocorrência das alturas significativas das ondas (HS); frequência de ocorrência dos períodos médios (Tmed); distribuição das direções médias da onda (DIR).

Validações do modelo numérico (SWAN) baseado nas medições *in situ*

Usando das formulações padrões do SWAN, com corridas em modo estacionário, são apresentados os resultados completos da modelagem do clima de ondas com o modelo SWAN para frequência de 6 horas diárias entre anos de 2010 (meses de novembro e dezembro), 2011 (janeiro a maio, e depois de outubro a dezembro), e, 2012 (janeiro a dezembro).

Neste primeiro caso são apresentados os resultados da modelagem do SWAN comparados com as medições da estação PT_1 e PT_2 para as variações temporais dos parâmetros: altura significativa, HS e período médio Tm02.

Em geral, observa-se alternância nos valores em função da estação estar localizada em maior profundidade (6 metros), e por conta da sobreposição em alguns momentos de ondulação mais expressiva. Esta variação foi tal fato já identificado por Ângelo (2012). Ao se

analisar os episódios de picos das alturas significativas ao largo ficam ainda mais evidente tal condição.

Em termos de HS (Figura 5), há uma ligeira superestimação dos resultados do ADCP quando comparados aos resultados do SWAN. Na fase inicial, há sempre uma pequena diferença entre os valores do SWAN e do ADCP, com os valores de HS abaixo de 1 m. Na sequência tem-se um crescimento de das ondas, sendo bem reproduzido pelo SWAN, o que se deve a intensificação dos ventos na região, e, em alguns momentos, quando ocorre a própria sobreposição de ondas mais altas, nos episódios de picos.

Para os resultados do período médio (Figura 6), verifica-se uma superestimação dos valores resultante do SWAN em relação aos dados dos ADCP's.

As direções médias DIR (Figura 7), observa-se um andamento muito distinto entre os resultados do SWAN com as medições do ADCP. O ajustamento foi mal sucedido ao longo de todas as campanhas de campo.

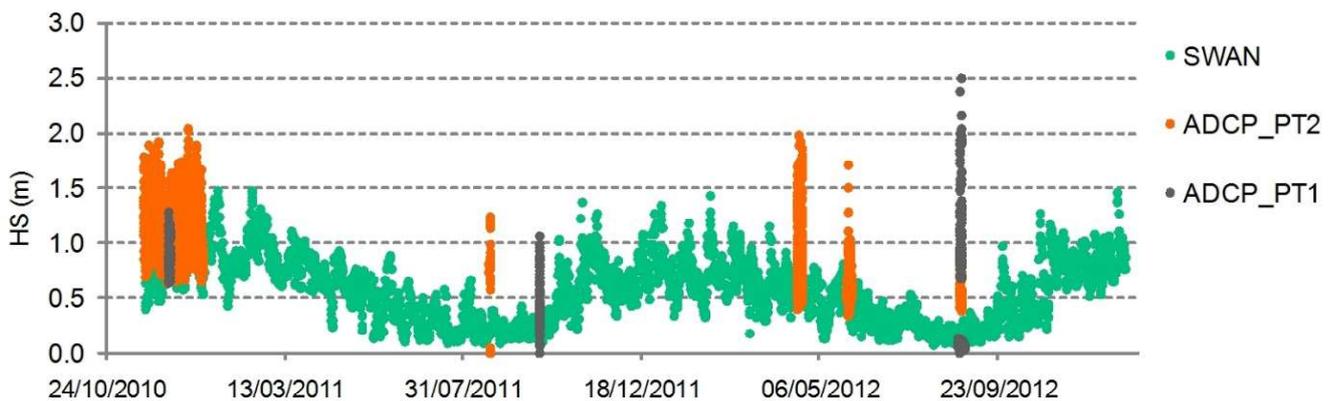


Figura 5 - Resultado das alturas significativas (HS) para modelagem com SWAN e em relação às medições da estação do PT_1 e PT_2, para os anos de 2010, 2011 e 2012.

