



DETERMINAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA ENTRE GALINHOS E GUAMARÉ – BR, ATRAVÉS DOS MODELOS REFDIF E SWAN

Ada C. Scudelari^{1*}, Conceição J. E. M. Fortes² e Ana Lúcia S. de S. Dantas³

(¹) UFRN - PPgES/LARHISA, DEC, Campus Universitário s/n, Lagoa Nova, CEP 59072-970 – Natal – RN – Brasil, Tel. +55 84 3215 3766, web: <http://www.ppges.ct.ufrn.br>
E-mail: ada@ct.ufrn.br

(²) LNEC - DHA – NPE, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3446,
Fax. +351 21 844 3019, E-mail: jfortes@lnec.pt

(³) UFRN, Rua Raposo Câmara, 3530, CEP: 59065-150– Natal – RN – Brasil,
E-mail: ajva@ufrnet.br

RESUMO

Devido à carência de informações sobre o clima de ondas ao longo do litoral setentrional do Rio Grande do Norte – Brasil, e mais especificamente na região de Galinhos e Guamaré, surge a necessidade do uso da modelagem numérica para caracterizar os principais processos de propagação de ondas nesta região. Esta região apresenta uma batimetria muito complexa, pois trata-se de uma área de grandes dimensões caracterizada por pequena declividade e pela presença de dunas submersas lineares longitudinais.

O conhecimento da agitação marítima nesta região permitirá avaliar a influência da variação da largura da plataforma continental e do atrito de fundo nos processos morfodinâmicos costeiros com prováveis implicações na forma e evolução da barreira arenosa.

Neste sentido, efectuaram-se aplicações do modelo de ondas regulares REFDIF, (Dalrymple e Kirby, 1991) e do modelo espectral SWAN (Booij *et al.*, 1999) para diferentes condições de agitação incidente. São apresentados e discutidos os resultados das alturas de onda e direcções de propagação obtidos em cada um dos modelos, bem como sua adequação de emprego na área estudada.

1. INTRODUÇÃO

A região de Galinhos–Guamaré, localizada no nordeste do Brasil, mais especificamente no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte (Figura 1), apresenta-se como uma área de grandes belezas naturais e de grande potencial económico proveniente dos recursos naturais lá encontrados, como o sal e o petróleo. A região é a maior produtora de sal do país e ocupa o primeiro lugar nacional de produção de petróleo em terra e o segundo no mar (Figura 2).

Esta região de Galinhos–Guamaré está inserida numa zona caracterizada por várias feições morfológicas (estuário, planície de maré, terraços flúvio-marinho, barras arenosas e dunas e superfície de aplainamento) modeladas continuamente pela actuação conjunta de vários factores (correntes, ondas, ventos, entre outros), relacionados com variações do nível do mar e variações climáticas. A batimetria desta região é muito complexa, tratando-se de uma área de grandes dimensões com pequena declividade e com presença de dunas submersas lineares longitudinais, que atribuem uma forte irregularidade nas formas de fundo.

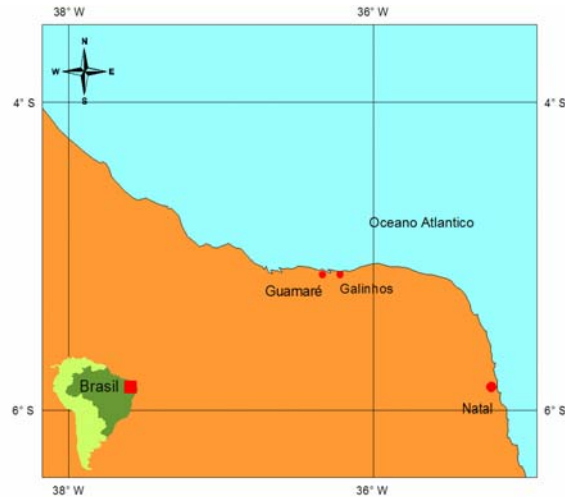


Figura 1 – Localização da área de estudo.



Figura 2 – Vista geral da área.

A actividade petrolífera instalada envolve a prospecção, exploração e transporte de petróleo, e mantém a área (que apresenta uma fragilidade ambiental natural elevada), em constante risco. Consequentemente, a área vem sendo objecto de estudos, que tentam contribuir para o entendimento dos processos costeiros presentes na região, e que são responsáveis pelas modificações verificadas no meio ambiente.

Os trabalhos desenvolvidos por Vital *et al.* (2001, 2005, 2006), Stattegger *et al.* (2004), Grigio *et al.* (2005, 2006), Lima *et al.* (2002, 2006), Silveira (2002), entre outros, apontam para a necessidade do conhecimento dos forçantes hidrodinâmicos na área, como ondas, marés e ventos, bem como o conhecimento da circulação hidrodinâmica na área. O conhecimento do padrão de propagação de ondas na região é, assim, de fundamental importância para estudos de morfodinâmica costeira e dinâmica sedimentar, bem como para qualquer obra de engenharia costeira a ser aí implantada.

No entanto, as informações existentes referentes a ondas e a sua propagação na região são insuficientes como base de qualquer estudo de engenharia costeira e portuária naquela área.

Os modelos numéricos de propagação de ondas têm-se apresentado como uma excelente alternativa para a determinação do clima de ondas em regiões carentes desse tipo de informações. São assim utilizados para transferir as características da onda (alturas, direcção e período) do largo ou de um local na costa onde sejam conhecidos para o local de interesse de estudo. Dependendo da complexidade do modelo numérico, estes podem incluir diferentes fenómenos que afectam a propagação das ondas em zonas costeiras, tais como, a refacção, a difracção, a reflexão, rebentação de ondas, efeitos não lineares e interacção onda-corrente.

Os modelos REFDIF, (Dalrymple e Kirby, 1991) e irregulares SWAN (Booij *et al.*, 1999) são dois exemplos de modelos de propagação com características diferentes. O modelo REFDIF é um modelo que efectua a propagação de ondas regulares em zonas de declive suave e na



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

presença de correntes, tendo em conta os efeitos da refacção e difracção (apenas na direcção perpendicular à direcção principal de propagação da onda), empolamento, dissipação de energia (por atrito ou por percolação do fundo e rebentação das ondas) e outros efeitos não lineares. Trata-se de um modelo de resolução de fase que se baseia na aproximação parabólica da equação de declive suave e que é essencialmente adaptado para a modelação de áreas costeiras com dimensões da ordem da dezena de quilómetros. Este modelo apenas propaga uma condição de agitação marítima, não tem em conta a geração de harmónicas nem a interacção entre ondas na propagação destas.

O modelo SWAN é um modelo de ondas irregulares (espectro de energia) para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. Trata-se de um modelo não linear espectral que permite a geração de ondas por vento e efectua a sua propagação considerando vários fenómenos intervenientes na propagação de ondas - refacção, rebentação difracção (de forma aproximada), geração de harmónicas (interacção não linear entre ondas) - é considerado adequado para grandes áreas costeiras (dezenas de quilómetros). No entanto, devido a limitações computacionais, utiliza-se na discretização dos domínios de cálculo malhas de diferenças finitas com uma resolução espacial grosseira, o que têm como consequência o "alisamento" da batimetria dos fundos e consequentemente algumas alterações na propagação da onda, principalmente quando o fenómeno da difracção é mais importante.

Os modelos atrás referidos são aplicados na propagação de várias condições de agitação incidente desde o largo até junto à costa de Galinhos-Guamaré. Por falta de informação de dados de agitação medidos na região, o conjunto de ondas incidentes considerado nos cálculos numéricos (períodos, direcções de propagação e alturas de onda), são baseadas nas informações do Global Wave Statistic (Hogben, 1986).

Realizaram-se cálculos de propagação com os dois modelos numéricos desde o largo até a zona da praia, para períodos de onda entre 5s e 13s, alturas de onda entre 0,8m a 2,4m e direcções compreendidas entre (-60°) NW e (60°) NE. Os resultados consistem nas alturas e direcções de onda na zona marítima em estudo, com ênfase para a batimétrica de -8m. A análise comparativa dos resultados das alturas de onda e direcções de propagação obtidos em cada um dos modelos permite avaliar a sua adequação de emprego na área estudada.

Nesta comunicação, descreve-se a aplicação dos modelos REFDIF e SWAN ao estudo da agitação marítima na costa do Rio Grande do Norte na região entre Galinhos e Guamaré. Assim, após esta introdução segue-se uma breve caracterização do clima de ondas e nível de maré da zona. De seguida, apresenta-se a descrição dos modelos referidos e das suas condições de aplicação e a apresentação, comparação e discussão dos resultados obtidos. Finalmente, apresentam-se as conclusões do estudo.

