

# Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina

Eloi Melo F<sup>o</sup> <sup>1</sup>; Guilherme R. Hammes<sup>2</sup>; Davide Franco<sup>3</sup> &  
<sup>4</sup>Marco A.R. Romeu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>emf@ens.ufsc.br; <sup>2</sup>guihammes@gmail.com; <sup>3</sup>franco@ens.ufsc.br; <sup>4</sup>mar7surf@hotmail.com  
*Laboratório de Hidráulica Marítima / UFSC, - Florianópolis, SC*

**RESUMO:** O modelo WW3 foi usado para reconstituir o estado do mar ao largo da ilha de SC durante o período de funcionamento do *Programa de Informação Costeira* (PIC) da UFSC. Comparações entre as medições do PIC e as modelações do WW3 através de parâmetros estatísticos normalmente utilizados para esse fim permitiram avaliar a qualidade da reconstituição. Foram testadas implementações do modelo WW3 com diferentes configurações de grade, com 2 batimetrias diferentes da plataforma continental (ETOPO e GEBCO) e com diferentes resoluções angulares para o espectro. A configuração com melhores resultados foi a que usou uma grade regional aninhada numa grade global. As batimetrias e a resolução angular não afetaram significativamente os resultados. Uma comparação dessa reconstituição com similares publicadas na literatura indicou que o nível de precisão alcançado nesse trabalho é comparável ao obtido por outros autores.

**PALAVRAS CHAVE:** Ondas oceânicas, modelo de geração de ondas, comparações entre modelos e medições, parâmetros estatísticos.

**ABSTRACT:** WW3 model was used to reconstruct sea state conditions off Santa Catarina island during the period when the *Coastal Information Program* (PIC) of UFSC was operating. Comparisons between PIC measurements and WW3 modeling through statistical parameters normally utilized to that end permitted the evaluation of the quality of the reconstruction. Implementations of WW3 with different grid configurations, with 2 different continental shelf bathymetries (ETOPO and GEBCO) and with different spectral angular resolutions were tested. The configuration which showed the best results was one that used a regional grid nested in a global grid. The bathymetries and the angular resolution did not significantly affect the results. A comparison of this reconstruction with similar ones published in the literature indicated that the level of precision achieved by the present work was comparable to those obtained by other authors.

## 1. INTRODUÇÃO

É fato bem conhecido que o movimento do ar sobre a superfície da água perturba o equilíbrio ali estabelecido pela gravidade produzindo ondas. Apesar da grande complexidade do processo, a pesquisa científica das últimas décadas propiciou grandes avanços no entendimento e, conseqüentemente, na modelação matemática do fenômeno da geração de ondas pelo vento no oceano. De fato, hoje em dia os chamados *modelos de geração de ondas* permitem prever o estado de agitação do mar com precisão satisfatória se o campo de ventos puder ser previsto ou descrito de forma igualmente confiável. O sucesso da previsão de ondas, portanto, depende crucialmente da qualidade do campo de ventos sobre o oceano.

Felizmente, os modelos meteorológicos também experimentaram grandes avanços nas últimas décadas. As previsões de ventos feitas através desses modelos já podem, hoje em dia, ser consideradas satisfatórias para um horizonte com até alguns dias de antecedência, especialmente, no que concerne os chamados ventos de “larga escala” como os que serão usados no presente estudo. Adicionalmente, a existência e a acessibilidade de um vasto banco de dados contendo os ventos calculados pelos modelos meteorológicos para as três últimas décadas abriram a possibilidade de se reconstituir condições pretéritas do estado do mar utilizando os mesmos modelos de geração de ondas usados na previsão.

O presente trabalho apresenta resultados de uma avaliação de desempenho do modelo de geração de ondas *Wave Watch 3* (WW3) feita através da comparação com medições de campo obtidas ao largo da ilha de SC.

## 2. IMPLEMENTAÇÕES DO MODELO WW3

O modelo de geração de ondas usado no presente estudo é o modelo “*Wave Watch 3*”, (WW3) na versão 2.2, utilizado pela NCEP/NOAA americana cujo código, de domínio público, encontra-se acessível via internet. Uma descrição detalhada do modelo, incluindo suas equações e o método numérico utilizado, pode ser encontrada em Tolman [11], aqui nos limitaremos apenas a fazer uma brevíssima descrição das suas principais características.

Admitindo, para simplificar, o caso particular (e de interesse no presente trabalho) de ausência de correntes, o WW3 resolve a equação de conservação da densidade espectral de energia ( $F$ ) em termos do número de onda ( $k$ ) e da direção de onda ( $\theta$ ) como funções que variam lentamente no espaço ( $x$ ) e no tempo ( $t$ ). Essa equação admite implicitamente que as escalas espacial e temporal das ondas em si sejam muito menores que as escalas de variação correspondentes do espectro e das profundidades (e correntes, quando consideradas).

$$\frac{DF(k, \theta, x, t)}{Dt} = S(k, \theta, x, t) = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (1)$$

O lado esquerdo da equação representa mudanças em  $F$  devidas à propagação da energia de componentes espectrais individuais que viajam com velocidade de grupo obtida da relação de dispersão linear. O lado direito representa uma combinação de fontes e sumidouros (não conservativos) devidos ao input pelo vento ( $S_{in}$ ), a dissipação ( $S_{ds}$ ) causada pela arrebentação em águas profundas (“White-capping”) e pelo atrito com o fundo e ainda a transferência de energia (conservativa) entre componentes espectrais devidas a efeitos não-lineares ( $S_{nl}$ ).

Os campos de vento utilizados no presente estudo foram também obtidos diretamente do banco de dados de domínio público da NOAA via internet. Em lugar do vento previsto, utilizou-se o chamado vento “reanalizado” o qual pode ser entendido como uma “previsão aperfeiçoada”, corrigida a partir de dados medidos em campo. O vento reanalizado é mais preciso e confiável que o vento prognosticado. Obviamente, o uso de ventos reanalizados só é possível quando se deseja fazer uma reconstituição de eventos pretéritos como neste caso. O campo de ventos é fornecido a cada 3 horas com resolução espacial de  $1.00^\circ$  de latitude x  $1.25^\circ$  de longitude.

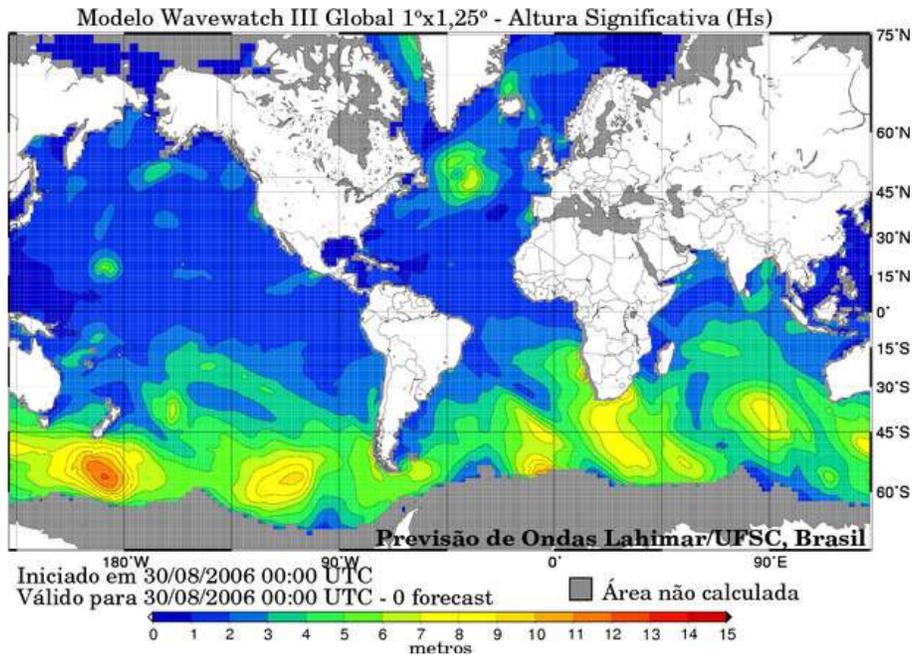
As implementações do WW3 realizadas podem ser organizadas segundo:

- a) Configuração de grades de cálculo
- b) Tipo de batimetria
- c) Discretização direcional do espectro

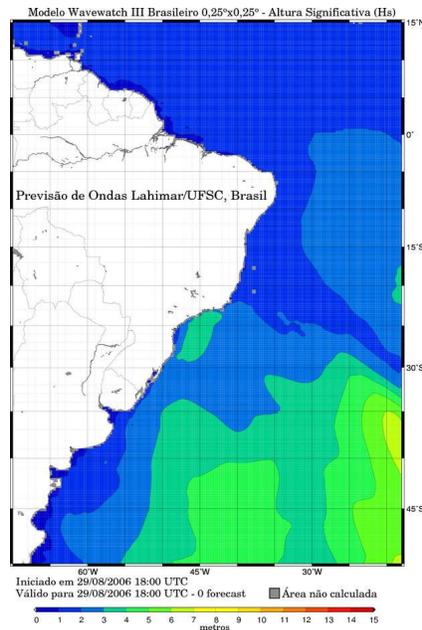
## 2.1 Configuração de Grades

Quanto a configuração de grades, o modelo WW3 foi executado de duas maneiras:

