

**ANÁLISES E LEVANTAMENTOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS VISANDO
AO PROJETO DA PONTE ENTRE SALVADOR E A ILHA DE ITAPARICA, BA**

R12 - RELATÓRIO DE EXTREMOS DE ONDAS

Cliente: SIT - Superintendência de Infraestrutura de Transporte da Bahia

Dezembro de 2015 - Rio de Janeiro

Conteúdo

1. Identificação	4
2. Objetivos	4
3. Introdução	5
4. Modelo WAVEWATCH III.....	6
4.1. Grades Computacionais	6
4.2. Grades Espectrais	7
4.3. Condições de Contorno e Condições Iniciais	7
5. Técnica de Plotagem - PLEDS	9
6. Validação da Modelagem.....	11
7. Caracterização Geral do Clima de Ondas na Baía de Todos os Santos	16
8. Estatística de Extremos de Ondas	25
9. Referências	27
10. Reconhecimentos e equipe técnica.....	28

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Limites geográficos das grades computacionais utilizadas: acima a grade 1 e abaixo a grade 2, com suas respectivas batimetrias em metros.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 - Evolução do espectro direcional para o mês de outubro de 2002. Faixas de período: Faixa 1 (23,9 a 12,3 s), Faixa 2 (12,3 a 7,63 s), Faixa 3 (7,63 a 4,31 a) e Faixa 4 (4,31 a 2,43 s).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3 - Localização do ponto de medição do ADCP A1.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4- Comparação dos dados medidos pelo ADCP 1 e os resultados do modelo WW3 para Novembro de 2014.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5 - Histogramas de ocorrência (%) de Hs, Tp e Dp para os 30 anos simulados no ponto de medição do ADCP A1.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 - A) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Tp; B) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Dp; e C) Histograma de distribuição conjunta de Tp e Dp para o ponto de medição do ADCP A1 durante todo o período simulado (1980 a 2010).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 - Histogramas de direção do Hs (m) e Tp (s) para as ocorrências do período de 1980 a 2010 no ponto do ADCP A1.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8 - Evolução do espectro direcional das ondas para o período entre o dia 5 e 19 de agosto de 2007 para o ponto de medição do ADCP A1.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9 – Campos de intensidade e direção dos ventos a 10 metros para os dias: a) 13/08/2007 às 18 horas UTC; b) 14/08/2007 às 00 horas UTC; c) 14/08/2007 às 06 horas UTC; e d) 14/08/2007 às 12 horas UTC.O ponto em vermelho representa a posição do ADCP A1.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10 - Evolução do espectro direcional das ondas para o período entre o dia 17 e 31 de julho de 2007 para o ponto de medição do ADCP A1.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 - Campos de intensidade e direção dos ventos a 10 metros para os dias: a) 29/07/2007 às 12 horas UTC; b) 29/07/2007 às 18 horas UTC; c) 30/07/2007 às 00 horas UTC; e d) 30/07/2007 às 06 horas UTC.O ponto em vermelho representa a posição do ADCP A1.</i>	<i>24</i>

Figura 12 - Resultado dos valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. A linha tracejada indica o intervalo de confiança de 95%..... 25

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Grades computacionais utilizadas nas simulações: $\Delta x, y$ é a resolução espacial em x e y , N_x é o número de pontos em x , N_y é o número de pontos em y , Lat_{ini} é a latitude inicial, Lon_{ini} é a longitude inicial, Lat_{fi} é a latitude final e Lon_{fi} é a longitude final.....	7
Tabela 2 - Faixas de períodos utilizadas para o espectro do WW3.	10
Tabela 3 - Índices estatísticos para os dados da boia BM01.	12
Tabela 4 - Índices estatísticos de validação para cada ponto avaliado.	13
Tabela 5 - Valores dos índices estatísticos encontrados na literatura em termos de H_s (m).	14
Tabela 6 - Valores dos índices estatísticos encontrados na literatura em termos de T_p (s).	14
Tabela 7 - Medidas estatísticas para os 30 anos simulados.	16
Tabela 8 - Estatísticas de alturas significativas de onda, H_s em metros, no ponto de medição do ADCP A1.	19
Tabela 9 - Estatísticas de alturas significativas de onda, T_p em segundos, no ponto de medição do ADCP01. ..	20
Tabela 10: Valores extremos de altura de ondas (H_s) para o ponto de medição do ADCP A1.	26

1. Identificação

Projeto COPPETEC:	PENO-18126
Título:	ANÁLISES E LEVANTAMENTOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS VISANDO AO PROJETO DA PONTE ENTRE SALVADOR E A ILHA DE ITAPARICA, BA R12 - RELATÓRIO DE EXTREMOS DE ONDAS
Interessado:	SIT - SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE DA BAHIA a/c Sr. Márcio de Almeida Machado Diretor de Projetos e Programas Especiais - DPPE 4ª Avenida, nº 445 CAB - Centro Administrativo da Bahia 41.745-002, Salvador - BA Contato: Sr. Márcio de Almeida Machado: marcio.machado@infra.ba.gov.br Tel. (71) 3115-2261
Programa COPPE	Engenharia Oceânica Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica
Data:	01 de Dezembro de 2015

2. Objetivos

Conforme descrito na proposta COPPETEC PENO18126, aprovada pelo DERBA e pela SEINFRA, os objetivos dos serviços contratados são:

1. Determinação de valores extremos associados à chegada de ondas de sul;
2. Determinação da severidade, através de persistência de valores de alturas significativas de onda, H_s , e períodos de pico espectral, T_p , acima de valores críticos (incluindo também valores extremos associada à circulação do ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul).

Este **R12- Relatório de Extremos de Ondas**, descreve a metodologia para reconstituição do clima de ondas de 30 anos (1980 a 2010), a análise dos valores extremos por quadrante de direção das ondas e o cálculo dos valores extremos para o ponto analisado. **Os resultados numéricos em termos de H_s (altura significativa), T_p (período de pico) e D_p (direção de pico) da reconstituição realizada com o modelo de ondas WW3 e os resultados da análise de extremos são enviados como anexo a este Relatório gravados em mídia ótica.**

Os dados gravados no CD-ROM anexo estão organizados por variáveis nos seguintes diretórios:

```
... \Hindcast30anos\                (contém valores de  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D_p$  para os 30 anos analisados)
    ... \hindcast1980_2010.txt
    ... \hindcast1980_2010.xlsx
... \Extremos\
    ... \Estatística_Extremos.xlsx
```

A seguir, apresenta-se a descrição da metodologia de modelagem de ondas, as características do clima de ondas na região oceânica defronte a BTS (Baía de Todos os Santos) e o cálculo dos valores de retorno para H_s .

3. Introdução

O conhecimento do clima de ondas de uma região é de fundamental importância para as diversas ciências que envolvam o mar. Em obras de engenharia costeira, por exemplo, os esforços e transporte de sedimentos ocasionados pelas ondas são de grande relevância para o planejamento e avaliações de impactos causados por estruturas como: pontes, molhes, quebra-mares, portos, entre outros.

No entanto, por causa da sua variabilidade em todas as escalas temporais, o clima de ondas de uma região não é algo simples de se determinar. Medições de boias, direcionais ou não, podem fornecer uma boa estimativa do estado do mar, contudo, é muito custoso financeiramente e logisticamente manter essas boias em funcionamento de forma a se obter uma estimativa de longo termo do clima de ondas de uma determinada região.

Para preencher esta lacuna, a utilização da modelagem numérica de ondas apresenta-se como um importante recurso aplicado mundialmente, permitindo reconstituir e estimar situações pré-teritas de estado de mar. Assim, pode-se caracterizar o clima de ondas numa determinada região com base em resultados de modelo de longo termo calibrados e validados com medições *in situ*, processo doravante denominado de reconstituição. A partir das informações de ondas de longo termo, é possível também a estimativa de ondas extremas associados a diferentes períodos de retorno.

O estado da arte da modelagem numérica de ondas está representado pelos modelos espectrais de 3ª geração. Estes modelos, empregados por diversas agências de previsão e institutos de pesquisas, são baseados na propagação do espectro de energia da onda e têm a vantagem de permitir estudos de larga abrangência espacial e temporal.

Este relatório apresenta a caracterização do clima de ondas nas proximidades da Baía de Todos os Santos (BTS) a partir da reconstituição do estado de agitação marítima pelo modelo numérico WAVEWATCH III (WW3) (Tolman, 2014) ao longo de 30 anos (1980 a 2010). Os resultados foram utilizados para o cálculo de ondas extremas utilizando a técnica de Picos sobre Limiares, conhecido pela sigla POT (Peaks Over Threshold) na literatura técnica.

4. Modelo WAVEWATCH III

O modelo WW3 versão 4.18 (Tolman, 2014) é um modelo espectral que resolve a equação do balanço da ação da onda N , que é expressa pela divisão da energia da onda pela frequência relativa ($N = E/\sigma$), em função do número de onda (k) e direção da onda (θ), representada pela equação abaixo:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(c_g + U)N] + \frac{\partial}{\partial k}(c_k N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S}{\sigma}$$

onde,

$$c_k = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial s}$$

$$c_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right)$$

em que $N = (k, \theta; x, t)$, $S = (k, \theta; x, t)$, σ é a frequência angular relativa, ∇_x é o operador diferencial bidimensional do vetor $\vec{x}(x, y)$, c_k e c_θ são as velocidades de propagação no espaço espectral k e θ respectivamente, c_g é a velocidade de grupo da onda, U é a velocidade média da corrente, s é a coordenada espacial na direção θ , m é a coordenada perpendicular à s e d é a profundidade da água.

