



**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO CAMPO DE VENTOS DE MESO-ESCALA SOBRE
A PREVISÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA EM TORNO DO ARQUIPELAGO DA MADEIRA**

F. Sansana Silva¹, J. P. Pinto¹, R. Caldeira^{2,4}, R. Tomé³

1 – Instituto Hidrográfico

2 – CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental

3 – Universidade dos Açores

4 – Centro de Ciências Matemáticas (CCM), Universidade da Madeira

SUMÁRIO

A modelação da agitação marítima nas regiões insulares é normalmente efectuada com base em forçamentos resultantes de modelos oceânicos e campos de ventos obtidos a partir de modelos de larga escala, que não consideram as condições atmosféricas de meso-escala, nem as alterações locais produzidas pela orografia das ilhas. No entanto, estas alterações no campo de ventos podem ser determinantes, principalmente em situações onde o regime de agitação marítima dominante é o de vaga gerada localmente.

O objectivo deste estudo consiste em avaliar o desempenho do sistema de previsão implementado no Instituto Hidrográfico para o Arquipélago da Madeira e, em particular, o impacto da aplicação de um campo de ventos de alta resolução nos eventos dominados por forçamentos locais. São efectuadas duas simulações da agitação marítima (i) um forçamento considerando a influência da ilha na variabilidade do vento local; (ii) e outro forçamento apenas considerando um campo de ventos de larga escala. As simulações da agitação marítima são realizadas através do modelo espectral SWAN (Simulating WAVes Nearshore) forçadas pelas condições de fronteiras do modelo espectral oceânico WW3 (Wave Watch III). De forma a avaliar a influência da resolução espaço-temporal foram testados três conjuntos de dados de ventos distintos. De forma a testar os campos de ventos de baixa resolução foi utilizado um forçamento de escala oceânica, com uma resolução espacial de 1^o, obtido através do modelo *U. S. Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System Model* (NOGAPS), fornecido pelo Naval Research Laboratory (NRL). Para os testes com campos de vento de alta resolução foram utilizados os campos de vento produzidos no âmbito do projecto Island Wakes (UMa/IO-FCUL, Projecto FCT - PPCDT/MAR/57265/2004), com uma resolução espacial de 6 e 2 km respectivamente. Os resultados obtidos foram comparados com os dados das bóias ondógrafo da rede de observação costeira do Arquipélago da Madeira e com os dados de altimetria da missão Jason-1.

A comparação da altura significativa entre o modelo e os dados de satélite revelam um acordo significativo, verificando-se também uma tendência do modelo em subestimar os dados experimentais na ordem dos 10%, aumentando para 20% quando se considera apenas os eventos dominados pela geração local. Este estudo sugere que a resolução do campo de ventos é de extrema importância para melhor descrever a agitação marítima gerada pela circulação atmosférica de meso-escala. Será no entanto necessário ampliar o domínio regional de forma a aumentar a eficiência do modelo para esta área.

INTRODUÇÃO

O Arquipélago da Madeira (33°N;17°W) está situado numa zona subtropical, a 700 km Oeste da costa de Marrocos e a 900 km Sudoeste de Portugal Continental (Figura 1). O regime de ondas predominante nesta zona do Atlântico NE está associado a áreas de geração no bordo do anti-ciclone dos Açores e a circulação depressionária ou pós-frontal na bacia do Atlântico Norte, resultando em ondulação de NW ou NE. Situações de vaga associadas à circulação atmosférica local também são observadas na região que em conjunto com as características típicas de uma ilha oceânica, nomeadamente, fortes gradientes de fundo e efeitos orográficos apreciáveis, contribuem para um aumento de complexidade na descrição da agitação marítima. Um estudo das condições médias de agitação marítima com base nos dados disponíveis da estação ondógrafo do Funchal (Esteves *et al.*, 2008), mostra que 73% dos registos são do quadrante SW com um valor médio de altura significativa inferior a 1 m. A comparação com simulações numéricas na bacia do Atlântico Norte para o ano de 2002, sugere que grande parte destes eventos está associada a ondulação de frequência média com direcção incidente do quadrante NW, sendo este padrão especialmente dominante nos meses de Inverno. As situações extremas ocorrem esporadicamente mas de forma sistemática nos meses de Inverno e nos meses de transição, Abril e Setembro. Nos meses de Verão e nos meses de transição, especialmente Setembro e Outubro, é mais clara a alternância entre a ondulação de incidência dominante e vaga gerada localmente mas com um padrão de incidência relativamente indefinido. No entanto, durante os meses de Inverno existem algumas ocasiões onde as condições atmosféricas locais são propícias para a formação de vaga forte com incidência dos quadrantes NE e SE. Estas condições estão associadas à activação de um anti-ciclone localizado no Norte de África, responsável pelo denominado “tempo de Leste” no Arquipélago.

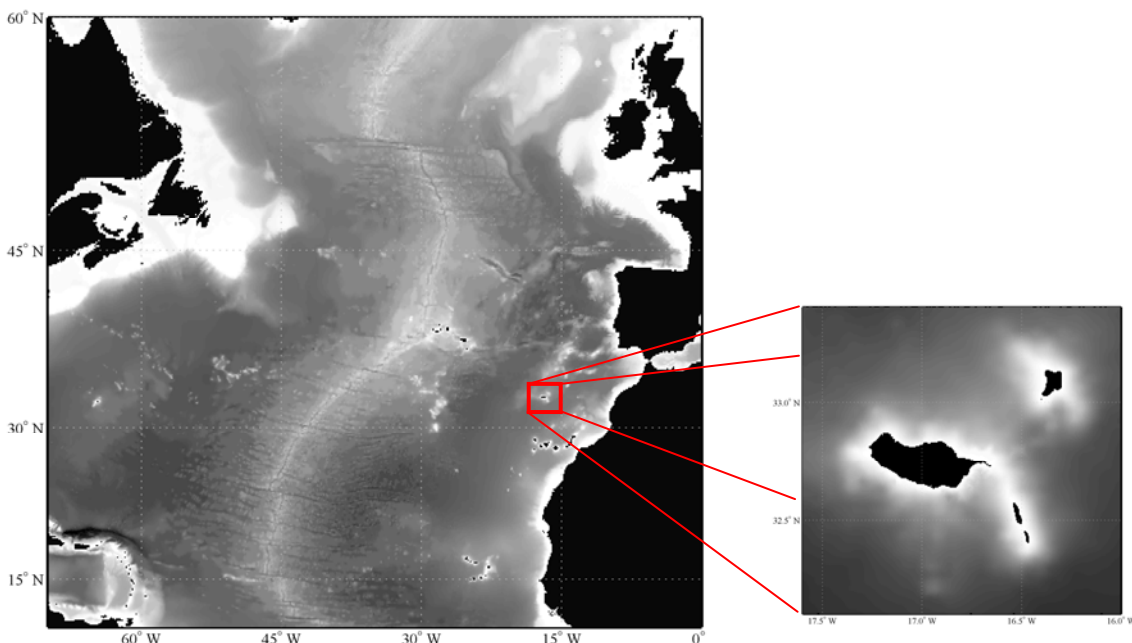


Figura 1 – Localização do Arquipélago da Madeira.