- (i) Em duas grades numéricas aninhadas:
  - Grade “global” usando o campos de ventos globais para fazer previsões de onda igualmente globais, (i.e., em *todos* os oceanos da Terra) com resolução de  $1.00^\circ \times 1.25^\circ$  (ver fig. 1).
  - Grade “regional” focalizando a parte *E* do oceano Atlântico Sul com resolução de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  e usando condições de contorno extraídas da grade global (Ver fig. 2)



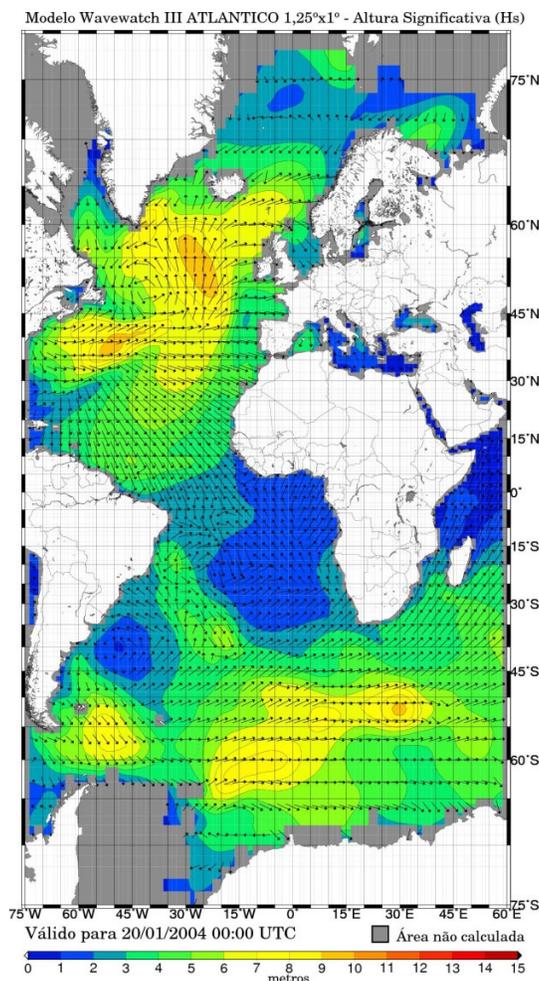
**Figura 1** - Exemplo de saída ( $H_s$ ) do modelo WW3 para a grade “global”.



**Figura 2** – Idem para a grade “regional” do Atlântico Sul.

O uso da grade global visa garantir que ondas geradas *fora* da região coberta pela grade regional possam ser incluídas na previsão. Dessa forma, a rodada do modelo na grade global fornece as condições de mar no contorno da grade regional do Atlântico Sul que são, portanto, incorporadas por esta nos cálculos.

- (ii) Grade “atlântica” – cobrindo todo o Oceano Atlântico (i.e. Norte e Sul) mais uma parte do Oceano Índico, indo do sul da África até o leste da ilha de Madagascar (ver fig. 3) com resolução idêntica à da grade global, ou seja  $1.00^\circ \times 1.25^\circ$



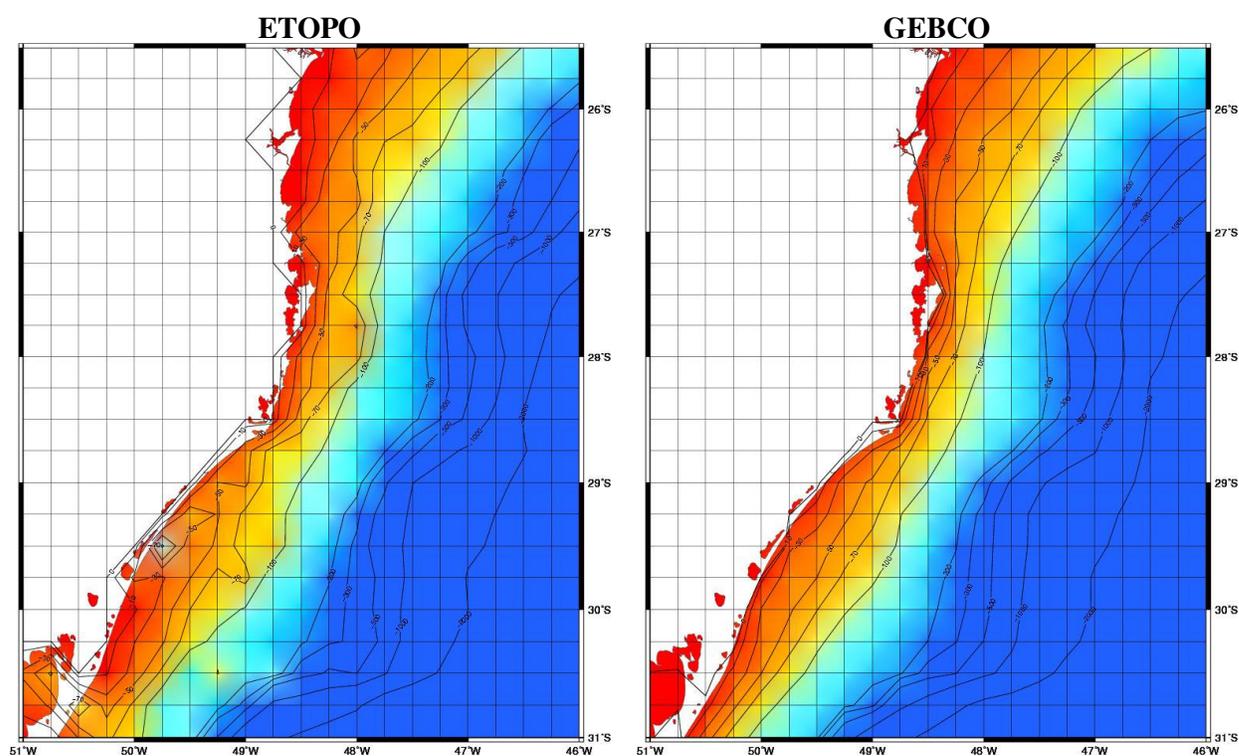
**Figura 3** - Exemplo de saída (Hs) do modelo WW3 para a grade “atlântica”.

A implementação com essa configuração objetivou aliviar o esforço computacional restringindo o cálculo apenas às regiões oceânicas que efetivamente contribuem para o clima de ondas na costa brasileira, em geral, e na costa catarinense, em particular. A inclusão de parte do oceano Índico na grade de cálculo foi inspirada pelo trabalho de Alves [1] que estudou a contribuição de diferentes regiões oceânicas globais na geração de ondulações e no trabalho de Souto [10] que identificou, a partir de medições do PIC, a chegada à costa de SC de ondulações longínquas geradas nessa área do Índico. Quanto a inclusão do Atlântico Norte, o motivo foi capturar as ondulações lá geradas e que sabidamente (Melo et al [8] ) atingem a costa norte brasileira.

## 2.2. Batimetrias

O modelo de geração de ondas WW3 requer que se prescreva o relevo do fundo oceânico para sua implementação. Essa necessidade advém da possibilidade das ondas serem refratadas pelo fundo, efeito este incluído na modelagem feita com o WW3. Como as ondas geradas pelo vento têm comprimentos na casa de algumas centenas de metros (ordem de grandeza), os efeitos de refração ficam restritos a profundidades (tipicamente) menores que 150 metros. Assim sendo, no que concerne o presente estudo, a região de interesse para especificação do relevo submarino restringe-se à região da plataforma continental.

Numa escala global, as duas batimetrias mais conhecidas para especificação do relêvo submarino são a ETOPO e a GEBCO, ambas de domínio público e que encontram-se disponíveis via internet. A título de ilustração, a figura 4 mostra o aspecto dessas batimetrias para a plataforma continental do Estado de Santa Catarina.



**Figura 4** – Batimetrias ETOPO (esq.) e GEBCO (dir.) para a plataforma continental do Estado de Santa Catarina

Uma simples inspeção visual da figura mostra que, na parte externa da plataforma continental, as duas batimetrias se mostram bastante similares. Na parte interna da plataforma, a batimetria ETOPO tende a ser um pouco mais irregular, enquanto a GEBCO mostra contornos mais uniformes. Entretanto, não devemos esquecer que o modelo WW3, na sua resolução mais refinada, “enxerga” o relevo do fundo apenas com pontos a cada  $0.25^\circ$  (ou seja, um ponto de batimetria a cada 30 km, aproximadamente) que correspondem aos pontos de grade das figuras, ou seja, feições com escalas menores que cerca de 30 km não participam da refração calculada pelo modelo.