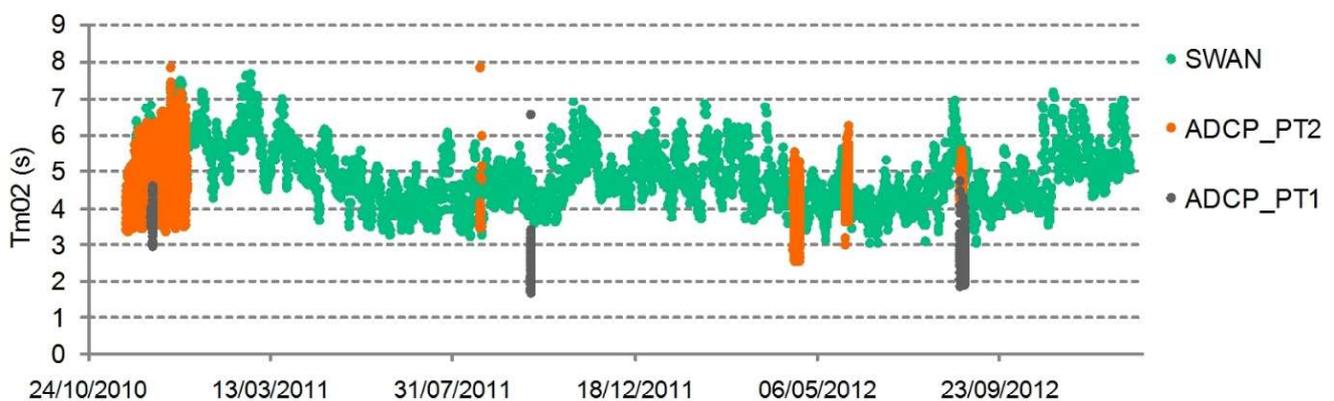


Figura 6 - Resultado dos períodos médios (Tm02) para modelagem com SWAN e em relação às medições da estação do PT_1 e PT_2, para os anos de 2010, 2011 e 2012.

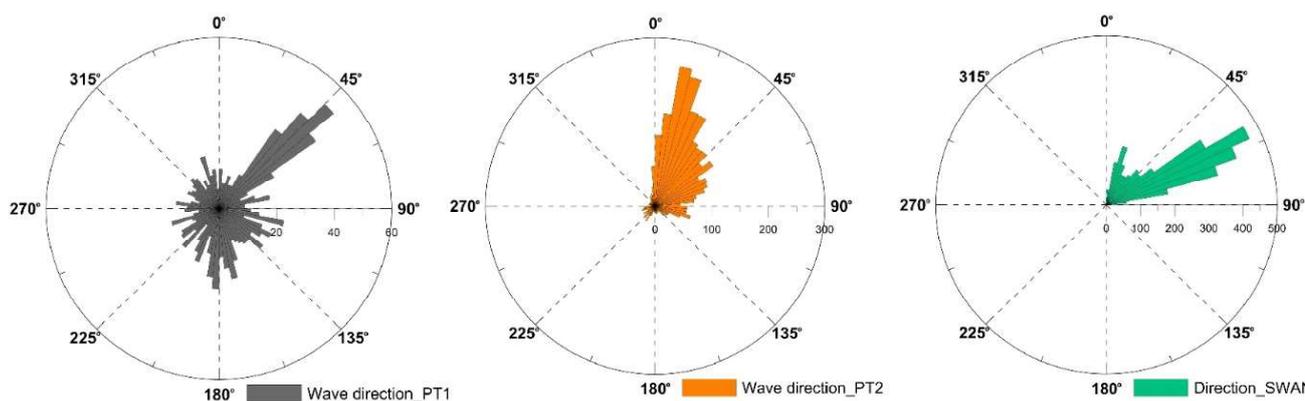


Figura 7 – Resultado das direções médias (DIR) para modelagem com SWAN e em relação às medições da estação do PT_1 e PT_2, para os anos de 2010, 2011 e 2012.

A comparação do conjunto total das alturas significativas de ondas, HS (Figura 8), medidos e simulados revela que o $RMSE = 0,41$ m; o $d = 0,54$ m; e o $R = 0,16$ m, para HS são razoavelmente reproduzidos pelo modelo SWAN para todos os períodos de medições (Tabela 6), com os resultados das análises estatísticas para as condições do PT_1. Nas condições do PT_2 (Figura 9), as análises estatísticas para as alturas significativas (HS) também revelaram parâmetros semelhantes em termos dos dados simulados em relação aos medidos, conforme Figura 9, onde o valor do RMSE foi de 0,35, o valor de $d = 0,59$ superior aos dados do PT_1 e o valor $R = 0,15$, inferior ao anterior (Tabela 7).

Nas análises estatísticas para as condições dos períodos médios, Tm01, o RMSE, o d e R para as características em relação ao PT_1, mostraram-se mais ajustados com 0,96 s; 0,58 s e 0,64 s, do que as estatísticas para as condições do PT_2, que se revelaram menos ajustadas e indicando uma subestimação, como se pode avaliar nos valores do $RMSE = 0,35$, o $d = 0,59$, e o $R = 0,15$. Acontece que, como observado para as comparações com o PT_1, tal subestimação generalizada, decorre, sobretudo do uso da formulação Kolmen para toda a modelagem, sendo que não foram usados os períodos médios Tm01, apesar de o SWAN oferecer este parâmetro, não sendo o mesmo para o ADCP, por isso não puderam ser usados nos cálculos e nas comparações.