No Funchal os ventos de Nordeste e de Sudoeste são os mais frequentes, sendo os ventos de Este e Oeste de maior intensidade (Miranda *et al.*, 2006). No Funchal, observa-se uma dispersão mais frequente da direcção predominante do vento, ao contrário do que acontece no Porto Santo. No Porto Santo, os ventos do quadrante Norte são dominantes (64%)

(com o quadrante Norte a contribuir com 37% das ocorrências). O vento no Porto Santo é representativo do vento sobre o mar, ou seja, do vento à escala sinóptica que incide sobre a orografia da Madeira, a Sudoeste do Porto Santo. Por outro lado, o Funchal encontra-se muitas vezes abrigado na esteira da ilha, quando o vento no Porto Santo é do quadrante Norte. Por outro lado, o escoamento atmosférico no Funchal é afectado por movimentos de recirculação horizontal do ar, o que explica a diversidade de direcções do vento nesta localização. A velocidade média do vento no Porto Santo é superior à velocidade média do vento no Funchal, devido ao escoamento ser menos afectado por efeitos topográficos e de superfície no Porto Santo. Os ventos do quadrante Oeste, bem como ventos das direcções Norte e Sul são também os ventos mais intensos sobre o Porto Santo, com intensidades médias atingir os 20 *km/h*. Os ventos do quadrante Sul são, no entanto, pouco frequentes no Porto Santo. Note-se ainda que no Funchal e no Porto Santo 11% e 5%, respectivamente das situações observadas foram de calma (ventos fracos).

O sistema operacional de previsão da agitação marítima do Instituto Hidrográfico (IH), <http://www.hidrografico.pt/previsao-operacional.php>, inclui desde Agosto de 2008 previsões a três dias (72h) para a região da Madeira. Os resultados do modelo para o Arquipélago da Madeira são apresentados para períodos de seis horas, e actualizados diariamente, em dois domínios de simulação designados por SWGM1 e SWGM2 (Figura 2 e Figura 3).

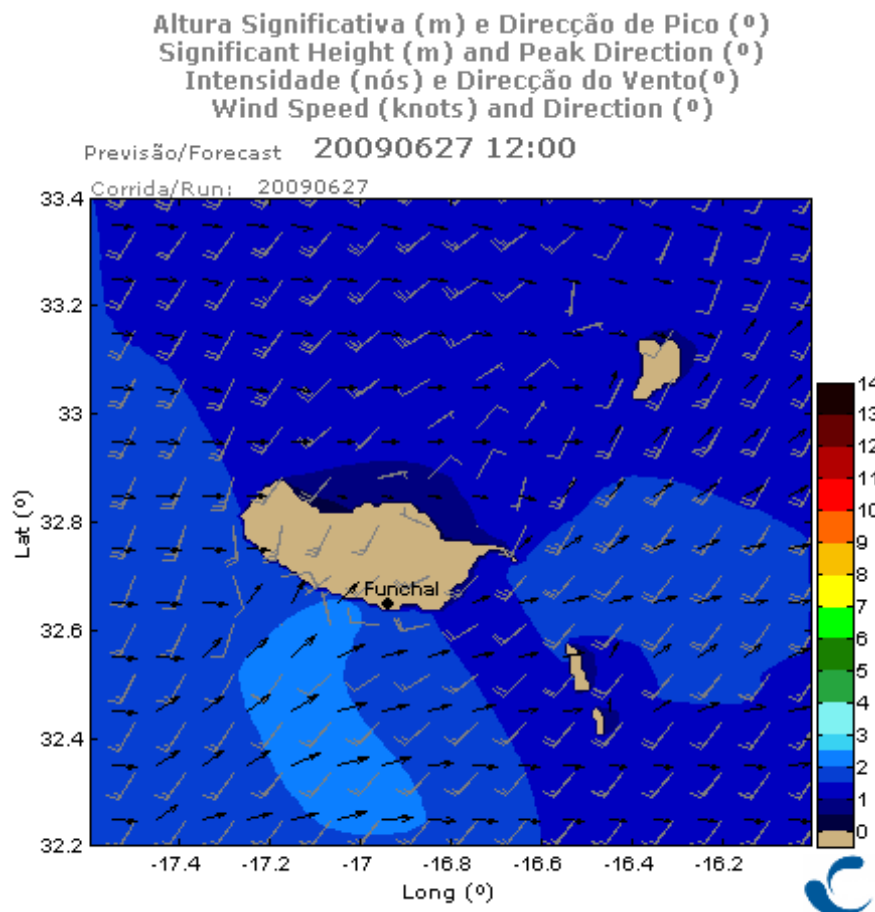


Figura 2 – Exemplo dos resultados apresentados diariamente na página do Instituto Hidrográfico e do projecto Island Wakes, para a área SWGM1.

Um estudo recente (Sansana Silva *et al.*, 2009), avaliou o desempenho deste sistema de previsão na área de Portugal Continental, comparando os resultados do modelo com os dados de observação disponíveis, nomeadamente as bóias ondógrafo de Leixões, Sines e Faro, que apresentam uma cobertura razoável das condições de agitação marítima no litoral de

Portugal Continental. Os resultados estatísticos obtidos mostram que o desempenho do sistema está dentro dos limites normais de exactidão referidos noutros artigos (Ris *et al.*, 1999; Rusu *et al.*, 2008). No presente trabalho pretende-se estender esta validação para o Arquipélago da Madeira, através duma análise introdutória que permitirá testar e avaliar o sistema operacional de previsão numa região insular. Em particular, um dos objectivos essenciais consiste em analisar até que ponto o modelo descreve os eventos caracterizados por geração local, determinando nessas situações o efeito da resolução do campo de ventos considerado.

Altura Significativa (m) e Direcção de Pico (°)
Significant Height (m) and Peak Direction (°)
Intensidade (nós) e Direcção do Vento(°)
Wind Speed (knots) and Direction (°)

Previsão/Forecast 20090627 12:00

Corrida/Run: 20090627

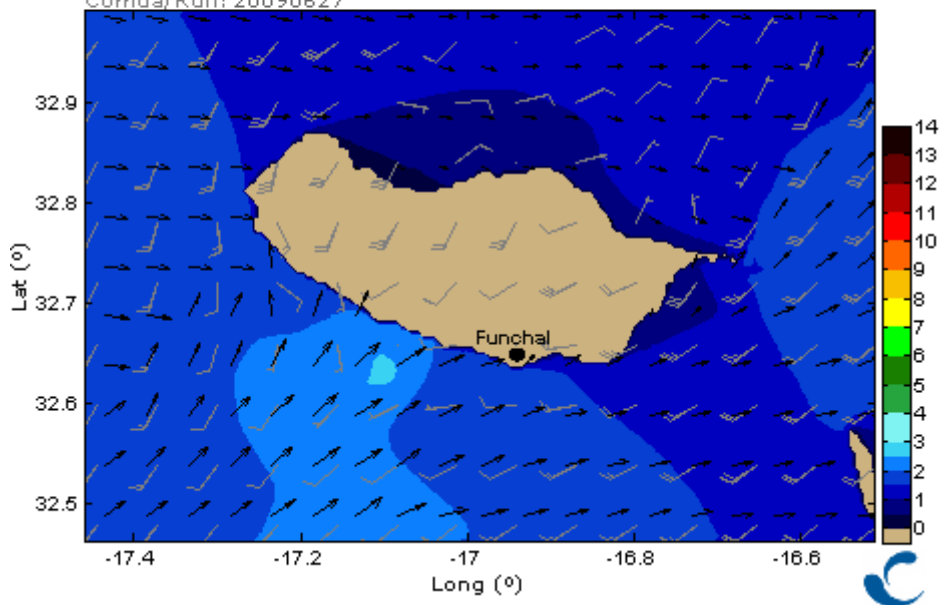


Figura 3 – Exemplo dos resultados apresentados diariamente na página do Instituto Hidrográfico e do projecto Island Wakes, para a área SWGM2.