Portanto, no que concerne a batimetria, foram feitas implementações do modelo WW3 com as duas batimetrias descritas acima

### 2.3 Discretização direcional do Espectro

O modelo WW3 foi sempre executado com todos os parâmetros no modo “default” e com o espectro discretizado em 25 componentes de frequência indo de  $0.041$  a  $0.42$  Hz. Entretanto, foram feitas implementações com dois esquemas de discretização direcional do espectro, a saber:

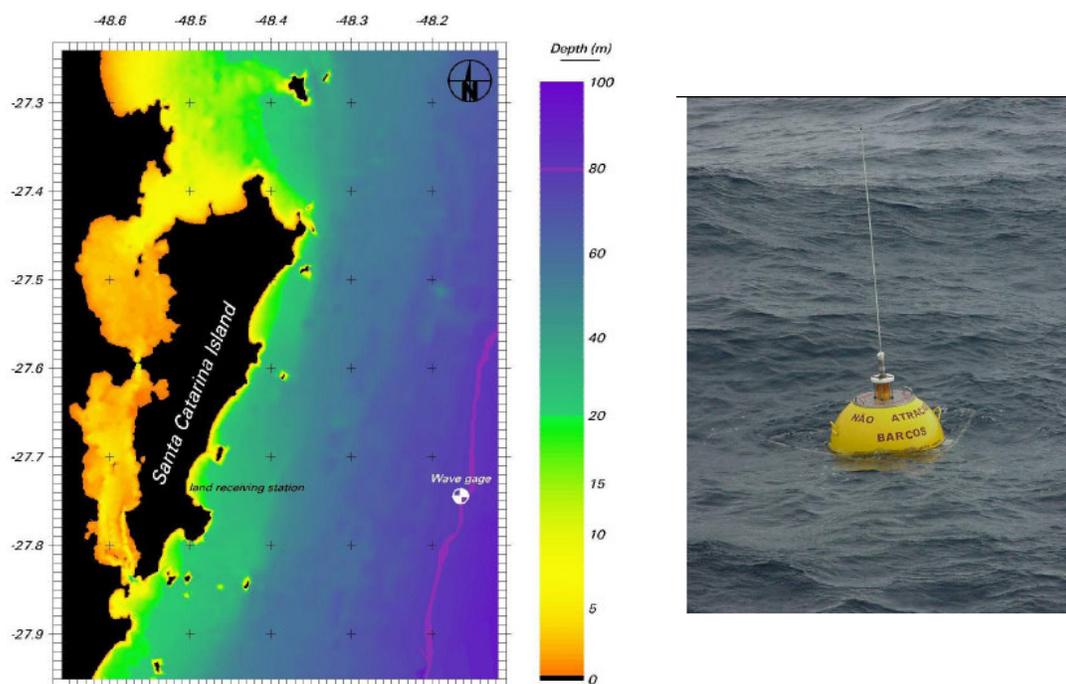
- (i) Espectro discretizado em 24 setores direcionais, correspondendo a um  $\Delta\theta$  de  $15^\circ$
- (ii) Espectro discretizado em 72 setores direcionais, correspondendo a um  $\Delta\theta$  de  $5^\circ$

## 3. COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES DE CAMPO

O modelo com as implementações descritas acima foi usado para reconstituir as condições do mar ao largo da ilha de SC durante o período de medições coberto pelo *Programa de Informação Costeira* (PIC), que foi de 2002 a 2005, possibilitando, assim, comparar resultados modelados com dados de campo conforme mostrado na sequência desse artigo.

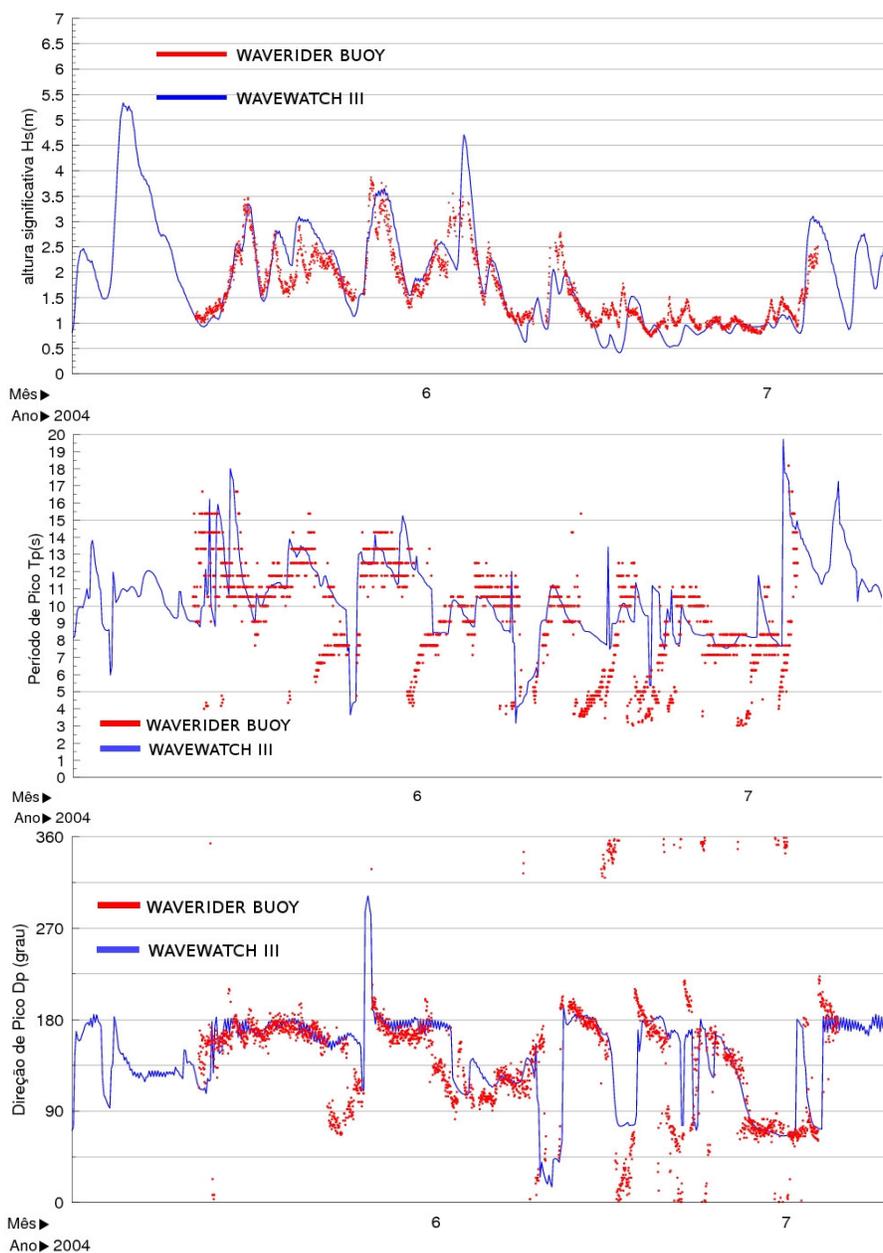
### 3.1 Medições do Programa de Informação Costeira da UFSC

O Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC conduziu de 2002 a 2005 o *Programa de Informação Costeira* (PIC), uma abrangente campanha de monitoramento de ondas ao largo da costa de Santa Catarina com medições realizadas por um ondógrafo direcional “waverider” fundeado a cerca de  $35$  km da costa numa profundidade de  $80$  m (ver figura 5). Informações sobre o PIC podem ser encontradas em Melo [7] e Melo et al [9].



**Figura 5** - Local de fundeio (esquerda) do ondógrafo da UFSC (direita) ao largo da ilha de Santa Catarina

A título de *ilustração*, a figura 6 mostra, para um período de medições de cerca de 2 meses do ano de 2004, séries temporais dos 3 parâmetros básicos da agitação marítima: altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção de pico ( $D_p$ ), medidos pela bóia e obtidos da reconstituição feita pelo WW3 para um ponto próximo ao local de fundeio do ondógrafo. A implementação do WW3 utilizada corresponde à grade regional aninhada na global com batimetria ETOPO e resolução direcional com 24 direções.



**Figura 6** – Séries temporais de  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$  medidas (vermelho) e modeladas (azul)

Uma rápida inspeção visual dessas figuras mostra que, em geral, o modelo conseguiu reproduzir razoavelmente bem os valores (instantâneos) medidos. Entretanto, fica também clara a necessidade de se estabelecer uma metodologia objetiva e bem fundamentada estatisticamente para avaliar *quantitativamente* a qualidade da modelação. A próxima seção aborda essa questão.

### 3.2 Parâmetros estatísticos usados na comparação “Modelo x Medições”

A *quantificação* da qualidade do ajuste entre resultados de modelos e medições requer o uso de parâmetros estatísticos específicos. O presente trabalho utiliza o conjunto de parâmetros mais usados na literatura para essa finalidade (ver, por ex., Bidlot et al [3], Lalbeharry [6] e Janssen et al [5]) os quais são definidos a seguir.

Sendo,  $m$  = resultados do modelo,  $o$  = medições (ou observações) e  $N$  = número de pontos, tem-se:

(i)– Valor Médio ( $\bar{o}$ ) e Desvio Padrão ( $s_o$ ) das medições;

$$\bar{o} = \frac{\sum_{i=1}^N o_i}{N} \quad (2)$$

$$s_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}{N}} \quad (3)$$

(ii) Valor Médio ( $\bar{m}$ ) e Desvio Padrão ( $s_m$ ) do modelo;

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{N} \quad (4)$$

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2}{N}} \quad (5)$$

Além desses parâmetros, é útil incluir os **valores máximos** tanto das medições quanto da modelação

(iii) **Viés (V)** (“*Bias*”) – Definido como o valor médio da diferença entre resultados do modelo e medições

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)}{N} \quad (6)$$

Esse parâmetro mede o desvio médio entre os resultados do modelo e as medições. Se positivo, o modelo tende a superavaliar medições, se negativo, o modelo tende a subavaliar as medições. É ainda interessante calcular o **Viés Relativo** dado por  $V/\bar{o}$ , que vai apresentar o viés como uma fração do valor médio observado.

