

sid.inpe.br/mtc-mxx/aaaa/00.00.00.00-XXX

APLICAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS NA ANÁLISE DE MODELO DE PREVISÃO DE ONDAS

Alexandre Miranda Pires dos Anjos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Antônio Lorenzetti e Valdir Innocentini, aprovada em 10 de outubro de 2000.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Cutter Anjos, Alexandre Miranda Pires dos.
Aplicação de Dados Altimétricos na Análise de Modelo de Previsão de Ondas / Alexandre Miranda Pires dos Anjos. - São José dos Campos: INPE, 2016.

Grau (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, ano de defesa.
Orientador: João Antônio Lorenzetti e Valdir Innocentini.

1. Satélite TOPEX/Poseidon. 2. Modelo de ondas do atlântico Sul SAWMO. 3. Climatologia de ondas. 4. Climatologia de ventos.
I. Título

CDU



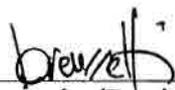
Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

[Informar aqui sobre marca registrada](#)

Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Mestre em**
Sensoriamento Remoto.

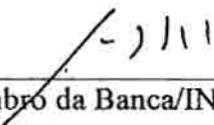
Dr. João Antônio Lorenzetti


Orientador/Presidente/INPE-SJC/SP

Dr. Valdir Innocentini


Orientador/INPE-SJC/SP

Dr. José Luiz Stech


Membro da Banca/INPE-SJC/SP

Dr. Carlos Eduardo Parente Ribeiro


Membro da Banca
Convidado COPPE/UFRJ-RJ

Candidato: Alexandre Miranda Pires dos Anjos

São José dos Campos, 10 de outubro de 2000.

Aos meus preciosos pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr João Antônio Lorenzetti e ao Dr. Valdir Innocentini por orientar-me com paciência e competência por caminhos que se sempre desconhecidos e ao Dr. Márcio Vianna pelas informações preciosas.

Aos colegas do Sensoriamento Remoto cuja herança alimentou meu caminhar. Em especial aos companheiros da turma de mestrado de 1997 por dar a sombra sempre que o sol castigava e aos amigos “conterrâneos” das montanhas viçosenses.

Aos meus amigos de vida: O Alessandro Prenazzi, O Alexandre Cobucci, O Carlos Coelho o “Carlinhos”, Francisco “Chico Anes”, Jorge o “Jorginho”, Marco Aurélio o “Corélio” e O Sandro, que mesmo seguindo caminhos diferentes ajudaram a encontrar-me no meu.

A minha família por ser o oásis mais belo e puro onde sempre recomponho minhas energias.

E, em especial, a minha querida Cassya que em todos os momentos caminhou comigo, mesmo agora nesta madrugada monótona e fria na qual escrevo as últimas palavras deste trabalho.

RESUMO

Dados de Altura Significativa de Ondas e de Velocidade Escalar de Vento, oriundos do satélite TOPEX/Poseidon, são utilizados para avaliar o desempenho do modelo de segunda geração de área limitada denominado South Atlantic Wave Model (SAWMO), implementado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São estudados os eventos ocorridos em 27 de maio de 1997 e 30 de maio de 1997. Estas datas são caracterizadas por intensas ondas no Atlântico Sul, culminando no dia 30, com ondas de cerca de 2,5 metros atingindo a costa Sudeste da América do Sul. Em cada um dos dias a área de estudo, localizada entre as coordenadas 10N, 50S e 10W, 90W, foi cortada por cinco órbitas passando por regiões com características distintas, abrindo possibilidades na comparação de informações entre modelo e satélite em diversos níveis de energia e localização. Os dados do modelo, dispostos em grade, foram interpolados linearmente, no tempo e no espaço, para os pontos de leitura do satélite para cada órbita. A partir destas informações foi calculado o Erro Médio, RMSE e o Índice de Espalhamento dos dados. O principal objetivo do trabalho é dimensionar a aplicabilidade de dados altimétricos do satélite TOPEX/Poseidon como fonte diagnóstica de modelos de previsão de ondas. Os resultados possibilitam identificar dificuldades do SAWMO em prever eventos com baixa energia ou em regiões de fronteira do modelo, sendo que muitas destas dificuldades são importadas do campo de ventos utilizado. Alguns gráficos sugerem que o SAWMO pode deslocar espacialmente suas informações. A subestima dos valores do modelo em relação ao satélite é nítida, com indícios do campo de ventos influenciar neste fato.

Palavras-chave: Satélite TOPEX/Poseidon. Modelo de Ondas do Atlântico Sul (SAWMO), climatologia de ondas e ventos.

ABSTRACT

Significant Wave Height and surface Wind speed, derived from TOPEX/Poseidon satellite, are used to evaluate the performance of a second generation limited area wave model called South Atlantic Wave Model (SAWMO) implemented at the National Space Research Institute (INPE). Two atmospheric events that occurred in May 27 and 30, 1977 were studied. These two dates were characterized by high waves in the South Atlantic, which resulted at May 30 in waves as high as 2.5 m reaching the Southeast coast of South America. At each of these two days, the study area, located between geographical coordinates 10 N, 50 S and 10 W and 90 W, was covered by five orbits that sampled oceanic regions showing very different wave patterns. These different situations enabled a better comparison of information derived from the satellite against model results and for several levels of wave energy and at diverse locations. The model results, provided at grid points, were linearly interpolated in time and space to each satellite data points and for all orbits. Using this information a Mean Error, a RMSE and a Scattering Index were calculated. The main goal of the present work has been investigating the usefulness of altimetric TOPEX/Poseidon data as a diagnostic tool of numerical wave models. The results obtained made it possible to identify some difficulties of SAWMO in forecasting low energy events or for regions close to model boundaries. Some of these problems seemed associated with the wind data used as forcing in the model. Some graphical plots suggest that SAWMO model can displace the forecast results as compared to the satellite observation. A frequent underestimation of model results as compared to satellite data has been observed. The analysis suggest this being linked to the LAM atmospheric model winds used to force the wave model.

Keywords: TOPEX/Poseidon Satellite. South Atlantic Wave Model (SAWMO). Climatology of waves and winds.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Espectro de energia mostrando os diferentes tipos de ondas oceânicas	32
Figura 2.2 - Parâmetros de uma onda senoidal.	34
Figura 2.3 - Espectro de ondas com aproximação por retângulos centrados nas frequências $f(i)$	41
Figura 2.4 - Espectro de ondas totalmente desenvolvido para ventos de 10,15 e 20 m/s.	42
Figura 3.1 - Espectro de ondas Eletromagnéticas.....	49
Figura 3.2 - Exemplo de um único pulso de retorno do radar altímetro (alto) e médias de 25 (meio) e 1000 (baixo) pulsos após interação com a superfície do mar.....	54
Figura 3.3 - Distribuição da média de 10.000 pulsos (“gates”) do satélite Seasat com curvas ajustadas equivalentes a 3 diferentes H_s	55
Figura 4.1 - Disposição das órbitas TOPEX/Poseidon.	63
Figura 4.2 - Representação de parte da malha do modelo cortada pelos pontos de coleta de dados do satélite.....	63
Figura 4.3 - Esquematização do método de interpolação empregado.	65
Figura 4.4 - Representação das três sub-áreas nas quais foi dividida a região de estudo.....	67
Figura 4.5 - Especificações do método de interpolação de dados utilizados no programa “ <i>surfer</i> ”	68
Figura 5.1 - Bacia do Oceano Atlântico Sul representando a área de estudo. .	69
Figura 5.2 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 25/05/1997.....	71
Figura 5.3 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 26/05/1997.....	72
Figura 5.4- Mapa de previsão dos ventos para o dia 27/05/1997.....	72
Figura 5.5 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 28/05/1997.....	73
Figura 5.6 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 29/05/1997.....	74
Figura 5.7 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 30/05/1997.....	74

Figura 5.8 - Média anual das Alturas Significativas de Ondas (Hs) e velocidade escalar dos ventos (U) do satélite TOPEX/Poseidon nas três subáreas do Oceano Atlântico Sul.	77
Figura 5.9 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1992.....	84
Figura 5.10 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1992	85
Figura 5.11 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1993.....	86
Figura 5.12 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1993	87
Figura 5.13 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1994.....	88
Figura 5.14 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1994	89
Figura 5.15 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1995.....	90
Figura 5.16 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1995	91
Figura 5.17 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1996.....	92
Figura 5.18 - Média da Velocidade dos Ventos (U) por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1996	93
Figura 5.19 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1997.....	94
Figura 5.20 - Média da Velocidade dos Ventos (U) por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1997	95
Figura 5.21 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1998.....	96
Figura 5.22 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1998	97

Figura 5.23 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1992/93. (01/dez. a 28/fev.)	100
Figura 5.24 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1993/94. (03/dez. a 02/mar.)	101
Figura 4.25 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1994/95. (05/dez. a 04/mar.)	102
Figura 4.26 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1995/96. (17/dez. a 05/mar.)	103
Figura 5.27 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1996/97. (08/dez. a 07/mar.)	104
Figura 5.28 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em referente ao verão de 1997/98. (09/dez. a 09/mar.)	105
Figura 5.29 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1993. (28/fev. a 07/jun.)	107
Figura 5.30 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1994. (02/mar. a 09/jun.)	108
Figura 5.31 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1995. (04/mar. a 01/jun.)	109
Figura 5.32 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1996. (05/mar a 02/jun.)	110

Figura 5.33 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1997. (07/mar. a 25/mai.).....	111
Figura 5.34 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1998. (09/mar. a 06/jun).....	112
Figura 5.35 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1993. (07/jun. a 05/set.).....	114
Figura 5.36 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1994. (09/jun. a 07/set.).....	115
Figura 5.37 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1995. (01/jun. a 08/set).....	116
Figura 5.38 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1996. (02/jun. a 09/set.).....	117
Figura 5.39 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1997. (04/jun. a 01/set.).....	118
Figura 5.40 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1993. (05/set. a 03/dez.)	120
Figura 5.41 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1994. (07/set. a 05/dez.)	121
Figura 5.42 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1995. (08/set. a 07/dez.)	122