Existem duas bóias ondógrafo no arquipélago, ambas localizadas no litoral Sul da Ilha da Madeira, mais precisamente no Funchal e no Caniçal (Figura 5), fornecendo uma adequada frequência temporal de dados. No entanto, como esta é uma zona pouco exposta à agitação marítima de mar aberto (quadrante NW), os dados destas estações são pouco representativos da região norte da ilha. Para permitir uma cobertura espacial mais abrangente identificando os gradientes dos campos de altura significativa característicos das regiões de mar aberto e insulares, optou-se por complementar os dados das bóias com as observações de satélite da missão Jason-1.

METODOLOGIA

A simulação da agitação marítima em regiões costeiras utiliza uma metodologia de redução de escala que envolve o acoplamento entre um modelo de baixa resolução à escala da bacia oceânica com um modelo costeiro de alta resolução, podendo considerar-se ainda um nível intermédio (regional) de meso-escala. No sistema de previsão implementado no IH optou-se pelo modelo WaveWatch III – versão 1.18 (WW3) para o domínio oceânico (Tolman, 1999;

2002), e pelo modelo SWAN – versão 40.72 (acrónimo de Simulating WAVes Nearshore) para os domínios regionais e costeiros (Booij *et al.*, 1999). Ambos os modelos são espectrais de 3^a geração, mas a adequação a escalas diversas implica uma diferença substancial ao nível da formulação dos termos de fonte e metodologia numérica.

As previsões meteorológicas operacionais disponíveis no Centro de Ciências Matemáticas (CCM) da Universidade da Madeira (<http://wakes.uma.pt>) utilizam o modelo de mesoscala MM5 (*Fifth generation Mesoscale Model*, Grell *et al.*, 1995). Este modelo operacional desenvolvido pela PSU/NCAR (Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research), na sua versão 3.7.0, encontra-se relativamente actualizado no que se refere à sua formulação física. O modelo utiliza um sistema de coordenadas sigma (Haltiner e Williams, 1980) que acompanha o terreno, tornando-o capaz de simular e prever circulações de mesoscala ou de escala regional. O MM5 conta com diversas opções físicas com parametrizações distintas. O utilizador pode escolher diferentes parametrizações: a) esquemas de *cumulus*, que representam os fluxos verticais de sub-escala, a precipitação convectiva e as nuvens; b) esquemas de camada limite planetária, que representam os fluxos de sub-escala verticais devidos à turbulência; c) esquemas de microfísica que resolvem os processos de precipitação e nuvens na escala da malha do modelo; d) esquemas de solo, que representam o efeito das superfícies terrestre e marítima; e e) esquemas de radiação, que representam os efeitos radiativos na atmosfera e na superfície. O MM5 operacional foi configurado com cinco domínios encaixados, centrados sobre a Ilha da Madeira, com resoluções de 54x54km, 18x18km, 6x6km, aqui designado por SWGM1, e dois domínios com resolução de 2x2km centrados na Ilha da Madeira (SWGM2) e na Ilha de Porto Santo, respectivamente. Todos os domínios utilizam 25 níveis verticais, interacção “two-way” e topografia operacional da USGS (United States Geological Survey). O modelo é forçado diariamente de 12 em 12 horas com previsões do modelo global GFS (“Global Forecast System”) disponibilizadas pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e corrido na sua versão paralela no cluster computacional disponível na Universidade da Madeira (<http://archipelago.uma.pt>).

O esquema de acoplamento, o forçamento meteorológico, a resolução espacial e a resolução do espectro (frequência e direcção) são apresentados na Figura 4 e na Tabela 1. O domínio oceânico WWG1, forçado pelo campo de ventos NOGAPS (*U. S. Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System Model*) com uma resolução de 1^o x 1^o e um passo temporal de 6 horas, fornece as condições de fronteira para o domínio intermédio SWGM1 que por sua vez fornece as condições de iniciais e de fronteira para o domínio SWGM2. Ambos os domínios de alta resolução são forçados pelo campo de vento resultante de uma implementação do MM5 na região da Madeira com um passo temporal de 1 hora.

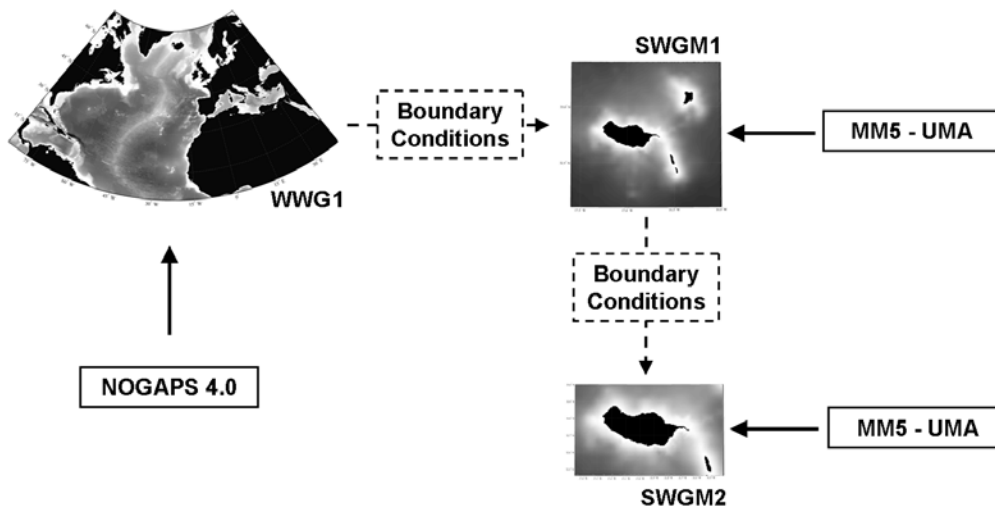


Figura 4 – Mecanismos de forçamento e respectivos campos de vento, utilizados para as simulações.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Tabela 1 – Características gerais das grelhas computacionais utilizadas nas simulações (Tipo de forçamento, Limites Geográficos, Resolução espacial, Número de frequências e de direcções utilizadas).

Malha	Forçamento	Latitude	Longitude	$\Delta x \times \Delta y (^{\circ})$	n_f	n_{θ}
WWG1	NOGAPS	5.0° N – 70°N	85° W – 40° E	0.5° x 0.5°	25	24
SWG1	MM5	32.1° N – 33.4° N	17.6° W – 16.0° W	0.01° x 0.01°	30	36
SWG2	MM5	32.46° N – 33.0° N	17.46° W – 16.51° W	0.005° x 0.005°	30	36

No período considerado para a validação do sistema de previsão de agitação marítima no Arquipélago da Madeira, de Agosto de 2008 a Maio de 2009, o satélite Jason-1 realizou 22 ciclos com uma periodicidade de 10 dias. Nos primeiros 13 ciclos, o satélite faz duas passagens por ciclo sobre o domínio SWGM1, separadas por um intervalo de tempo de 4 dias, uma primeira passagem descendente (Track 1) e uma segunda passagem ascendente (Track 2). Como se pode verificar na Figura 5, a cobertura espacial destes ciclos é adequada a caracterização da região de interesse. No entanto, nos últimos 9 ciclos o satélite apenas realiza uma passagem (Track 3) no extremo NE do domínio.