(iv) **Erro Médio Quadrático (RMSE)** (“*Root Mean Square Error*”) – definido como a raiz quadrada do valor médio do quadrado da diferença entre modelo e medições

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}{N}} \quad (7)$$

Esse parâmetro dá idéia da magnitude do módulo (i.e., sem levar em conta o sinal) do erro do modelo.

(v) **Índice de Espalhamento (SI)** (“*Scatter Index*”) – Definido como a razão entre o erro médio quadrático (RMSE) e o valor médio das medições ( $\bar{o}$ )

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

Esse parâmetro mede, em última análise, o grau de confiança que se pode ter nos resultados do modelo.

(vi) **Inclinação Quadrática Média (SS)** (“Symmetric Slope”) – Definida como a raiz quadrada da razão entre a variância do modelo e a variância das medições

$$SS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N m_i^2}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}} \quad (9)$$

Esse parâmetro, também conhecido como declividade de regressão não tendenciosa, é o resultado de uma análise de regressão na qual nenhum dos dois conjuntos de dados (i.e. nem o modelo, nem as medições) é considerado como “perfeito”, mas que contribuem igualmente para o erro. Numa situação ideal,  $S=I$ , se  $SS>I$  o modelo tende a super-avaliar valores grandes (ou subavaliar valores pequenos) observados, enquanto o oposto ocorre quando  $SS<I$ .

#### 4 – ILUSTRAÇÃO DA METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO

Um aspecto que chamou a atenção na literatura consultada foi o fato de que a comparação *modelo x medições* tem sido feita apenas em termos dos parâmetros  $H_s$  e  $T_p$  (ou, as vezes,  $T_{medio}$ ); o parâmetro *direção* ( $D_p$  ou  $D_{media}$ ), curiosamente, *não* tem sido considerado. O motivo para tal não está claro. É possível que em alguns casos as medições não contemplem a direção das ondas. Entretanto, a importância da direção das ondas justificaria um esforço no sentido de se incluir esse parâmetro na avaliação de precisão dos modelos. O presente artigo, todavia, vai seguir o que é feito na literatura e focar a comparação nos parâmetros  $H_s$  e  $T_p$ .

Antes de tratar da avaliação de desempenho das diferentes implementações feitas, apresenta-se nessa seção saídas completas de resultados para a rodada do modelo que originou as séries temporais mostrada na figura 6, observando, porém, que nessa análise todo o período de medições foi considerado (2002 a 2005). Como já mencionado, essa implementação tem a seguinte configuração: grade regional com resolução de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  aninhada na grade global com resolução de  $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ , com 24 direções. O ponto de saída escolhido foi o “Floripa2” ( $28^\circ S$ ,  $48.25^\circ W$ ) o qual encontra-se na região onde o ondógrafo da UFSC ficou fundeado. O modelo foi rodado usando as batimetrias ETOPO e GEBCO.

##### 4.1 Batimetria ETOPO

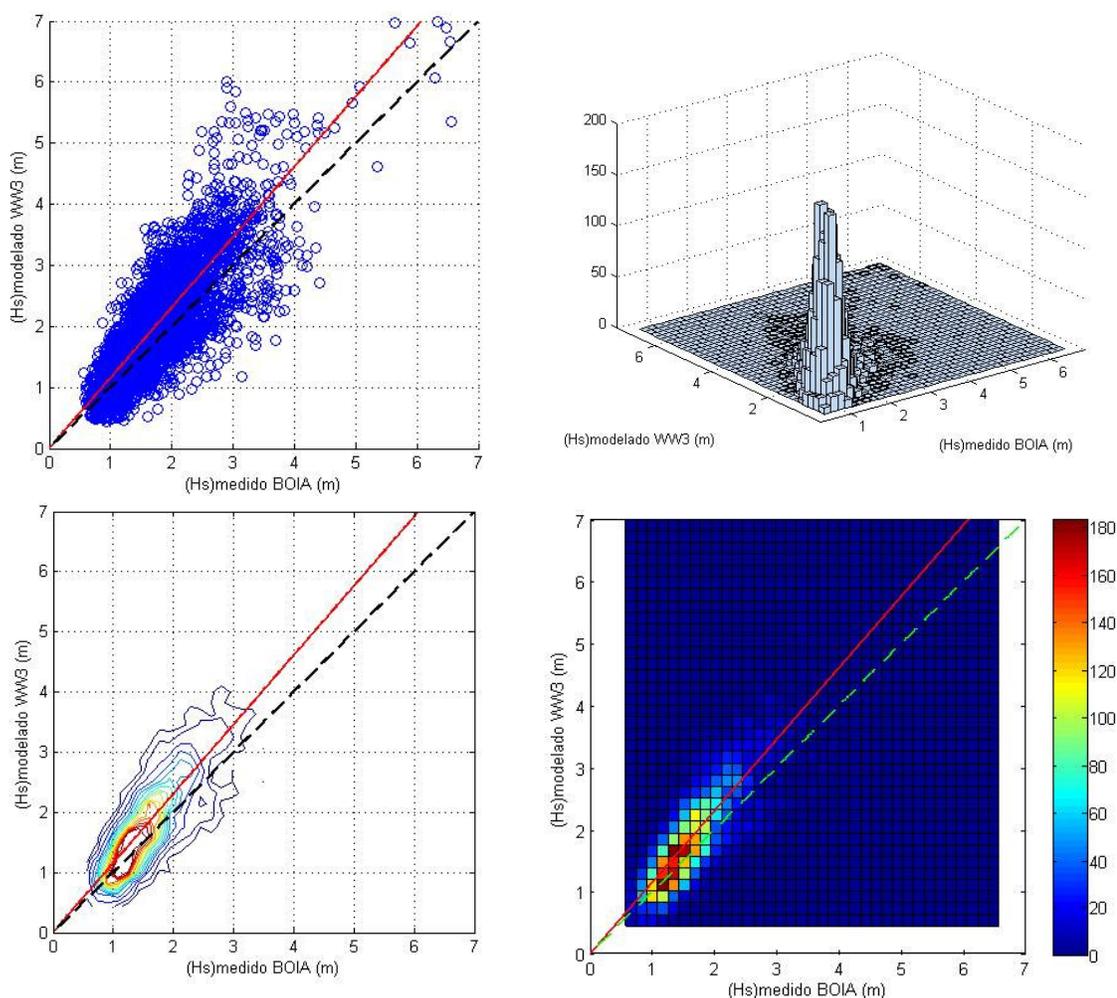
Os valores dos parâmetros estatísticos descritos acima estão mostrados na tabela 1 abaixo.

**Tabela 1** – Parâmetros estatísticos para implementação com grade aninhada, espectro com 24 direções e batimetria ETOPO. Ponto de saída “Floripa2” ( $28^\circ S$ ,  $48.25^\circ W$ )

<i>Para- metro</i>	<i>No. Pts.</i>	$\bar{\sigma}$	$s_o$	$\sigma_{max}$	$\bar{m}$	$s_m$	$m_{max}$	$V$	$\frac{V}{\bar{\sigma}}$	<i>RMSE</i>	<i>SI</i>	<i>SS</i>
<b>Hs</b>	<b>6033</b>	<b>1.699</b> (m)	<b>0.616</b> (m)	<b>6.830</b> (m)	<b>1.916</b> (m)	<b>0.807</b> (m)	<b>7.111</b> (m)	<b>0.217</b> (m)	<b>12.8</b> %	<b>0.512</b> (m)	<b>0.301</b>	<b>1.150</b>
<b>Tp</b>	<b>6033</b>	<b>9.035</b> (s)	<b>2.503</b> (s)	<b>16.67</b> (s)	<b>9.859</b> (s)	<b>2.233</b> (s)	<b>20.24</b> (s)	<b>0.825</b> (s)	<b>9.1%</b>	<b>2.636</b> (s)	<b>0.292</b>	<b>1.078</b>

Uma percepção *visual* do ajuste do modelo para  $H_s$  e  $T_p$  pode ser conseguida através dos gráficos mostrados na figura 7. O primeiro gráfico a esquerda no alto, nada mais é do que o conhecido *diagrama de dispersão* (“scatter plot”) entre medições (eixo-x) e modelo (eixo-y). Cada ponto nesse diagrama corresponde a  $[(H_s)_{obs}, (H_s)_{mod}]$  e a reta a  $45^\circ$  (tracejada) marca o que seria um ajuste “perfeito”. A reta contínua foi traçada com a inclinação quadrática média ( $SS$ ) passando pela origem. Esse tipo de diagrama perde um pouco sua utilidade quando o número de pontos é muito grande pois, nesse caso, não há como saber quantos pontos estão numa certa área do plano uma vez que a sobreposição de pontos origina um “borrão” no gráfico. Assim, com muitos pontos, é mais conveniente usar o *histograma de densidade de ocorrências*, (canto inferior esquerdo) o qual mostra o número de pontos presentes numa certa “área” do plano  $[(H_s)_{obs}, (H_s)_{mod}]$ . As outras duas figuras na coluna da direita são diferentes maneiras de se apresentar esse mesmo histograma de densidade (ver legenda). As retas traçadas são idênticas às do “scatter plot”.