2. A ÁREA EM ESTUDO, O CLIMA DE ONDAS E NÍVEL DE MARÉ

A área em estudo estende-se ao longo de aproximadamente 15Km e caracteriza-se por uma zona de relevo suave. A plataforma continental é extensa com largura média de 40Km, e apresenta fundo arenoso. Como referido, a batimetria desta região é muito complexa (Figura 3) tratando-se de uma área de grandes dimensões com pequena declividade e com presença de dunas submersas lineares longitudinais.

Dada a carência de dados de ondas na região, os períodos e alturas de ondas significativos, foram obtidos a partir das informações do *Global Wave Statistics* (Hogben, 1986). Estas informações apresentam, no entanto, alguns pontos fracos, uma vez que se tratam de observações efectuadas por diferentes fontes (navios, bóias-ondógrafo, visual) em diferentes pontos de uma dada região que é sempre uma área bastante vasta. As direcções são inferidas a partir de dados de ventos e observações locais. A distribuição das alturas e períodos estão mostradas na Figura 4 e as direcções de incidência das ondas ao largo estão compreendidas entre os azimutes (-60°) NW e (60°) NE.

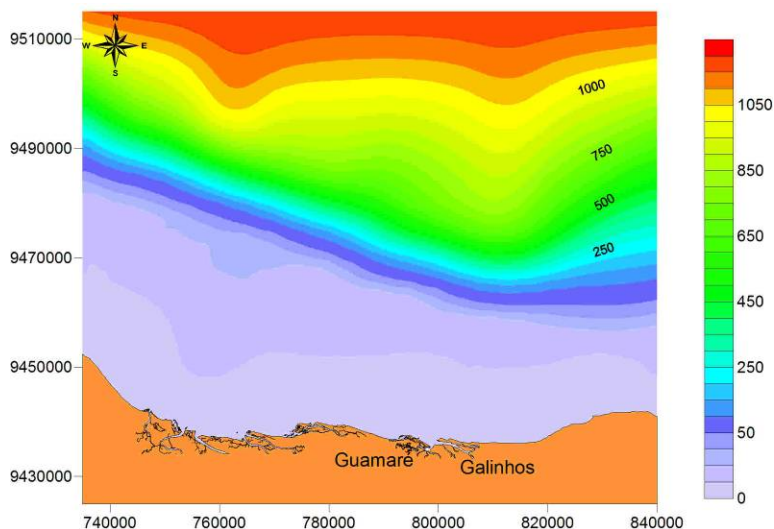


Figura 3 – Batimetria da área de estudo.

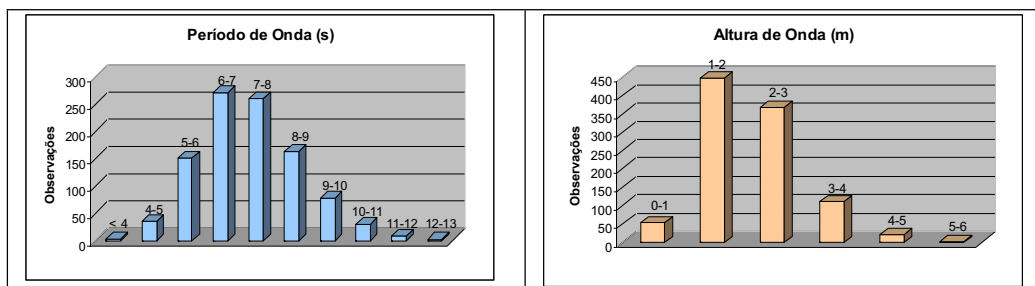


Figura 4 – Períodos e alturas de ondas.

O nível médio de maré foi obtido a partir de informações da DHN (Directoria de Hidrografia e Navegação), e corresponde à cota +1.3m em relação ao zero hidrográfico (ZH).

3. MODELOS NUMÉRICOS

3.1 Modelo REFDIF

O modelo REFDIF é um modelo de propagação e deformação da agitação marítima em zonas de profundidade variável desenvolvido por (Dalrymple e Kirby, 1991). Este modelo efectua a propagação de ondas regulares em zonas de declive suave e na presença de correntes, tendo em conta os efeitos da refração e difracção (apenas na direcção perpendicular à direcção principal de propagação da onda), empolamento, dissipação de energia (por atrito ou por percolação do fundo e rebentação das ondas) e outros efeitos não lineares. É um modelo essencialmente adaptado para a modelação de grandes áreas costeiras.

O modelo baseia-se na aproximação parabólica da equação de declive suave de Berkhoff (1972). Para zonas de águas profundas e intermédias, os autores desenvolveram um modelo baseado na teoria de Stokes de 3^a ordem. Para águas pouco profundas, esta teoria perde validade, pelo que os autores propuseram uma modificação empírica da relação de dispersão da teoria de Stokes de 3^a ordem, ajustando-a à relação da teoria da onda solitária. O efeito principal desta alteração consiste no aumento da celeridade da onda em relação à obtida pela relação de dispersão linear e na diminuição em relação à da onda de Stokes de 3^a ordem, efeito este que se repercutirá nos cálculos da altura de onda.



A modelação da dissipação de energia por rebentação é efectuada de acordo com o modelo de Dally *et al.* (1985), que se baseia no fato de a onda, após rebentar, atingir uma altura estável num fundo plano. Assim, os autores propuseram que a taxa de dissipação de energia fosse proporcional à diferença dos fluxos de energia entre uma dada posição e a zona onde a altura de onda é estável.

Para a aplicação do modelo, deve-se garantir que:

- € O fundo é de inclinação suave (até um valor do declive de 1:3);
- € O ângulo entre a direcção de propagação da onda e a direcção de propagação principal, não deve ultrapassar os $\pm 60^\circ$, devido à utilização da aproximação parabólica de ângulo largo;

A escolha da relação de dispersão a utilizar no modelo, de entre as três disponíveis, é feita pelo utilizador e depende dos valores do parâmetro de Ursell no problema em estudo.

Como limitações do modelo REFDFIF salienta-se o fato de se tratar de um modelo de ondas regulares, não propagando estados de agitação irregular nem permitindo a transferência de energia entre componentes harmónicas de um espectro. O modelo apenas tem em conta a difracção de ondas na direcção transversal à direcção de propagação de ondas pelo que não deve ser utilizado em zonas abrigadas por obstáculos. Além disso, este modelo, por ser parabólico, não deve ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes, pois a componente de onda reflectida é desprezada.

Para a aplicação do modelo REFDFIF, são necessários dados de batimetria da zona a modelar, das características das malhas, das opções de cálculo e das condições iniciais de agitação marítima. O modelo fornece as alturas e as direcções de propagação de onda em qualquer zona, incluindo a de rebentação.

Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo REFDFIF, utiliza-se a ferramenta SOPRO, Pinheiro *et al.* (2005) e Fortes *et al.* (2006, 2007). O SOPRO é um pacote informático composto por uma interface com o utilizador e um conjunto de modelos de propagação de ondas sendo um deles, o modelo REFDFIF. A interface com o utilizador permite o armazenamento e manipulação de dados, a execução dos modelos de propagação da agitação marítima, assim como a obtenção dos resultados e a criação das correspondentes visualizações gráficas.

3.2 Modelo SWAN

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999 e SWAN Team, 2006) - acrónimo de *Simulating WAVes Nearshore* - é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology* da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados o que permite a fácil actualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário.

Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refracção, difracção e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da acção da agitação marítima. Com esta representação, é possível a aplicação do modelo em áreas onde o crescimento da agitação marítima pela acção do vento seja notável ou onde estados de mar, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas, utilizando uma malha "rectangular".



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, a dispersão direccional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional.

Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo SWAN também se utiliza a ferramenta SOPRO, Fortes *et al.* (2007).

De entre as limitações do modelo refira-se:

- € A calibração dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos utilizou dados da campanha JONSWAP, que foi realizada no Mar do Norte (Hasselmann *et al.*, 1973). Tais parâmetros poderão não estar correctos para áreas com diferentes características de clima de ondas (ondas associadas ao estado de mar vaga e ondulação) ou diferentes características do fundo marinho;
- € A difracção no SWAN, sendo modelada de modo simples como uma dispersão direccional, pode ser considerada sua principal limitação, além de não considerar os efeitos de espalhamento de Bragg;
- € A inclusão da difracção nos cálculos numéricos implica que o espaçamento da malha computacional, relativamente ao comprimento de onda, seja tal que garanta a convergência dos cálculos computacionais. Tal implica, por vezes, que as malhas sejam de tão grande dimensão que podem inviabilizar a execução dos cálculos;
- € Outro ponto importante é a influência das condições de fronteira nos resultados do modelo SWAN em certas zonas do domínio de cálculo.

4. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos REFDFIF e SWAN foram aplicados ao estudo da propagação de ondas ao longo da costa do Rio Grande do Norte, Brasil, mais especificamente na região entre Galinhos e Guamaré (Figura 5). A preparação dos dados, execução e visualização dos resultados dos modelos foi efectuada com a ferramenta SOPRO, Pinheiro *et al.* (2005), Fortes *et al.* (2006, 2007).