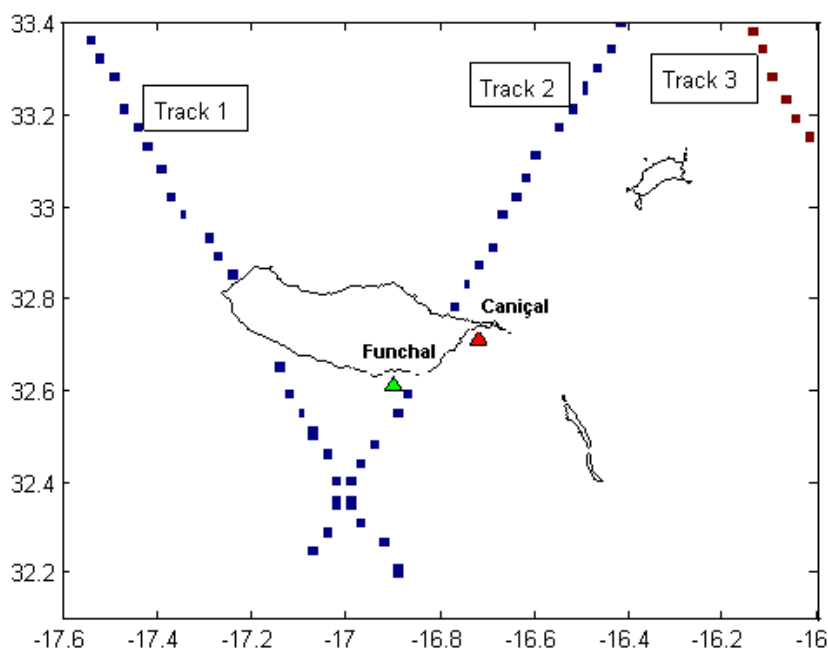


Figura 5 – Representação das passagens do satélite (Tracks) na área de modelação e localização das bóias ondógrafo.

As observações de altimetria consistem na análise do eco que resulta da reflexão na superfície da Terra de um pulso electromagnético emitido pelo satélite. A forma deste eco permite obter uma medida da rugosidade da superfície reflectora, e no caso do oceano, uma estimativa da altura significativa das ondas gravíticas. A velocidade do vento a 10 m de altitude é obtida a partir de modelos empíricos que estabelecem uma relação entre esta grandeza, a altura significativa e um coeficiente de retrodispersão que depende da intensidade do eco. Para reduzir flutuações estatísticas que afectam cada eco individualmente, é considerada uma média durante um período típico de 50 ms, resultando um eco médio ou “waveform” donde se retiram os valores das grandezas que se pretendem medir. Este procedimento possibilita, para além do valor médio, o desvio padrão e o número de ecos válidos, proporcionando uma



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

escolha posterior e adequada das observações (Picot *et al.*, 2006). Nesta análise, considerou-se dois critérios de selecção: número de registos superior a 15 (o valor máximo é de 20) e desvio padrão inferior ao valor médio. Em geral, estes critérios permitem filtrar observações sobre a linha de costa.

RESULTADOS E ANÁLISES

De forma a analisar a influência da resolução espacial dos campos de ventos utilizados nas simulações foram criadas três simulações distintas. Na simulação R1 foram utilizados os campos de vento provenientes do modelo MM5, com uma resolução espacial de 6 km, uma resolução temporal de 1 hora e foram modeladas as condições de agitação na área SWGM1. Estes dados foram posteriormente comparados com as observações do satélite.

Para avaliar o comportamento do modelo nas situações em que a resolução do campo de ventos assume um carácter primordial, foi seleccionado a partir dos resultados das simulações R1, um conjunto de situações típicas de geração local. Este conjunto de dados será posteriormente referido como Simulação R2. Tendo em conta que o satélite não mede períodos de onda, o critério adoptado na escolha deste tipo de eventos envolve os valores de declividade da onda resultantes do modelo numérico, tendo-se considerado regime de vaga valores de declividade superiores a 1/11.

A simulação R3 corresponde às situações de geração local identificadas na simulação R1, mas neste caso utilizando o campo de ventos de baixa resolução (NOGAPS).

Na Figura 6 (a) são apresentados os gráficos de dispersão da altura significativa (H_s) entre os resultados globais do modelo com forçamento meteorológico procedente do modelo atmosférico MM5, designado por simulação (R1), assim como as respectivas observações do satélite para a análise e previsões a 24 e 48 horas sobre o domínio SWGM1. Os indicadores estatísticos estão dentro dos limites razoáveis encontrados nestes tipos de comparação (Dykes *et al.*, 2002 ;Dykes *et al.*, 2009; Garcia *et al.*, 2005; Ris *et al.*, 1999; Rogers *et al.*, 2007; Rusu *et al.*, 2008a; Rusu *et al.*, 2008b), verificando-se uma correlação significativa entre o modelo de previsão e os dados experimentais.

De acordo com a Figura 6 e com os valores do “Bias” apresentados na Tabela 2, constata-se que o modelo tende a subestimar ligeiramente as observações do satélite. De acordo com o valor do declive, 1.10 para a análise e 1.06, 1.08 para as previsões, esta discrepância ronda os 10%. Como seria de esperar, a acuidade do modelo deteriora-se com o tempo de previsão, com o desvio padrão a aumentar 7%, de 0.41 m para 0.49 m nas primeiras 24 horas, aumentando 11% nas 24 horas seguintes.

Na Figura 6 (b) apresentam-se os gráficos de dispersão de um subconjunto dos resultados anteriores, caracterizados por estarem associados a um regime de agitação marítima com origem na circulação atmosférica local (simulação R2). Constatou-se que a eficiência do modelo é claramente inferior nas situações onde a agitação marítima é gerada localmente. O índice de dispersão sobe ligeiramente mas o desvio padrão ultrapassa meio metro, sendo da ordem dos sessenta centímetros. Verifica-se ainda um aumento na subestimação dos dados de satélite por parte do modelo, rondando agora os 20%.

Tabela 2 – Análise estatística dos resultados do modelo para as três simulações (R1, R2 e R3).