Nas análises estatísticas das direções médias, em ambos os casos, foi muito baixo o índice de concordância, d e o R (Tabela 6 e 7), mantendo-se indiferentes às variações impostas pelos modelos de previsões.

Desta forma, as configurações atuais definidas no modelo SWAN para simular a propagação das ondas

neste litoral alcançam de foram satisfatória tanto as altas, quanto as baixas variações temporais de alturas significativas e períodos médios. Contudo, apresenta estimativas menos precisas para os valores máximos de ambos os parâmetros. Essa subestimação pode estar relacionada com as resoluções espaciais e temporais, mais, sobretudo, os baixos valores de d e R , podem estar associados principalmente, aos campos de baixas velocidades dos ventos, pois foram medidos em terra e transportados para referência padrão correspondentes em mar, com distribuição temporal e não espacial (ÂNGELO, 2012; MATOS *et al.*, 2013).

Além destas características, a região adjacente da área do domínio do cálculo é afetada pela circulação atmosférica e oceânica como mecanismos controladores dos sistemas oscilatórios neste litoral ao longo das estações do ano, resultando, sobretudo, nos padrões direcionais dispersos do regime de ondas locais.

Os parâmetros estatísticos revelaram comparações semelhantes a outros trabalhos existentes com a aplicação do modelo SWAN, tais como os resultados de Lin *et al.* (2002) e Moeini e Etemad-Shahidi (2009), ambos utilizaram o modelo SWAN para simulações de ondas na Baía de Chesapeake e no Lago Erie (Estados Unidos), respectivamente nos dois casos as alturas significativas foram sempre melhor ajustadas ou reproduzidas.

Analisando os resultados obtidos por Akpınar *et al.* (2012), que aplicou o SWAN para simular as ondas do Mar Negro, novamente percebeu-se que as alturas significativas obtiveram melhores resultados e, em todos os casos, se verificou uma ligeira subestimação na previsão dos parâmetros de ondas para os períodos médios (Tmed, s) simulados.

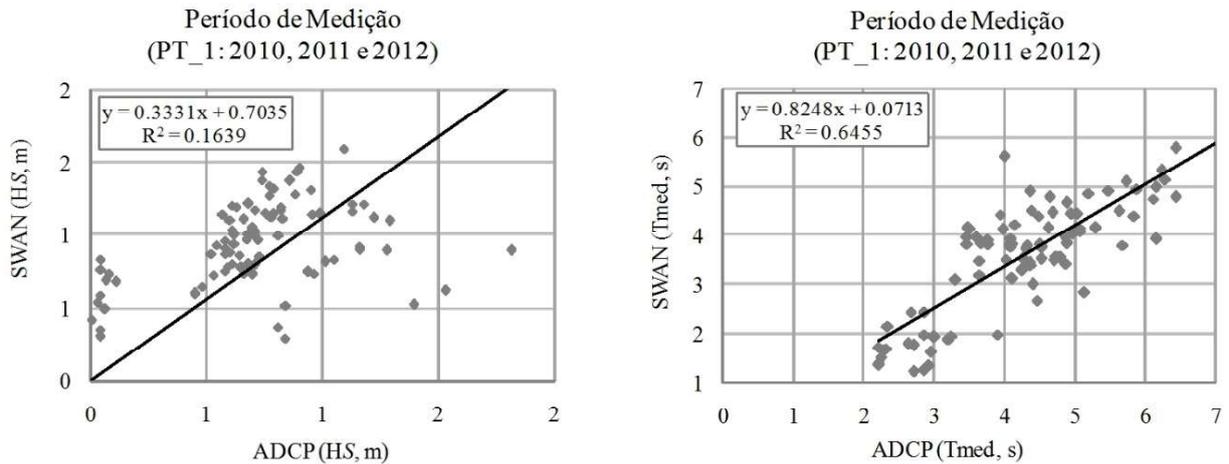


Figura 8 – Resultado da correlação dos dados simulados e medidos para HS e Tmed, PT_1.

Tabela 6: Indicadores estatísticos: MAPE, RMSE e *d* para o conjunto de dados de SWAN e dos dados válidos do ADCP do PT_1, para os parâmetros: HS (m), Tmed (s) e DIR (°).