4.1 Condições de cálculo do modelo REFDFIF

As características (direcção, período e altura de onda) das ondas monocromáticas utilizadas nos cálculos de propagação da agitação marítima desde o largo até a zona adjacente à praia, com o modelo REFDFIF, foram definidas com base nas informações do *Global Wave Statistics* (Hogben, 1986) e em observações de campo. Foram assim seleccionadas as seguintes condições de agitação incidente:

1. Direcções de onda: de (-60°) a (60°), espaçadas de 10° (13 direcções);
2. Para cada direcção de onda, os períodos considerados foram T=5s a 13s, espaçados de 1s, e as alturas $H_0=0,8$ a 2,4m, com um espaçamento de 0,2m.

O nível de maré foi de 1.3 m (ZH). Para atender a gama de direcções incidentes (NW a NE) no presente estudo, e às características da batimetria da zona, foi necessário a definição de 3 domínios de cálculo do REFDFIF, cada um deles constituído por três malhas computacionais, conforme apresentado na Figura 5. Deste modo, é garantido no domínio em estudo e, principalmente, na zona de interesse (que inclui o ponto A), que o valor do ângulo entre a direcção de propagação da onda e a direcção de propagação principal, não ultrapassa os 60°, condição essencial para aplicação do modelo REFDFIF.

Para cada domínio as direcções extremas incidentes também são mostradas na Figura 5. Uma vez que o modelo REFDFIF é baseado na equação de declive suave, houve que suavizar a batimetria na zona compreendida entre 0 e -30m, tendo sido desprezadas as

ondulações de pequena ordem sobre a mesma, preservando-se, no entanto, as suas características principais, de modo a não ter influência na refacção e difracção das ondas (Figura 5).

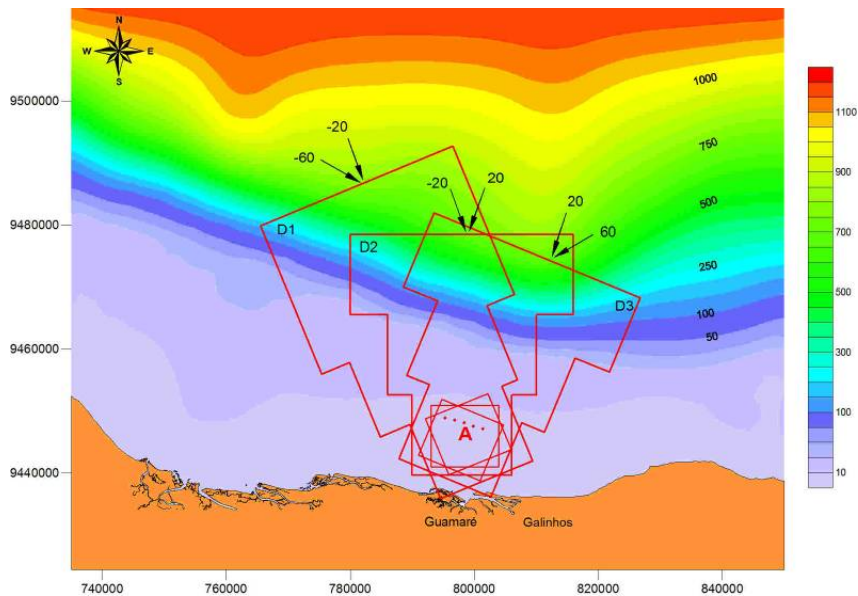


Figura 5 – Modelo REFDIF. Domínios e respectivas direcções extremas de incidência de ondas consideradas.

Sendo assim, foram utilizados para os domínios de cálculo, as dimensões e subdivisões de malhas apresentadas na Tabela 1. Nos domínios D1, D2 e D3 a malha M1 é a mais afastada da zona de interesse e a malha M3 é a malha que envolve esta região.

Tabela 1 – Dimensões, espaçamento e número de pontos das malhas computacionais dos domínios de cálculo e direcções de simulação para o REFDIF.

	Domínios de cálculo								
	D1			D2			D3		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Dimensão na direcção de propagação da onda (m)	25920	12960	12960	12960	12960	12960	12960	12960	12960
Dimensão na direcção perpendicular à de propagação (m)	33600	24000	16080	36000	24000	16080	36000	24000	16080
Espaçamento na direcção de propagação (m)	6	3	3	6	3	3	6	3	3
Espaçamento na outra direcção (m)	6	3	3	6	3	3	6	3	3
Número de pontos na direcção de propagação	4320	4320	4320	2160	4320	4320	2160	4320	4320
Número de pontos na direcção perpendicular à de propagação	5600	8000	5360	6000	8000	5360	6000	8000	5360
Direcções de onda incidentes	-60° a -20°			-20° a -20°			20° a -60°		

As direcções de simulação correspondentes a cada domínio utilizado são também apresentadas na Tabela 1.

4.2 Condições de cálculo do modelo SWAN

As características de agitação incidentes consideradas são as de um espectro de onda correspondente às ondas monocromáticas utilizadas nos cálculos do modelo REFDIF. Foram assim seleccionadas as seguintes condições de agitação incidente:

- ∉ Direcções médias espectrais de pico: de NW (-60°) a NE (60°), espaçadas de 10° (13 direcções);

- ≠ Para cada direcção média espectral de onda, os períodos de pico do espectro de onda considerados foram TP=5s a 13s, espaçados de 1s, e as alturas significativas de onda HS=0,8 a 2,4m, com um espaçamento de 0,2m.

Como não havia dados espectrais disponíveis para o local, admitiu-se um espectro de JONSWAP, com um coeficiente $\nu=3.3$ e uma função de dispersão direccional co-seno de potência par. A discretização em frequência foi realizada em 31 intervalos de 0.02 a 0.4 Hz, obedecendo a uma distribuição logarítmica. A resolução em direcção foi de 2°.

O nível de maré foi de 1.3 m (ZH). A malha batimétrica utilizada é a mesma que a utilizada para o modelo REFDIF.

Para os cálculos com o modelo SWAN, utilizaram-se três malhas encaixadas, Figura 6. A primeira malha abrange toda a região ao largo da zona de Galinhos e Guimarães com dimensões de 63Km por 57Km e espaçamento de 300 m. Uma 2^a malha mais refinada, próxima e encaixada na primeira, foi definida com uma resolução de 150 m, num total de 12Km por 10,5Km (Figura 6). Uma 3^a malha ainda mais refinada, próxima e encaixada na segunda, que foi definida com uma resolução de 25 m, num total de 9 Km por 9 Km (Figura 6).

As características da agitação ao largo constituem a condição de fronteira na malha global em um ou dois dos lados dessa fronteira dependendo da direcção daquela agitação. Os resultados da malha global fornecem as condições de fronteira para a 2^a malha, e os resultados desta malha fornecem as condições de fronteira para a 3^a malha.

Não foram considerados no funcionamento do modelo SWAN os fenómenos devidos a correntes ou ventos. Para a 1^a malha só foram considerados os fenómenos associados à variação de profundidade ao longo da malha de cálculo. Para a 2^a e 3^a malhas foram também considerados os fenómenos de difracção e interacção de ondas não lineares.

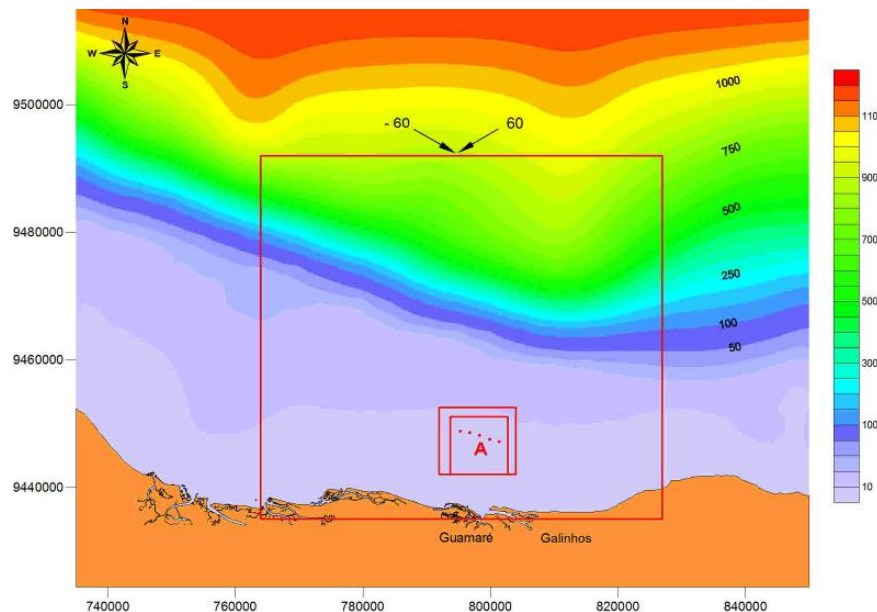


Figura 6 – Malhas computacionais utilizadas pelo modelo SWAN.