<u>Simulação</u>	<u>Bias (m)</u>			<u>Índice Dispersão</u>			<u>Desvio Padrão (m)</u>		
	<i>0 hr</i>	<i>24 hr</i>	<i>48 hr</i>	<i>0 hr</i>	<i>24 hr</i>	<i>48 hr</i>	<i>0 hr</i>	<i>24 hr</i>	<i>48 hr</i>
R1	-0.17	-0.13	-0.17	0.22	0.23	0.25	0.41	0.44	0.49
R2	-0.38	-0.23	-0.30	0.27	0.25	0.28	0.61	0.55	0.62
R3	-0.69	-	-	0.40	-	-	0.94	-	-

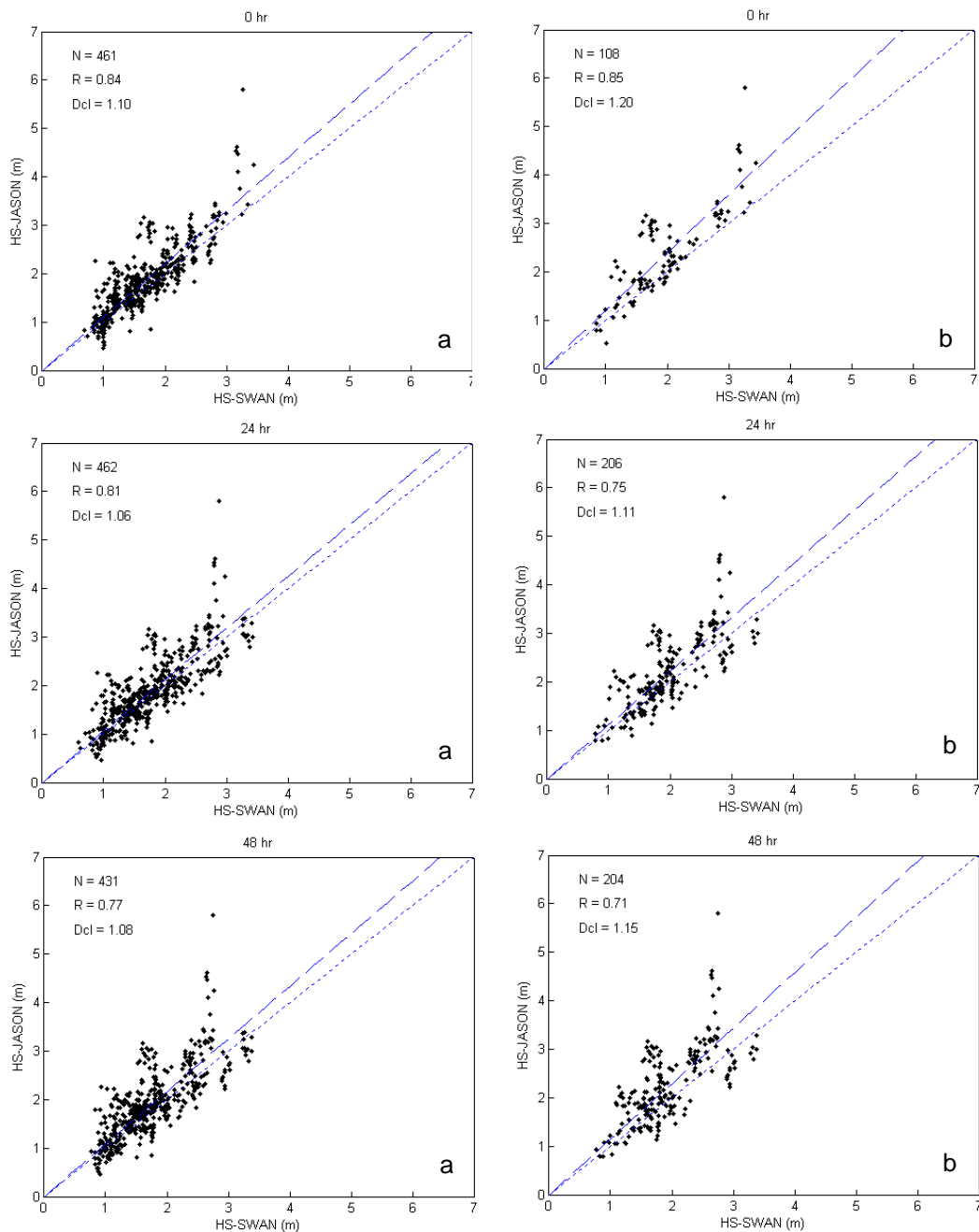


Figura 6 – Gráficos de dispersão da altura significativa (H_s) entre os resultados do modelo (SWAN) e as medições do satélite, para a simulação R1 (a) e para a simulação R2 (b), para os passos temporais correspondentes às 00, 24 e 48 horas de simulação.

O índice de dispersão e o desvio padrão são, respectivamente, de 0.22 e 0.41 m para a análise, aumentando ligeiramente para, 0.23 e 0.44 m para as previsões de 24 horas e 0.25 e 0.49 m para as previsões das 48 horas. Os valores relativos ao desvio padrão são da ordem de meio metro, aumentando quando comparados com observações obtidas com bóias ondógrafo. No entanto, o erro associado às observações provenientes do satélite é da mesma ordem de grandeza. Como se pode verificar na Figura 7, existe uma clara correlação entre o erro nas observações de satélite e o erro entre o modelo e as observações.

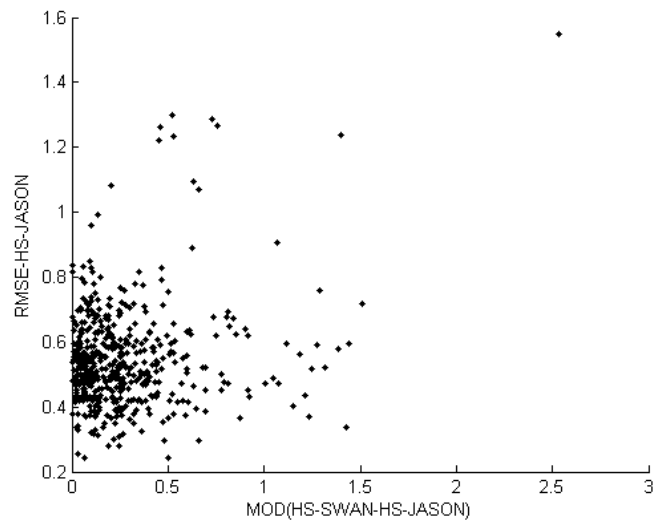


Figura 7 – Relação entre o erro das observações do satélite e a diferença entre o valor obtido pelo modelo e o valor observado.

A comparação entre o campo de ventos resultante do modelo MM5 com as observações de altimetria registadas pelo satélite mostra um acordo razoável para os diversos parâmetros estatísticos (Figura 8). Em particular, o desvio padrão é de 2.34 m/s para a análise e de 2.65 m/s para a previsão a 24 horas, valores da ordem do erro associado ao satélite que se considera ser da ordem dos 2 m/s.

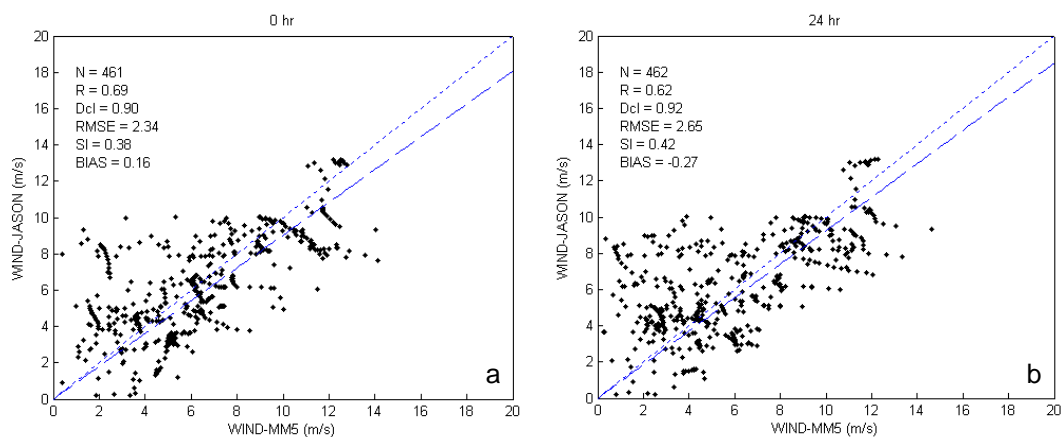


Figura 8 – Gráficos de dispersão para a intensidade do vento (m/s) entre os resultados do modelo MM5 e as observações do satélite, para as 00 horas (a) e 24 horas de simulação (b).