Estatísticas dos Parâmetros	SWAN – ADCP/PT_1		
	HS (m)	Tmed (s)	DIR (°)
MAPE	39,52	19,95	283,20
RMSE	0,41	0,96	150,34
<i>d</i>	0,54	0,58	0,36

Tabela 7: Indicadores estatísticos: MAPE, RMSE e *d* para o conjunto de dados de SWAN e dos dados válidos do ADCP do PT_2, para os parâmetros: HS (m), Tmed (s) e DIR (°).

Estatísticas dos Parâmetros	SWAN – ADCP/PT_2		
	HS (m)	Tmed (s)	DIR (°)
MAPE	25,56	27,95	121,12
RMSE	0,35	1,57	110,49
<i>d</i>	0,59	0,40	0,42

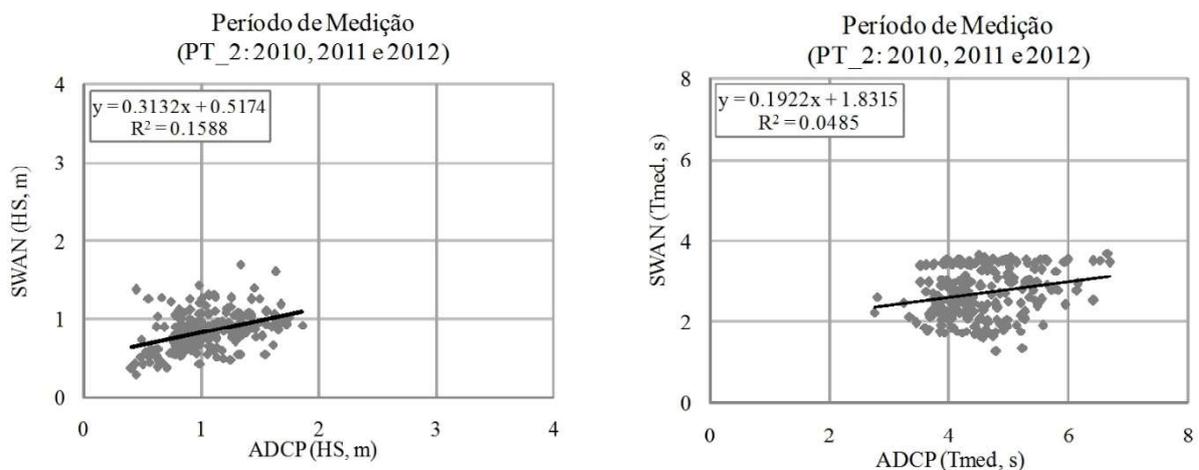


Figura 9 – Resultado da correlação dos dados simulados e medidos para HS e Tmed, PT_2.

Distribuição espacial da onda na plataforma continental

As análises da distribuição espacial da altura significativa e das direções permitiram observar o efeito da evolução na plataforma continental da área estudada. Foram observados dois estados de mar: o primeiro janeiro de 2011 (Figura 10), que coincide com a estação seca (verão); e o segundo em junho de 2012 (Figura 11), durante o período chuvoso (inverno) no hemisfério sul.

Verificou-se alterações de valores e estados de mar bastante significativos nos dois momentos, sobretudo, em termos de incidência direcional de acordo com a variabilidade sazonal.

No primeiro caso, mês de janeiro (período tipicamente seco), constatou-se uma agitação marítima incidindo com maior intensidade de norte (N), mais proeminente ao largo, com alturas de ondas até 2,15 m. Na plataforma rasa, com profundidades médias em torno de 10 m, a propagação da onda tende a uma diminuição com alturas significativas reduzidas, abaixo de 0,8 m, e direções no sentido E, principalmente nas proximidades do estuário de Diogo Lopes onde a agitação é muito baixa. Próxima

à costa, verificou-se uma baixa agitação marítima, com valores de HS inferiores a 0,5 m. Os períodos médios de maior intensidade com 7,5 s ocorrem nas zonas com alturas significativas acima de 1.8 m. Nas áreas mais próximas à costa, detectou-se períodos médios mais frequentes com valores de 2,5 s e 3,5 s.

Nas análises de agitação marítima correspondente ao período das chuvas (Figura 13), observou-se um estado de mar alterado, com ondas incidentes de E e ESE, devido a maior influência dos ventos alísios de sudeste neste período do ano na região (CARVALHO, 2010). Na medida em que as ondas alcançam a plataforma continental interna, em profundidades inferiores a 25 m, predominam alturas abaixo de 1.0 m, períodos médios das ondas muito curtos, com 3 s de média. Na região mais rasa, próxima da linha de praia a propagação da onda se torna ainda mais reduzida com agitação quase nula.