5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE, COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para as condições de cálculo estabelecidas no item anterior, efectuaram-se os cálculos com o modelo REFDIF/SOPRO e SWAN/SOPRO, correspondentes aos períodos, alturas e direcções anteriormente especificadas. Sendo assim, foram executadas 1053 simulações de condições de agitação (9 períodos Δ 13 direcções Δ 9 alturas), quer para o modelo REFDIF quer para o modelo SWAN.



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Os cálculos com o modelo REFDFIF foram efectuados numa estação de trabalho, cujas características são: AMD Athlon™ Dual Core Opteron 1.7GHz com 2.00GB de RAM, enquanto que os do modelo SWAN foram efectuados num computador pessoal com as seguintes características: Intel Pentium M 1.73 MHz com 1.00GB de RAM.

Para efeitos de comparação dos resultados, obtiveram-se os valores de altura de onda e direcção da onda:

- € no domínio de cálculo total junto à costa entre Galinhos e Guamaré e numa zona restrita centrada na zona de interesse, Figura 6;
- € ao longo da batimétrica de -8 m, i.e., ao longo de 5 pontos espaçados em média de 800m, com ênfase para o ponto A, representativo da agitação marítima nesta batimétrica (Figuras 5 e 6).

Sendo assim, são apresentados os resultados dos cálculos de propagação de ondas com o modelo REFDFIF e SWAN correspondentes a:

- € Características da agitação (altura e direcção) na zona restrita do domínio de cálculo, para as direcções ao largo de -40° , 0° e 40° , $T=7s$ e $H=2m$;
- € Características da agitação (altura e direcção) ao longo da batimétrica de -8m, para direcções ao largo variando de -60° a 60° , $T=7s$ e $H=2m$.

Note-se que a agitação marítima correspondente ao período de 7s e $H= 2 m$ é a agitação mais frequente na zona, ver Figura 4.

5.1. Características da agitação marítima em todo o domínio de cálculo

Da Figura 7 à Figura 12 apresentam-se os resultados (altura de onda e direcção de onda) do modelo REFDFIF e SWAN na zona restrita do domínio, para uma onda incidente de período igual a 7s, altura de 2.0 m e com direcções de -40° , 0° e 40° . Nessas figuras encontra-se indicado a posição do ponto A.

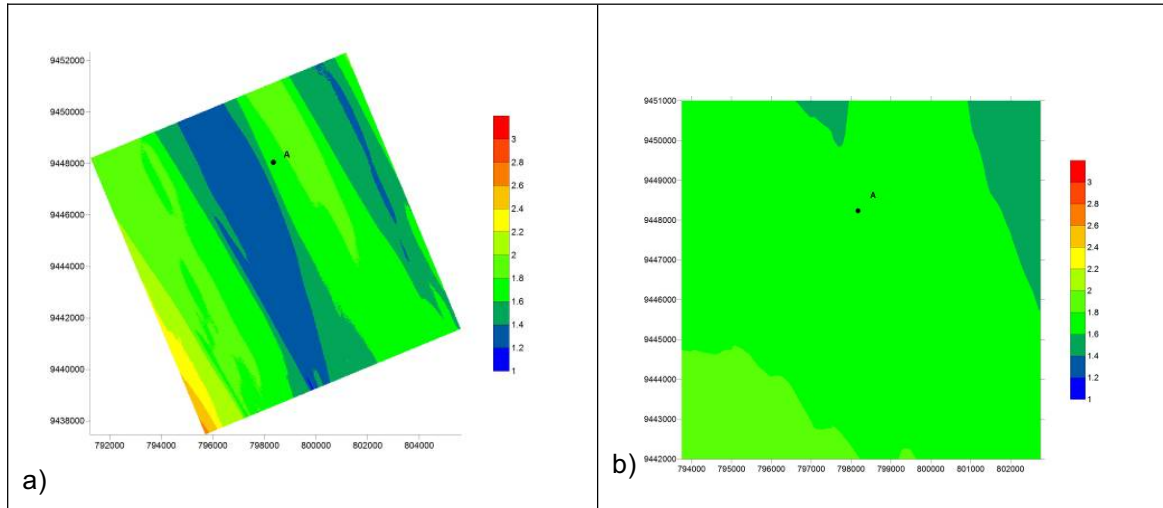


Figura 7 – Alturas de onda para uma onda incidente ao largo com direcção -40° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDIF; b) SWAN.

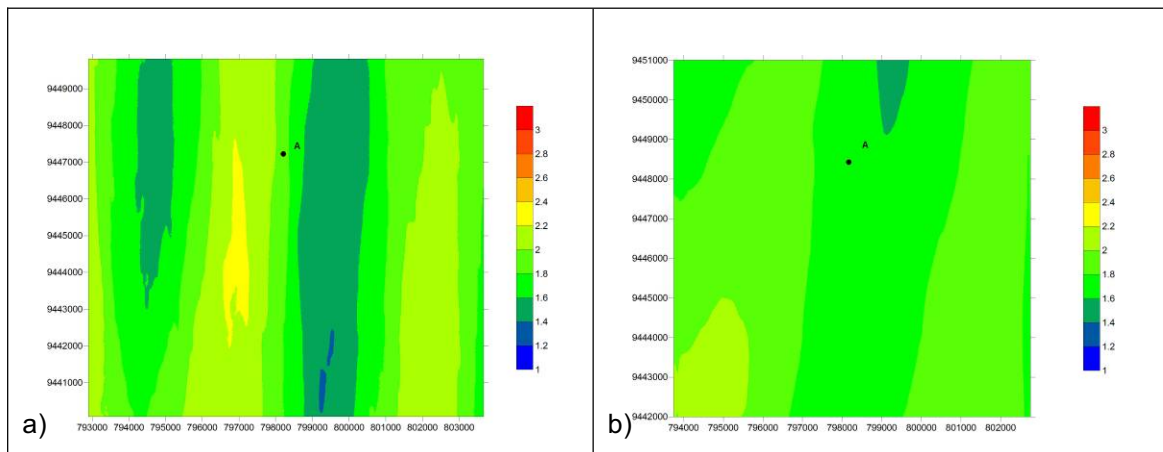


Figura 8 – Alturas de onda para uma onda incidente ao largo com direcção 0° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDIF; b) SWAN.

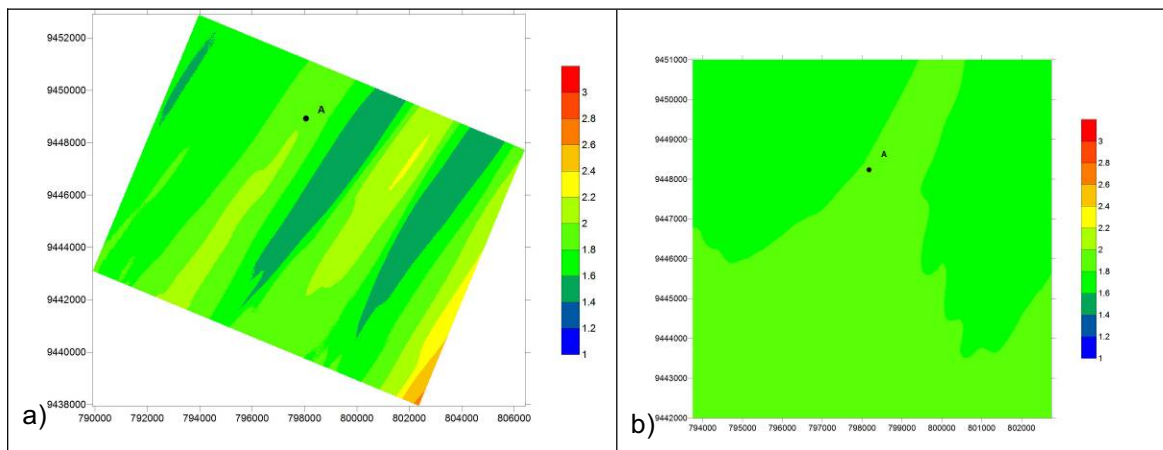


Figura 9 – Alturas de onda para uma onda incidente ao largo com direcção 40° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDIF; b) SWAN.