Para analisar o efeito da utilização de um forçamento atmosférico de alta resolução, realizou-se uma simulação (R3) com o campo de ventos de baixa resolução NOGAPS sobre o domínio SWGM1. Na Figura 9 é apresentado o gráfico de dispersão para a altura significativa entre os resultados desta simulação e as observações do satélite. A comparação das simulações R2 e R3 indicia de forma nítida que o campo de ventos de alta resolução promove uma melhoria substancial nos resultados de altura significativa nas situações onde o regime de agitação marítima é dominado por vaga. O declive passa de 1.20 com o forçamento MM5 para 1.37 com o NOGAPS, um aumento de 14% na subestimação de H_s relativamente aos dados

experimentais. O desvio padrão passa de 0.61m para 0.94m, um aumento expressivo tende em conta os valores típicos de altura significativa observados nesta região, e o índice de dispersão de 0.27 para 0.40, respectivamente.

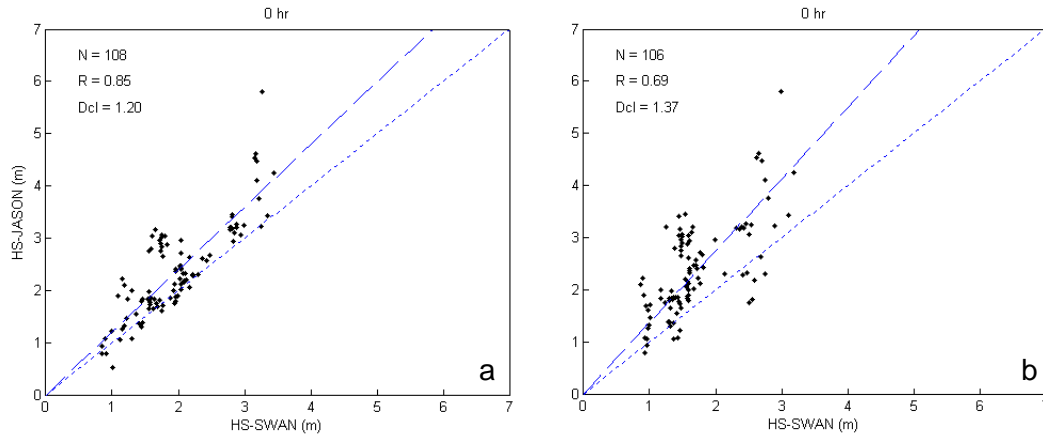


Figura 9 – Gráfico de dispersão para a altura significativa (H_s) entre os resultados do modelo e as observações do satélite, para as simulações R2 (a) e R3 (b).

Os gráficos de dispersão da altura significativa entre o modelo de previsão e as bóias do Funchal e do Caniçal, para o mesmo período da corrida (R1) mas resultantes de uma simulação sobre o domínio de maior resolução SWGM2, são exibidos nas Figuras 10 (a) e (b). Nas tabelas 2 e 3 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos associados à comparação entre o modelo e os dados observados pelas bóias do Funchal e Caniçal para (i) a altura significativa; (ii) período de pico; (iii) período médio e (iv) direcção média.

Tabela 3 – Análise estatística dos resultados do modelo em comparação com os dados da Bóia do Funchal.

	<u>Bias</u>			<u>Índice Dispersão</u>			<u>Desvio Padrão</u>		
	0 hr	24 hr	48 hr	0 hr	24 hr	48 hr	0 hr	24 hr	48 hr
$H_s(m)$	0.02	0.07	0.10	0.26	0.26	0.29	0.19	0.20	0.22
$T_p(s)$	-3.82	-3.98	-4.08	0.51	0.52	0.53	5.37	5.46	5.54
$T_{m02}(s)$	-2.03	-2.34	-2.39	0.43	0.49	0.50	2.21	2.49	2.55
$Dir(^{\circ})$	-	-	-	-	-	-	63.05	59.52	57.07

Tabela 4 – Análise estatística dos resultados do modelo em comparação com os dados da Bóia do Caniçal.

	<u>Bias</u>			<u>Índice Dispersão</u>			<u>Desvio Padrão</u>		
	0 hr	24 hr	48 hr	0 hr	24 hr	48 hr	0 hr	24 hr	48 hr
$H_s(m)$	0.14	0.21	0.23	0.38	0.51	0.56	0.20	0.26	0.28
$T_p(s)$	-4.84	-5.11	-5.23	0.63	0.64	0.65	6.55	6.66	6.80
$T_{m02}(s)$	-2.30	-2.62	-2.64	0.54	0.59	0.59	2.60	2.83	2.86
$Dir(^{\circ})$	-	-	-	-	-	-	51.05	64.93	64.09