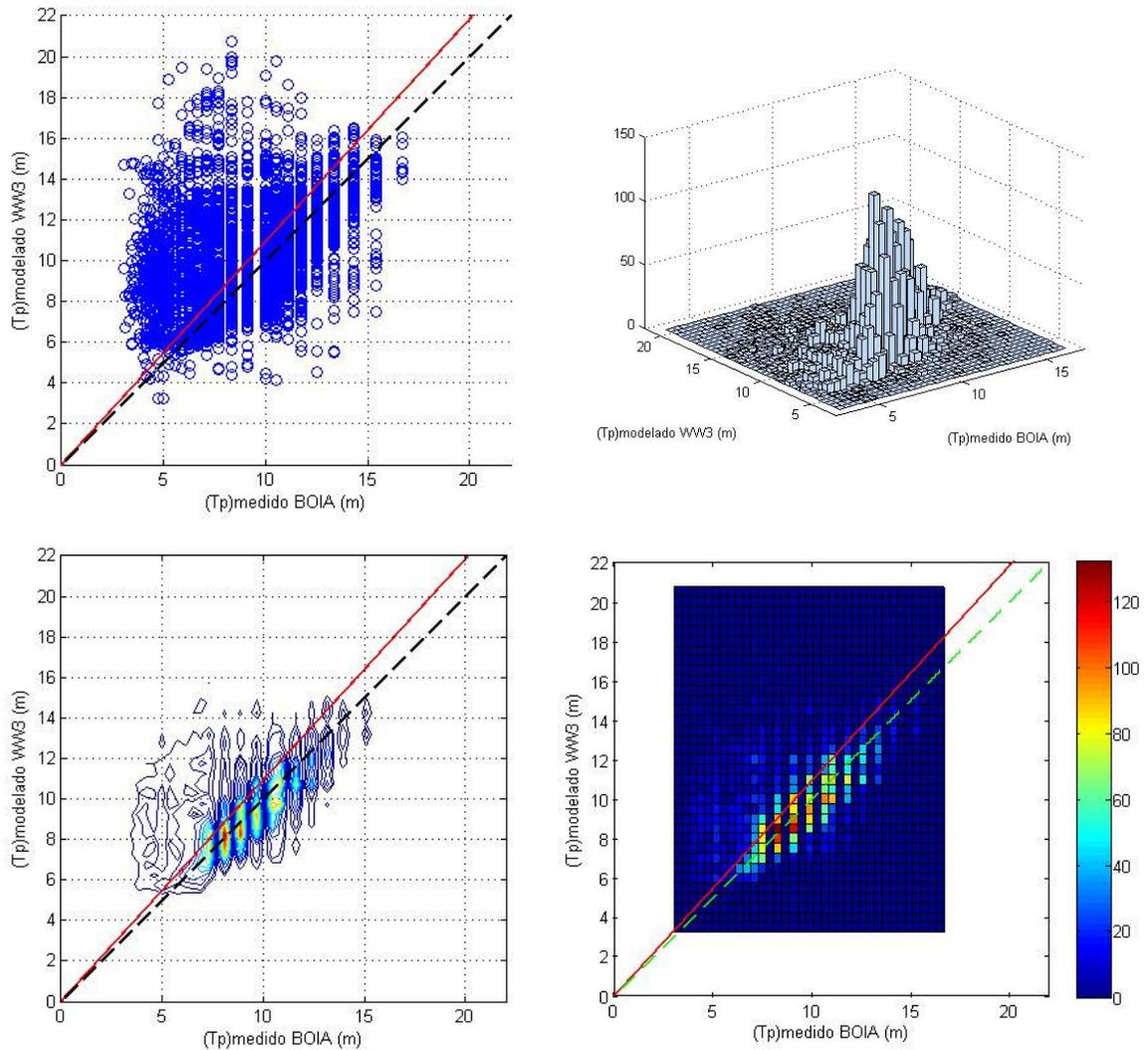
**Parâmetro:  $H_s$  - Implementação: grade aninhada, batimetria ETOPO com 24 direções**



**Figura 7** – Sup. esq.: Diagrama de dispersão (“Scatter Plot”); inf. esq.: Histograma de densidade de ocorrências; sup. dir.: Vista em perspectiva do Histograma de densidade, inf. dir.: Mapa de densidade de ocorrências. Reta contínua: traçada com inclinação dada pela inclinação quadrática média ( $SS$ ) passando pela origem. Reta pontilhada: traçada a  $45^\circ$  passando pela origem (apenas para referência).

Saídas gráficas semelhantes para o parâmetro *período de pico* ( $T_p$ ) são mostradas na figura 8.

**Parâmetro:  $T_p$  - Implementação: grade aninhada, batimetria ETOPO com 24 direções**



**Figura 8** – (ver legenda da figura 7)

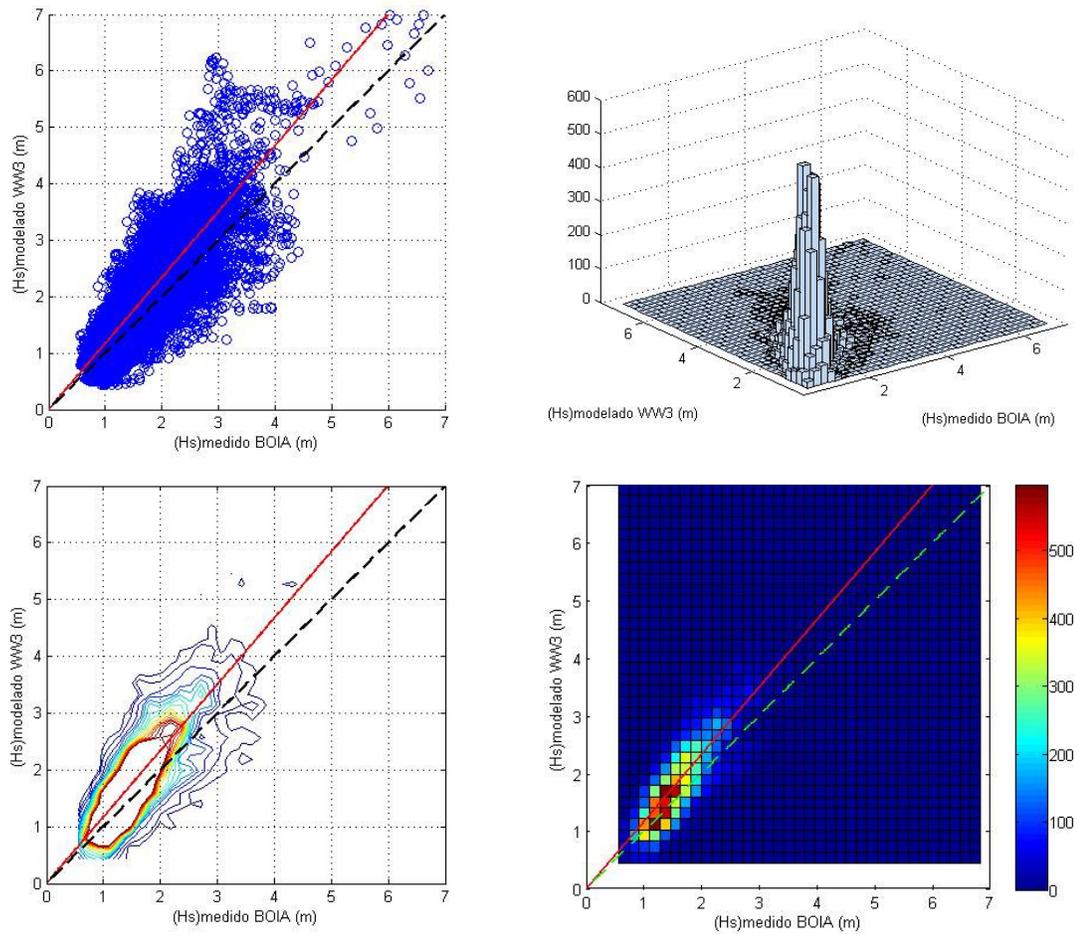
## 4.2 Batimetria GEBCO

Os valores dos parâmetros estatísticos para o modelo com batimetria GEBCO estão mostrados na tabela 2 e os diagramas correspondentes nas figuras 9 e 10 a seguir.