Figura 5.43 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1996. (09/set. a 28/nov.)	123
Figura 5.44 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1997. (01/set. a 30/nov.)	124
Figura 6.1 - Erro Médio (EM) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 27/mai/1997.....	129
Figura 6.2 - Índice de dispersão (IE) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 27/mai/1997	132
Figura 6.3 - RMSE calculado para as cinco órbitas (T/P) do dia 27/mai/1997	133
Figura 6.4 - Correlação cruzada calculada para as cinco órbitas (T/P) do dia 27/mai/1997.....	133
Figura 6.5 - Hs(a) e U ₁₀ (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 1.....	134
Figura 6.6 - Erro percentual ((SAT-MOD)/SAT)x100), em função da latitude calculado para órbita 1	135
Figura 6.7 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 1.	137
Figura 6.8 - Hs(a) e U ₁₀ (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 2.....	138
Figura 6.9 - Erro percentual ((SAT-MOD)/SAT)x100), em função da latitude calculado para órbita 2	139
Figura 6.10 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 2.	141
Figura 6.11 - Hs(a) e U ₁₀ (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 3.....	142

Figura 6.12 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 3.	143
Figura 6.13 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 3.	145
Figura 6.14 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 4.	146
Figura 6.15 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 4.	147
Figura 6.16 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 4.	149
Figura 6.17 - Hs(a) e velocidade dos ventos (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 5.	150
Figura 6.18 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 5.	152
Figura 6.19 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 5.	153
Figura 6.20 - Erro Médio (EM) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 30/mai/1997.....	156
Figura 6.21 - Índice de dispersão (IE) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 30/mai/1997.....	157
Figura 6.22 - RMSE calculado para as cinco órbitas (T/P) do dia 30/mai/1997.....	157
Figura 6.23 - Correlação cruzada calculada para as cinco órbitas (T/P) do dia 30/mai/1997.....	158

Figura 6.24 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 6.	159
Figura 6.25 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 6.	160
Figura 6.26 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 6.	161
Figura 6.27 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 7.	163
Figura 6.28 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 7.	164
Figura 6.29 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 7.	165
Figura 6.30 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 8.	166
Figura 6.31 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 8.	167
Figura 6.32(a) - Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 8.	169
Figura 6.33 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 9.	170
Figura 6.34 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 9.	171

Figura 6.35 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 9.	173
Figura 6.36 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 10.	174
Figura 6.37 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 10.	175
Figura 6.38 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 10.	177

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Distribuição ondas oceânicas geradas pelo vento de acordo com o período e forças atuantes.....	33
Tabela 2.2 – Escala Beaufort que relaciona a velocidade do vento e a altura significativa de ondas	40
Tabela 3.1- Valores dos coeficientes a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 do polinômio utilizado na estimativa de velocidade do vento (U)	57
Tabela 3.2 – Alguns parâmetros dos satélites altimétricos.	57
Tabela 6.1 – Parâmetros estatísticos que comparam as alturas significativas de ondas do modelo SAWMO com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 27/mai/1997.....	127
Tabela 6.2 – Parâmetros estatísticos que comparam a velocidade dos ventos do modelo LAM com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 27/mai/1997.....	128
Tabela 6.3 – Parâmetros estatísticos que comparam as alturas significativas de ondas do modelo SAWMO com o satélite TOPEX/Poseidon em 30/mai/1997.....	154
Tabela 6.4 – Parâmetros estatísticos que comparam os ventos do modelo LAM com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 30/mai/1997	155

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD	Acoplados Discretos
AH	Acoplados Híbridos
ALT	Radar altimétrico de frequência dupla
AVISO	Archiving Validation Interpretation of Satellite data in Oceanography
CNES	<i>Centre National d'Etudes Spatiales</i>
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CSOWM	<i>Canadian Spectral Ocean Wave Model</i>
ERS	
ERS	Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto
GDR-M	<i>Geophysical data record</i>
GEOSAT	Geodetic Satellite
GPS	Sistema de posicionamento global
IDL	<i>Interactive data language</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LAM	<i>limited-area atmospheric model</i>
LRA	Laser refletor
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PNJ	Técnica de Pierson, Neumann e James
REM	Radiação Eletromagnética
SAWMO	<i>South Atlantic Wave Model</i>
SSALT	Radar altimétrico de estado sólido de frequência única
T/P	TOPEX/Poseidon
TMR	Radiômetro de microondas
TOGA	<i>Tropical Ocean and Global Atmosphere</i>
TOPEX	<i>Topography Experiment</i>
WAM	<i>Wave Model</i>
WOCE	<i>The World Ocean Circulation Experiment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Pegada ou escarpamento da onda = H/L
β	Idade da onda = c/U
ρ	Densidade
σ	Desvio Padrão
τ	Potência do pulso transmitido
σ	Seção reta do radar
$\eta(\mathbf{x},t)$	Deslocamento vertical instantâneo da superfície do mar em torno do nível médio da água
σ_{ob}	Bias do coeficiente de retroespalhamento
a	Amplitude de onda
a_e	Raio da Terra
B	Números Beaufort
\bar{c}_g	Velocidade de grupo
c	Velocidade de fase = L/T
c	Velocidade da luz
EM	Erro Médio
f	Frequência de onda = $1/T$
f_m	Frequência de pico
\bar{H}	Altura média de ondas
$H_{1/10}$	Média dos 1/10 das ondas mais altas
H_m	altura de ondas mais provável
H	Altura de onda da crista até o cavado
h	Profundidade medida a partir do nível médio da água
h	Rms da altura de onda
H_s	Altura Significativa de Ondas, m
IE	Índice de dispersão
k	Número de onda = $2\pi/L$
K	Constante que inclui a potência transmitida, ganho na compressão do pulso, ganho da antena, perdas na propagação e coeficiente de reflexão de Fresnel

L	Comprimento de onda
<i>L</i>	Latitude do ponto observado
<i>P</i>	Pressão superficial
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
<i>S_{ds}</i>	dissipação devido ao <i>wave-breaking</i>
<i>S_{nl}</i>	Dissipação devido às interações não lineares
T	Período da onda (intervalo de tempo entre a ocorrência de sucessivos vales ou cristas numa dada posição fixa)
U	Velocidade Escalar do Vento Horizontal, m/s
U₁₀	Velocidade escalar do Vento horizontal a 10,0 m de altura

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 27
2	CAPÍTULO 2: DINÂMICA DAS ONDAS E MODELOS DE PREVISÃO ... 31
2.1.	DINÂMICA DAS ONDAS SUPERFICIAIS 31
2.2.	MODELOS DE PREVISÃO DE ONDAS 40
2.3.	MODELO DE PREVISÃO DE ONDAS SAWMO (<i>South Atlantic Wave Model</i>) 45
3	CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO REMOTO 48
3.1.	SATÉLITES ALTIMÉTRICOS 48
3.2.	CORREÇÕES ALTIMÉTRICAS 49
3.3.	MEDIÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS E VENTO 52
3.4.	HISTÓRICO DOS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS 57
3.5.	SATÉLITE TOPEX/Poseidon 58
4	CAPÍTULO 4: METODOLOGIA 60
4.1.	SATÉLITE x MODELO 60
4.1.1.	DADOS DO SATÉLITE TOPEX/Poseidon 60
4.1.2.	DADOS DO MODELO DE PREVISÃO DE ONDAS (SAWMO)..... 61
4.1.3.	AJUSTE DOS DADOS DO SATÉLITE E DO MODELO 62
4.1.4.	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO 65
4.2.	CLIMATOLOGIA DAS ONDAS PELO SATELITE TOPEX/Poseidon 66
5	CAPÍTULO 5: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 69
5.1.	REGIME DOS VENTOS E ONDAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL 69
5.2.	CLIMATOLOGIA T/P DOS VENTOS E ONDAS NO ATLÂNTICO SUL... 77
5.2.1.	VERÃO 98
5.2.2.	OUTONO 106
5.2.3.	INVERNO 113
5.2.4.	PRIMAVERA 119
6	CAPÍTULO 6: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 125
6.1.	RESULTADOS TOPEX/Poseidon 126

6.2. RESULTADOS SATÉLITE x MODELO	127
6.2.1. CASO 27 DE MAIO DE 1997	127
6.2.1.1. ANÁLISE GERAL	127
6.2.1.2. ANÁLISE DA ÓRBITA 1	134
6.2.1.3. ANÁLISE DA ÓRBITA 2	138
6.2.1.4. ANÁLISE DA ÓRBITA 3	142
6.2.1.5. ANÁLISE DA ÓRBITA 4	146
6.2.1.6. ANÁLISE DA ÓRBITA 5	150
6.2.2. CASO 30 DE MAIO DE 1997	154
6.2.2.1. ANÁLISE GERAL	154
6.2.2.2. ANÁLISE DA ÓRBITA 6	158
6.2.2.3. ANÁLISE DA ÓRBITA 7	162
6.2.2.4. ANÁLISE DA ÓRBITA 8	166
6.2.2.5. ANÁLISE DA ÓRBITA 9	170
6.2.2.6. ANÁLISE DA ÓRBITA 10	174
7 CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	179
7.1. QUANTO A RESOLUÇÃO TEMPORAL DO SATÉLITE	179
7.2. QUANTO AS REGIÕES DE FRONTEIRA	180
7.3. QUANTO A ENERGIA	181
7.4. QUANTO A SUBESTIMA DO MODELO	181
7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	182
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	185

1 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A aplicação de dados de satélites abrange diversas áreas. Este trabalho utiliza especificamente informações de altimetria oriundas do satélite TOPEX/Poseidon (T/P) em comparação com o modelo de previsão de ondas de Segunda geração denominado SAWMO (*South Atlantic Wave Model*), para oceano Atlântico Sul. São utilizadas informações de Altura Significativa de Ondas (Hs) e de Velocidade Escalar do Vento (U) na verificação do desempenho do modelo frente aos dados do satélite. Hs é um parâmetro estatístico amplamente utilizado no estudo de ondas superficiais e representa a média dos 1/3 das ondas mais elevadas encontradas numa determinada região. Tanto o satélite T/P como o SAWMO utilizam este parâmetro para descrever o campo de ondas de uma determinada região. O confronto das informações de modelos de ondas com dados que representem a realidade mais fielmente é de extrema importância para avaliação do desempenho e aperfeiçoamento dos modelos. Guillaume (1990) utiliza dados de Hs da bóia “BEATRICE” ancorada no canal da Mancha para testar modificações do modelo de ondas de segunda geração VAG e comparação com o modelo de ondas de terceira geração WAM. Khandekar e Lalbeharry (1996) também se valem de dados de bóias ancoradas ao longo do Atlântico e Pacífico norte na avaliação do desempenho do modelo de ondas CSOWM (Canadian Spectral Ocean Wave Model). O grande mérito na utilização dos dados de bóia está na precisão das informações tomadas quase que continuamente. No entanto, estando as bóias ancoradas, as informações se restringem a uma mesma localização, necessitando, portanto, de um grande número desses equipamentos para cobrir áreas mais extensas. Os satélites surgem como opção valiosa na disponibilização de dados para estudos de modelos. A acurácia de suas informações hoje são, como no caso do satélite T/P na medição de Hs, de 3,0 cm. Em contrapartida os satélites ainda perdem muito em resolução temporal se comparados às bóias. O satélite T/P passa por um mesmo ponto somente a cada 10 dias aproximadamente. Os dados de satélite, pelas suas características, abrem um leque de possibilidades em estudos envolvendo

modelos de ondas. Atualmente a maioria dos trabalhos tratam da assimilação de dados de satélites pelos modelos visando a melhoria de suas informações, principalmente no que se refere aos campos de vento que alimentam os modelos, tido como a principal fonte de erros destes. Nesta linha podem ser citados os trabalhos de Clancy et al (1986), Janssen et al (1989), Breivik e Reinstad (1994), Bender e Glowacki (1996) e Mailly et al (1997). Mais próximo da linha seguida por este trabalho pode ser citado o trabalho de Staabs e Bauer (1998) no qual são feitas comparações de Hs entre os satélites T/P e ERS-1 e o modelo de previsão de ondas de terceira geração WAM.