O termo fonte (S) em águas profundas possui três componentes: a entrada de energia proveniente do vento (S_{in}), a dissipação, do termo inglês *whitecapping* (S_{dis}) e as interações não-lineares quádruplas onda-onda (S_{nl}). Conforme a profundidade vai diminuindo, pode-se ainda adicionar à formulação do modelo um quarto termo, que considera as interações da onda com o fundo (S_{bot}). Em águas muito rasas, a quebra da onda induzida pela profundidade (S_{br}) e as interações não-lineares triplas (S_{tr}) também se tornam importante. Portanto, a equação geral de termos fontes é expressa como:

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} + S_{bot} + S_{br} + S_{tr}$$

Os termos input do vento (S_{in}) e dissipação (S_{dis}) representam processos separados, mas podem ser considerados como processos inter-relacionados uma vez que o balanço entre esses dois termos governam as características de crescimento dos modelos de ondas.

4.1. Grades Computacionais

Para a modelagem de águas profundas foram utilizadas duas grades computacionais, a citar: Grade1, a qual abrange o Oceano Atlântico e parte do Oceano Pacífico, e Grade2, que abrange o Oceano Atlântico Sul (Figura 1). Informações acerca das grades utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Os dados de batimetria utilizados para os domínios computacionais considerados foram obtidos a partir da base de dados digitais proveniente da compilação do ETOPO-1 do National Geophysical Data Center/Geodas Databases (NGDA/GEODAS – NOAA) e de Cartas Náuticas, gentilmente cedidas pelo CHM (Centro de Hidrografia da Marinha).

Tabela 1 - Grades computacionais utilizadas nas simulações: $\Delta x, y$ é a resolução espacial em x e y, N_x é o número de pontos em x, N_y é o número de pontos em y, Lat_{in} é a latitude inicial, Lon_{in} é a longitude inicial, Lat_{fi} é a latitude final e Lon_{fi} é a longitude final.

Domínio	$\Delta x, y$	N_x	N_y	Latin	Lonin	Latfi	Lonfi
Grade 1	1°	111	141	-80°	-90°	60°	20°
Grade 2	0,25°	261	181	-45°	-65°	0°	0°

4.2. Grades Espectrais

O espectro de densidade de energia é discretizado considerando 25 frequências (ou números de onda), espaçadas logaritmicamente desde 0,042 Hz (23,8 s) até 0,5 Hz (2 s), e 24 direções.

4.3. Condições de Contorno e Condições Iniciais

Os dados de vento utilizados como forçantes de geração das ondas foram obtidos através da base de dados do NCEP e são produtos da reanálise de alta resolução CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (Saha et al., 2010). Os dados estão disponíveis no sítio <<http://rda.ucar.edu/pub/cfsr.html>>. Também são utilizados dados de cobertura de gelo, disponível no mesmo sítio.

A condição inicial é do tipo partida fria, onde o mar no instante zero é considerado em repouso. Dessa forma, é necessário fazer um pré-aquecimento do modelo por alguns dias.

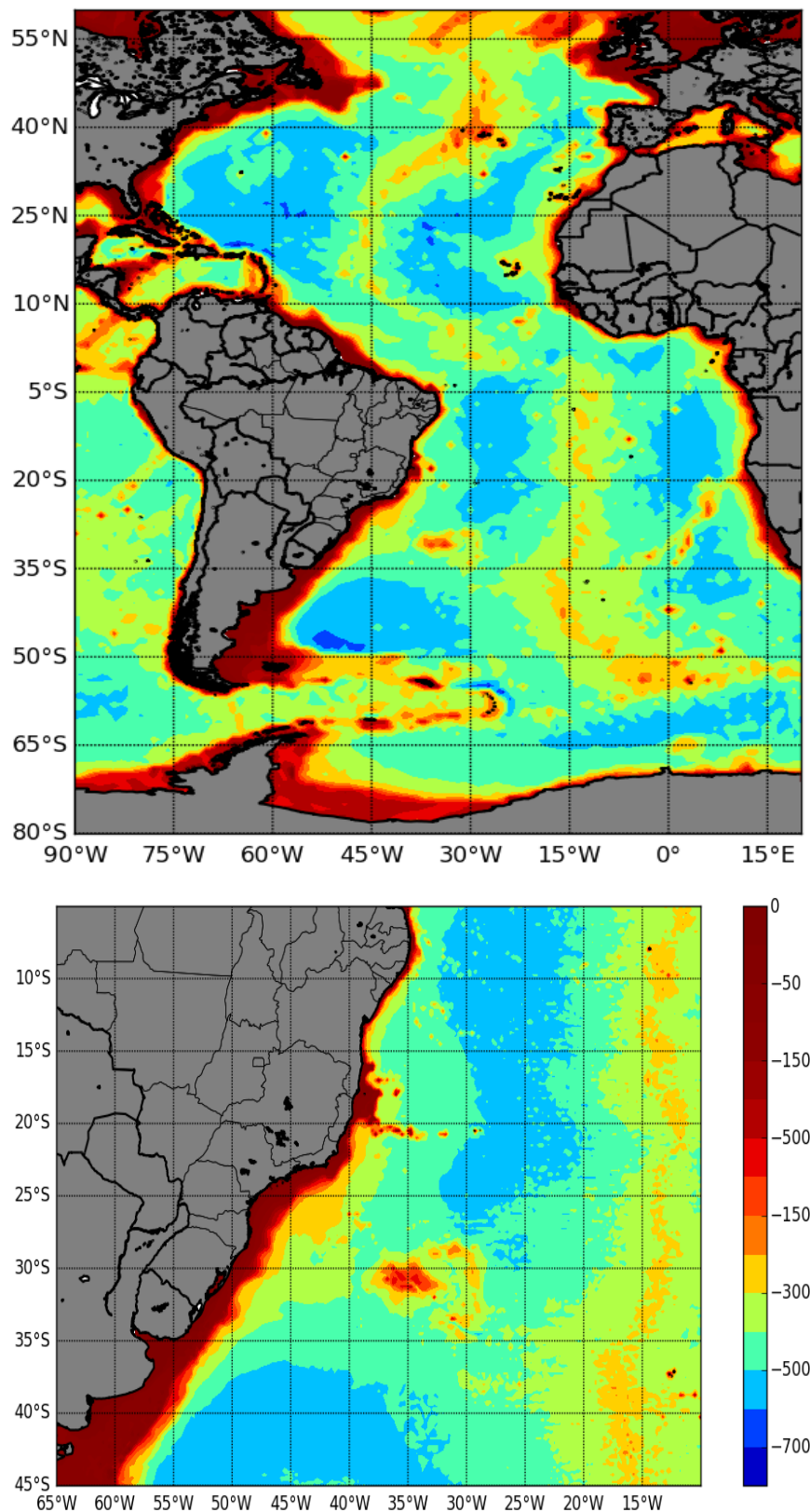


Figura 1 - Limites geográficos das grades computacionais utilizadas: acima a grade 1 e abaixo a grade 2, com suas respectivas batimetrias em metros.

5. Técnica de Plotagem - PLEDS

Uma forma de apresentar os resultados espectrais do modelo WW3 é a representação gráfica da evolução do espectro direcional com o tempo, que foi desenvolvida por Parente (1999) e foi denominada PLEDS (Plotting the Evolution of the Directional Spectrum).

Um exemplo de resultado gráfico da PLEDS é apresentado na Figura 2. O eixo horizontal indica a direção do vento e das ondas em graus e o eixo vertical o tempo em dias, de forma que cada linha horizontal seja representativa do intervalo de 6 horas. As figuras geométricas coloridas representam o momento de ordem zero do espectro de energia, m_0 , sendo a energia de cada faixa definida pela altura dessas figuras, onde cada três divisões da escala correspondem a um metro de altura significativa de onda. As faixas de períodos representativas de cada figura são mostradas em cores como indicado no quadro na parte inferior do gráfico.

As barras verticais representam a intensidade do vento, de forma que a altura de cada barra possa expressar o valor da intensidade, sendo 1 divisão vertical no gráfico correspondente a aproximadamente 2 m/s. As barras de cor branca são utilizadas para velocidades até 10 m/s, em amarelo para intensidade entre 10 m/s e 20 m/s e em verde para maiores que 20 m/s.