**Tabela 2** – Parâmetros estatísticos para implementação com grade aninhada, espectro com 24 direções e batimetria GEBCO. Ponto de saída “Floripa2” (28° S, 48.25° W)

<i>Para- metro</i>	<i>No. Pts.</i>	$\bar{o}$	$s_o$	$o_{max}$	$\bar{m}$	$s_m$	$m_{max}$	$V$	$\frac{V}{\bar{o}}$	<i>RMSE</i>	<i>SI</i>	<i>SS</i>
<b>Hs</b>	<b>6033</b>	<b>1.699</b> (m)	<b>0.616</b> (m)	<b>6.830</b> (m)	<b>1.941</b> (m)	<b>0.823</b> (m)	<b>7.203</b> (m)	<b>0.242</b> (m)	<b>14.3</b> %	<b>0.533</b> (m)	<b>0.314</b>	<b>1.167</b>
<b>Tp</b>	<b>6033</b>	<b>9.035</b> (s)	<b>2.503</b> (s)	<b>16.67</b> (s)	<b>9.895</b> (s)	<b>2.215</b> (s)	<b>20.16</b> (s)	<b>0.862</b> (s)	<b>9.5%</b>	<b>2.647</b> (s)	<b>0.293</b>	<b>1.082</b>

**Parâmetro: Hs** - Implementação: grade aninhada, batimetria GEBCO com 24 direções



**Figura 9** – (ver legenda da figura 7)

Parâmetro: **T<sub>p</sub>** - Implementação: grade aninhada, batimetria GEBCO com 24 direções

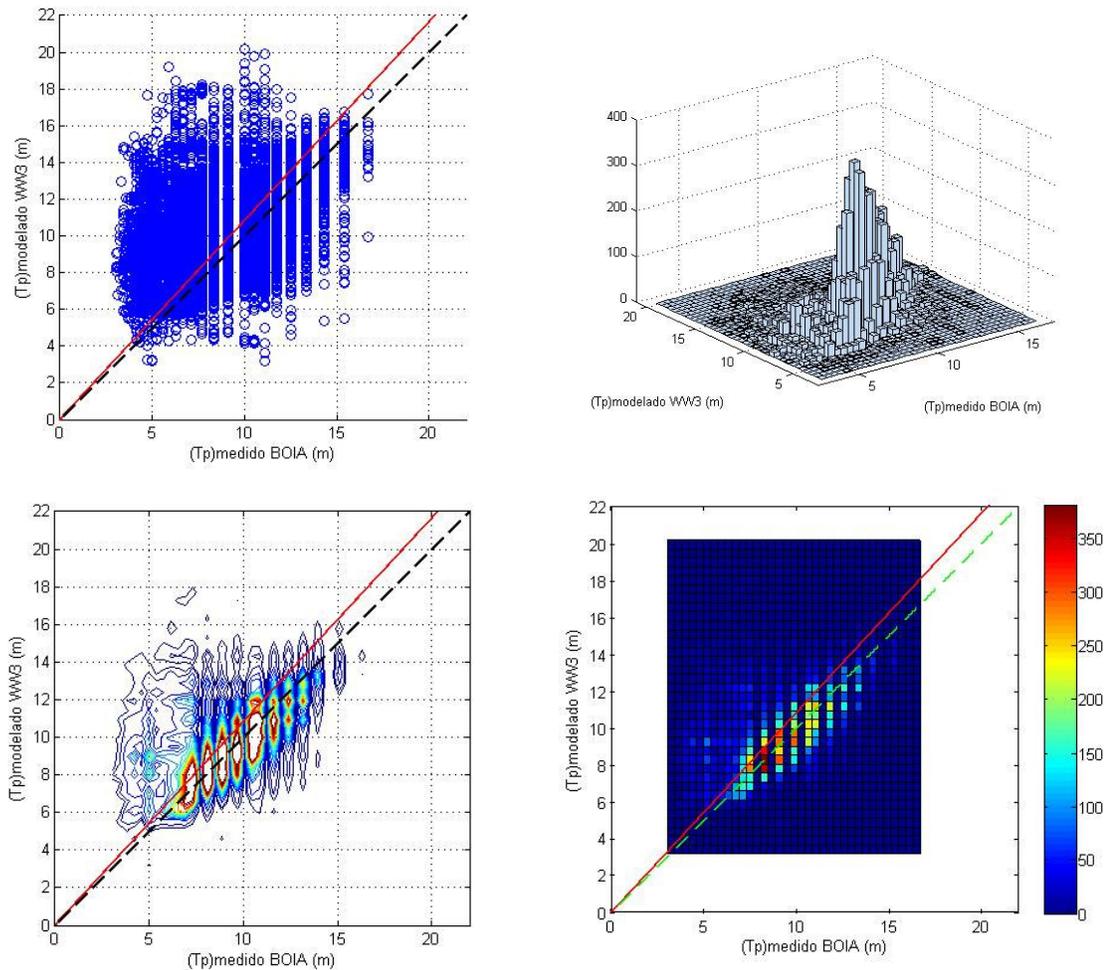


Figura 10 – (ver legenda da figura 7)

## 5. COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Essa seção contém uma série de testes realizados com as diferentes implementações citadas. As comparações foram organizadas em 3 grupos de acordo com o indicado na seção 2 e são mostradas de forma condensada nas tabelas 3, 4 e 5.

Uma comparação dos testes da tabela 3 mostrou que a troca de batimetrias não trouxe alterações significativas aos resultados estatísticos. Isso ocorreu, provavelmente, pelo fato do ponto de saída do modelo estar em cerca de 70 m de profundidade, portanto, no final da parte externa da plataforma continental. Portanto, os testes indicam que, para profundidades intermediárias da plataforma continental, tanto a ETOPO quanto a GEBCO dão resultados similares. Como para profundidades menores (plataforma interna), onde as batimetrias mostram diferenças, o próprio uso do modelo WW3 é pouco recomendado, é possível concluir que é indiferente o uso de uma ou outra batimetria em implementações do WW3 nesse trecho da costa brasileira.

**Tabela 3 - Testes com batimetrias ETOPO e GEBCO**

TESTE #	I		II		III		IV	
Tipo de Grade	Regional aninhada na global							
Resolução da Grade	Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)		Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)		Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)		Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)	
Número de Direções	24 ( $\Delta\theta = 15^\circ$ )							
Ponto de Saída	Floripa2 (28.00°S; 48.25W)		Floripa2 (28.00°S; 48.25W)		FL061 (27.75°S; 48.25W)		FL061 (27.75°S; 48.25W)	
Batimetria	ETOPO		GEBCO		ETOPO		GEBCO	
Parametro	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
$\bar{o}$	1.699 m	9.035 s						
$s_o$	0.616 m	2.503 s						
$o_{max}$	6.830 m	16.67 s						
$\bar{m}$	1.916 m	9.859 s	1.941 m	9.985 s	1.847 m	9.912 s	1.852 m	9.918 s
$s_m$	0.807 m	2.233 s	0.823 m	2.215 s	0.785 m	2.235 s	0.787 m	2.245 s
$m_{max}$	7.111 m	20.24 s	7.203 m	20.16 s	6.871 m	20.16 s	6.822 m	20.45 s
$V$	0.217 m	0.825 s	0.242 m	0.862 s	0.148 m	0.878 m	0.153 m	0.884 s
$V/\bar{o}$	12.8%	9.1%	14.3%	9.5%	8.7%	9.7%	9.0%	9.8%
RMSE	0.512 m	2.636 s	0.533 m	2.647 s	0.492 m	2.674 s	0.495 m	2.673 s
SI	0.301	0.292	0.314	0.293	0.290	0.296	0.291	0.296
SS	1.150	1.078	1.167	1.082	1.111	1.084	1.114	1.085

(\*) Número de pontos de dados = 6033

Quanto aos valores dos parâmetros encontrados, os resultados para o *Viés* e para a *Inclinação Média Quadrática* (grifados em verde), mostram que o modelo tende a *superestimar* as observações tanto de *Hs* quanto de *Tp*. Os melhores resultados ocorreram para o ponto *FL061* onde o modelo superestimou as medições de *Hs* e *Tp* em cerca de 10%. Ressalta-se que os resultados para o período de pico superaram as expectativas iniciais pois sabe-se que a estimativa desse parâmetro em locais com abundância de mares bi (ou multi) modais, como é o caso da costa S/SE brasileira, pode apresentar dificuldades.

A dispersão de resultados do modelo, medida pelo *Índice de Espalhamento* atingiu valores na casa de 30% para ambos os parâmetros. Entretanto, uma parte dessa dispersão *pode* estar relacionada com o fato de que foram usados valores “instantâneos” dos dados para a comparação com resultados do modelo. Diversos autores (Bidlot et al [3], Tolman et al [12], Janssen et al [5]) alertam para o fato de que, para comparações com modelos, é necessário tratar as medições calculando valores médios em janelas de 4 a 6 horas. Segundo esses autores, esse procedimento compatibiliza o passo de tempo do modelo com as medições

tornando a comparação *modelo x medições* mais realista. A importância dessa promediação dos dados será investigada em trabalho futuro.

**Tabela 4** - Testes com diferentes resoluções angulares do espectro direcional

TESTE #	V		VI	
Tipo de Grade	Regional aninhada na global		Regional aninhada na global	
Resolução da Grade	Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)		Glob: 1.00° x 1.25° Reg.: 0.25° x 0.25° (lat x lon)	
Número de Direções	72 ( $\Delta\theta = 5^\circ$ )		72 ( $\Delta\theta = 5^\circ$ )	
Ponto de Saída	Floripa2 (28.00°S; 48.25°W)		FL061 (27.75°S; 48.25°W)	
Batimetria	ETOPO		ETOPO	
Parametro	Hs	Tp	Hs	Tp
$\bar{o}$	1.699 m	9.035 s	1.699 m	9.035 s
$s_o$	0.616 m	2.503 s	0.616 m	2.503 s
$O_{max}$	6.830 m	16.67 s	6.830 m	16.67 s
$\bar{m}$	1.942 m	9.985 s	1.865 m	9.951 s
$s_m$	0.821 m	2.215 s	0.794 m	2.292 s
$m_{max}$	7.107 m	20.16 s	6.835 s	20.66 s
$V$	0.242 m	0.862 s	0.166 s	0.916 s
$V/\bar{o}$	14.3%	9.5%	9.8%	10.1%
RMSE	0.533 m	2.647 s	0.506 m	2.730 s
SI	0.314	0.293	0.298	0.302
SS	1.167	1.082	1.122	1.089

Comparações entre os testes I (tab. 3) e V (tab. 4) e III (tab. 3) e VI (tab. 4) indicam que o refinamento da resolução direcional do espectro teve reflexo insignificante na precisão do modelo, pelo menos no que concerne os parâmetros  $H_s$  e  $T_p$ . É possível que esse refinamento tenha surtido efeito para melhor definir a *forma* do espectro direcional mas uma verificação desse tipo necessitaria uma análise mais ampla que fosse além de parâmetros simples como  $H_s$  e  $T_p$ .