Os modelos de previsão de ondas têm grande interesse prático tanto em operações navais como em atividades de comércio marítimo, se estendendo por vários ramos como ciência, indústrias petrolíferas e segurança. O SAWMO tem se voltado principalmente para a previsão de eventos extremos que podem afetar as populações costeiras. Regularmente, nos períodos de ondas mais intensas, a imprensa tem noticiado mortes, naufrágios, destruição de patrimônio público e de estabelecimentos a beira-mar, além de modificações de perfis de praias por erosão ou deposição. Os modelos de previsão de ondas, nestes casos, atuam como fonte de informação preventiva, auxiliando as autoridades competentes a tomar decisões que minimizem os prejuízos e resguardem a vida da população. As previsões do SAWMO são encontradas na internet no endereço eletrônico <http://www.atlasul.inpe.br>. Neste página eletrônica também podem ser encontradas várias notícias divulgando os danos consequentes das fortes ondas ocorridas nos últimos anos. A televisão, como nas previsões meteorológicas, também é utilizada como veículo de divulgação das informações de vento e de ondas. A motivação prática o trabalho vem da necessidade em se fornecer informações precisas a respeito do estado do mar e ampliar o campo de aplicação do modelo de previsão de ondas.

O principal objetivo deste trabalho é dimensionar a aplicabilidade de dados altimétricos T/P como fonte diagnóstica do modelo de previsão de ondas SAWMO.

Foi escolhido para estudo o evento de 30 de maio de 1997, o qual apresentou ondas de grande porte. Visando acompanhar a evolução deste evento foi estudado também o dia 27 de maio do mesmo ano. A metodologia empregada compara órbita a órbita as informações do satélite e modelo. Para que os dados do modelo, dispostos em grade, coincidissem com os pontos de leitura do satélite, tanto no tempo como no espaço, optou-se pela interpolação linear dos quatro pontos do modelo mais próximos da localização da leitura do satélite. Em cada um dos dias a região de estudo foi cortada por cinco órbitas totalizando portanto dez órbitas. As órbitas do dia 30 e do dia 27 possuem características semelhantes no tamanho e na área de cobertura por serem umas imediatamente paralelas às outras. Esta possibilidade é permitida, pela resolução temporal do satélite T/P, somente a cada 3 dias, motivo pelo qual foi escolhido para analisar a evolução do evento descrito pelo modelo o dia 27 e não o dia 29, por exemplo. Estando as duas bases de dados coerentemente dispostas no tempo e no espaço foram calculados os parâmetros estatísticos Erro Médio (EM), o RMSE, Índice de dispersão (IE) e o Desvio Padrão dos Erros para Hs e U, conforme foram apresentados por Khandekar e Lalbeharry (1996). Além destes parâmetros foi também calculado o Coeficiente de Correlação Linear (r). Estes parâmetros são correntemente utilizados em estudos que comparam modelos de ondas com outras bases de informação.

O capítulo 2 introduz os conceitos básicos da dinâmica das ondas superficiais seguido de uma abordagem sobre os modelos de previsão de ondas para finalmente encerrar apresentando as principais características do SAWMO. O capítulo 3 trata do Sensoriamento Remoto direcionado a satélites altimétricos, apontando os fundamentos da aquisição de dados de Hs e U e ressaltando algumas características relevantes do satélite TOPEX/Poseidon. O capítulo 4, apresenta a caracterização da área de estudo focalizando o regime dos ventos e ondas encontrados na região. Valendo-se dos dados do satélite TOPEX/Poseidon é construída a climatologia de Hs e U no período de 1992 a 1998, buscando complementar o escasso material disponível que aborda o assunto. São

apresentados os valores médios de Hs e U no intervalo de cerca de 10 dias. As informações Hs e U também são interpoladas em grade em períodos aproximadamente equivalentes às estações climáticas. No capítulo 5 é descrita a metodologia utilizada tanto na construção da climatologia como na comparação dos dados do satélite com o modelo. O capítulo 6 apresenta os resultados encontrados e sua análise preparando o caminho para o capítulo 7 onde são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 CAPÍTULO 2: DINÂMICA DAS ONDAS E MODELOS DE PREVISÃO

As ondas oceânicas despertam interesse de curiosos e estudiosos desde tempos remotos da civilização humana. Segundo Khandekar (1989), destacados pensadores, começando pelo filósofo grego Aristóteles, já buscavam conhecer as fontes geradoras das ondas do mar. Mais recentemente, o avanço tecnológico proporcionou novas ferramentas que auxiliam no entendimento e reprodução do fenômeno ondulatório. Será abordado neste capítulo uma destas ferramentas, os modelos de previsão de ondas.

Modelos matemáticos de previsões de ondas, auxiliados por tecnologia computacional, são ferramentas importantes na descrição do estado do mar. O primeiro modelo com a finalidade de retratar o estado das ondas em tempo futuro foi aplicado durante a segunda Guerra Mundial, auxiliando operações anfíbias (Bishop, 1984). Atualmente, a previsão de ondas oceânicas têm grande interesse prático, tanto em operações navais como em atividades de comércio marítimo.

A parte inicial deste capítulo dará uma breve introdução a respeito da dinâmica das ondas oceânicas, causas, formação, classes, propagação e formulação básica, oferecendo argumentos para que o leitor se familiarize, de forma mais ampla, com os modelos de previsão de ondas. No tópico 2.2 é feita uma breve descrição histórica sobre a evolução dos modelos de previsão de ondas e suas classificações. No último tópico será apresentado o modelo de previsão de ondas utilizado neste estudo.

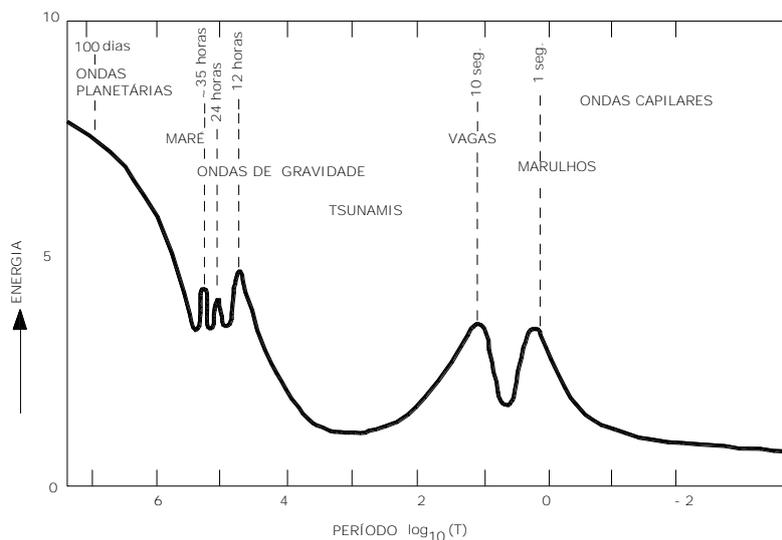
2.1. DINÂMICA DAS ONDAS SUPERFICIAIS

Algumas das principais causas dos fenômenos ondulatórios no oceano são: ventos, variações verticais de densidade, distúrbios sísmicos, mudança de pressão atmosférica, influência das forças gravitacionais do Sol e da Lua.

Segundo Pickard (1978) os principais tipos de ondas oceânicas e suas causas são:

- 1- Marulho e Vagas – ondas formadas pela ação do vento na superfície da água;
- 2- Ondas internas – ondas que podem ocorrer quando há variações de densidade vertical. Possuem várias causas como cisalhamento de corrente e distúrbios de superfície;
- 3- Tsunames – ondas geradas por distúrbios sísmicos no fundo do mar ou na costa;
- 4- Ondas Gravitacionais Giroscópicas internas e externas – ondas que têm período suficientemente longo para que o efeito Coriolis tenha influência. São várias as causas, entre elas, variações de pressão atmosférica.
- 5- Rossby ou Ondas Planetárias – ondas de grande período. Algumas causas são : variações temporais de pressão e instabilidades barotrópica e baroclínica.
- 6- Marés – ondas geradas pela influência das forças gravitacionais do Sol e da Lua.

Figura 2.1 - Espectro de energia mostrando os diferentes tipos de ondas



Fonte: Adaptado de McLellan (1977).

Outra forma de retratar a classificação das ondas é através do espectro de energia (figura 2.1) onde os diferentes tipos de ondas oceânicas são discriminadas conforme o período e energia.

Será abordado, dentro da classificação de Pickard (1978), ondas do tipo 1. Este fato se justifica porque na implementação de modelos de previsão de ondas, o principal agente gerador de ondas oceânicas considerado é o vento, já que este é o maior responsável pela formação das ondas de superfície.

No grupo das ondas geradas pelo vento, McLellan (1977) discrimina os tipos conforme a tabela 1.