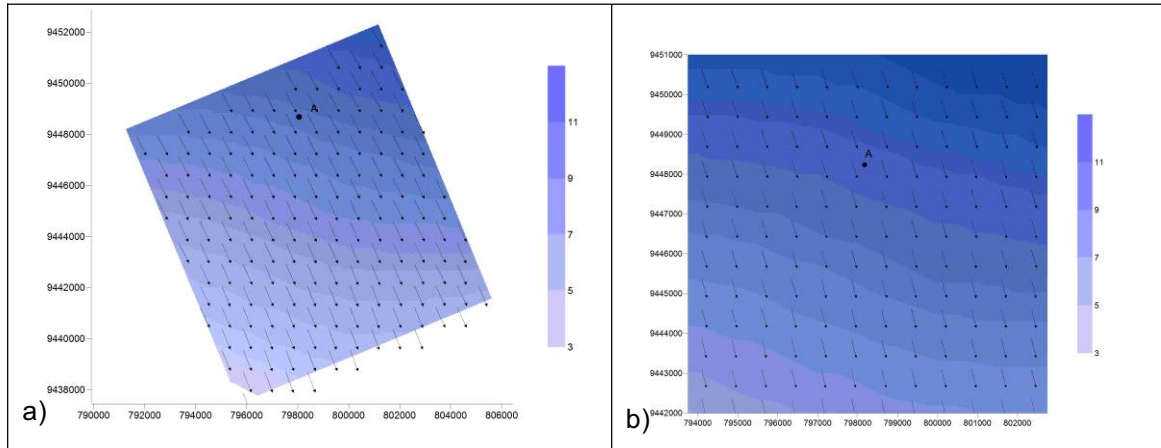


Figura 10 – Direcções de onda para uma onda incidente ao largo com direcção de -40° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDF; b) SWAN.

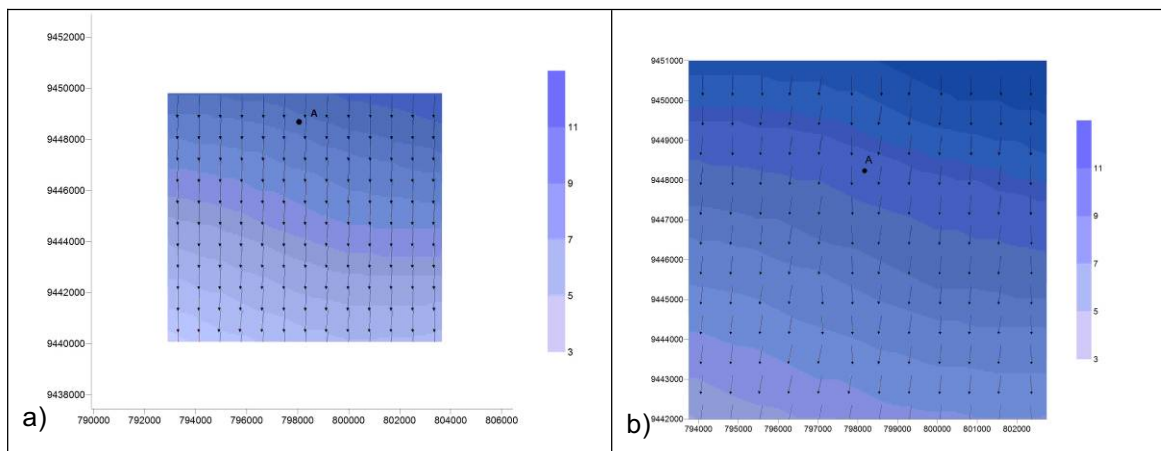


Figura 11 – Direcções de onda para uma onda incidente ao largo com direcção de 0° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDF; b) SWAN.

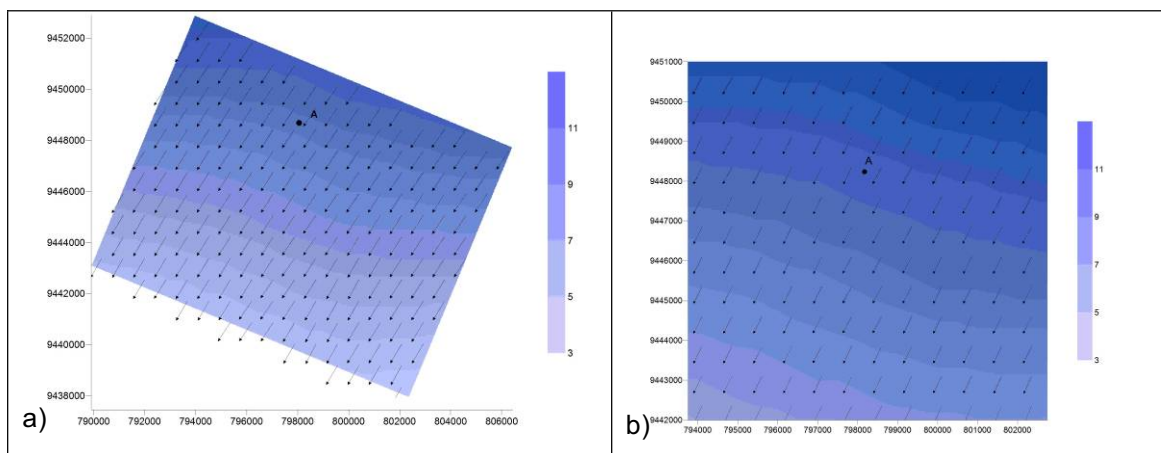


Figura 12 – Direcções de onda para uma onda incidente ao largo com direcção de 40° , período de 7s e altura de 2.0m. a) REFDF; b) SWAN.

Da análise das Figuras 7 a 12, verifica-se que, em geral, com os modelos REFDF e SWAN a agitação incidente de período 7s e altura de 2m sofre progressivamente uma rotação no sentido de se dispor perpendicularmente à batimetria. Ocorrem alterações quer na altura (aumento ou diminuição) quer na direcção da onda, dependentes da direcção ao largo considerada.

No caso do modelo REFDF, verifica-se que as ondas atingem a zona costeira com maior

intensidade à medida que as direcções incidentes rodam de -40° para 0° ou de 40° para 0° . Existe uma maior variabilidade dos valores da altura de onda ao longo da frente da onda conduzindo a zonas de convergência/divergência da energia das ondas. Esta variabilidade é mais significativa no caso das direcções de -40° e $+40^\circ$.

No caso do modelo SWAN, este comportamento não se verifica. A agitação mantém-se praticamente inalterada (menor variabilidade dos valores de altura de onda ao longo da frente de onda) ou sofre uma redução ligeira para direcções entre -40° a 40° , sem se notar a presença tão evidente de zonas de convergência/divergência de energia como acontece com REFDIF.

As diferenças entre os modelos podem ser explicadas pelo facto da 3^a malha computacional utilizada no modelo REFDIF apresentar uma resolução espacial muito superior (3m) à utilizada pelo modelo SWAN (25m). Por outro lado, o REFDIF, é um modelo de ondas regulares e não considera a dispersão das ondas em direcção e em frequência o que não se passa com o SWAN, que têm esse fenómeno previsto na sua formulação. Estas duas diferenças conduzem a um alisamento dos valores de altura de onda de SWAN que não se verifica com REFDIF.

Convém notar que para o ponto A (de profundidade -8m) as diferenças são muito pouco significativas em termos de direcção de onda. No que diz respeito às alturas de onda, as diferenças já são mais significativas. Para este período de onda e altura de onda incidente, a agitação no ponto A pode atingir 1,35 vezes a agitação incidente junto à costa no caso do REFDIF e 0,9 vezes no caso do modelo SWAN.

Apresenta-se, a título ilustrativo, os valores do período médio ou de zero ascendente do modelo SWAN, para ondas de direcção ao largo -40° , 0° e 40° , período de pico de 7 s e altura significativa de 2.0 m.