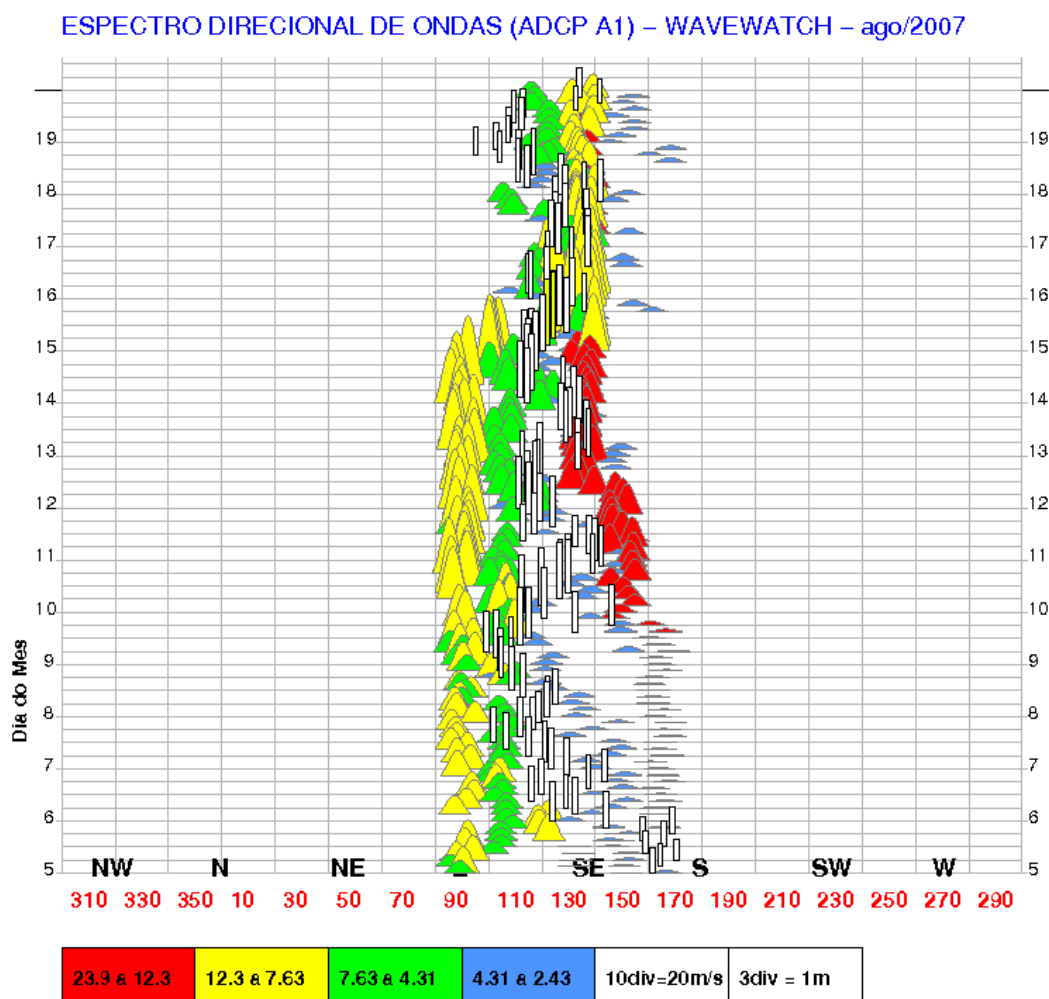


Figura 2 - Evolução do espectro direcional para o mês de outubro de 2002. Faixas de período: Faixa 1 (23,9 a 12,3 s), Faixa 2 (12,3 a 7,63 s), Faixa 3 (7,63 a 4,31 a) e Faixa 4 (4,31 a 2,43 s).

Para a análise dos espectros do modelo WW3, que importa muito na determinação das categorias de estado de mar na região, foram definidas as faixas de períodos indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixas de períodos utilizadas para o espectro do WW3.

Índice da Faixa	Valores de Períodos para a Faixa
1	23,9 a 12,3 s
2	12,3 a 7,63 s
3	7,63 a 4,31 s
4	4,31 a 2,43 s

Essas faixas foram escolhidas após diversos testes, a partir dos quais se tentou encontrar a melhor forma de caracterizar os principais sistemas de mar que poderiam ser observados na região. A faixa 1 (vermelha) corresponde normalmente a um swell distante gerado em latitudes mais altas, a faixa 2 (amarela), tanto pode representar ondulação de sul, com pistas menores, quanto pode estar associada a um mar gerado não muito longe do ponto de medição, denominado *quasi-sea* (VIOLANTE-CARVALHO, 1998). As faixas 3 (verde) e 4 (azul) estão na maior parte das vezes associadas ao mar local, no entanto, ressalta-se que a faixa 3 também pode estar associada ao *quasi-sea*.

6. Validação da Modelagem

Os dados de ondas coletados por um ADCP no ponto denominado A1, localizado em 38,5746° W e 13,1224° S (Figura 3), próximo à entrada da BTS, foram utilizados para validar os resultados do modelo WW3.

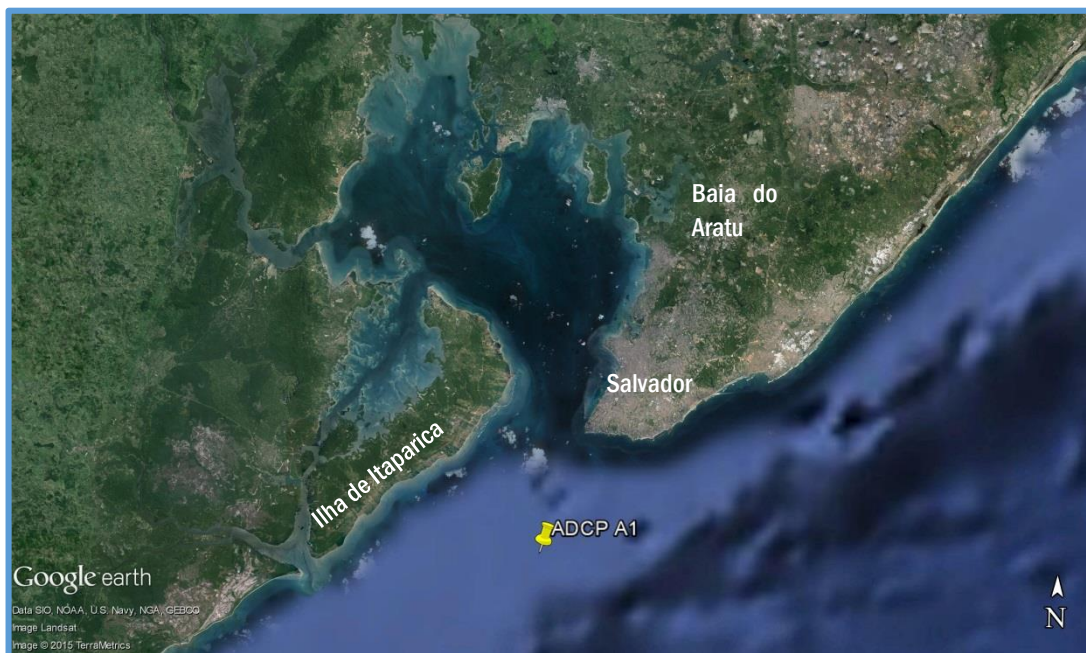


Figura 3 - Localização do ponto de medição do ADCP A1.

Os parâmetros de ondas foram submetidos a um controle de qualidade, evitando que dados inconsistentes contaminem os índices de coerência calculados entre o modelo e a medição. A Figura 4 apresenta os valores de Altura Significativa (H_s), Período de Pico (T_p) e Direção de Pico (D_p) medidos pelo ADCP no ponto A1 e o resultado da modelagem para Novembro de 2014. Verifica-se grande similaridade entre os parâmetros medidos e modelados, tanto em termos dos valores de H_s , quanto em relação ao T_p e D_p .

No caso do dia 18 de Novembro, a altura significativa medida pelo ADCP ultrapassou o valor de 2,5 m, os resultados do WW3, no entanto, alcançaram valores um pouco menores, com máximo de 2 m. Vale mencionar que este evento ocorreu associado a ondas com períodos baixos (~ 7 s), o que geralmente está relacionado a um acréscimo na energia das ondas na alta frequência, geradas pelos ventos locais. Em virtude da resolução dos campos de vento utilizados nas simulações, os modelos de ondas tendem a ter maior dificuldade em modelar eventos de maior energia associado a pistas locais. Por outro lado, a modelagem do swell parece estar sendo bem reproduzida, visto que o modelo consegue capturar bem o aumento nos valores de T_p acima de 10 s, como o que acontece após o dia 20 de novembro.

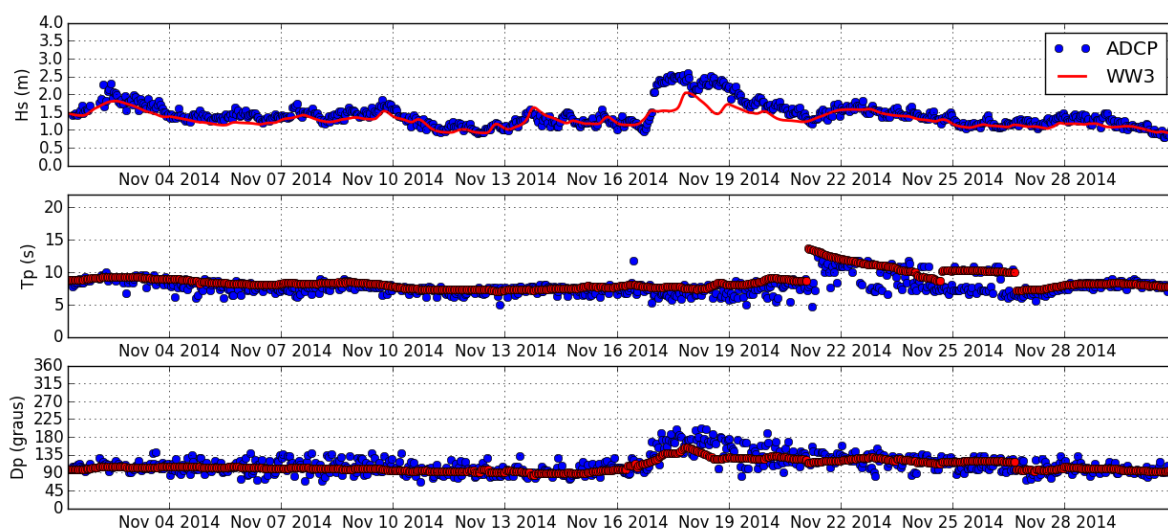


Figura 4- Comparação dos dados medidos pelo ADCP 1 e os resultados do modelo WW3 para Novembro de 2014.

Na Tabela 3 são apresentados os valores estatísticos para as séries de ondas medidas e modeladas. Os valores médios dos parâmetros Hs, Tp e Dp obtidos dos dados medidos pelo ADCP foram de 1,4 m, 7,9 s e 111 ° (E-SE), respectivamente, e de 1,3 m, 8,6 s e 107 ° para o WW3. Os valores máximos de altura chegaram a 2,6 m no ADCP e 2,0 m calculado pelo modelo.