Conclusões

O modelo SWAN foi implementado para o litoral setentrional do Rio Grande do Norte com o intuito de validar o modelo numérico de ondas para esta região.

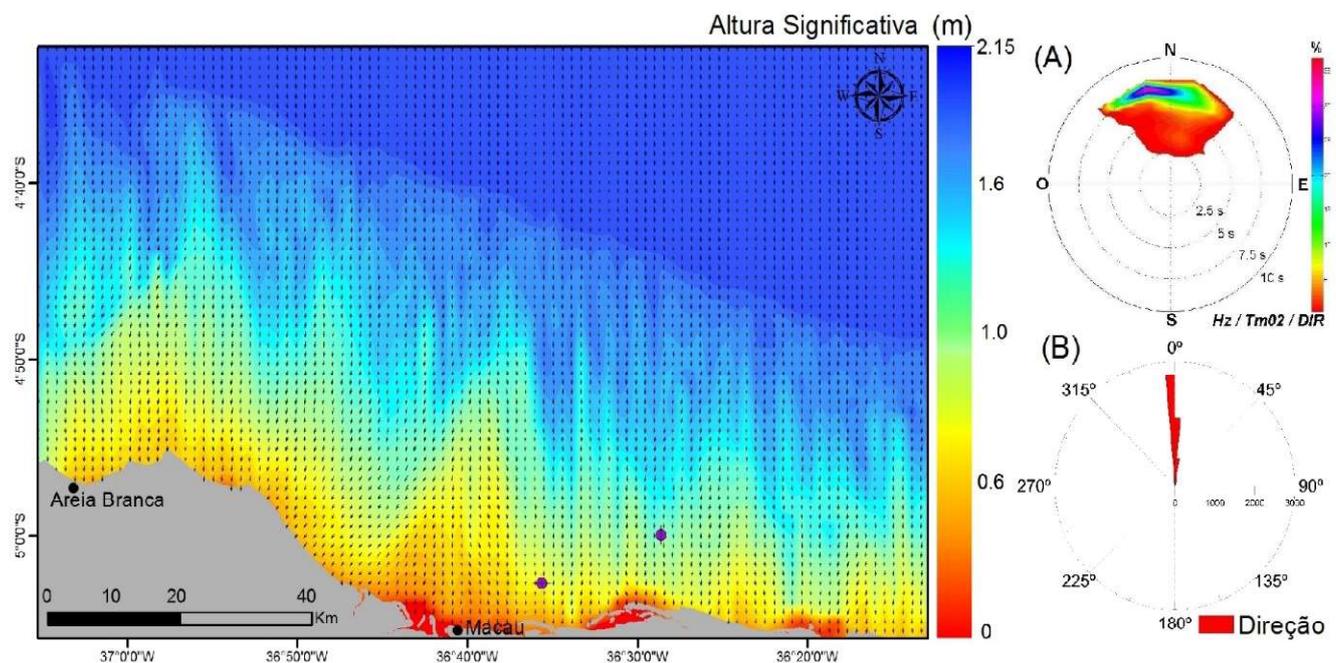


Figura 10 - Resultados das simulações do SWAN no domínio computacional para o dia 05 de dezembro de 2011, às 12:00h para HS com gráficos dos período médio e as direções médias .