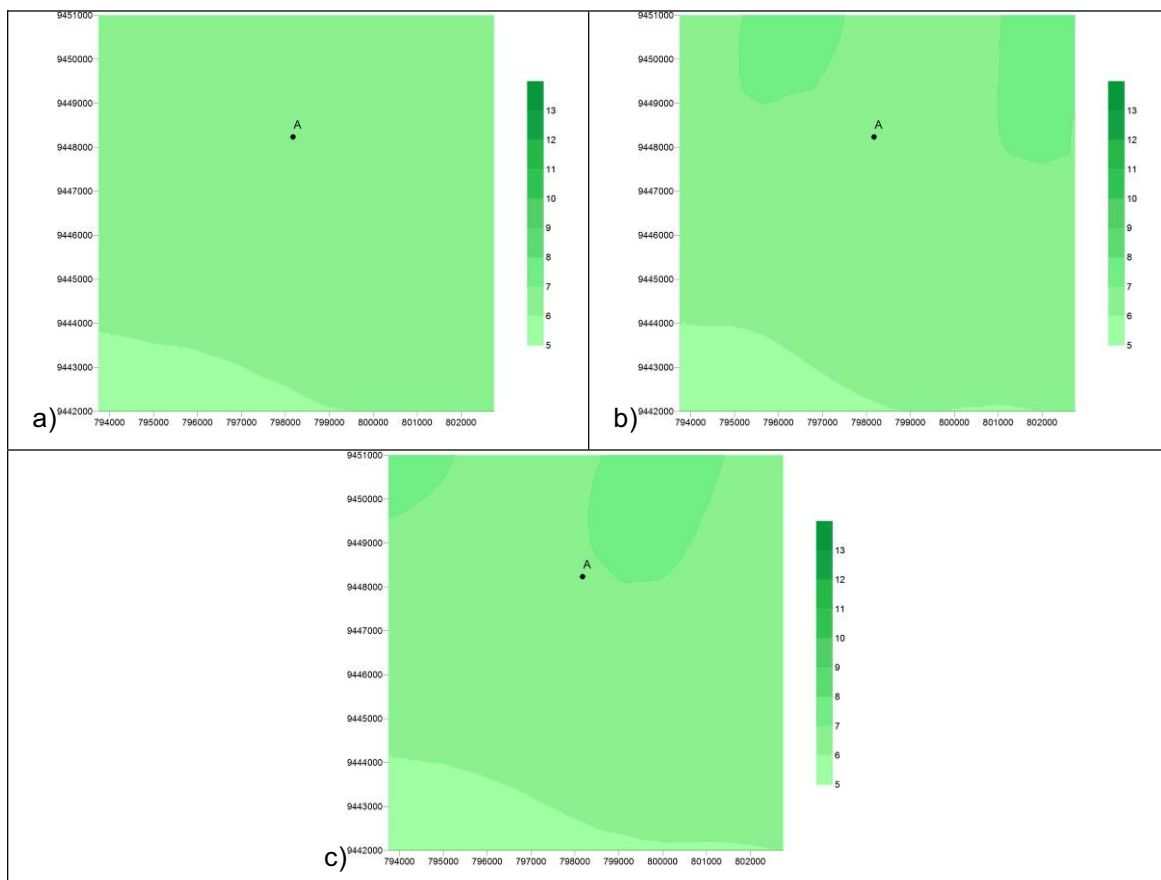


Figura 11 – Modelo SWAN. Período médio de zero ascendente para uma onda incidente ao largo com direcção a) -40° , b) 0° e c) 40° , período de pico de 7s e altura significativa de 2.0m.

Como se pode constatar, com o modelo SWAN para as diferentes direcções de onda não se verificam alterações significativas do período médio de zero ascendente na zona restrita com excepção da zona de menores profundidades, em que há uma ligeira diminuição do valor do período de onda. No caso do ponto A, as diferenças são muito pouco significativas.

É de notar que com o modelo REFDIF não há alterações do período da onda ao longo de todo o domínio de cálculo, pois não considera a geração de harmónicas nem a transferência de energia entre estas.

5.2. Características da agitação ao longo da batimétrica de -8m

A análise dos resultados dos modelos REFDIF e SWAN ao longo da batimétrica -8m é efectuada com base nas Figuras 13 a 15, onde se encontram representados os resultados (alturas e direcções de onda) do modelo, para os 5 pontos considerados ao longo desta batimétrica, para uma onda incidente com $T=7s$ e $H=2m$ e direcções de onda variando entre -60° e 60° .

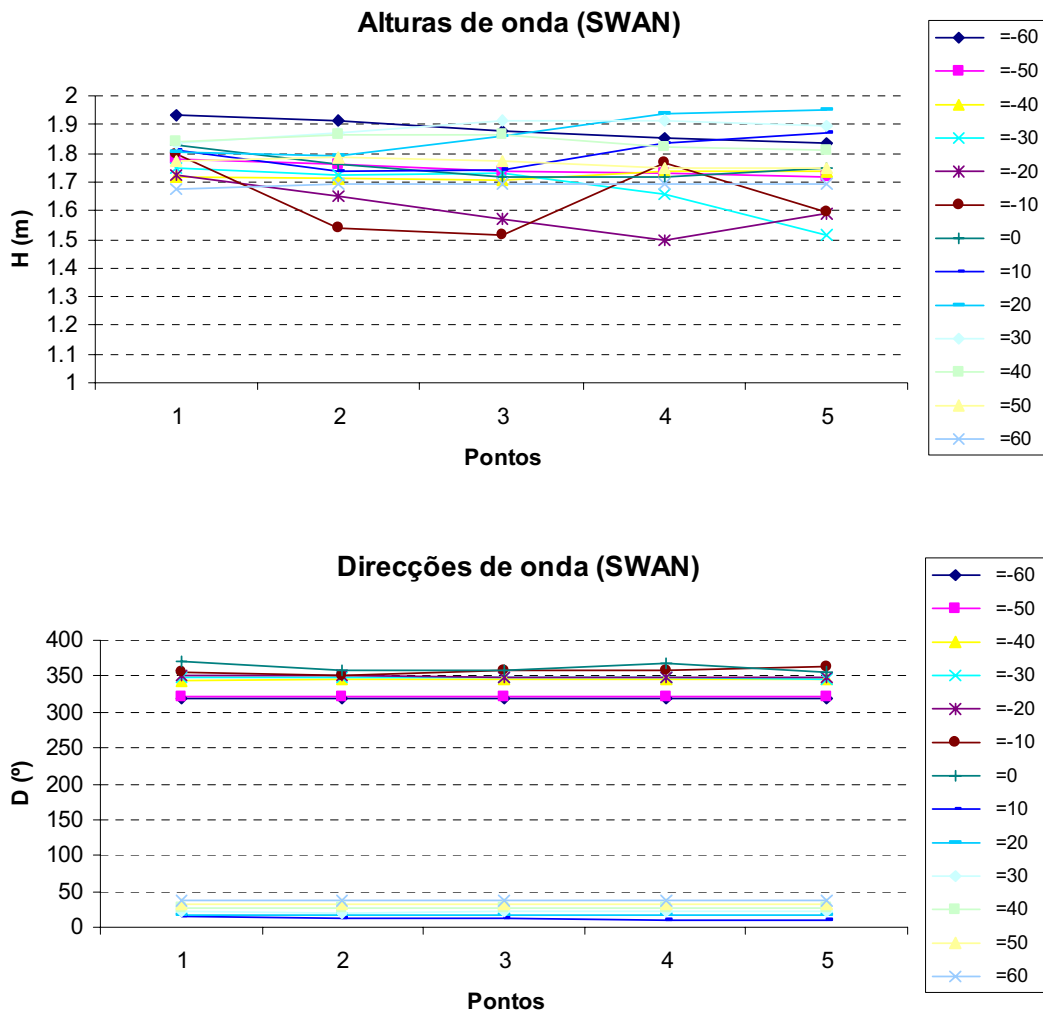


Figura 13 – Modelo SWAN. Valores da altura significativa e direcção média da onda nos pontos ao longo da batimétrica -8 m (ZH), para uma onda incidente com período de pico de 7s e altura significativa de 2.0 m. Direcções de onda incidente entre -60° e $+60^\circ$.