Tabela 3 - Índices estatísticos para os dados da boia BM01.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Mínimo	90° Percentil	Máximo
Hs-ADCP (m)	1,4	0,3	0,8	2,0	2,6
Tp-ADCP (s)	7,9	1,2	4,7	9,6	13,0
Dp-ADCP (°)	111	24	67	144	203
Hs-WW3 (m)	1,3	0,2	0,9	1,6	2,0
Tp-WW3 (s)	8,6	1,3	7,1	10,2	13,7
Dp-WW3 (°)	107	14	84	127	154

Para o ponto de interesse, em termos de Hs, Tp e Dp, também foi feita uma avaliação com base nos índices de coerência: viés (Bias), diferença quadrática média (*root mean square difference*, RMSD), índice de espalhamento (*scatter index*, SI) e coeficiente de correlação de Pearson (r), tal como segue:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

$$SI = \frac{RMSD}{\bar{y}}$$

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

onde x e y são os valores modelados e observados respectivamente; $\bar{x}$, $\bar{y}$ são as médias e n é o número de observações.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de cada índice calculado para o ponto do ADCP.

Tabela 4 - Índices estatísticos de validação para cada ponto avaliado.

Período	Parâmetros	Bias	RMSD	SI (%)	R
Novembro/14	Hs (m)	-0,1	0,3	18	0,8
	Tp (s)	0,7	1,3	17	0,6
	Dp (°)	-4	18	16	0,7

Com o intuito de melhor fundamentar a verificação dos resultados e, consequentemente, melhor avaliar se o modelo WW3 foi capaz de simular satisfatoriamente o comportamento das ondas, foram selecionados alguns trabalhos que também utilizavam modelagem numérica de ondas e seus respectivos índices estatísticos para comparação (Tabela 5 e Tabela 6).

Em relação aos valores de Hs, na Tabela 5 encontram-se os principais trabalhos listados. Observa-se que o valor do coeficiente de correlação obtido ($r = 0,8$) está dentro da margem encontrada na literatura. O mesmo pode-se dizer do valor de Bias encontrado. Já o valor do RMSD e do SI apresentaram, na maior parte das vezes, valores inferiores aos relatados pelos trabalhos citados.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores dos índices aqui analisados encontrados por outros autores em termos de Tp. O coeficiente de correlação para o Tp está próximo aos valores encontrados por outros trabalhos. Além disso, os valores do RMSD e SI estão dentro da margem de diferenças encontradas na literatura.

Tabela 5 - Valores dos índices estatísticos encontrados na literatura em termos de Hs (m).

Hs	Pontos analisados	r	Bias	RMSD	SI (%)	Profundidade (m)
Chawla et al., (2013)*	41008	0,81	-0,02	0,21	21,7	-
	41004	0,83	0,02	0,29	21,9	-
	41010	0,87	0,08	0,31	19,0	-
	41002	0,87	0,08	0,37	19,7	-
	41001	0,88	0,06	0,40	19,3	-
	44004	0,90	0,08	0,41	19,8	-
	44025	0,83	-0,04	0,30	23,5	-
	44005	0,76	-0,25	0,55	31,0	-
	44011	0,91	-0,01	0,37	18,5	-
	42001	0,89	0,15	0,30	23,2	-
	42002	0,84	0,12	0,33	24,4	-
	42003	0,88	0,02	0,26	24,4	-
Alves et al., 2009	P1	0,75	-	0,46	22	-
	P2	0,79	-	0,47	22	-
	P3	0,75	-	0,55	28	-
Piumbini, 2009	P1	0,94	-	0,21	20	22 m
	P2	0,91	-	0,20	32	19 m
Rusu et al., 2008a	P1	0,92	-0,07	0,31	24	100 m
	P2	0,84	0,14	0,27	35	100 m
Rusu et al., 2008b	P1	0,93	-0,19	0,5	20	97 m
	P2	0,90	-0,28	0,60	29	23 m
Padilha – Hernandez et al., 2007	P1	-	-0,07	0,70	17	195,7 m

Tabela 6 - Valores dos índices estatísticos encontrados na literatura em termos de Tp (s).

Tp	Pontos Analisados	r	Bias	RMSD	SI (%)	Profundidade (m)
Alves et al., 2009	P1	0,57	-	2,27	23	-
	P2	0,61	-	2,18	25	-
	P3	0,65	-	1,86	19	-
Rusu et al., 2008a	P1	0,50	-0,39	2,74	25	100 m
	P2	0,36	1,00	4,17	48	100 m
Rusu et al., 2008b	P1	0,69	-0,58	2,0	17	97 m
Padilha – Hernandez et al., 2007	P1	-	-0,94	2,04	24	195,7 m

No que se refere à D_p , por ser um parâmetro que tem sua variação mais relacionada ao local em análise do que propriamente dito à relação entre modelado e observado, preferiu-se analisá-la somente comparando com o valor de desvio padrão dos dados. Neste sentido, vê-se que o valor de RMSD encontrado (18°) é menor que desvio apresentado pelos dados do ADCP (24°).

Sendo assim, considerando-se as limitações inerentes aos modelos numéricos, supõe-se confiável a utilização do modelo WW3 para caracterizar o clima de onda na região oceânica defronte a BTS, visto que este se mostrou capaz de reproduzir o comportamento geral das ondas na região.

7. Caracterização Geral do Clima de Ondas na Baía de Todos os Santos

A caracterização do clima de ondas na BTS foi calculada em um ponto na entrada da baía, a 32 m de profundidade, no mesmo local de medição denominado A1 (Figura 3). Esta caracterização foi realizada com base em 30 anos (1980 - 2010) de reconstituição da agitação marítima realizada pelo modelo WW3, totalizando 271752 valores horários.

O padrão geral observado ao longo dos 30 anos simulados em termos de H_s , T_p e D_{p1} está apresentado na Tabela 7, onde se encontram as principais medidas estatísticas do conjunto de dados, e nos histogramas da Figura 5. Ressalta-se que os valores dos percentis são indicativos das frequências acumuladas de ocorrência, de forma que o percentil de 90%, também denominado decil superior da distribuição, indica o valor abaixo do qual estão 90% dos valores de H_s , por exemplo.

O valor médio de H_s foi de 1,3 m, com percentis de 90% e 99% de 1,7 e 2,4 m, respectivamente, e valor máximo de 3,8 m. Em termos de T_p , o valor médio foi de 8,9 s, com 90º percentil de 11,8 s, 99º percentil de 15,8 s e valor máximo chegando a 19,7 s. Já relacionado à direção do período de pico, o valor médio encontrado foi de 115 (Leste-Sudeste).

Tabela 7 - Medidas estatísticas para os 30 anos simulados.

Parâmetro	WW3 – Ponto do ADCP A1		
	H_s (m)	T_p (s)	D_{p1} (°)
Média	1,3	8,9	115
90º percentil	1,7	11,8	153
99º percentil	2,4	15,8	163
Máximo	3,8	19,7	176

Analisando o histograma de H_s (Figura 5) se observa que a classe de maior ocorrência é de 1,0 a 1,5 m, com 59,2 %, seguido das classes de 0,5 a 1 e 1,5 a 2 m com, respectivamente, 21,7 e 15,3 %. Ondas com H_s acima de 2 metros têm somente 3,8 % das ocorrências. Os valores de T_p ficaram distribuídos basicamente entre 6 e 10 s, sendo as mais frequentes de 8 a 10, com 48,6 %. Valores de T_p acima de 10 s corresponderam a 18,3 % das ocorrências.

A direção das ondas se mostrou com predominância de Leste, com 61,3 %, e Sudeste com 31,6 %. Ondas provenientes de Sul contribuem somente com 7,0 % das ocorrências.