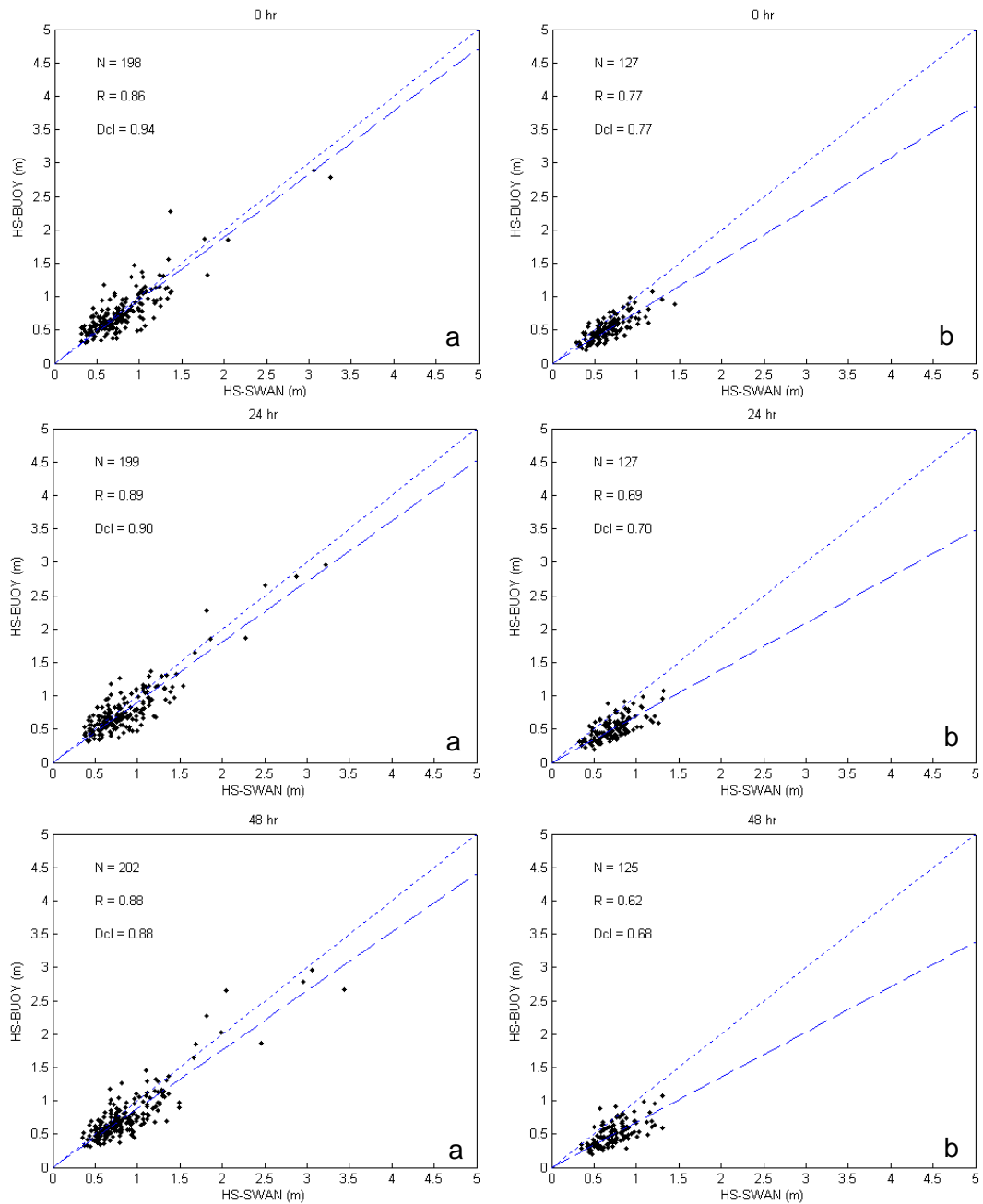


Figura 10 – Gráfico de dispersão para a altura significativa (H_s) entre os resultados do modelo e os dados da bóia do Funchal (a) e do Caniçal (b), para os diferentes passos temporais (00 horas, 24 horas e 48 horas).

Os resultados do modelo associados à altura significativa mostram, uma correlação significativa com os dados observados, especialmente com a bóia do Funchal. No entanto, o modelo sobrestima os resultados das bóias, ao contrário do que acontece com o satélite, sendo esta diferença mais expressiva nos dados provenientes da bóia do Caniçal. Enquanto que no Funchal o modelo sobrestima a altura significativa, que cresce desde 6% a 13% com o tempo de previsão; no Caniçal, este efeito é mais significativo, atingindo diferenças de 26% na análise e 38% para a previsão a 48 horas. O desvio padrão no Funchal é de 0.19 m, 0.20 m e 0.22 m para a análise e previsões a 24 horas e 48 horas, respectivamente. No Caniçal o desvio padrão é inferior a 0.30 m. No entanto, como os valores de altura significativa no Caniçal são invariavelmente inferiores aos valores observados no Funchal, este aumento relativo do desvio

padrão no Caniçal evidencia por um lado a insuficiência do modelo em calcular a dinâmica da agitação marítima junto a bóia e por outro a provável complexidade do sistema nesta área. Importante notar é o facto desta bóia estar localizada muito junto ao molhe do Porto do Caniçal podendo estar submetida à influência do mesmo.

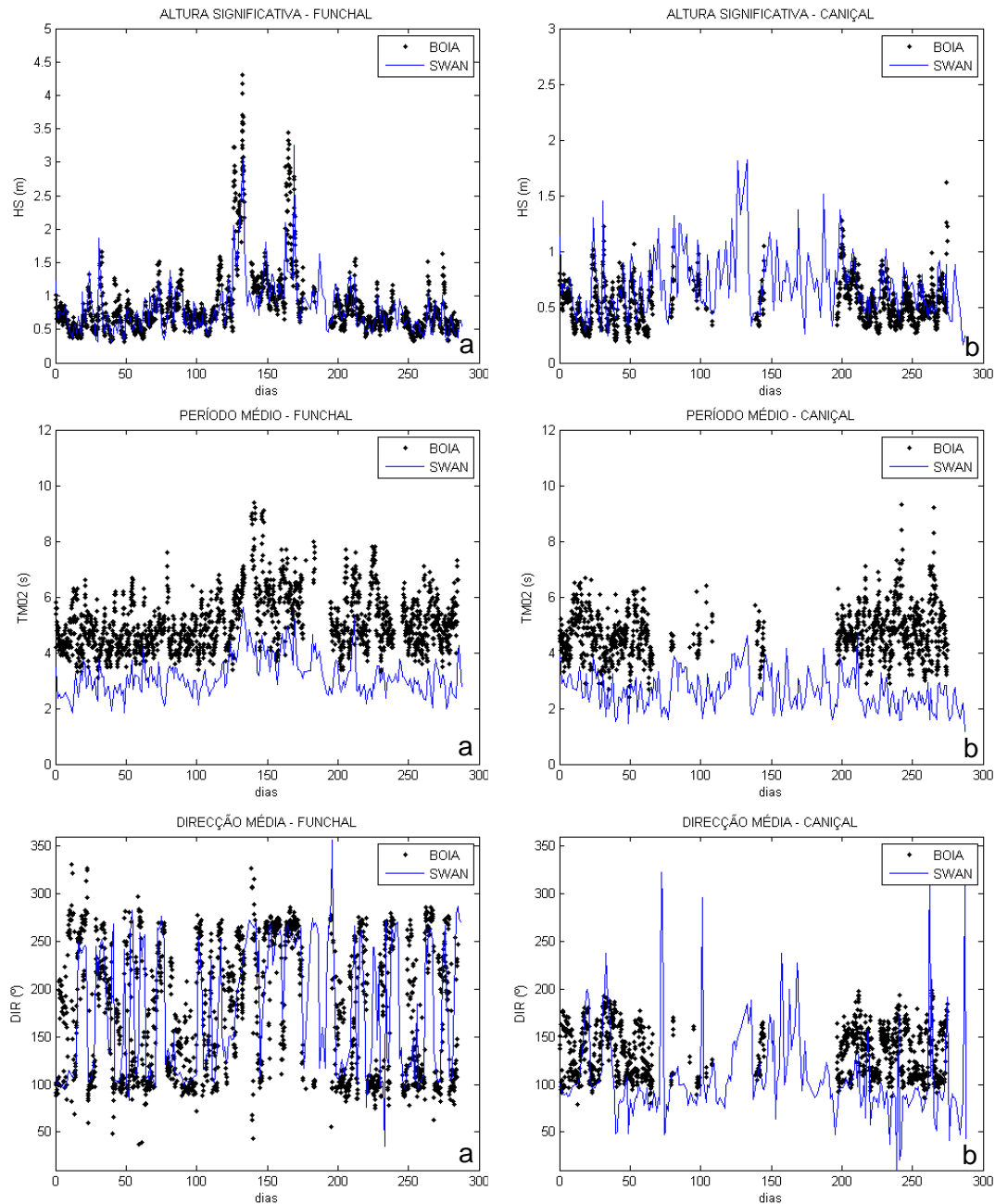


Figura 11 – Comparação entre os resultados do modelo e os dados obtidos através das bóias ondógrafo do Funchal (a) e do Caniçal (b) para a altura significativa (H_s), Período Médio (T_{m02}) e Direcção (Dir).