Finalmente, apresentam-se resultados para implementações feitas com a grade atlântica descrita na seção 2 e também com implementações da grade global isoladamente, i.e. *sem* usar a grade aninhada. Em ambas, como os pontos de saída (Floripa2 e FL061) não coincidem com um ponto de grade, os resultados tiveram de ser interpolados (automaticamente pelo WW3) para o local desejado.

**Tabela 5** - Testes com diferentes implementações de grade

TESTE #	VII		VIII		IX		X	
Tipo de Grade	Atlantica		Atlantica		Apenas global		Apenas global	
Resolução da Grade	1.00° x 1.25° (lat x lon)		1.00° x 1.25° (lat x lon)		1.00° x 1.25° (lat x lon)		1.00° x 1.25° (lat x lon)	
Número de Direções	24 ( $\Delta\theta = 15^\circ$ )		24 ( $\Delta\theta = 15^\circ$ )		24 ( $\Delta\theta = 15^\circ$ )		72 ( $\Delta\theta = 5^\circ$ )	
Ponto de Saída	Floripa2 (28.00°S; 48.25W) (interpolado)		FL061 (27.75°S; 48.25W) (interpolado)		Floripa2 (28.00°S; 48.25W) (interpolado)		Floripa2 (28.00°S; 48.25W) (interpolado)	
Batimetria	GEBCO		GEBCO		ETOPO		ETOPO	
Parametro	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
$\bar{o}$	1.699 m	9.035 s	1.699 m	9.035 s	1.699 m	9.035 s	1.699 m	9.035 s
$s_o$	0.616 m	2.503 s	0.616 m	2.503 s	0.616 m	2.503 s	0.616 m	2.503 s
$o_{max}$	6.830 m	16.67 s	6.830 m	16.67 s	6.830 m	16.67 s	6.830 m	16.67 s
$\bar{m}$	2.112 m	10.085 s	2.070 m	10.11 s	2.103 m	10.025 s	2.117 m	10.04 s
$s_m$	0.911 m	2.336 s	0.887 m	2.316 s	0.904 m	2.341 s	0.914 m	2.341 s
$m_{max}$	7.274 m	18.25 s	7.000 m	18.28 s	7.362 m	19.61 s	7.44 m	19.96 s
$V$	0.413 m	1.051 s	0.372 m	1.075 s	0.404 m	0.990 s	0.418 m	1.007 s
$V/\bar{o}$	24.3%	11.6%	21.9%	11.9%	23.8%	11.0%	24.6%	11.2%
RMSE	0.667 m	2.801 s	0.632 m	2.809 s	0.657 m	2.784 s	0.674 m	2.767 s
SI	0.396	0.310	0.372	0.311	0.387	0.308	0.397	0.306
SS	1.273	1.104	1.247	1.106	1.267	1.098	1.276	1.100

Uma análise da tabela 5, indica que a grade atlântica forneceu resultados estatisticamente similares aos da grade global dando, portanto, fundamento à hipótese de que a primeira grade (atlântica) realmente cobre toda a área oceânica de interesse para o clima de ondas em SC.

Em particular, a comparação dos testes II (tab. 3) e VII (tab.5) mostra que o aninhamento de grades introduziu uma melhoria da ordem de 10% no SS e 25% no SI para o parâmetro Hs mas foi pouco efetiva em melhorar os índices para Tp. Apesar de não ser muito expressiva, a melhoria em Hs sustenta a utilidade de se usar grades aninhadas. O aninhamento com uma grade de maior resolução traz também o benefício extra de se ter um número maior de pontos de grade para coletar saídas do modelo sem a necessidade de recorrer a interpolação.

## 6. AVALIAÇÃO CONTEXTUALIZADA DOS RESULTADOS

Uma questão que se apresenta naturalmente na finalização desse trabalho é: *como os resultados obtidos no presente estudo se comparam com similares realizados por outros autores?* No intuito de avaliar essa questão, fez-se um levantamento de publicações sobre comparações entre modelos e medições de campo realizadas por bóias oceanográficas (Lalbeharry [6], Tolman et al [12], Gorman et al [4], Janssen et al [5] & Bidlot et al [3]). [Observa-se que os artigos consultados se restringiram àqueles cujas medições foram realizadas por bóias oceanográficas.]

**Tabela 6** – Tabela ilustrativa de desempenho – Parâmetro analisado: **Hs**

Referência	Presente trabalho	Lalbehary (2001)	Tolman et al (2002)	Gorman et al (2003)	Janssen et al (1997)			Bidlot et al (2002)		
Modelo	WW3	WAM	WW3	WAM + SWAN	WAM			WAM	UKMO	WW3
Executor	Presente trabalho	Serviço Meteor. do Canadá	NCEP/NOAA	Inst. Pesq. Atmosf. da Nova Zelândia.	ECMWF			ECMWF	UKMO	NCEP/NOAA
Local de medição	Floripa Atlântico Sul	Atlântico Norte	Atlântico & Pacífico Norte	Nova Zelândia (água rasa)	NE do Atlântico Norte	Pacífico Norte	W do Pacífico Norte	Atlântico & Pacífico Norte		
Número de pts.	6 033	15 721	95 267		8 812	5 473	7 238	25 343	25 343	17 788
$\bar{o}$ (m)	1.70	1.99	-		-	-	-	2.49	2.49	2.53
$s_o$ (m)	0.62	-	-		-	-	-	-	-	-
$\bar{m}$ (m)	1.85	1.77	-		-	-	-	-	-	-
$s_m$ (m)	0.78	-	-		-	-	-	-	-	-
V (m)	0.15	-0.22	0.11	0.09	-0.53	-0.25	-0.27	-0.17	0.04	0.03
RMSE (m)	0.49	0.52	0.47	0.22	-	-	-	0.46	0.52	0.43
SI	0.29	0.24	0.18	0.26	0.14	0.18	0.15	0.17	0.21	0.17
SS	1.11	0.90	1.12	-	-	-	-	0.91	1.01	1.00

**Tabela 6** – Tabela ilustrativa de desempenho – Parâmetro analisado: **Tp**

Referência	Presente trabalho	Lalbehary (2001)	Tolman et al (2002)	Gorman et al (2003)	Janssen et al (1997)			Bidlot et al (2002)		
Modelo	WW3	WAM	WW3	WAM + SWAN	WAM			WAM	UKMO	WW3
Executor	Presente Trabalho	Serviço Meteor. do Canadá	NCEP/NOAA	Inst. Pesq. Atmosf. da Nova Zelândia.	ECMWF			ECMWF	UKMO	NCEP/NOAA
Local de medição	Floripa Atlântico Sul	Atlântico Norte	Atlântico & Pacífico Norte	Nova Zelândia (água rasa)	NE do Atlântico Norte	Pacífico Norte	W do Pacífico Norte	Atlântico & Pacífico Norte		
Número de pts.	6 033	15 054	(Não infor.)	OBS.: T médio	(Não infor.)	5 473	7 238	19 665	19 665	19 665
$\bar{o}$ (s)	9.04	8.38	-	-	-	-	-	9.44	9.44	9.44
$s_o$ (s)	2.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\bar{m}$ (s)	9.91	7.76	-	-	-	-	-	-	-	-
$s_m$ (s)	2.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V (s)	0.88	-0.62	-	0.24	-	-0.44	-0.68	0.26	1.57	0.23
RMSE (s)	2.67	1.89	-	1.05	-	-	-	2.16	3.54	2.20

SI	0.29	0.21	-	0.19	-	0.19	0.17	0.23	0.34	0.23
SS	1.08	0.93	-	-	-	-	-	1.02	1.17	1.04

Analisando as duas tabelas acima, o que se pode depreender é que, de maneira geral, os resultados obtidos no presente estudo comparam-se razoavelmente bem aos similares encontrados na literatura, apresentando valores dos parâmetros chave (grifados em amarelo) da mesma ordem de magnitude que os da literatura.

Um aspecto que chamou a atenção na leitura dos artigos mencionados (ver tabelas acima) foi que a tendência de superestimação de parâmetros encontrada no presente estudo também foi verificada em outras implementações do Modelo WW3 (Tolman et al [12]), sugerindo ser esse tipo de comportamento uma característica desse modelo. Por outro lado, o levantamento indicou que o modelo WAM (similar ao WW3 e usado pela Comunidade Européia) tem uma leve tendência de subestimar os parâmetros  $H_s$  e  $T_p$ . (Janssen et al [5])

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão que se coloca na conclusão desse artigo é *o que ainda poderia ser feito para aperfeiçoar os resultados do modelo?*

De maneira geral, existem dois caminhos (não excludentes!) a seguir:

- Aperfeiçoar o campo de ventos fornecido ao modelo
- Aperfeiçoar aspectos do modelo WW3 em si.