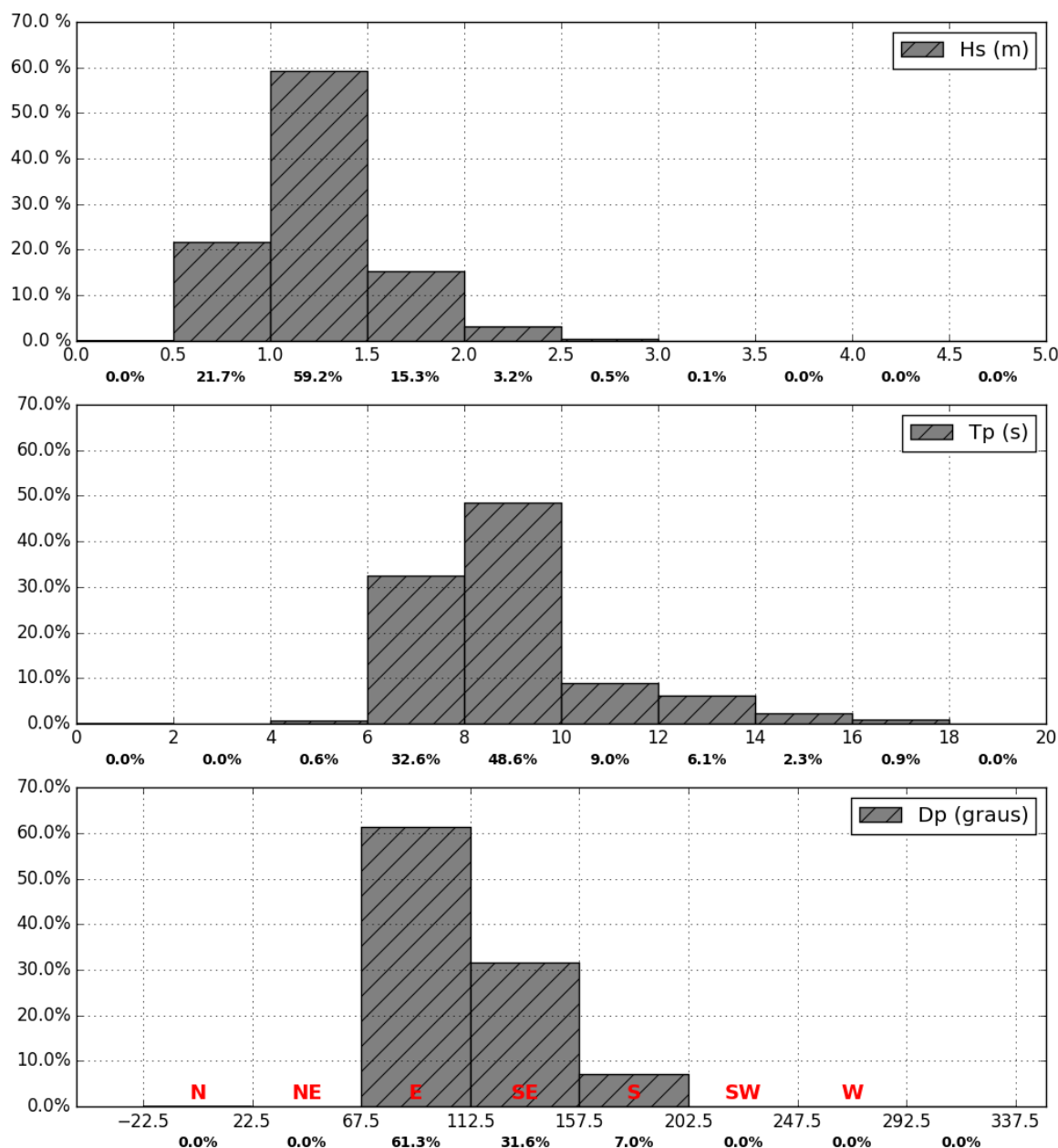


Figura 5 - Histogramas de ocorrência (%) de Hs, Tp e Dp para os 30 anos simulados no ponto de medição do ADCP A1.

A distribuição conjunta de Hs e Tp (Figura 6a) indica que em cerca de 30 % das ocorrências as ondas com Hs entre 1 e 1,5 m estavam associadas a Tp entre 8 e 10 s. Também bastante ocorrente foram as ondas com Hs entre 1 e 1,5 m e Tp entre 6 e 8 s, com 19 %. Além disso, nota-se que ondas com Tp acima dos 12 s não apresentaram valores de Hs superior a 2,5 m.

Em termos direcionais, analisando a Figura 6b e Figura 6c, nota-se que as ondas de E, direção mais frequente, possuem em 40 % das ocorrências Hs entre 1 e 1,5 m e em 32% Tp entre 8 e 10 s. Na Figura 6c se observa que para Tp acima de 12 s, os quais representam 9,3 % das ocorrências, a Dp é sempre de SE e S, o que deve, possivelmente, estar associado à presença de swell distante ou passagem de sistemas frontais pela região.

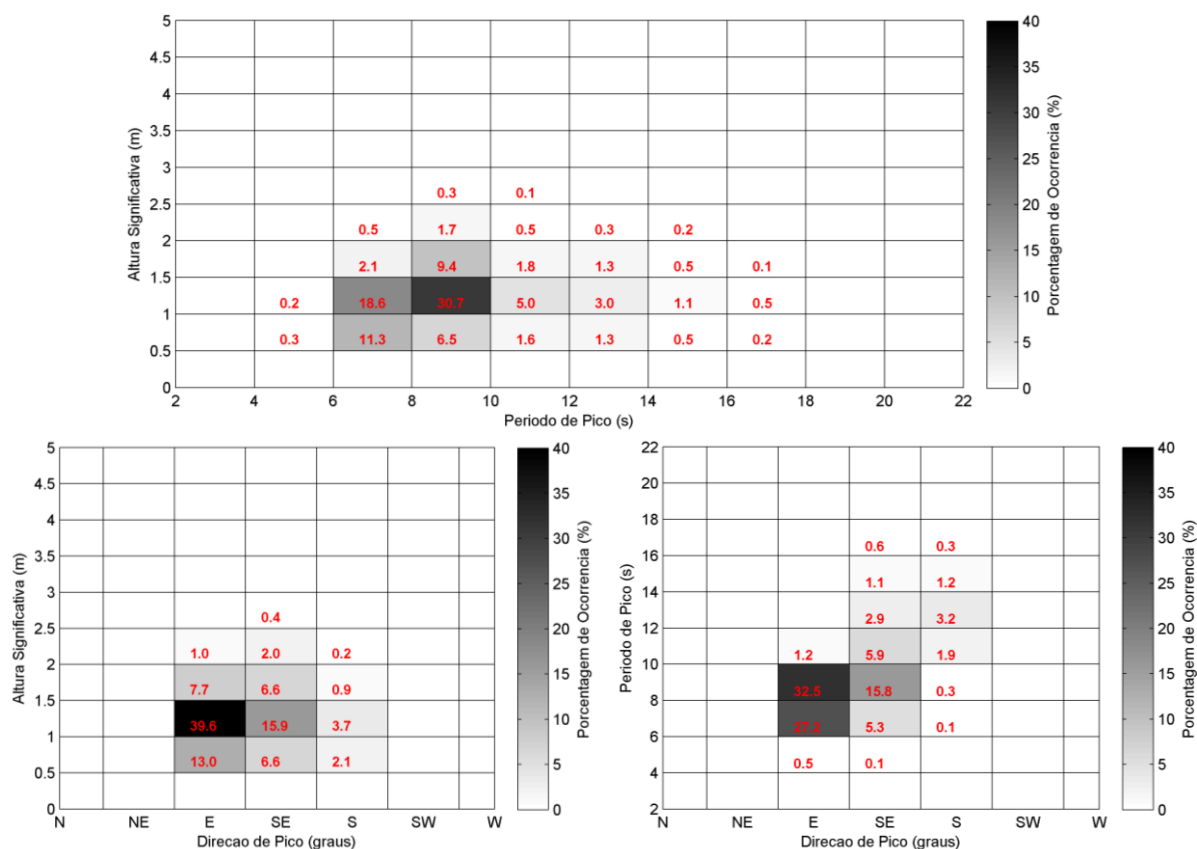


Figura 6 - A) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Tp; B) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Dp; e C) Histograma de distribuição conjunta de Tp e Dp para o ponto de medição do ADCP A1 durante todo o período simulado (1980 a 2010).

A distribuição direcional dos valores de Hs e Tp pode ser sumarizada nos histogramas da Figura 7. Nota-se que ondas de E em 65% das ocorrências tem Hs entre 1 e 1,5 m e em 52% dos eventos Tp entre 8 e 10 s. Ondas de SE estão em 50 % das ocorrências associadas a Hs entre 1 e 1,5 m e Tp de 8 a 10 s. Ondas de S possuem comportamento em termos de Hs semelhante às ondas de SE, com 52% das ocorrências entre 1 e 1,5 m, no entanto, possuem valores de Tp em 46% associados a valores entre 12 e 14 s.

Para cada direção de pico das ondas estão apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9 os valores médios, percentis de 90% e 99% e máximos para Hs e Tp, respectivamente. Para ondas com Dp de E a média de Hs encontrada foi de 1,22 m, percentis de 90 e 99% de 1,59 e 2,11 m, respectivamente, e valor máximo de 2,88 m. Ondas de SE, direção com maiores valores de Hs associados a situações de maior severidade do estado do mar, se caracterizaram por média de 1,34 m, percentis de 90 e 99% de 1,92 e 2,60 m e máximo de 3,79 m. As ondas com direção de S tem média de 1,22 m, percentis de 1,72 e 2,46 m, respectivamente, e valor máximo de 3,67 m.

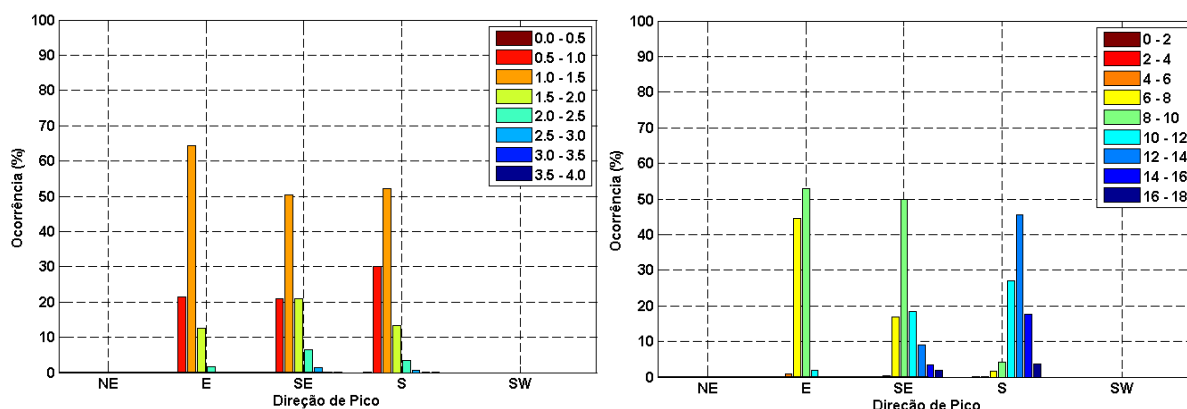


Figura 7 - Histogramas de direção do Hs (m) e Tp (s) para as ocorrências do período de 1980 a 2010 no ponto do ADCP A1.