Tabela 2.1 - Distribuição ondas oceânicas geradas pelo vento de acordo com o período e forças atuantes

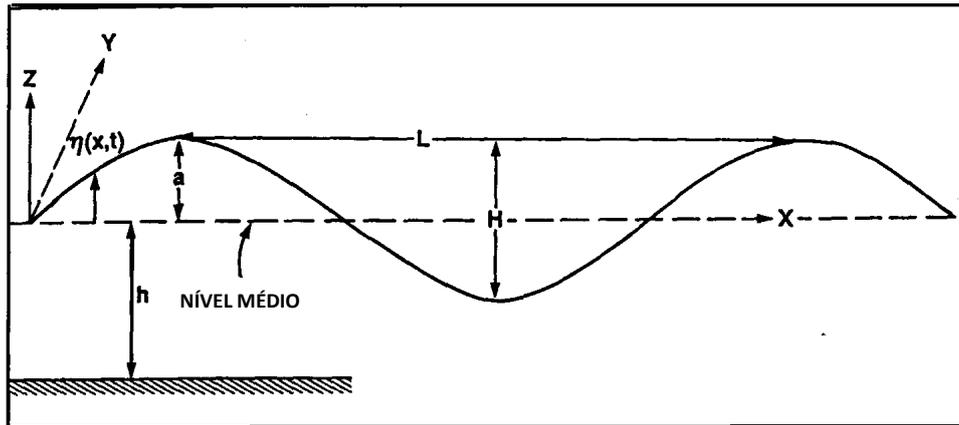
TIPO	FAIXA DE PERÍODO	FORÇAS QUE CONTROLAM AS CARACTERÍSTICAS DA ONDA	FORÇAS GERADORAS
Ondas capilares	< 0,1 seg.	Tensão Superficial	Ventos
Ondas de Ultra-gravidade	0,1-1 Seg.	Tensão superficial e gravidade	Ventos
Ondas de gravidade ordinárias	1-30 Seg.	Gravidade	Ventos
Ondas de infra-gravidade	30 seg.-5 min.	Gravidade e aceleração de Coriolis	Ventos e ondas de gravidade ordinárias

Fonte: Adaptada de McLellan (1977)

As ondas oceânicas, a exemplo da maioria, são a princípio consideradas como tendo a forma senoidal. Esta abordagem é vantajosa pela facilidade descritiva da senóide. Mesmo as ondas geradas pelo vento aparentando, muitas vezes, a forma trocoidal, a aproximação para uma senóide é válida como um conveniente meio de ilustrar propriedades básicas e conceitos.

Os principais parâmetros das ondas, que seguem uma descrição senoidal, são apresentados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Parâmetros de uma onda senoidal.



Fonte: Adaptado de Bishop (1984)

a: amplitude de onda

H: altura de onda da crista até o cavado

L: comprimento de onda

$\eta(x,t)$: deslocamento vertical instantâneo da superfície do mar em torno do nível médio da água

k: número de onda = $2\pi/L$

T: período da onda (intervalo de tempo entre a ocorrência de sucessivos vales ou cristas numa dada posição fixa)

c: velocidade de fase = L/T

f: frequência de onda = $1/T$; ω : frequência angular de onda = $2\pi/T$;
 $\sigma = kc$

h: profundidade medida a partir do nível médio da água

δ : pegada ou escarpamento da onda = H/L . De acordo com a teoria de Stokes o máximo valor de H/L é $1/7$.

β : idade da onda = c/U ; aqui U é a velocidade horizontal do vento. Como a onda cresce com o aumento da velocidade do vento, a onda aumenta seu comprimento de onda levando a um aumento da velocidade de fase c . Portanto β , a idade da onda, cresce com o aumento da onda.

A descrição matemática de uma onda senoidal pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta(x,t) = a \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.1)$$

Devido ao fato das ondas serem geradas por processos não lineares, com interação não linear entre suas componentes senoidais, o estado do oceano dificilmente será representado completamente por uma única onda bem comportada como a mostrada na Figura 2.2. Normalmente representa-se o estado do mar através da superposição simultânea de uma boa quantidade de classes de ondas. A representação matemática formal usa componentes harmônicos da onda como uma construção de blocos, e representa a superfície do mar como uma combinação finita desses componentes de onda, cada uma com sua amplitude, freqüência, e direção (Bishop, 1984), e é dada por uma representação em componentes de Fourier:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^r a_n \cos(n\omega_n t + \varepsilon) \quad (2.2)$$

O tratamento de ondas se propagando em meio fluido requer considerações particulares, direcionadas pelos princípios físicos associados à mecânica dos fluidos. Um importante parâmetro na dinâmica das ondas, principalmente para os modelos numéricos, é denominado Velocidade de Fase determinada pela Equação de Dispersão. Partindo-se da equação de dispersão pode-se determinar a velocidade com que uma onda ou grupo de ondas se propaga e como estas naturalmente são selecionadas conforme seus comprimentos de onda e profundidade em que se deslocam. Investigar o caminho que leva à equação de dispersão será o objetivo em seguida. É sabido que quanto maior o comprimento de onda associado à perturbação na superfície da água, mais rapidamente esta será capaz de se afastar de seu núcleo gerador.

Na teoria clássica que descreve a propagação das ondas em meio fluido, são geralmente apontadas as seguintes considerações, buscando simplificar o tratamento matemático:

- 1) A amplitude da perturbação superficial é muito pequena em relação ao comprimento da onda e à profundidade.
- 2) O fluido é de profundidade uniforme, h ;
- 3) O fluido é não viscoso e irrotacional (sem vorticidade);
- 4) O fluido é incompressível e homogêneo;
- 5) A aceleração de Coriolis pode ser desprezada;
- 6) A tensão superficial pode ser desprezada;
- 7) O fundo é liso e impermeável;
- 8) A pressão atmosférica ao nível do mar é uniforme;
- 9) A Terra é plana e estática.

(4) exclui ondas acústicas e ondas internas; (5) exclui ondas muito longas; (6) exclui ondas muito curtas.

Simplificando a descrição de uma onda para um sistema de duas coordenadas x e z , seguindo a orientação mostrada na figura 2.2, as equações que regem o fenômeno ondulatório em meio fluido podem ser escritas como se segue:

Nas direções x , com velocidade u , e em z , com velocidade w :

$$u_t + uu_x + ww_z = -\frac{P_x}{\rho} \quad (2.3)$$

$$w_t + uw_x + ww_z = -\frac{P_z}{\rho} - g \quad (2.4)$$

A equação de continuidade num fluido incompressível pode ser escrita como:

$$u_x + w_z = 0 \quad (2.5)$$

A notação aqui utilizada obedece ao seguinte critério:

$$S_k = \frac{dS}{dk}, \quad S_{kk} = \frac{d^2S}{dk^2} \quad \text{e} \quad S_{kj} = \frac{dS}{dkdj},$$

onde,

S, pode ser qualquer símbolo que represente uma função e k e j quaisquer variáveis.

Se as forças atuantes no sistema forem consideradas conservativas, ou seja, as ondas sendo irrotacionais, então existe uma função potencial de velocidade de fase associada às direções x e z, que podem ser expressas da seguinte forma:

$$u = \phi_x \quad w = \phi_z \quad (2.6)$$

Rescrevendo as equações 2.3, 2.4, e 2.5 considerando as relações de 2.6, obtém-se:

$$-\phi_{xt} + \phi_x \phi_{xx} + \phi_z \phi_{zx} = -\frac{P_x}{\rho} \quad (2.7)$$

$$-\phi_{xt} + \phi_x \phi_{xx} + \phi_z \phi_{zx} = -\frac{P_x}{\rho} - g \quad (2.8)$$

$$\phi_{xx} + \phi_{zz} = 0 \quad (2.9)$$

Integrando as equações 2.7 e 2.8 em relação a x e z, respectivamente encontra-se:

$$-\phi_t + (\phi_x^2/2) + (\phi_z^2/2) = -\frac{P}{\rho} + \text{Constante} \quad (2.10)$$

$$-\phi_t + (\phi_x^2/2) + (\phi_z^2/2) = -\frac{P}{\rho} - gz + \text{Constante} \quad (2.11)$$

Tomando a equação 2.11 e reorganizando seus termos obtém-se:

$$gz - \phi_t + (\phi_x^2 + \phi_z^2)/2 + P/\rho = \text{Constante} \quad (2.12)$$

A equação 2.10 é identificada como sendo uma das várias formas em que pode-se expressar a equação de Bernoulli.

É preciso neste ponto, estabelecer as condições de contorno do problema em questão, que são: a interface ar-água e o fundo do oceano. Pode-se

expressar matematicamente as condições de contorno impostas pela interface ar-água da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt}[z - \eta(x,t)] = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dz}{dt} - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

Considerando as relações dadas em 2.6 a equação 2.13 pode ser rescrita como:

$$\phi_z + \eta_t = \phi_x \eta_x \quad (2.14)$$

A equação é chamada de Condição de Contorno Cinemática.

No fundo do oceano, onde $z=-h$ é considerado que não existe deslocamento de massa de água na direção vertical, ou seja:

$$-\phi_z = w = 0 \text{ em } z = -h \quad (2.15)$$

Reuniu-se portanto, o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} gz - \phi_t + (\phi_x^2 + \phi_z^2)/2 &= \text{Constante} \text{ para } z = \eta(x,t) \\ \phi_z + \eta_t &= \phi_x \eta_x \quad \text{para } z = \eta(x,t) \\ \phi_{xx} + \phi_{zz} &= 0 \quad \text{para } -h \leq z \leq \eta(x,t) \\ \phi_z &= 0 \quad \text{em } z = -h \end{aligned} \quad (2.16)$$

Para solucionar o conjunto de equações 2.16 é necessário encontrar uma função que satisfaça a todas. A não linearidade do termo $\phi_x \eta_x$ da segunda equação de 2.16 impede que tal função seja encontrada. Desta forma é preciso que as duas primeiras equações em 2.16 sejam linearizadas. A linearização destas equações é feita através da expansão, em série de Taylor, dos termos para o nível fixo $z = 0$ na forma:

$$\phi_{x(z=\eta)} = \phi_{x(z=0)} + \phi_{xz}\eta_{(z=0)} + \phi_{xzz}(\eta^2/2)_{(z=0)} + \dots$$

Após a linearização introduz-se o fator Cx , considerando C a velocidade de fase com que o fluido se propaga. Os detalhes da linearização, assim como a introdução do fator Cx pode ser acompanhado em maiores detalhes em Neumann e Pierson (1966).