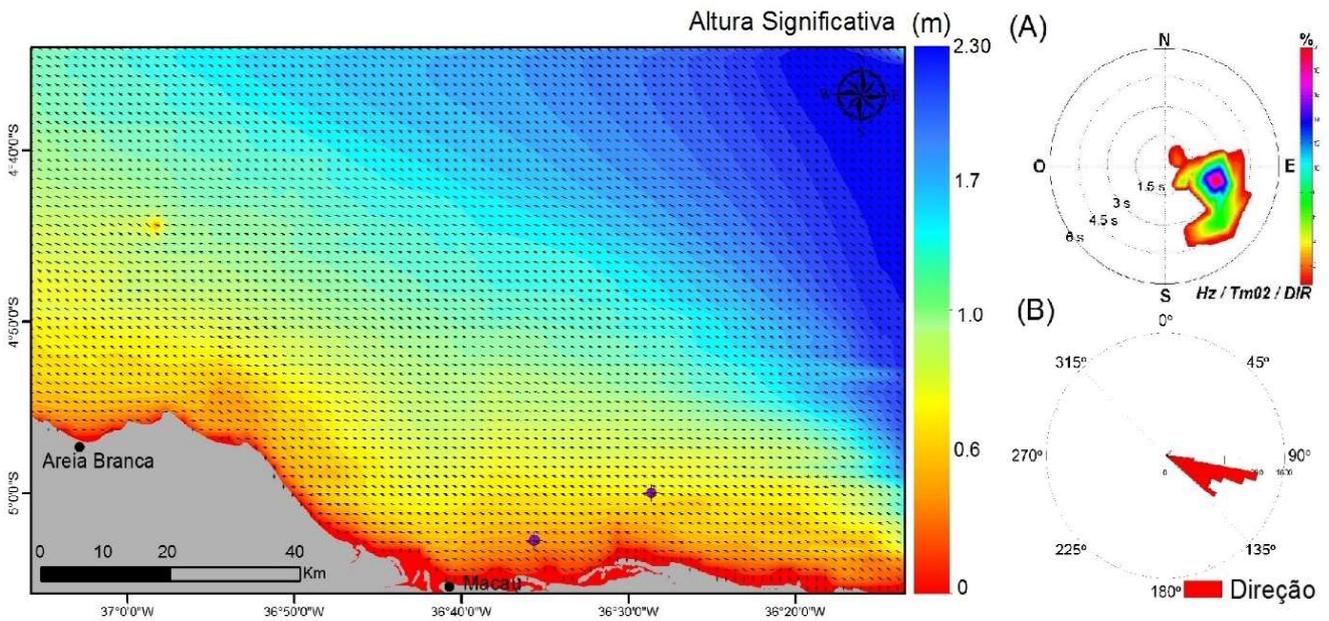


Figura 11 - Resultados das simulações do SWAN no domínio computacional para o dia 05 de junho de 2012, às 12:00h para HS e a direita o período médio e as direções médias.

Em geral, foi observada a dimensão e a frequência muito superior de dados obtidos pelas simulações com o SWAN em relação a um número reduzido de medições feitas para duas estações de medidas *in situ* (PT_1 e PT_2). Ainda sim, foi importante a comparação para esses curtos períodos de medições com o intuito de avaliar e calibrar a modelagem para este litoral. Com as configurações padrões do SWAN e em regime estacionário foi possível obter resultados satisfatórios, baseados em estatísticas aceitáveis, de forma a identificar as diferenças de frequência dos dados entre os registros simulados e os medidos em campo.

Baseado nas configurações padrões do modelo SWAN versão 40.72AB, em regime estacionário, usando as formulações de Komen *et al.* (1984), os resultados obtidos se mostraram satisfatórios nas simulações de propagações das ondas incidentes e na condução do tempo de corridas computacional.

Os resultados do SWAN mostram tendência semelhante com as medidas nas variações temporais de altura significativa (HS, m) e período médio de onda (Tmed, s). Entretanto, os resultados paramétricos das estatísticas se mostraram baixos para as estimativas dos valores máximos, na maioria dos períodos analisados em comparação com os dados do PT_1 e PT_2, com alternância das alturas significativas de ondas.

Em termos de períodos médios (Tmed, s), foi

observado uma subestimação em relação às medições, tais valores baixos podem ser explicados na influência do valor alto do coeficiente de atrito de fundo (c). uma vez que a diminuição do valor de c leva a uma menor subestimação de Tmed. Essa mesma condição foi observada por Ângelo (2012).

A dependência dos dados de ventos no forçamento do modelo SWAN se tornou o ponto de dificuldade na condução desta pesquisa. Primeiro, por serem ventos de terra e não de mar, que poderiam oferecer melhores resultados em *wind sea*, o que permite explicar também o motivo dos baixos índices de concordância, d , RMSE, e R^2 entre os valores simulados contra os medidos. Segundo, além da não disponibilidade de dados de ventos de mar, a inoperância da estação meteorológica de Macau durante vários meses dificultou a aquisição destas informações e interferiu na análise para todos os meses. Entretanto, ainda sim, é de se considerar a gama de informações e medições.

Para as análises das direções médias, verificaram-se padrões de direções de ondas ao longo do ano, sobretudo para as análises do PT_2, quando da entrada da sobreposição de ondulação mais expressiva. Assim, as estatísticas e a concordância dos dados (d) para este ponto, foram mais satisfatórias que em relação às análises do PT_1 no conjunto geral dos dados. Verificou-se ainda que para este litoral, os ventos *onshore* exercem

importante papel na evolução das ondas para a linha de costa, ainda que predominantes de sudeste do ano. Apesar disso, as maiores magnitudes foram às ondas de orientação norte e nordeste.