Em relação ao Tp, observa-se que ondas de E têm em média Tp de 8,1 s, com percentis de 90 e 99% de 9,2 e 10,2 s e valor máximo de 12,3 s. Para as ondas de SE os valores encontrados são significativamente maiores, com média de 9,7 s, percentis de 12,7 e 16,5 s, respectivamente, e máximo de 19,6 s. A direção das ondas com maiores valores de Tp, contudo, é S, com média de 12,6 s, percentis de 90 e 99% de 14,8 e 17,0 s e valor máximo de 19,7 s.

Tabela 8 - Estatísticas de alturas significativas de onda, Hs em metros, no ponto de medição do ADCP A1.

Estatística	NE	E	SE	S	SW
Média	0,00	1,22	1,34	1,22	0,00
Percentil 90%	0,00	1,59	1,92	1,72	0,00
Percentil 99%	0,00	2,11	2,60	2,46	0,00
Máximo	0,00	2,88	3,79	3,67	0,00

Tabela 9 - Estatísticas de alturas significativas de onda, Tp em segundos, no ponto de medição do ADCP01.

Estatística	NE	E	SE	S	SW
Média	0,0	8,1	9,7	12,6	0,0
Percentil 90%	0,0	9,2	12,7	14,8	0,0
Percentil 99%	0,0	10,2	16,5	17,0	0,0
Máximo	0,0	12,3	19,6	19,7	0,0

Em relação à severidade do estado do mar, foram escolhidas as ocorrências com maiores valores de Hs em cada direção (E, SE e S) para avaliar as características meteorológicas associadas à geração das ondas em tais eventos. O maior valor de Hs encontrado com Dp de E aconteceu no dia 14/Ago/2007, com valor máximo de 2,88 m de Hs, Tp de 10,3 s e Dp de 112 ° (E).

A evolução do espectro direcional de ondas para esse evento no ponto do ADCP A1 pode ser observada na Figura 8. Ao longo de todo o período, entre os dias 5 e 19/Ago/2007, nota-se a presença de ventos (barras na cor branca) com intensidades abaixo dos 10 m/s e direção variando entre E e SE. Acompanhando a direção dos ventos, observa-se o mar local de alta frequência (faixa azul com períodos entre 2,23 e 4,31 s) e baixa energia. As faixas de ondas com períodos maiores, faixa verde (4,31 - 7,63 s) e amarela (7,63 – 12,3 s), por outro lado, possuem direção de pico de E e maior energia que o mar local de alta frequência.

Os campos de intensidade e direção dos ventos para a região oceânica defronte ao nordeste do Brasil estão representados na Figura 9 para o período entre o dia 13/Ago/2007 às 18 horas UTC e 14/Ago/2007 às 12 horas UTC. Evidencia-se que, apesar dos ventos locais (próximo ao ponto em vermelho) possuírem direção próxima a SE, ao largo é formada uma extensa pista de E, com valores de intensidade superiores a 10 m/s, associada à circulação atmosférica imposta pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Por consequência da estabilidade atmosférica configurada pelo posicionamento do ASAS, essas pistas atuam na região oceânica defronte ao litoral do nordeste por dias, sendo responsáveis pela geração de um mar local de E (faixa amarela) bem desenvolvido com valores de Hs que chegaram a 2,9 m e Tp de 10,3 s.

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS (ADCP A1) – WAVEWATCH – ago/2007

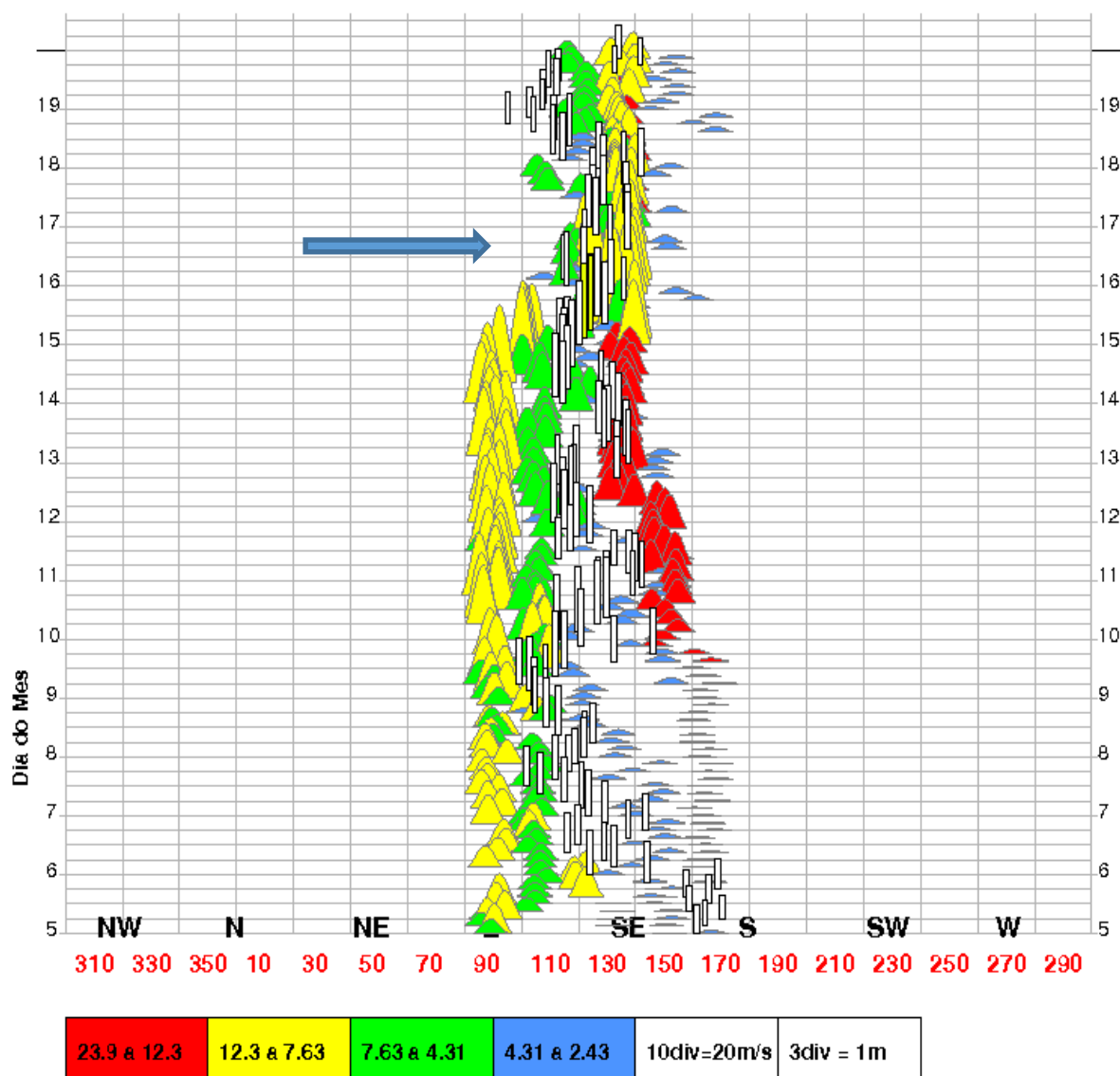


Figura 8 - Evolução do espectro direcional das ondas para o período entre o dia 5 e 19 de agosto de 2007 para o ponto de medição do ADCP A1.

Em relação às ondas com direção de SE e S, normalmente os valores extremos para esses dois quadrantes estão associados à passagem ou aproximação de sistemas frontais pela região. Dessa forma, preferiu-se escolher somente um único evento para apresentar as características meteorológicas associadas à geração dessas ondas. O evento escolhido ocorreu no dia 30 de julho 2007 com valor de H_s de 3,79 m, T_p de 9,8 s e D_p de 156 °.

A evolução do espectro direcional entre os dias 17 e 31 de julho de 2007 é mostrada na Figura 10. Ao final do dia 27/Jul/2007, com a aproximação de uma frente fria que vinha se deslocando pela costa, evidencia-se que os ventos (barras brancas) de E começam a mudar para SE e finalmente S. Entre o dia 29 e 30/Jul/2007 as velocidades dos ventos atingem valores acima dos 10 m/s (barra amarela). Na ocasião, segundo CLIMANÁLISE (2007), houve registro de rajada de vento de até 50 km/h em Aracajú-SE.

Na Figura 11 estão apresentados os campos de intensidade e direção dos ventos em superfície (10 metros) entre os dias 29/Jul/2007 às 12 horas UTC e 30/Jul/2007 às 06 horas UTC. No dia 29 às 12 horas é possível notar no sul do litoral baiano a formação de uma extensa pista de ventos com direção de S e intensidades de até 15 m/s, a qual estava associada à passagem de um sistema frontal na região.