O novo conjunto de equações linearizadas têm a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\phi_z - C\eta_x &= 0 && \text{em } z = 0 \\
g\eta + C\phi_x &= 0 && \text{em } z = 0 \\
\phi_{xx} + \phi_{zz} &= 0 && \text{para } z < \eta \\
\phi_z &= 0 && \text{em } z = -h
\end{aligned} \tag{2.17}$$

A função que soluciona este conjunto de equações é convenientemente escolhida como tendo a forma $\eta = a \cos(kx)$. Aplicando esta função nas equações 2.17, exceto a Segunda, com algumas considerações matemáticas chega-se ao seguinte resultado:

$$\phi = \frac{-ca \cosh k(z+h)}{\sinh(kh)} \sin(kx) \tag{2.18}$$

Usando esta expressão na Segunda equação de 2.17 chega-se a equação de dispersão:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \tag{2.19}$$

Na equação 2.19 além da dependência do comprimento de onda, inserido em k , a velocidade de fase também depende da profundidade em que a onda se propaga. Águas rasas ou profundas são definidas como razão entre a profundidade da água e o comprimento de onda (h/L). As águas são consideradas profundas para valores de h/L maiores do que $1/2$ e rasas para valores menores do que $1/20$ (Bishop, 1984).

Quando em águas profundas ($2\pi h/L \approx 1$) a equação (2.19) assume a seguinte forma:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \tag{2.20}$$

Quando em águas rasas ($\tanh(2\pi h/L) \approx 2\pi h/L$) a equação (2.19) assume a seguinte forma:

$$c = \sqrt{gh} \tag{2.21}$$

2.2. MODELOS DE PREVISÃO DE ONDAS

As primeiras descrições do estado do mar foram feitas por navegantes, no curso de suas viagens. Em 1805, Francis Beaufort desenvolveu uma escala numérica associando o estado do mar ao vento local. Segundo Khandekar (1989), em 1903, foi introduzida uma fórmula de equivalência entre a velocidade do vento e os números Beaufort.

$$U = (1,87/1,994) B^{3/2} \quad (2.22)$$

Onde U é a velocidade do vento em metros por segundo e B é o número Beaufort.

Utilizando este número também é possível estimar a Altura Significativa de Ondas (H_s) mais provável numa região atingida por ventos de determinada intensidade.

Tabela 2.2 - Escala Beaufort que relaciona a velocidade do vento e a altura significativa de ondas

NUMERO BEAUFORT	VELOCIDADE DO VENTO (m/s) a 10m	ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS (m)
0	0.0 – 0.2	0
1	0.3 – 1.5	0.1 – 0.2
2	1.6 - 3.3	0.3 – 0.5
3	3.4 – 5.4	0.6 – 1.0
4	5.5 – 7.9	1.5
5	8.0 – 10.7	2.0
6	10.8 – 13.8	3.5
7	13.9 – 17.1	5.0
8	17.2 – 20.7	7.5
9	20.8 – 24.4	9.5
10	24.5 – 28.4	12.0
11	28.5 – 32.7	15.0
12	>32.7	>15

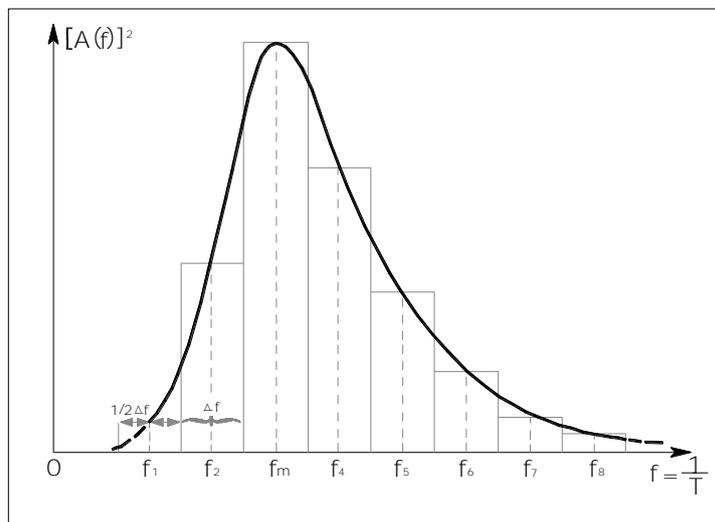
Fonte: Adaptado de Brown et al. (1991,p.13)

O primeiro modelo de previsão de ondas, propriamente dito, foi desenvolvido na Segunda guerra mundial por H. Sverdrup e W. Munk. Estes autores tomaram o vento como o agente forçante das ondas, o que é feito até hoje. Segundo Khandekar (1989), o trabalho de Sverdrup e Munk (1947), introduziu de forma inovadora a utilização das componentes tangencial e normal dos ventos na geração das ondas. A descrição dos estado do mar , feita por estes pioneiros, utilizou-se do parâmetro

estatístico Altura Significativa de Ondas, sendo por isso conhecido como método das Alturas Significativas de Previsão de Ondas. Este tipo de modelo escreve a equação de balanço de energia e de pista de ventos através dos termos escarpamento (δ) e idade da onda (β).

Reproduzir de forma satisfatória o estado do mar baseando-se somente em H_s é ineficiente, já que uma região é normalmente dominada por ondas de vários tamanhos e formas. Buscando remediar este fato, foi introduzido a técnica espectral de previsão de ondas. Os primeiros a introduzirem este conceito foram Pierson, Neumann e James, sendo por isso também conhecida como técnica PNJ. O espectro é construído pela distribuição do quadrado das alturas das ondas em função de suas frequências, ilustrado na figura 2.3. A área de cada retângulo, que representa a média do quadrado da amplitude de ondas das frequências em torno da frequência $f(i)$, tem uma relação de proporcionalidade com a energia da onda por unidade de área.

Figura 2.3 - Espectro de ondas com aproximação por retângulos centrados nas frequências $f(i)$.



Fonte: Produção do autor.

Do espectro de ondas, como é denominado, pode-se extrair uma série de parâmetros que descrevem o estado do mar, inclusive a H_s .

O estado do mar totalmente desenvolvido, definido por Khandekar (1989), sob a ação de um determinado vento, é atingido quando todas as possíveis componentes do espectro, entre as frequências $f = 0$ e $f = \infty$,

atingem sua energia espectral máxima, estabelecendo-se um equilíbrio entre geração e dissipação de energia.

A relação entre a frequência de pico (f_m) e a velocidade do vento (U) é dada, empiricamente, pela seguinte fórmula:

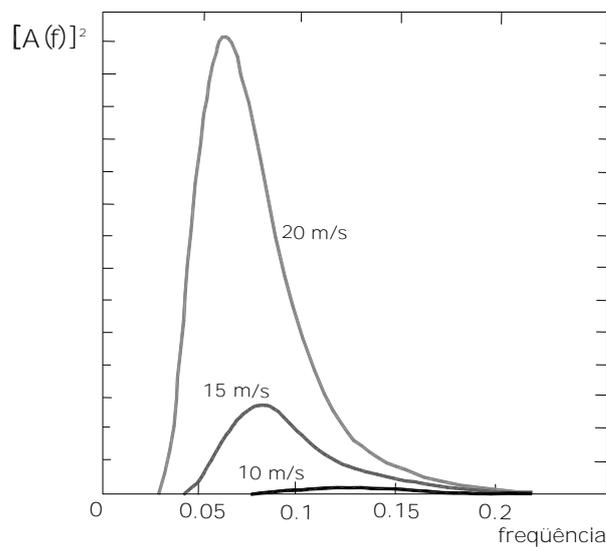
$$f_m \times U = 1,269 \quad (2.23)$$

onde,

f_m é dada em Hertz (Hz) e U em m/s.

Partindo desta equação conclui-se que: quanto maior a energia do espectro, menor é a frequência de pico.

Figura 2.4 - Espectro de ondas totalmente desenvolvido para ventos de 10,15 e 20 m/s



Fonte: Proc

A contribuição dos extremos do espectro na energia total é pequena em relação à região em torno da frequência de pico. A técnica PNJ, devido a isto, se concentra na parte mais significativa do espectro, abandonando convenientemente as frequências mais altas e mais baixas, cita Khandekar (1989).

Longuet-Higgins (1952), mostrou teoricamente que, para um espectro de ondas, contendo uma banda de frequências limitada, a altura de ondas segue uma distribuição de Rayleigh. Partindo deste fato vários parâmetros que caracterizam um determinado estado do mar, podem ser calculados.

Integrando a função densidade de probabilidade de uma distribuição Rayleigh de zero a infinito, determina-se a altura média de ondas, em função de energia obtendo:

$$\bar{H} = 1,77\sqrt{E} \quad (3.24)$$

A relação entre altura significativa de ondas e energia é :

$$H_s = 2,83\sqrt{E} \quad (3.25)$$

A média dos 1/10 de ondas mais altas é dada por:

$$H_{1/10} = 3,60\sqrt{E} \quad (3.26)$$

E a altura de ondas mais provável é determinada por:

$$H_m = 1,41\sqrt{E} \quad (3.27)$$

A primeira formulação que descreve a evolução do espectro de onda, segundo Komen et al. (1994), foi apresentada por Gelci et al. (1956,1957). Khandekar (1989), revela uma formulação anterior, desenvolvida por Newmann (1953). Conforme a cronologia de Khandekar (1989), vieram em seguida a formulação de Phillips (1958), Bretschneider (1959), Pierson e Mowat (1964), JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), com a principal colaboração de Hasselmann et al (1973,1976) e, finalmente, a formulação dos espectros de Wallops (1981), contando com a colaboração de vários estudiosos. Esta última formulação é particularmente interessante por oferecer a possibilidade de utilização de dados de Sensoriamento Remoto, diretamente no modelo espectral.

Os modelos de previsão de ondas são divididos em três grupos. Os de primeira, segunda e terceira geração. Segundo Candella (1997), nos modelos de primeira geração, ou desacoplados, cada componente do espectro de energia se propaga com sua própria velocidade de grupo, desenvolvendo-se independentemente das demais, até um nível individual de saturação. Komen *et al.* (1994), dividem os modelos de Segunda geração em duas classes: Acoplados Híbridos (AH) e Acoplados Discretos (AD). A Vaga (“Wind-sea”), é fortemente influenciada por

interações não lineares. Nos modelos AH as funções que controlam as interações não lineares, conforme Khandekar (1989), são calculadas usando uma aproximação pela integral de Boltzmann, ou seja, assume-se a hipótese da independência estatística na interação entre partículas . A própria interação linear mantém continuamente a estabilidade do espectro de energia. Já o marulho (“Swell”) é considerado, nos modelos AH, uma superposição independente de ondas, como nos modelos de primeira geração, pois este grupo de ondas não é afetado pelas interações não lineares.

Nos modelos AD, segundo Komen et al (1994), é mantida a representação espectral discreta tradicional, utilizando uma parametrização restritiva das interações não lineares, significando uma parametrização baseada em formas pré determinadas , às quais o espectro do modelo se ajusta.