Finalmente, as melhorias ocorridas na estruturação da interface SOPRO mostraram-se mais eficiente dinamizando os arquivos de entrada e assim, o tempo de viagem computacional.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelos projetos de pesquisa MOLECO e CRONALOG da Rede Monitoramento: Rede05-PETROMAR/CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq e pelo Projeto UNIVERSAL/CNPq-481386/2012-2. O autor agradece ainda à CAPES pela concessão da bolsa de Pesquisa para a realização dos trabalhos.

Referências Bibliográficas

AKPINAR, A.; VAN VLEDDER, G. P.; KÖMÜRÇÜ, M. I.; ÖZGER, M. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. **Continental Shelf Research**, v. 50, n. 19, p. 80 - 99, 2012.

ÂNGELO, J. S. F. C. **Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente ao estuário de Diogo Lopes, Brasil**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico de Lisboa - IST, Portugal, 2012.

BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 16, 1978, Hamburg. *Proceedings...* Hamburg: ASCE, 1978, p. 569-587.

BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. A third-generation wave model for coastal regions, part I, model description and validation. **Journal Geophysical Research**, v. 104, n. 4, p. 7649 - 7666, 1999.

CARVALHO, J. T. **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânica ao largo do litoral Brasileiro**. 2010. 169 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2009.

CEM. Coastal Engineering Management. **Meteorology and Wave Climate**. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, 77 p., 2002.

CUCHIARA, D.; FERNANDES, E. H.; STRAUCH, J. C.; CALLIARI, L. J. Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul. In: SEMINARIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2, 2006, Rio Grande. *Anais...* Rio Grande: UFRG, 2006, 15 p.

DALRYMPLE, R. A.; KIRBY, J. T. REF/DIF 1 version 2.3 Documentation manual. Combined refraction / diffraction model, **CACR Report nº 91-2**, University of Delaware. 1991.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Cartas náuticas. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/>>. Acesso em: 01/15/2012.

ELDEBERKY, Y. **Nonlinear transformation of wave spectra in the neashore zone**. 1996. Ph.D. (Thesis Civil Engineering) - The Delft University of Technology, Netherlands, 1996.

FORTES, C. J. E. M.; PINHEIRO, L.; PALHA, A. O pacote de dados SOPRO: evoluções recentes. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA, 1, 2007, Lisboa. *Resumos...* Lisboa: PIANC, 2007.

FORTES, C. J. E. M.; MATOS, M. F. A.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E. Caracterização da agitação marítima nas proximidades da Ponta do Tubarão – RN, Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO SOBRE PLANEAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 6, 2011, Boa Vista. *Anais...* Boa Vista: APRH, 2011, 11 p.

GÓIS, D. M. M.; SCUDELARI, A.C.; ROSMAN, P. C. C.; AMARO, V. E. Um estudo sobre propagação de manchas de óleo na zona costeira de Galinhos e Guamaré – RN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: ABRH, 2009.

GOMES, M. P.; VITAL, H. Revisão da compartimentação da plataforma continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 40, n. 3, p. 321 - 329, 2010.

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.; MILLER, 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), **DtschHydrogr. Z. Suppl.**, v. 12, n. 8, p. 1 - 95,

1973.

- HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; ALLENDER, J. H.; BARNETT, T. P. Computations and parameterizations of the linear energy transfer in a gravity wave spectrum, Part II: parameterizations of nonlinear transfer for application in wave models. **Journal of Physical Oceanography**, v. 15, n. 11, p. 1378 - 1391, 1985.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Dados das séries temporais climáticas da Rede do INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 01/21/2011.
- KOMEN, G. J.; HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum. **Journal of Physical Oceanography**, v. 14, p. 1271 - 1285, 1984.
- LIMA, F. G. F.; MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E. Contribuição para os estudos sobre a influência das forçantes meteorológicas na morfodinâmica costeira do litoral setentrional do Rio Grande do Norte - Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, 2012, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UGB, 2012, 5p.
- LIN, W.; SANFORD, L. P.; SUTTLES, S. E. Wave measurement and modeling in Cheasepeak Bay. **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 2673 - 2686, 2002.
- MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E. Oscillatory Coastal Wave and Currents Profile in the Northern Continental Shelf of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE PROGRAMME, 5, 2011, Sidney. *Proceedings...* Sidney: UNESCO/IUGS/Project 526, 2011, 8 p.
- MATOS, M. F. A.; FORTES, C. J. E. M.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Comparative analysis of agitation obtained the numeric model (SWAN) in modelling Rio Grande do Norte (Brazil) Northern Coastal waves and field data. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 13, n. 3, p. 283 - 299, 2013.
- MOEINI, M. H.; ETEMAD-SHAHIDI, A. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. **Applied Ocean Research**, v. 29, p. 137 - 145, 2007.
- MOEINI, M. H.; ETEMAD-SHAHIDI, A. Wave parameter hindcasting in a lake using the SWAN model. **Transaction A: Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 156 - 164, 2009.
- MORTON, R. A. Accurate shore line mapping: past, present, and future. **Coastal Sediments**, v. 91 n. 1, p. 997 - 1010, 1991.
- MOURA, J. E. **Influência dos modelos digitais de terreno na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH: um estudo de caso**. 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- PEREIRA, A. I. S. **Modelação da agitação marítima em zonas costeiras**. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2008.
- PINHEIRO, L. V.; FORTES, C. J. E. M.; SANTOS, J. A.; NEVES, M. G.; CAPITÃO, R.; COLI, A. B. SOPRO. Caracterização da agitação marítima. Aplicações. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA, 4, 2005, Porto. *Anais...* Porto: APRH, 2005.
- PIRES SILVA, A. A.; MAKARYNSKY, O.; MONBALIU, J.; VENTURA SOARES, C.; COELHO, E. Modelling wave transformation in an open beach on the west coast of Portugal. In: PROCEEDINGS COASTAL WAVE MEETING, A. SANCHEZ-ARCILLA, S. PONCE DE LEON (Eds.) Technical University of Catalonia, Barcelona, **Chapt. 4.3**, 2000.
- RESIO, D. T.; VICENT, C. L. Estimation of winds over the Great Lakes. **J. Waterway, Port Coastal and Ocean Eng.** ASCE, v. 103, p. 265-285, 1977.
- RÖBER, V. Structure and dynamics of the inner shelf north of Galinhos, Rio Grande do Norte (NE - Brazil). Institute of Geosciences, University Christian Albrechts zu Kiel, Germany, 76 p. 2001.
- ROSMAN, P. C. C. **Modeling shallow water bodies via filtering techniques**. 1987. Ph.D. (Thesis – Ralph M) Parsons Laboratory for Water for Resources and Hydrodynamics. Civil Engineering Department, Massachusetts, USA, 1987.
- ROSMAN, P. C. C. Referências Técnicas do SisBAHIA – Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental. Programa de Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, **Referência Técnica**, Rio de Janeiro, 2006.
- ROSSO, T. C. A. Gestão integrada em bacias hidrográficas costeiras. In: WORKSHOP SOBRE HIDRODINÂMICA COSTEIRA - AMIGOS DE BOUSSINESQ, 1, 2007. *Anais...* Vitória: UFRJ, 2007, v. 1, p. 1-7.
- SCHWARZER, K.; STATTEGGER, K.; VITAL, H.; BECKER, M. Holocene coastal evolution of the Rio Açu area (Rio Grande do Norte, Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 140-144, 2006.
- SCUDELARI, A. C.; FORTES, C. J. E. M.; DANTAS, A. L. S. S. Propagação da agitação marítima na região de Galinhos - Guamaré, Rio Grande do Norte, Brasil. In: CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS

COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, Porto, *Anais...* Porto: CMNE/CILANCE, 2007. p. 1-18.

SWAN TEAM. SWAN technical documentation. SWAN cycle II version 40.51. Delft University of Technology, 2008.

TELES, M. J.; PIRES SILVA, A. A.; BELO-PEREIRA, M. Simulations of wave conditions on open beach configuraton: wind resolution, seaward forcing and whitecapping effects. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 16, n 8, p. 927 - 942, 2012.

TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH – III Version 2.22.N.O.A.A, National Centers for Environmental Prediction. OMB Technical Note 222.Camp. **Springer**, EUA, 133 p., 2002.

VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V. E.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E. P.; TABOSA, W. F. Modern high-energy siliciclastic-carbonate plataform: Brazilian Continental Shelf Adjacent to Northern Rio Grande doNorte State, NE Brazil.

SEPM Special Publication on Advances in Shallow-marine sedimentology. **Journal of Sedimentary Research**, v. 90, 100 p., 2008.

VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E. Carta sedimetológica 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.

WAMDI GROUP. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, p. 1775 - 1810, 1988.

WESTHUYSEN, A.; VAN DER.; ZIJLEMA, M.; BATTJES, J. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. **Coastal Engineering**, v. 54, p. 151 - 171, 2007.

WILMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 1984 - 1994, 1981.