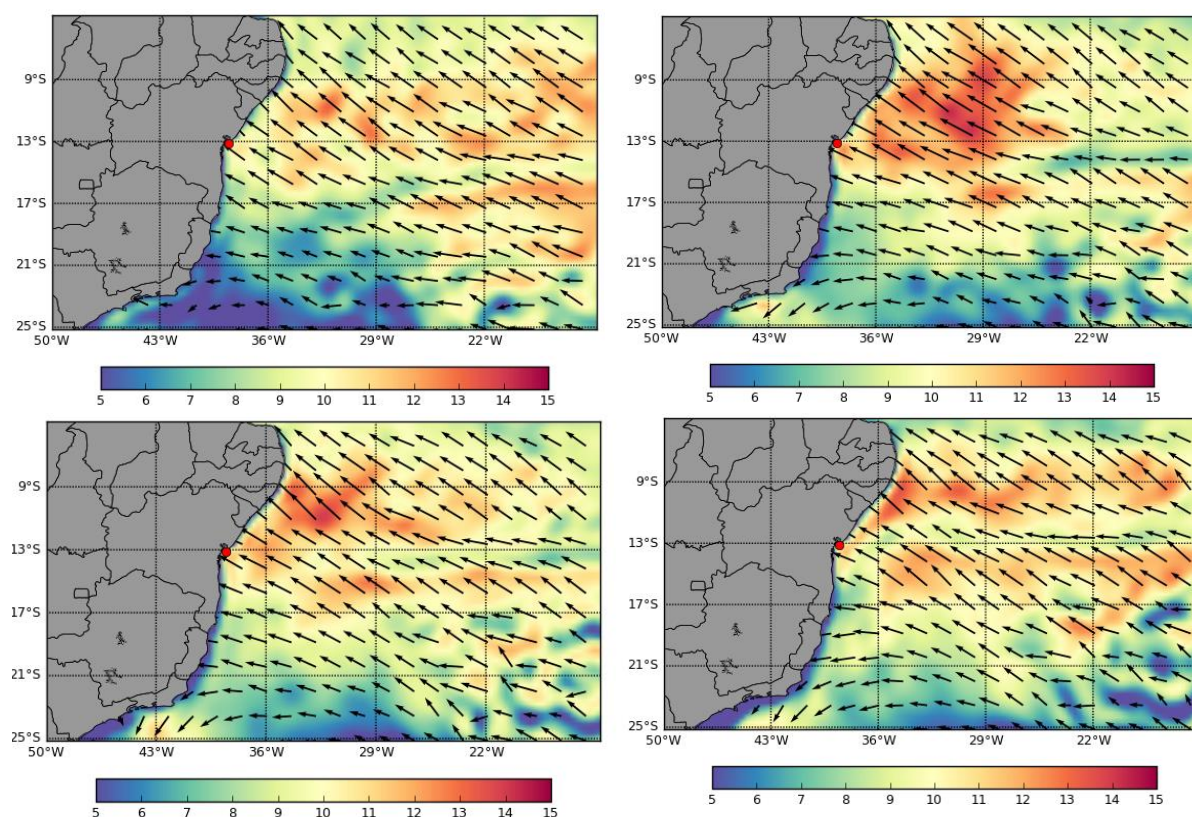


Figura 9 – Campos de intensidade e direção dos ventos a 10 metros para os dias: a) 13/08/2007 às 18 horas UTC; b) 14/08/2007 às 00 horas UTC; c) 14/08/2007 às 06 horas UTC; e d) 14/08/2007 às 12 horas UTC. O ponto em vermelho representa a posição do ADCP A1.

A presença de um anticiclone, o qual atuou na retaguarda do sistema frontal, foi responsável pela geração de uma região de alto gradiente de pressão na porção oceânica do litoral do Espírito Santo e Bahia, propiciando a geração e evolução dessas pistas de vento de S com altos valores de intensidades. Associado a esta situação meteorológica, a partir do dia 30 começam a chegar ondas de alta energia da faixa 3 (amarela) que atingem cerca de 3,8 m de Hs com direção de S.

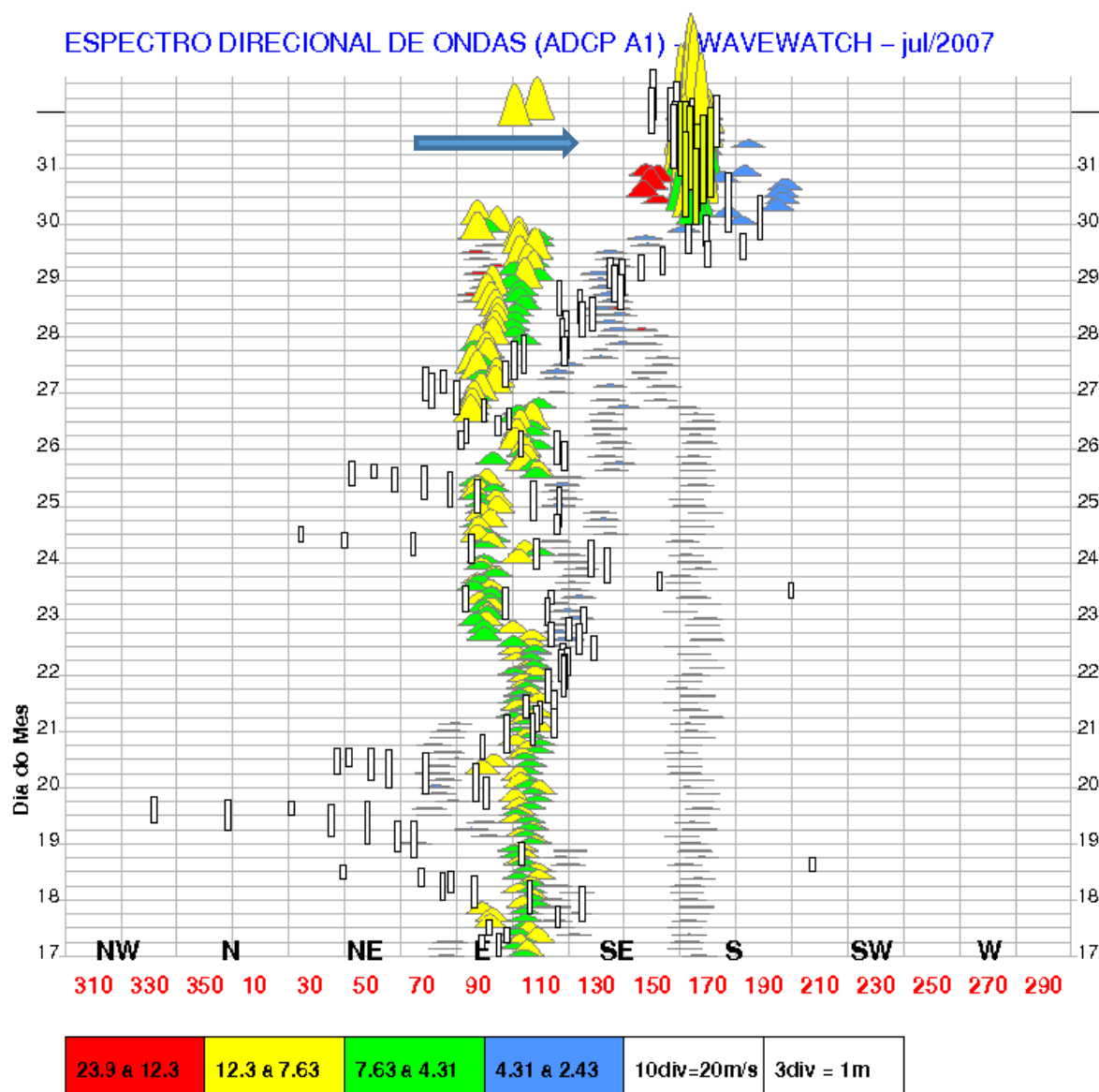


Figura 10 - Evolução do espectro direcional das ondas para o período entre o dia 17 e 31 de julho de 2007 para o ponto de medição do ADCP A1.

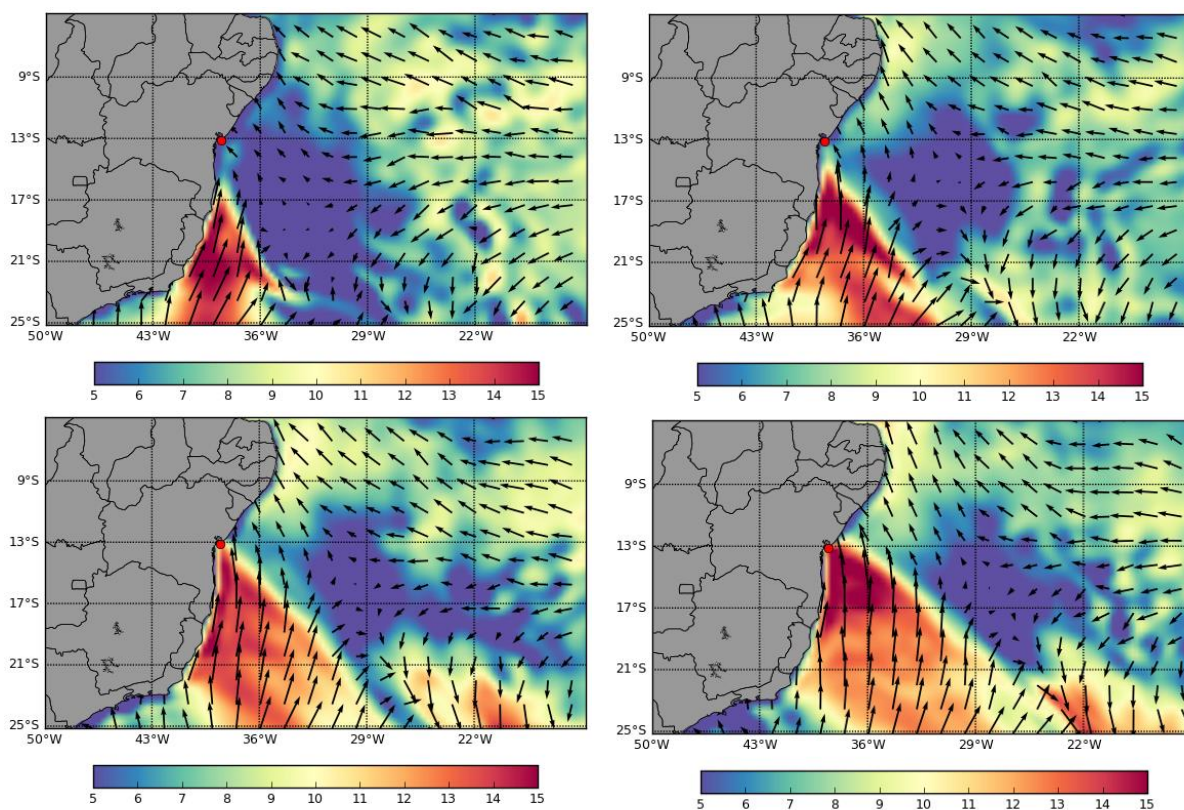


Figura 11 - Campos de intensidade e direção dos ventos a 10 metros para os dias: a) 29/07/2007 às 12 horas UTC; b) 29/07/2007 às 18 horas UTC; c) 30/07/2007 às 00 horas UTC; e d) 30/07/2007 às 06 horas UTC. O ponto em vermelho representa a posição do ADCP A1.