Khandekar (1989) aponta que as principais deficiências dos modelos de segunda geração estão associadas à inadequada parametrização do processo de transferência não linear, principalmente quando envolvem rápidas variações do campo de ventos e interações entre vagas e marulho.

Os modelos de terceira geração começaram a ser criados quando K. Hasselmann e S. Hasselmann apresentaram um método computacional possibilitando o cálculo da integral de transferência não linear de energia. Segundo Khandekar (1989), o grupo WAM (Wave Model), baseado na aproximação por interações discretas introduzidas por Hasselmann et al. (1985), elaboraram o modelo de terceira geração de previsão de ondas. A maior limitação na utilização deste modelo é o grande custo computacional envolvendo o cálculo das interações não lineares. Numa comparação, um modelo de Segunda Geração gasta cerca de seis vezes menos tempo numa previsão com 48 de antecedência, do que modelos de Terceira Geração.

Os modelos de previsão de ondas podem, também, ser classificados segundo a área de atuação como: Modelo Global ou Modelo de Área Limitada.

2.3. MODELO DE PREVISÃO DE ONDAS SAWMO (*South Atlantic Wave Model*)

O modelo utilizado neste trabalho foi desenvolvido no INPE e introduzido no trabalho de Franco (1995). A denominação SAWMO, segue o trabalho de Innocentini e Neto (1994) e Candella (1997).

Conforme a classificação adotada o SAWMO pode ser classificado como: Modelo de segunda geração, acoplado discreto, concordando com Candella (1997), e de área limitada.

O modelo utiliza um LAM (*limited-area atmospheric model*). O LAM simula o episódio meteorológico e fornece um campo de ventos a 10m acima da superfície média do oceano, em intervalos de 3h. O campo de ventos gerado pelo LAM é assimilado pelo SAWMO, constituindo a fonte a partir da qual serão construídos os campos de ondas. O uso do modelo atmosférico, com ventos gerados em uma área limitada, é muito utilizado no estudo da evolução do oceano, porque muitos sistemas atmosféricos de mesoescala podem ser explicitamente simulados, e geralmente, ventos de superfície são obtidos mais realisticamente do que em modelos globais, já que o baixo custo computacional destes modelos permite uma parametrização mais refinada, como: base de dados mais realista e maior resolução da grade. Além disso a análise e previsões fornecidos por centro internacionais operando modelos globais são disponíveis somente a cada 6 ou 12 horas de intervalo reduzindo a frequência de dados sobre ventos forçantes de ondas oceânicas. Experimentos têm demonstrado que a atualização do campo de ventos gerador de ondas seja feito a cada 3 horas.

Nesta versão o LAM usa 14 camadas no sistema de coordenadas sigma (σ):

$$\sigma \equiv \frac{P - P_{top}}{P_{sup\,ref.} - P_{top}} \quad (1.13)$$

onde,

P= pressão e P_{top} = 100hPa

Os planos são definidos como 15 σ níveis correspondendo as pressões 1000, 990, 970, 940, 900, 850, 790, 720, 640, 550, 450, 350, 250, 150e 100hPa.

As variáveis prognósticas $\Pi \equiv P_{\text{superf.}} - P_{\text{top}}$, u, v, θ e umidade específica q são colocados no meio de cada camada e a velocidade vertical diagnosticada nos níveis σ é $\omega \equiv dp/dt$. Como usualmente assumido em modelos numéricos com esse tipo de coordenada vertical, a equação de tendência de pressão é formulada de modo que $\omega=0$ no nível da superfície e do topo (Innocentini,1995).

O SAWMO é um modelo de segunda geração que incorpora advecção, refração, empinamento, (termo adotado por Candella, 1997) referindo-se ao *shoaling*, dissipação devida ao fundo, transferência (*input*) de energia devido ao vento horizontal de 10,0 m acima da superfície, dissipação devido à quebra da onda e interações não lineares. O espectro de ondas é representado em cada ponto da malha em 13 frequências correspondentes aos períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 16, 20 e 25 segundos e 36 direções angulares em intervalos de 10°. O SAWMO é integrado no mesmo domínio e malha do LAM. O campo de onda inicial é obtido rodando o SAWMO um período de 9h de um estado anterior do oceano. O forçante inicial é o vento na superfície. A profundidade do mar é assumida como tendo o valor de 500 m. No caso em que se queira uma descrição mais realista, a batimetria pode ser fornecida, pois o modelo considera os efeitos relativos à variação da profundidade. Esta é uma consideração razoável, na região do Atlântico Sul, porque a plataforma continental com profundidade aproximada de 200 m está no máximo a 200Km da costa (Innocentini et al, 1995).

Os princípios físicos incorporados no modelo são introduzidos pela equação de balanço de energia dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial t} + \vec{c}_g \cdot \vec{\nabla} E = -E \vec{\nabla} \cdot \vec{c}_g - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\left(\vec{c}_g \cdot \vec{\nabla} \theta \right) E \right) + S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (1.14)$$

onde,

$-E\vec{\nabla}\cdot\vec{c}_g$ representa o empinamento (*shoaling*), $-\frac{\partial}{\partial\theta}((\vec{c}_g\cdot\vec{\nabla}\theta)E)$ a refração, S_{in} o *input* de energia devido à ação do vento, S_{ds} a dissipação devido ao *wave-breaking* e ao fundo do oceano, S_{nl} interações não lineares, \vec{c}_g é a velocidade de grupo e $\vec{\nabla}\equiv m(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ sendo m o fator de mapa.

3 CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO REMOTO

A utilização de dados de satélites tem comprovada relevância no estudo dos oceanos. Comparado a outros métodos de coleta de dados as plataformas orbitais se destacam pela sua grande capacidade de cobertura de áreas extensas, com informações quase contínuas sobre regiões bem determinadas pelas órbitas. Atualmente, como no caso do satélite TOPEX/Poseidon (T/P), uma mesma órbita, percorrida em diferentes tempos, varia em torno de 1,0 Km. Diante da extensão do globo este é um número muito pequeno. Aliado a estes fatos está a diversidade dos dados coletados pelos satélites e acurácia, cada vez maior, destes.

Existe hoje uma verdadeira constelação de satélites, direcionados para o monitoramento dos recursos terrestres. Suas aplicações e objetivos variam tanto quanto os recursos naturais do planeta Terra. Aqui será feita uma pequena abordagem concentrada nos satélites altimétricos, seus princípios, voltados para estudos oceanográficos. Especificamente na medição dos campos de ondas e de ventos.

3.1. SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

Os satélites altimétricos utilizam sensores ativos, ou seja, são radares que emitem pulsos de radiação eletromagnética (REM), a nadir, e retiram informações da região iluminada a partir da captação do próprio pulso refletido. Tais sensores se diferenciam pela sua capacidade de monitoramento sem a necessidade da radiação solar. Um relógio muito preciso a bordo mede o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do pulso. Considerando um pulso de REM (na faixa das microondas) que é emitido à nadir do satélite com uma velocidade aproximada de $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, a altura relativa do satélite em relação ao mar (h) é dada pela seguinte relação:

$$h = c\Delta t/2 \quad (3.1)$$

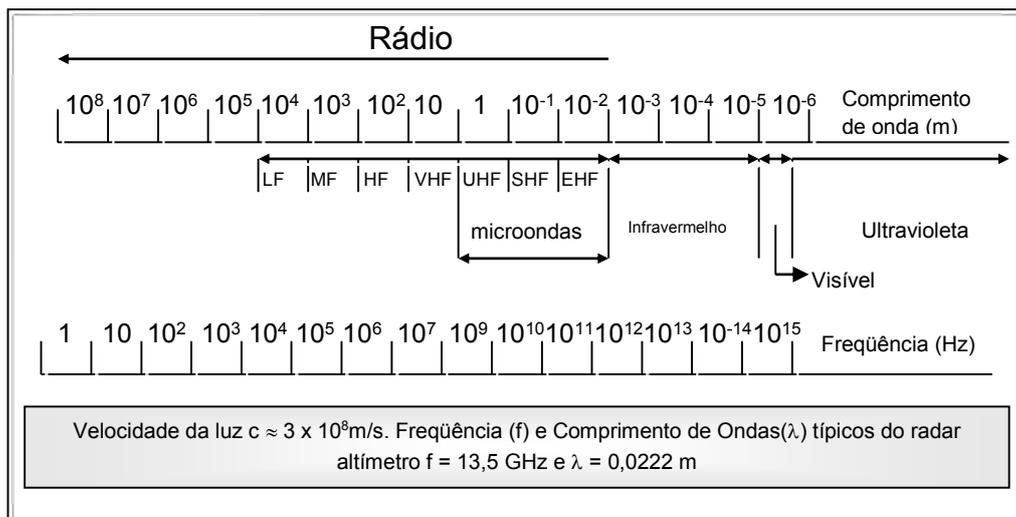
onde,

Δt é o intervalo de tempo decorrido entre a emissão e recepção do pulso.

Estes intervalos são da ordem de 10^{-3} segundos, sendo necessário, para obter uma boa acurácia na medida (cerca de 1,0 cm), relógios com precisão da ordem de 30 picosegundos (30×10^{-12} s) (Stewart, 1985).

Os satélites altimétricos trabalham na faixa de freqüência entre 3-30GHz, figura 3.1. A banda mais utilizada é a Ku correspondendo a freqüências em torno de 13 GHz, equivalente a um comprimento de onda de aproximadamente 2,3cm.

Figura 3.1 - Espectro de ondas Eletromagnéticas



Fonte: Produção do autor.

O processamento do sinal de retorno do radar altímetro, nas regiões oceânicas, possibilita a extração, entre outras, de informações de Altura Significativa de Ondas e velocidade do vento.

3.2. CORREÇÕES ALTIMÉTRICAS

A acurácia dos dados altimétricos passa pela capacidade de minimizar algumas fontes de erros, algumas resultantes da interação da REM com a atmosfera e conformação do oceano, outras decorrentes da própria instrumentação do satélite.

As principais fontes de erros nas medidas altimétricas, discutidas por Stewart (1995), são:

- (1) Determinação da órbita, (2) Influência da ionosfera, (3) Influência dos gases atmosféricos, (4) Forma das ondas oceânicas, (5) Influência das chuvas, (6) Calibração e (7) Erros de instrumentos.