O desempenho do modelo relativamente aos restantes parâmetros espectrais agrava-se claramente. O período de pico (T_p), é sistematicamente subestimado pelo modelo tendo erros da ordem dos 6 segundos no Funchal e 7 segundos na bóia do Caniçal, o que implica diferenças à volta dos 50% tendo em conta os valores típicos observados. O período médio



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

(T_{m02}) continua a ser subestimado pelo modelo, designadamente um erro entre 2 a 3 segundos para ambas as bóias. A direcção média calculada pelo modelo apresenta erros substanciais em ambas as localizações, com valores para o desvio padrão a rondar os 60 graus. Como se pode ver pela Figura 11 a variabilidade na direcção é considerável, com mudanças rápidas de quadrante, especialmente na região do Funchal pois a bóia do Caniçal também se encontra resguardada para ondas de W.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Com a finalidade de investigar e testar o desempenho do modelo operacional de previsão de agitação marítima implementado no IH na região do Arquipélago da Madeira, foram utilizados os dados de satélite Jason-1 e os dados provenientes das bóias do Funchal e Caniçal durante o período de Agosto de 2008 até Maio de 2009. Estes dados consistem num conjunto de observações complementares para a região em análise; os dados de satélite formam uma razoável cobertura espacial do domínio intermédio SWGM1, enquanto que os dados das bóias apresentam uma óptima cobertura temporal no litoral sul da ilha da Madeira, uma região onde se desenvolvem várias actividades marítimas e portuárias sendo por isso fundamental uma validação da previsão de agitação marítima.

A comparação da altura significativa entre o modelo e os dados de satélite revelam um acordo significativo, com valores de desvio padrão na ordem dos 0.40 m, passando para valores de 0.60 m quando se considera apenas situações de geração local. Verifica-se também uma tendência do modelo em subestimar os dados experimentais na ordem dos 10%, aumentando para 20% quando se considera apenas os eventos caracterizados por regime de vaga. No entanto, quando se compara os resultados do modelo para diferentes forçamentos meteorológicos em eventos dominados por vaga local, verifica-se um decréscimo significativo na qualidade das previsões no caso em que se aplica um campo de ventos de baixa resolução. O desvio padrão aumenta para 0.94 m e é maior a subestimação do modelo. Desta análise conclui-se que com o esquema de previsão implementado, não se alcança o mesmo nível de acuidade para os eventos de vaga local que se obtém quando a agitação marítima no arquipélago é determinada pelas condições fronteira provenientes do modelo oceânico WW3. Este estudo sugere que a resolução do campo de ventos é relevante para melhor descrever a agitação marítima gerada pela circulação atmosférica de meso-escala. No entanto, será necessário ampliar o domínio regional intermédio SWGM1 para aumentar a eficiência do cálculo para esta área.

A comparação entre os resultados do modelo e os dados das bóias localizadas no litoral Sul da ilha da Madeira permitiu chegar a várias conclusões. Primeiro, verifica-se um acordo significativo na previsão da altura significativa, ligeiramente melhor para a região do Funchal. Tal como foi previamente reportado (Rusu *et al.*, 2008b), continua a haver uma diferença sistemática entre as bóias do Funchal e do Caniçal. Ainda em relação à altura significativa, verifica-se que o modelo sobrestima os dados provenientes das bóias, ao contrário do que acontece no litoral continental, especialmente nas bóias de Leixões e Sines, e com os dados de satélite sobre o arquipélago. O facto de neste aspecto se obter em Faro um comportamento próximo àquele que encontramos no Sul da Ilha da Madeira, sugere que esta sobrestimação deverá estar associada à posição resguardada dos pontos de observação relativamente à direcção de incidência dominante. Em segundo lugar, o período de pico e o período médio estão sistematicamente abaixo dos valores observados nas bóias. Este é um problema que se enquadra na formulação utilizada nos termos de fonte e dissipação por "whitecapping" no modelo SWAN, e que resulta da escolha de uma parametrização (Komen) que subestima o período mas melhora os valores de altura significativa relativamente a outra formulação (Janssen) (Rusu *et al.*, 2008a). Encontra-se em preparação um estudo onde se pretende avaliar as diferentes formulações através de um procedimento de calibração e deste modo obter a mais favorável para as regiões de interesse, em particular a plataforma continental Portuguesa e Ilha da Madeira. A direcção, tal como os períodos não tem o mesmo nível de qualidade que a altura significativa. Mas ao contrário do período, o erro na direcção não depende na formulação utilizada pelo SWAN. Nas regiões a sotavento das ilhas,



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

resguardadas à ondulação dominante, a direcção da agitação marítima calculada é muito sensível à direcção nas fronteiras de incidência (Rusu *et al.*, 2008b). Como se percebe, variações de 10° nas condições fronteira pode causar variações de 180 ° nas zonas resguardadas, o que implica que essa deveria ser a resolução do modelo oceânico WW3. No entanto, por motivos operacionais, o modelo WW3 corre com uma resolução de 15° em direcção, valor acima do recomendável e que pode explicar a disparidade que se nota nas comparações envolvendo a direcção.

Nota-se uma ligeira deterioração da qualidade dos resultados com o tempo de previsão. No entanto, é de salientar que mesmo na previsão a 2 dias o erro na altura significativa não ultrapassa os 0.22 m, no caso do Funchal, e 0.28 m no caso do Caniçal.

Neste momento encontra-se em preparação uma nova estrutura informática que aumentará substancialmente a presente capacidade computacional e que irá proporcionar um aumento nas resoluções dos modelos e que, em particular, poderá melhorar as análises comparativas entre as previsões e as observações.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à APRAM pela cedência dos dados das bóias ondógrafo apresentados neste trabalho, bem como à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento no projecto Island Wakes (Projecto FCT - PPCDT/MAR/57265 /2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649–7666.

Dykes, J.D., Hsu, Y.L., Rogers, W.E., 2002. The Development of an Operational SWAN Model for NGLI, *Oceans '02 MTS/IEEE*, 2, 859–866.

Dykes, J.D., Wang, D.W., Book, J.M., 2009. An evaluation of a high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, doi: 10.1016/j.jmarsys. 2009.01.027.

Garcia, P.C.; Balseiro, C.F., Penabad, E., Gómez, B., Pérez-muñuzuri, V., 2005. One year validation of wave forecasting at Galician coast. *Journal of Atmospheric and Ocean Science*, 10(4), 407–419.

Grell, G. A., Dudhia J., D., Stauffer R., 1995. *A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.

Haltiner, G.J. e Williams, R.T. 1980. *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*. Second Edition, John Willey and Sons, New York, USA.

Miranda, P.M.A., Valente M.A., Tomé A., Azevedo E. B., Coelho F., Trigo R., 2006. *Estudo detalhado sobre o Clima do Arquipélago da Madeira, produção de cartografia climática, construção de cenários climáticos futuros e realização de estudos de impacto e medidas de adaptação às alterações climáticas em vários sectores de actividade*. Relatório Final, ICAT, Lisboa, Portugal, 100pp.

Picot, N., Case, K., Desai, S., Vincent, P., 2006. *AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products*, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC).

Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 2. Verification. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7667–7681.

Rogers, W.E., Kaihatu, J.M., Hsu, L., Jensen, R.E., Dykes, J.D., Holland, K.T., 2007. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight, *Coastal Engineering*, 54, 1–15.

Rusu, E.; Pilar, P., Soares, C.G., 2008a. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models. *Coastal Engineering*. 35, 1357–1371

Rusu, L., Pilar, P., Soares, C.G., 2008b. Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*. 55, 906–919.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Tolman, H.L., 1999. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166, 110p.

Tolman, H.L., 2002. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 222, 133p.