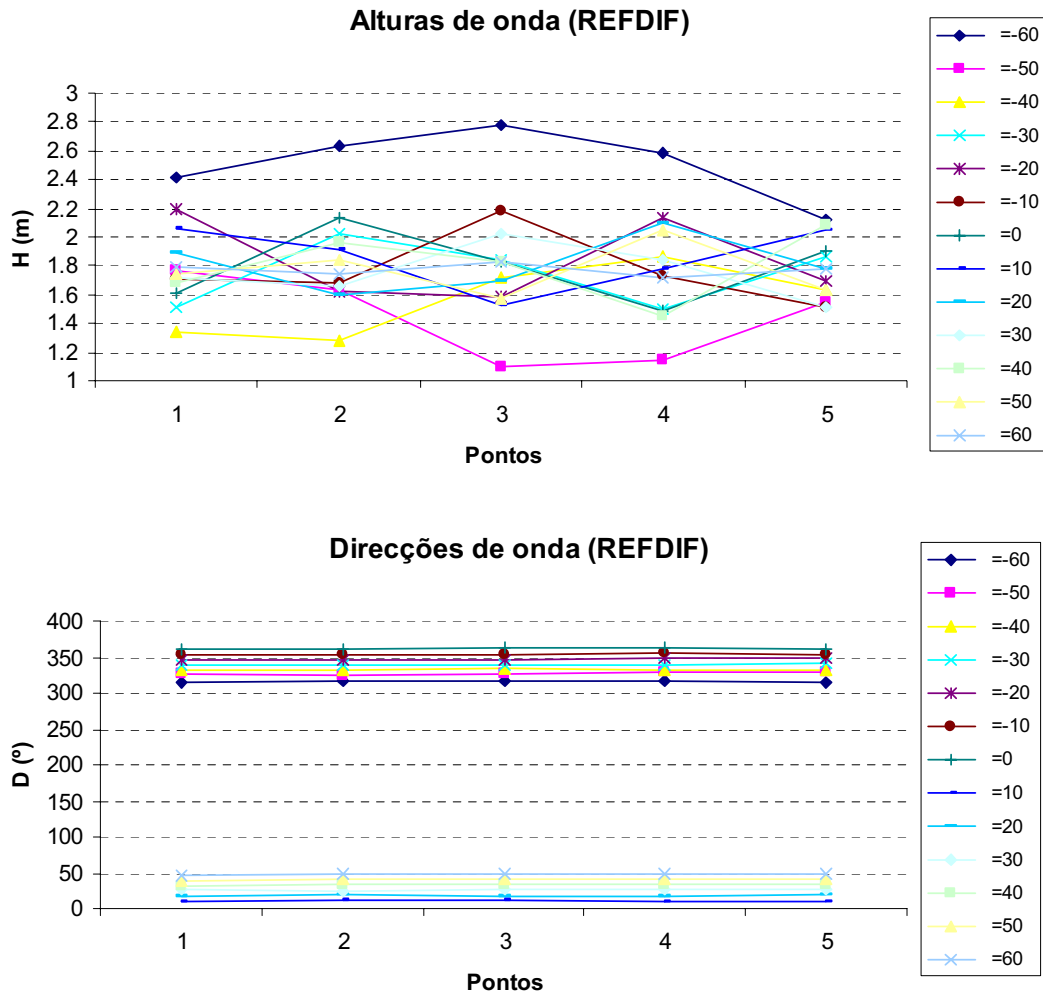
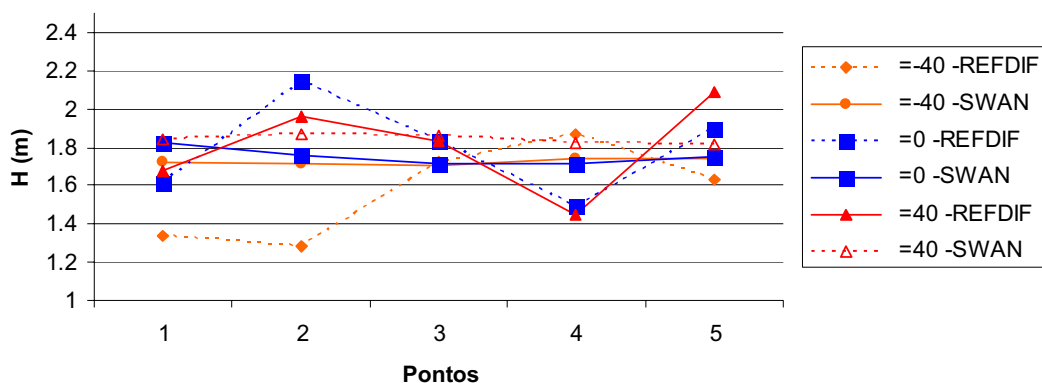


Figura 14 - Modelo REFDIF. Valores da altura e direcção da onda nos pontos ao longo da batimétrica -8 m (ZH), para uma onda incidente com período de 7s e altura de 2.0 m. Direcções de onda incidente entre -60° e $+60^\circ$.

Alturas de onda



Direcções de onda

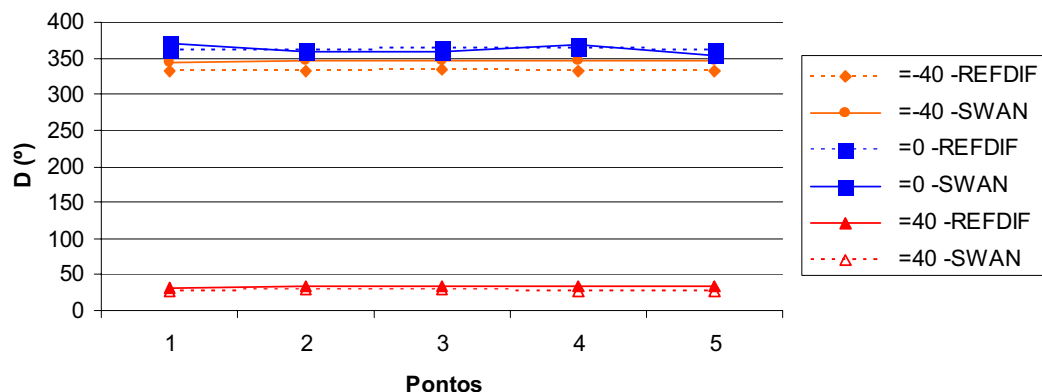


Figura 15 – Comparação dos resultados dos modelos REFDIF e SWAN. Valores da altura e direcção da onda nos pontos ao longo da batimétrica -8 m (ZH), para uma onda incidente com período de 7s e altura de 2.0 m. Direcções de onda de -40°, 0° e 40°.

No que respeita à variação da altura de onda com a direcção incidente, pode-se verificar que, em geral:

Com o modelo REFDIF

- € No intervalo de direcções incidentes entre 60° e -30°, as alturas de onda variam entre 1.5 m a 2.1 m, o que significa que a agitação proveniente dessas direcções atinge a costa com uma ligeira redução ou sem sofrer grandes alterações na altura de onda. Existe, em geral, para algumas direcções incidentes, uma certa variabilidade dos valores de altura de onda ao longo dos pontos da batimétrica;
- € Para a direcção incidente de -40° e -50°, os valores de H são sempre inferiores à onda incidente ocorrendo uma maior variabilidade ao longo dos pontos da batimétrica;
- € Para a direcção incidente de -60°, verifica-se um incremento dos valores da altura de onda, o que parece ser estranho pois trata-se de uma direcção muito oblíqua às batimétricas do fundo. Disto pode inferir-se que talvez o modelo REFDIF esteja a ser utilizado fora do domínio de validade, ver 3.1.



Com o modelo SWAN:

- € Para todas as direcções de onda, as alturas de onda variam entre 1.5 m a 2.0 m, o que significa que a agitação proveniente dessas direcções atinge a costa não se altera ou sofre uma ligeira redução. Na maioria das direcções incidentes não se verifica uma variabilidade dos valores de altura de onda ao longo dos pontos da batimétrica, mas no caso das direcções -10° e -20° essa variabilidade já ocorre.

No que respeita à variação da direcção de onda ao longo das batimétricas, com a direcção de onda incidente, D_0 , pode-se verificar que, em geral, com os dois modelos:

- € A relação entre as direcções incidentes e as direcções calculadas nas batimétricas, para todos os pontos, aparenta ser linear;
- € O valor obtido para a direcção de onda nos diferentes pontos é o resultado da refração e difracção da onda e depende da direcção de onda incidente;
- € As direcções incidentes entre 0° e 20° praticamente não sofrem variação, o que é espectacular uma vez que se trata das direcções sensivelmente paralelas ao gradiente da batimetria;
- € Para valores de direcção incidente superiores a 20° regista-se que os valores calculados para a direcção de onda são inferiores aos da onda incidente (rotação da onda para a esquerda, no sentido de se alinhar com o gradiente da batimetria);
- € Para valores de inferiores a 0° verifica-se que os valores calculados são superiores aos da onda incidente (rotação da onda para a direita, no sentido de se alinhar o gradiente da batimetria).

As diferenças dos resultados obtidos pelos dois modelos, principalmente em termos da altura da onda estão relacionadas com as características próprias de cada modelo.

O modelo SWAN apresenta uma limitação na medida em que considera a difracção na forma de uma dispersão direccional, descrevendo este fenómeno de maneira aproximada. Para além disso, para a discretização do domínio de cálculo do SWAN, neste caso concreto da região de Galinhos–Guamaré, utilizou-se, por limitações computacionais, uma malha muito grosseira (25 m de espaçamento) face às características da batimetria desta zona. Esta discretização suaviza a representação da batimetria. Em relação a este aspecto, o REFDIF permite uma melhor discretização espacial (3 m).

Quanto ao modelo REFDIF, trata-se de um modelo de propagação de ondas regulares, não tendo em conta a dispersão espectral (em direcção e em frequência) nem a alteração do período da onda por transferência de energia entre componentes espectrais como acontece com o modelo SWAN modelos. Além disto, admitiu-se que as alturas, períodos e direcções de onda, resultantes dos cálculos com ondas regulares do modelo REFDIF, são equivalentes aos valores de alturas, períodos de pico e direcção espectral de pico de ondas irregulares.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se a aplicação dos modelos REFDIF, Dalrymple e Kirby (1991) e do modelo SWAN, Booij *et al.* (1991) à zona marítima entre Galinhos e Guamaré, Rio Grande do Norte, Brasil, para diferentes condições de agitação incidente.

REFDIF é um modelo baseado na aproximação parabólica da equação de declive suave, Berkhoff (1972), que efectua a propagação de ondas em zonas costeiras e considera os fenómenos de refração, difracção (apenas na direcção perpendicular à propagação), dissipação de energia (por rebentação ou atrito de fundo) e a presença de correntes na propagação das ondas. Este modelo apenas propaga uma condição de agitação incidente e não um espectro de energia e não tem em conta a transferência de energia entre harmónicas. SWAN é um modelo espectral que tem em conta a refração, difracção (de forma aproximada) e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos. SWAN considera a difracção de forma aproximada e por vezes por limitações computacionais há necessidade de diminuir a resolução espacial das malhas computacionais, diminuindo deste modo a precisão de representação da batimetria.