As correções empregadas nas medidas do satélite TOPEX/Poseidon, segundo o manual do usuário dos produtos TOPEX/Poseidon, fornecido pela AVISO (*Archiving Validation Interpretation of Satellite data in Oceanography*) são as seguintes:

(1) - Influência da troposfera (seca e úmida): A troposfera é a parte mais baixa da atmosfera ocupando cerca de 11,0 Km de altura a partir da superfície da Terra. Possui grande massa de ar, visto que 90% da massa de ar na atmosfera está nos 16,0 Km logo acima da superfície. Isso significa que nesta camada, existe uma influência significativa no sinal de microondas. Nas correções dos dados TOPEX/Poseidon, os gases na troposfera são considerados em equilíbrio hidrostático e como sendo ideais. Desta forma as correções ficam dependentes unicamente da pressão local. A correção para a troposfera seca multiplica a pressão superficial pelo fator $-2,27$ mm/mb. A incerteza na correção da troposfera seca é cerca de 0,7 cm. Jolly (1999), apresenta a seguinte fórmula de correção :

$$C_{dry} = -2.277 P(L+0.0026 \cos(2\theta)) \quad (3.2)$$

onde,

L é a latitude do ponto observado e P é a pressão superficial.

A contribuição do vapor d'água no índice de refração da atmosfera terrestre pode ser estimado de duas formas: por meio de sensores, trabalhando em frequências específicas, em torno de 22,2356 GHz para o vapor d'água, ou através de previsões meteorológicas em concordância com o tempo e localização da medida. O satélite T/P trabalha com três frequências medindo a radiação natural que emerge do topo da atmosfera, em 18, 21 e 37 GHz. A primeira é utilizada para remover a emissão da superfície (velocidade do vento). A frequência de 21 GHz capta o sinal emitido pelo vapor d'água enquanto que o canal em 37 GHz é utilizado para remover outros agentes atmosféricos, como cobertura de nuvens.

(2) – Influência da ionosfera: A ionosfera consiste em várias camadas ionizadas dentro da atmosfera terrestre. Está localizada a partir da altura

de 70 Km, tendo como referência a superfície da Terra, até várias centenas de quilômetros. A quantidade de elétrons livres variam da noite para o dia, sendo que durante a noite a quantidade é bem menor. Varia também de acordo com a estação e o ciclo solar. O T/P se utiliza da diferença no tempo de retorno do sinal emitido nas bandas Ku e C para estimar a quantidade de elétrons livres na ionosfera. A velocidade de propagação do pulso eletromagnético decai proporcionalmente ao conteúdo de elétrons livres e é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do altímetro.

(3) – Influência das ondas oceânicas: O efeito das ondas sobre o pulso de radiação proveniente do satélite é também especificado na literatura como sendo o “Sea State Bias” eletromagnético. Olhando a superfície do mar como uma interface refletora não é difícil verificar que esta é normalmente rugosa. Como decorrência deste fato, a radiação é refletida de volta para o satélite de forma diferenciada, conforme o perfil dos elementos da superfície iluminada do oceano. As cavas das ondas tendem a refletir melhor a radiação do que as cristas, superestimando, assim, a altura das ondas. O ‘Sea State Bias’ é definido por Glazman et al (1994), como sendo a diferença entre o aparente nível do mar medido pelo altímetro e o verdadeiro nível do mar. As correções utilizadas são proporcionais à altura significativa de ondas (H_s). O satélite T/P, segundo Jolly (1999), utiliza quatro parâmetros de correção, representados pelas letras A , B , C e D , além da H_s e a velocidade do vento estimada pelo altímetro, apresentados na fórmula 3.3.

$$C_{be} = A \times H_s (B \times U + C \times U^2 + D \times H_s) \quad (3.3)$$

onde,

A , B , C e D são respectivamente, para o sensor TOPEX, 1,93; 0,368; -0,014 e - 0,268.

(4) – Influência de chuvas: As chuvas tendem a atenuar o sinal refletido do satélite conforme sua intensidade, podendo produzir oscilações na potência no sinal, no caso de chuvas mais suaves, ou redução significativa do pulso, nas formações de chuva mais intensas.

(5) – Influência das marés: As correções de maré, utilizadas nos dados T/P, são divididas em três grupos : Maré elástica oceânica, que é a soma das marés denominadas “*equilibrium*” e “*non-equilibrium*” e as marés “*loading*”. Maré sólida terrestre, resultado das forças gravitacionais externas sobre o oceano, e Maré de Polo, oriunda da oscilação do eixo de rotação da Terra. A correção de marés é utilizada nos estudos de circulação oceânica.

(6) – Efeito de barômetro inverso: O efeito de barômetro inverso é a resposta da superfície do mar devido às variações de pressão na atmosfera. Esta correção é feita pontualmente e é expressa pela fórmula (3.4).

$$Cib = -9.948 \times (P - 1013.3) \quad (3.4)$$

onde,

P é a pressão atmosférica no ponto de aquisição do dado.

3.3. MEDIÇÃO DA ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS E VENTO

O diferenciado espalhamento da radiação, conforme a rugosidade da superfície oceânica, citado na literatura como “bias”, é o principal responsável pela medição das Hs. A clara dependência entre o “bias” eletromagnético e Hs, segundo Arnold et al. (1995), foi mostrada pela primeira vez nos trabalhos de E.J.Walsh, D.W.Hancock, D.E.Hines, e J.E.Kenney em 1984 e o trabalho de L.W.Choy, D.L.Hammond e E.A.Uliana no mesmo ano. Iniciou-se então o desenvolvimento de métodos de medição de Hs e ventos a partir deste efeito. Algoritmos que estimam a Hs e a velocidade do vento têm sido aplicados à altímetros em plataformas orbitais e aperfeiçoados a partir das missões dos satélites GEOS-3 e Seasat. De maneira geral a Hs é medida a partir do tempo de retorno dos pulsos de REM e da potência destes captada pelo sensor à bordo do satélite. Gráficos com estas informações são construídos , depois do cálculo da média de um número suficiente de amostras. O satélite T/P utiliza uma média de 58.000 pulsos (Tabela 3.1). A distribuição média destes pulsos obedece o padrão mostrado na figura 3.3. É testado o ajuste de curvas empíricas, construídas a partir de dados

de campo, cada uma equivalente a uma Altura Significativa de Ondas. A curva cujo ajuste apresenta o menor erro é escolhida como a que melhor representa a H_s da região onde os dados foram adquiridos. Robinson (1985) apresenta o seguinte algoritmo que relaciona a potência média recebida pelo radar do satélite em função do tempo considerando a geometria do pulso emitido.

$$P(t) = \frac{Kc\tau}{s^2 H'^2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{t_p} \right) \right] \exp \left(-\frac{2t}{t_s} \right) \quad (3.5)$$

onde,

H' = Altura do satélite acima do nível médio da água

τ = potência do pulso transmitido

S = rms da inclinação das ondas no oceano

$$t_p = \frac{2}{c} \left[\frac{c^2 \tau^2}{16 \ln 2} + 2h^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

h = rms da altura de onda

$$t_i = 2H \frac{\Psi_e^2}{c}$$

$$\Psi_e^{-2} = \frac{8 \ln 2}{\Psi_R^2} + \left[\frac{1 + H/a_e}{S} \right]$$

a_e = raio da Terra

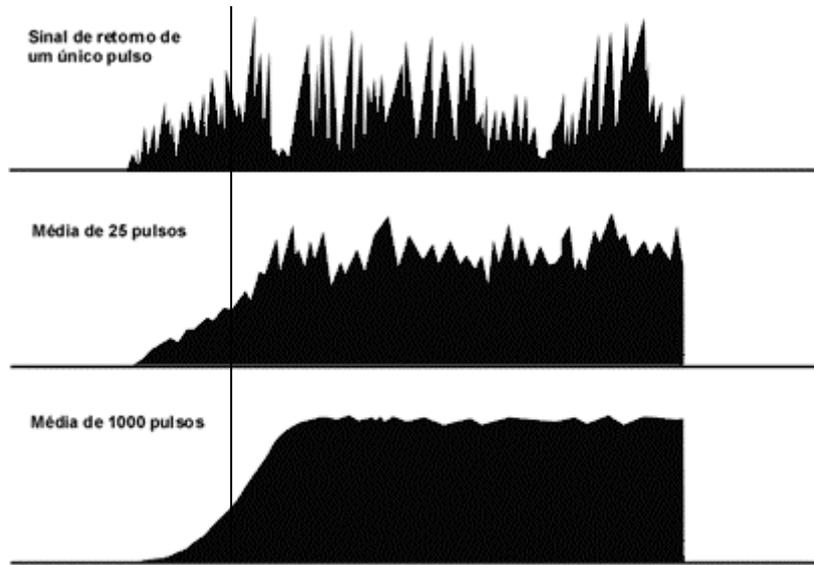
Ψ_R = potência da antena

K = constante que inclui a potência transmitida, ganho na compressão do pulso, ganho da antena, perdas na propagação e coeficiente de reflexão de Fresnel

c = velocidade da luz

A figura 3.2 ilustra um único pulso captado pelo sensor e a nova feição adquirida de acordo com o número de pulsos utilizados no cálculo da média.

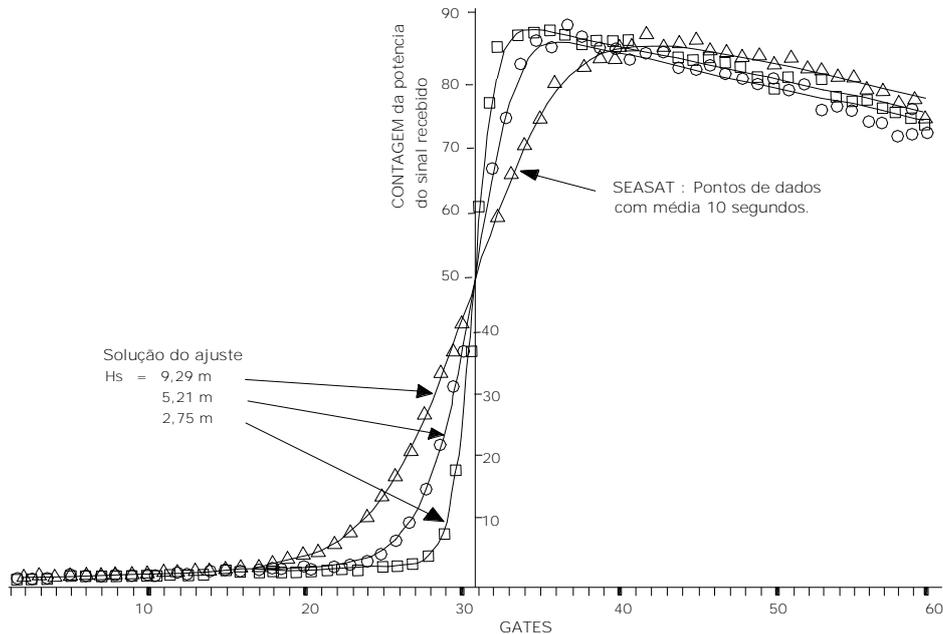
Figura 3.2 - Exemplo de um único pulso de retorno do radar altímetro (alto) e médias de 25 (meio) e 1000 (baixo) pulsos após interação com a superfície do mar.