8. Estatística de Extremos de Ondas

Com base nos resultados da reconstituição de ondas realizada para o período de 1980 a 2010 com o modelo WW3, os valores de altura significativa para o ponto de medição do ADCP A1 foram utilizados na análise de extremos e na aplicação da técnica de Picos sobre Limiares, conhecido pela sigla POT - *Peaks Over Threshold* na literatura internacional, para a determinação do valor de retorno de H_s , conforme metodologia apresentada por Campos (2009).

De forma genérica a POT é utilizada para problemas de estimação da cauda de uma distribuição probabilística com base na sua amostra. O método é ajustado para problemas particulares de processos estocásticos que podem ser considerados aproximadamente estacionários ou divididos em partes estacionárias. Esse consiste no ajuste da distribuição generalizada de Pareto (GPD) para os excessos acima de um limiar (u) (FERREIRA e GUEDES SOARES, 1998). Assim, os valores extremos (ou valores de retorno) são resultados da extrapolação da GPD para períodos de retorno longos.

Para o conjunto de dados em questão foi escolhido o limiar (u) como 2,00 m, considerando uma janela temporal de 168 horas para garantir a independência estatística entre os eventos. Os valores de retorno para cada período de retorno podem ser encontrados na Figura 12 e na Tabela 10.

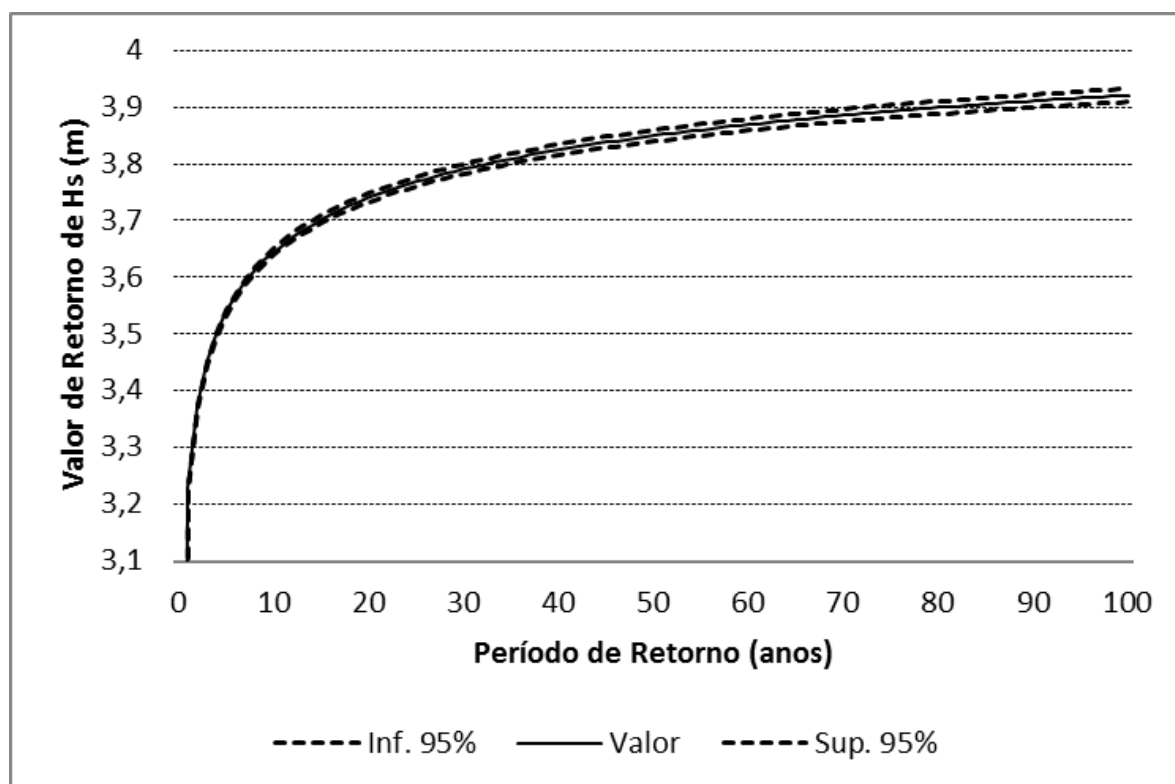


Figura 12 - Resultado dos valores extremos para períodos de retorno até 100 anos. A linha tracejada indica o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 10: Valores extremos de altura de ondas (H_s) para o ponto de medição do ADCP A1.

Período de Retorno (anos)	Valor de Retorno (m)	Intervalo de Confiança (95%)
5	3,54	(3,53 – 3,54)
10	3,65	(3,64 – 3,65)
20	3,74	(3,73 – 3,75)
50	3,85	(3,84 – 3,86)
100	3,92	(3,91 – 3,93)

O valor de retorno para o período de 5 anos foi de 3,54 m, com intervalo de confiança de 95% entre 3,53 – 3,54 m. Para 10 anos foi encontrado o valor de 3,65 m (3,64 – 3,65 m), para 20 anos de 3,74 m (3,73 – 3,75 m) e para 50 anos de 3,85 m (3,84 – 3,86). O valor extremo encontrado para o período de 100 anos foi 3,92m, sendo que com segurança de 97,5% é possível dizer que os extremos para 100 anos não ultrapassam $H_s = 3,93$ m.

Após esta etapa, os valores extremos de onda caracterizados no oceano serão transportados para o ponto de interesse na Baía de Todos os Santos por modelagem de propagação de ondas, incluindo efeitos de refração, difração, dissipação de fundo e arrebentação, através do SisBaHiA.

9. Referências

- Alves, J. H. G. M, Ribeiro, E. O., Grossmann Matheson, G. S. et al. 2009. Reconstituição do clima de ondas no Sul e Sudeste brasileiro entre 1997 e 2005. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 27, p. 427-445.
- Campos, R.M. (2009). Extreme wave values in the coast of Ro de Janeiro related to extratropical cyclones in the South Atlantic, M.Sc. dissertation – PEN0-COPPE/UFRJ.
- Chawla, A., Spindler, D. M., Tolman, H. L. 2013. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*. v. 70, p. 189-206.
- CLIMANÁLISE: Boletim de Monitoramento e Análise Climática INPE/CPTEC. 2007. n°07. v.22. 48p. CPTEC-INPE.
- Ferreira, J. A., Guedes Soares, C., 1998, “An Application of Peaks Over Threshold Method to Predict Extremes of Significant Wave Height”. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 120, pp. 165-176.
- Padilla-Hernández, R.; Perrie, W., Toulany, B., Smith, P. C. 2007. Modeling of Two Northwest Atlantic Storms with Third-Generation Wave Models. *Weather and Forecasting*. Vol. 22, Iss. 6, pp. 1229.
- Parente, C. E. 1999. Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas [Tese]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Piumbini, P. P. 2009. Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Rusu, E.; Pilar, P., Guedes Soares, C. 2008b. Evaluation of the wave conditions in Madeira Archipelago with spectral models. *Ocean Engineering*. v. 35, p. 1357 - 1371.
- Rusu, E.; Pilar, P.; Guedes Soares, C. 2008a. Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*. v. 55, p. 906–919.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Delst, P. V., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057. doi <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Tolman, H. L. User Manual and System Documentation of WAVEWATCHIII version 4.18. U. S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Technical Note. 2014.
- Violante-Carvalho, N. Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

10. Reconhecimentos e equipe técnica

Este relatório teve a coordenação geral do Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ, e contou com a colaboração dos seguintes profissionais:

Pela COPPE/UFRJ:

1. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica – Programa de Eng. Oceânica:
 - a. Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.
 - b. Profa. Susana Vinzon, D.Sc.
 - c. Prof. Marcos Nicollas Gallo, D.Sc.
 - d. Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc. (coordenador técnico deste relatório)
 - e. Prof. Nelson Violante de Carvalho, D.Sc.
 - f. Pesq. TI Patricia Auler Rosman, M.Sc.
 - g. Pesq. Izabel Nogueira, M.Sc. (principal pesquisador neste relatório)
2. Laboratório de Traçadores – Área de Recursos Hídricos – Programa de Eng. Civil:
 - a. Prof. João Fajardo Roldão, M.Sc. Notório Saber
 - b. Dr. Otávio Goulart Pécly. D.Sc.

Pela UFBA:

1. Departamento de Oceanografia: Prof. Guilherme Lessa, D.Sc.
2. Instituto de Geociências: Prof. José Maria Landim Dominguez, D.Sc.

Rio de Janeiro, 01 de Dezembro de 2015.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman
COORDENADOR DO PROJETO

Prof. Theodoro Antoun Netto
COORDENADOR
PROGRAMA DE ENGENHARIA OCEÂNICA

Prof. Fernando Alves Rochinha
DIRETOR SUPERINTENDENTE
FUNDAÇÃO COPPETEC