A comparação dos resultados obtidos com os dois modelos permitiu retirar conclusões gerais semelhantes, resumidas a seguir.

Em termos gerais, a agitação incidente de período 7s e altura 2 m sofre progressivamente uma rotação no sentido de se dispor perpendicularmente à batimetria. Ocorrem alterações quer na altura (aumento ou diminuição) quer na direcção da onda, dependentes da direcção ao largo considerada. Existem, algumas diferenças significativas entre os modelos REFDIF e SWAN especialmente no que diz respeito aos valores de altura de onda na zona em estudo. Com efeito, o modelo REFDIF conduz a uma maior variabilidade dos valores da altura de onda ao longo da frente da onda induzindo diferentes zonas de convergência/divergência, ao contrário do modelo SWAN. Em geral, com este modelo dá-se a diminuição dos valores de altura.

Ao longo da batimétrica de -8 m, verificou-se que, com o modelo REFDIF, as alturas das ondas ao largo mantêm-se com o mesmo valor até à batimétrica dos -8 m ou sofrem uma redução, para direcções entre 60 ° e -50 °. Para a direcção de -60°, verificou-se o incremento desses valores mas este resultado deve ser visto com cuidado pois está-se no limite de aplicabilidade do modelo. Existe para algumas direcções incidentes, uma certa variabilidade dos valores de altura de onda ao longo dos pontos. O modelo SWAN apresenta resultados mais suavizados. A agitação que chega à batimétrica referida é sempre inferior à agitação incidente e não existe uma variabilidade dos valores de H ao longo dessa batimétrica. Tal pode ser consequência da resolução espacial adoptada para a 3^a malha computacional utilizada no modelo SWAN (25 m) que é muito menor à do modelo REFDIF (3 m). Será conveniente efectuar cálculos para este caso de teste com o modelo SWAN utilizando malhas com uma maior resolução espacial de modo a obter valores mais próximos ao REFDIF.

Com ambos os modelos, a direcção de onda nos diferentes pontos é o resultado da refracção e difracção da onda e depende da direcção de onda incidente. É possível constatar que ondas incidentes com uma direcção de cerca de 0° e 20°, praticamente não sofrem variação na sua direcção e que, ondas com direcções de ângulos superiores e inferiores a 0° e 20°, sofrem variações opostas. Quanto maior o período da onda, maior a rotação sofrida pela onda. Existem, no entanto, algumas diferenças entre os dois modelos numéricos e que se podem atribuir ao facto do modelo REFDIF ser um modelo de ondas regulares, não tendo em conta a dispersão espectral (em direcção e em frequência) nem a alteração do período da onda por transferência de energia entre componentes espectrais como acontece com os outros dois modelos.

Em conclusão, a utilização de ambos os modelos mostrou ser adequada neste caso de teste, desde que respeitadas as condições de aplicação dos modelos. A aplicação do modelo SWAN é mais simples que REFDIF dada a facilidade de construção das malhas de cálculo, mas SWAN está associado a um tempo computacional superior ao de REFDIF.

Em termos gerais, de comportamento, os resultados dos dois modelos são semelhantes, principalmente no que diz respeito às direcções de onda. No entanto, a utilização de uma resolução grosseira no caso do modelo SWAN levou a algumas diferenças significativas nas alturas de onda ao longo do domínio de cálculo. A resolução espacial limita por isso a aplicação deste modelo. Em zonas onde a refracção/difracção são fenómenos dominantes será aconselhável a utilização de REFDIF. Em grandes zonas costeiras o modelo SWAN é uma boa alternativa.

Em outras aplicações destes modelos, é aconselhável de modo a avaliar qual (ou quais) o fenómeno mais importante(s) e, por conseguinte, qual o modelo que melhor simulará esse(s) fenómeno(s). É importante não esquecer que, para além dos fenómenos físicos que são determinantes na escolha do modelo e um dos factores mais importantes, existem outros



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

aspectos a ter em conta, tais como: a dimensão da zona em estudo, a finalidade a que se destina o estudo e a urgência do mesmo.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece a CAPES a bolsa de pós doutoramento, através do projecto CAPES-GRICES 158/06, processo BEX2563/06-1.

Os autores agradecem ao M.Sc. Alexandre Braga Coli pela ajuda na aplicação do SWAN. Agradecem aos Engs. Artur Palha, Liliana V. Pinheiro e Lourenço Mendes pela ajuda na aplicação do pacote SOPRO. Agradecem também o financiamento da FCT através dos projectos POCTI/CTA/48065/2002 e “MEDIRES – Metodologias de Inspeção Robotizada de Estruturas Semi-Submersas”.

REFERÊNCIAS

- BERKHOFF, J. C. W.; 1972. *Computation of Combined Refraction-Diffraction*. Proc.13th Int.Conf. Coastal Engrg. ASCE, Vancouver.
- BOOIJ, N., RIS, R. C. and HOLTHUIJSEN, L. H., 1999. *A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation*. *J. Geophysical Research*, 104 (C4), pp. 7649-7666.
- DALLY, W. R., DEAN, R. G. and DALRYMPLE, R. A.; ,1985. *Wave Height Variations Across Beachs of Arbitrary Profile*. *J.Geophys. Research*-90.
- DALRYMPLE, R. A. and KIRBY, J. T.; 1991. *REFDIF 1, Version 2.3, Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*. CARC Report 91-91, University of Delaware, January.
- FORTES, C. J. E. M.; PINHEIRO, L.; PALHA, A.; 2007. *O pacote SOPRO: Evoluções recentes. Comunicação a apresentar às 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária* (JPECP), Lisboa, Outubro.
- FORTES, C. J. E. M.; PINHEIRO, L.; SANTOS, J. A.; NEVES, M. G. O.; CAPITÃO, R., 2006. *SOPRO – Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos*. *Revista da Tecnologia da Água*, Edição I, Março de 2006.
- GRIGIO, A. M., AMARO, V. E., VITAL, H., DIODATO, M. A., 2005. *A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote sensing - A case study from the guamare city, Northeast Brazil*. *Journal of Coastal Research*, Florida, USA, v. 42, p. 412-421.
- GRIGIO, A. M., SOUTO, M. V. S, CASTRO, A. F. de, AMARO, V. E., VITAL, H., 2006. *Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Journal of Coastal Research, v. 39, p. 293-298.
- HOGBEN, N.; ,1986. *Global Wave Statistics*.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGTH, D. E.; ENKE, K.; EWING, J. A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D. E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MLLER, P.; OLBERGS, D. J.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H., 1973. *Measurements of wind wave-growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, *Ergnzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe A(8)*, (Nr. 12), 1-95.
- LIMA, Z. M. C.; ALVES, A. L.; AMARO, V. E. & VITAL, H. 2002. *Coastline Evolution Of The Galinhos Spit (NE Brazil) Using Air Photography And LANDSAT TM Images*. *Revista Pesquisas em Geociências*, Ed. UFRGS, RS. 28 (2).
- LIMA, Z. M. C. ; VITAL, H. ; TABOSA, W. F., 2006. *Morphodynamic variability of the Galinhos Spit, NE Brazil*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

- International Coastal Symposium,. Journal of Coastal Research, v. 39, p. 598-601.
- PINHEIRO, L. V.; FORTES, C. J. E. M.; SANTOS, J. A.; NEVES, M. G.; CAPITÃO, R.; COLI, A. B. (2005) – SOPRO. *Caracterização da agitação marítima*. Aplicações. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Angra do Heroísmo, Outubro. 2005.
- SILVEIRA, I. M., 2002. *Monitoramento Geoambiental da Região Costeira do Município de Guimarães-RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 115p.
- STATTEGGER, K.; CALDAS, L. H. de O. and VITAL, H. , 2004. *Holocene coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil*. Journal of Coastal Research, SI39, proc. ICS2004.
- SWAN Team, 2006. *SWAN: Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.51*, Delft University of Technology, versão electrónica em <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>.
- VITAL, H., GUEDES, I. M. G., 2006 . *Erosion on areas of oil and gas exploration along the coast of northeastern Brazil: The Guimarães Hotspot*. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Inglaterra, v. 88, p. 175-182.
- VITAL, H., SILVEIRA, I. M., AMARO, V. E., 2005. *Carta Sedimentológica da Plataforma Continental Brasileira - Área Guimarães a Macau (NE BRASIL), Utilizando Integração de dados Geológicos e Sensoriamento Remoto*. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 233-241.
- VITAL, H.; TABOSA, W. F.; STATTEGGER, K.; CALDAS, L. H. O. 2001. *Tectonics and Bottom Morphology control on Sediment Distribution in the Brazilian NE Continental Margin: São Bento do Norte / Caiçara do Norte Área*. Abstracts of the Chapman conference on the Formation of Sedimentary Strata on Continental Margins, American geophysical Union, Ponce-Puerto Rico. Proceedings p.37.