Obviamente, ambos os caminhos estão sendo também trilhados pelos pesquisadores que desenvolveram/utilizam o modelo restando aos usuários (como nós) acompanhar e implementar da melhor forma possível os avanços conseguidos.

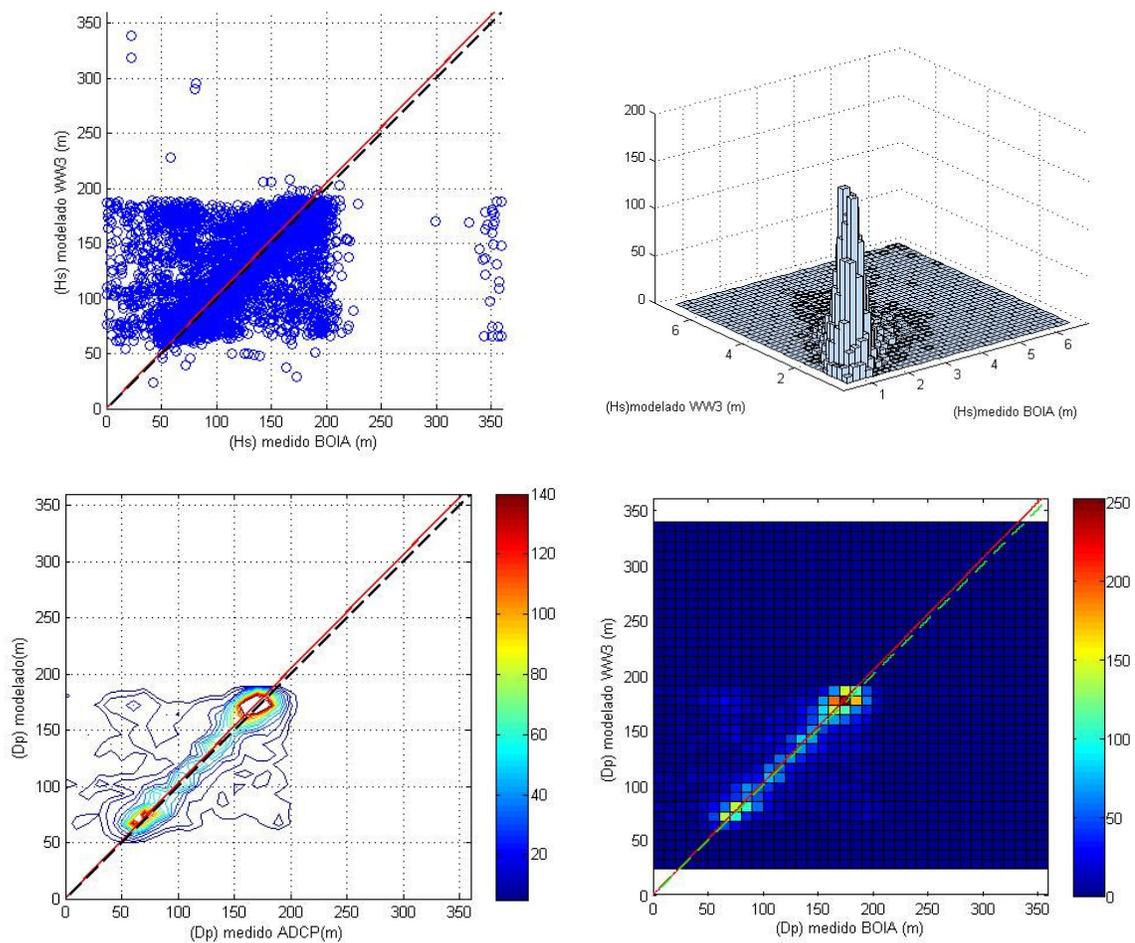
Entretanto, atuando num nível ainda preliminar ao da pesquisa de ponta sobre o assunto, seria possível investigar se é possível melhorar um pouco os resultados estatísticos “calibrando” parâmetros do modelo (que no presente estudo foram usados sempre na forma “default”) para os dados de SC. Esse tópico será tema de trabalho posterior.

Finalmente, apesar da direção das ondas não ter sido incluída na análise, vale a pena aproveitar a oportunidade e verificar como ficariam os resultados da presente metodologia de comparação quando utilizada para o parâmetro  $Dp$ . Isso está feito na tabela 7 e na figura 11 abaixo.

**Tabela 7** – Parâmetros estatísticos para implementação com grade aninhada, espectro com 24 direções e batimetria ETOPO. Ponto de saída “Floripa2” (28° S, 48.25° W)

Para- metro	No. Pts.	$\bar{\sigma}$	$s_{\sigma}$	$\sigma_{max}$	$\bar{m}$	$s_m$	$m_{max}$	$V$	$\frac{V}{\bar{\sigma}}$	RMSE	SI	SS
Dp(°N)	6033	127.3 (°N)	50.2 (°)	359.4 (°N)	133.5 (°N)	39.8 (°)	338.5 (°N)	6.2 (°)	4.9 %	43.7 (°)	0.343	1.018

Parâmetro: **Dp** - Implementação: grade aninhada, batimetria ETOPO com 24 direções



**Figura 11** – (ver legenda da figura 7)

Analisando os resultados verifica-se que os parâmetros estatísticos para  $D_p$  apresentam valores na mesma faixa de precisão de  $H_s$  e  $T_p$  (ver tabela 7). Em particular, o índice de espalhamento ( $0.34$ ) ficou ligeiramente acima dos obtidos para  $H_s$  ( $0.30$ ) e  $T_p$  ( $0.29$ ), porém o valor da inclinação quadrática média ( $SS$ ) ficou em  $1.02$ , surpreendentemente próxima de  $1.00$ . Além disso, o diagrama de densidade de ocorrências (figura 11) mostra um alto número de ocorrências nas direções  $S$  e  $ENE$ , indicando que o modelo conseguiu capturar uma importante característica do clima de ondas de SC conforme estudo feito por Araujo et al. [2] a partir dos dados do PIC. Assim, embora tanto as medições quanto a modelação tenham dificuldade em identificar *uma única* direção de pico em casos de mares bi (ou multi) modais onde co-existem mares de diferentes direções, os resultados com o parâmetro  $D_p$  mostraram-se promissores.

## 8. REFERÊNCIAS

1. ALVES, J.H.G.M (2006) *Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate*; Ocean Modelling 11, pp 98-122.
2. ARAÚJO, C.E.; FRANCO, D.; MELO, E. & PIMENTA, F.M. (2003). *Wave regime characteristics of the Southern Brazilian Coast*. Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 097; pp 15, 2003 (publicado em CD, sem paginação). Disponível em: <[http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003\\_1.pdf](http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003_1.pdf)>
3. BIDLOT, J-R; HOLMES, D.J.; WITTMAN, P.A.; LALBEHARRY, R. & CHEN, H.S. (2002) *Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data*; Weather and Forecasting, 17, 287-310.
4. GORMAN, R.M.; BRYAN, K.R. & LAING, A.K. (2003) *Wave hindcast for the New Zealand region: nearshore validation and coastal wave data*; New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, Vol. 37, 567-588
5. JANSSEN, P.A.E.M.; HANSEN, B. & BIDLOT, J-R (1997) *Verification of the ECMWF wave forecasting system against buoy and altimeter data* Weather and Forecasting, 12, (4), 763-784
6. LALBEHARRY, R. (2001) *Evaluation of the CMC Regional Wave Forecasting System against Buoy Data*; Atmosphere-Ocean 40 (1), 1-20
7. MELO F<sup>o</sup>, E. (2004) *Programa de Informação Costeira on line: Um balanço dos primeiros dois anos de funcionamento*. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, SEMENGO, FURG, Rio Grande, pp 25, (Publicado em CD, sem paginação). Disponível em: <[http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/SMG\\_PIC.pdf](http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/SMG_PIC.pdf)>
8. MELO, E.; ALVES, J.H.G.M; JORDEN, V.; ZAGO, F. & DIAS, W.S.S. (1995). *Instrumental Confirmation of the Arrival of North Atlantic Swell to the Ceará Coast*. Proceedings of the Fourth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC IV, pp. 1984-1996, Rio de Janeiro, Brazil, 1995 Disponível em: <<http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec95.pdf>>
9. MELO, E.; PIMENTA, F.M.; MENDES, D.A.R.; HAMMES, G.R.; ARAUJO, C.E.; FRANCO, D.; ALVES J.H.G.M, BARLETTA, R.C.; SOUTO, A.M.C.; CASTELÃO, G.P.; PEREIRA N.C. & BRANCO, F.V. (2003) *A real time, on-line coastal information program in Brazil*. Proc. of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 104; pp 14, 2003 Disponível em: <[http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003\\_2.pdf](http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003_2.pdf)>
10. SOUTO, A.M.C (2006) *Identificação da zona de geração de ondulações longínquas na costa de Santa Catarina*, Trab. de Conclusão de Curso, Depto. Eng. Civil, UFSC, 76 pp.
11. TOLMAN, H.L. (2002) *User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 2.22*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 222, 130 pp
12. TOLMAN, H.L.; BALASUBRAMANYAN. B.; BURROUGHS, L.D.; CHALIKOV, D.V.; CHAO, Y.Y.; CHEN, H.S & GERALD, V.M. (2002) *Development and implementation of wind-generated ocean surface models at NCEP*; Weather and Forecasting, 17, 311-333