Fonte: Adaptado do manual AVISO (1996)

Para se captar um pulso de forma contínua, como ilustrados na figura 3.2 seria necessário um número muito grande de pontos captados continuamente. Os satélites , para remediar este fato, utilizam os chamados “gates”. O satélite Seasat, por exemplo, utiliza 60 pontos e uma média de 10.000 pulsos correspondentes a cada “gate” (Robinson, 1985). Pode parecer um numero elevado de pulsos, entretanto não se gasta mais do que 10 segundos para reunir este montante de dados. O resultado disto pode ser visualizado na figura 3.3.

Figura 3.3 - Distribuição da média de 10.000 pulsos (“gates”) do satélite Seasat com curvas ajustadas equivalentes a 3 diferentes H_s .



Fonte: Manual AVISO (1996).

A curva ajustada a estes pontos tem a forma aproximada de um degrau ligeiramente inclinado. Quanto mais vertical estiver a parte que liga os dois níveis do degrau, menor será a H_s estimada.

Entre os resultados discutidos por Robinson (1985), destacam-se os seguintes. Quando comparados, o algoritmo utilizado pelo GEOS-3 e dados mais realísticos, concluiu-se que para ondas menores do que 4m, o desvio padrão foi de 0,75m. Ondas com alturas entre 4,1 e 8,0m apresentaram desvio padrão de 0,5m. Outros resultados, utilizando o satélite Seasat e um algoritmo aperfeiçoado, mostram resultados mais concordantes entre altímetro e dados de campo.

A informação mais importante destas observações é que o erro entre satélite e dados reais variam conforme a intensidade das ondas estudadas. Este fato não é restrito às plataformas orbitais. Khandekar e Lalbeharry (1996) quando comparam dados de modelo de previsão de ondas e bóias calculam os erros em três diferentes faixas de ondas. De 0 a 3, 3 a 6 e maiores do que 6,0 m, contando com diferentes erros conforme a Altura Significativa de Ondas (H_s).

Vários algoritmos foram desenvolvidos com o intuito de se estimar a velocidade dos ventos sobre a superfície oceânica. O parâmetro mais utilizado para este fim é a seção reta do radar (σ). Este parâmetro é uma medida da radiação retroespalhada. A superfície oceânica quando perfeitamente lisa, ou seja, sem ondas, é um refletor ótimo e a seção reta é máxima. Na medida em que a superfície oceânica se torna mais rugosa menos REM é refletida para o sensor diminuindo o valor de σ . A intensidade do vento mantém estreita relação com a rugosidade da superfície oceânica e, portanto, com a seção reta do radar, tornando possível a estimativa do vento a partir da seção reta do radar. Em outros casos utiliza-se a Hs para se estimar a velocidade do vento. Lefevre et al. (1994) expõe as principais características dos vários algoritmos desenvolvidos até então. O satélite TOPEX utiliza o algoritmo especificado por Witter e Chelton (1991), segundo o manual do usuário AVISO.

$$U = \sum_{n=0}^4 a_n (\sigma_{ob})^n \quad (3.6)$$

onde,

U = velocidade do vento em m/s

σ_{ob} é o bias do coeficiente de retroespalhamento: $\sigma_{ob} = \sigma_o + d\sigma$, em decibéis.

$$d\sigma = -0.63\text{dB}$$

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 são coeficientes do polinômio definido conforme tabela apresentada no manual do usuário AVISO.

Tabela 3.1 - Valores dos coeficientes a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 do polinômio utilizado na estimativa de velocidade do vento (U)

Limites de U	Limites de σ_{ob}	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
$U > 7,30$	$\sigma_{ob} < 10,8$	51,045307042	-10,982804379	1,895708416	-0,174827728	0,005438225
$0,01 \leq U \leq 7,30$	$10,8 \leq \sigma_{ob} \leq 19,6$	317,474299469	-73,507895088	6,411978035	-0,248668296	0,003607894
$U = 0,0$	$19,6 < \sigma_{ob}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Adaptada do manual AVISO (1996).

3.4. HISTÓRICO DOS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

Tabela 3.2 – Alguns parâmetros dos satélites altimétricos.

Compressão de Pulso	Frequência (GHz)	Largura de Banda (MHz)	Comprimento de Onda (m)	Resolução (m)	Compressão de Pulso
Skylab	13,90	100,00	0,02	1,00	13
Geos-3	13,90	80,00	0,02	0,5	30
Seasat	13,50	320,00	0,02	0,10	10.000
Geosat	13,50	320,00	0,02	0,10	30.000
ERS-1	13,50	400,00	0,02	0,10	8.000
TOPEX/Poseidon	5,3 e 13,6	320,00	0,566 e 0,220	0,03	58.000
ERS-2	13,50	—	0,02	0,10	—

Fonte: Adaptada do manual AVISO (1996).

Os primeiros testes com altímetros, em uma plataforma orbital, foram realizados pela NASA no ano de 1973. Os instrumentos voaram à bordo da Skylab. O experimento comprovou a aplicabilidade dos radares altímetros em satélites para estudos dos oceanos. Os dados obtidos pouco favoreceram fins práticos, visto que a acurácia dos dados estavam em torno de 1,0 m e a acurácia da órbita em torno de dezenas de metros. A partir daí seguiu-se uma série de satélites altimétricos com dados cada vez mais precisos.

Com o surgimento do satélite GOES-3, lançado em 1975, uma nova perspectiva foi levantada nos estudos oceanográficos, já que esse foi a primeira plataforma orbital a possuir como carga útil um altímetro com intenção de operar por um longo período e permitindo a obtenção de medições do nível do mar com uma precisão de cerca de 20,0 cm, (Podaac/JPL). O objetivo desta missão foi fornecer dados para o refinamento dos resultados geodésicos e geofísicos para próximas missões dentro do programa Nacional de Satélites Geodésicos, além de servir como teste para novos sistemas.

Em 1978 foi lançado o satélite Seasat, o qual se utilizava de cinco instrumentos, entre os quais um radar altímetro e um laser retro-refletor para precisão da órbita, que mediam temperatura e ventos da superfície

do oceano, altura de ondas, conteúdo de vapor d'água na atmosfera, topografia do oceano etc. Sua precisão na medição do nível do mar era de 10,0 cm. Sua missão destinou-se a fornecer medidas de altura de ondas, topografia global do oceano e do geóide oceânico. Infelizmente, este satélite somente operou por cerca de três meses.

Em março de 1985 foi lançado o satélite GEOSAT (Geodetic Satellite), pela marinha dos Estados Unidos, com medições similares às do Seasat. O principal objetivo da missão estava em delinear um mapa preciso do geóide terrestre do oceano.

O Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto (ERS-1), foi lançado em julho de 1991, numa órbita com inclinação de 98 graus, a uma altitude em torno 780Km. Sua carga útil combinam sensores ativos e passivos, incluindo um instrumento ativo de microondas, o qual combina SAR e escaterômetro para vento, e um radiômetro escaneador ao longo da órbita, combinando um radiômetro infravermelho e um sondador de microondas para medidas da temperatura da superfície do mar. Designado para medir a superfície média do mar e análises do geóide oceânico. Em 1996 colocou-se em operação o ERS-2, com características similares ao ERS-1, propiciando uma operação simultânea entre os dois satélites com uma diferença de fase temporal de cerca de um dia. Como atual sucessor dos satélites altimétricos está o TOPEX/Poseidon (T/P).

3.5. SATÉLITE TOPEX/Poseidon

Em 10 de agosto de 1992, o satélite TOPEX/Poseidon foi lançado pelo foguete Ariane 42P pela Agência Espacial Européia na Guiana Francesa. Essa missão espacial e conduzida conjuntamente pelos Estados Unidos, através da National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela França, Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) (Fu 1994).

O projeto trabalha com dois outros programas. O TOGA, Tropical Ocean and Global Atmosphere e o WOCE, The World Ocean Circulation Experiment, buscando uma complementaridade de dados.

O T/P descreve uma órbita circular com inclinação de 66 com o plano do equador, a uma altitude de 1336 Km. Para completar um ciclo de

cobertura da Terra efetua 127 órbitas, em cerca de 10 dias, sendo que cada órbita consecutiva está distante cerca de 315 Km na linha do equador.

O objetivo da missão T/P é promover um monitoramento global da topografia oceânica da Terra com suficiente acurácia para implementar modelos projetados para previsão da circulação global do oceano.

Existem seis instrumentos científicos, como carga útil, à bordo do T/P. Quatro da NASA e dois da CNES. Estes estão divididos entre sensores operacionais e experimentais da seguinte forma: (1) Sensores operacionais: radar altimétrico de frequência dupla (ALT) (NASA); radiômetro de microondas (TMR) (NASA); Laser refletor (LRA) (NASA); e orbitógrafo Doppler e radioposicionamento integrado pelo satélite (DORIS), sistema dual Doppler receptor de rota. (2) Sensores experimentais: radar altimétrico de estado sólido de frequência única (SSALT) (CNES); e sistema de posicionamento global (GPS) (NASA) (Fu, 1994).

O ALT, doravante denominado TOPEX, é o principal instrumento da missão, sendo o primeiro de banda dupla já utilizado em missões orbitais. As medidas são realizadas em duas frequências na faixa das microondas (5,3 e 13,6 GHz), as quais são combinadas para minimizar os efeitos da ionosfera (Hayne, 1994).

4 CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta dois tipos de resultados. O primeiro é oriundo da comparação entre dados de altura significativa de ondas e ventos adquiridos pelo satélite TOPEX/Poseidon e Modelo de Previsão de ondas. O outro utiliza dados T/P na construção da climatologia de ondas, através do parâmetro Hs, e de velocidade escalar dos ventos, ao longo de cinco anos. Em cada um destes caminhos foi adotada uma metodologia distinta, descritas separadamente, a começar pela comparação entre dados de Satélite e Modelo.

4.1. SATÉLITE x MODELO

4.1.1. DADOS DO SATÉLITE TOPEX/Poseidon

Os dados utilizados estão disponíveis numa série de 64 CDs fornecidos pela AVISO arquivados no INPE. Cada CD possui no mínimo dois arquivos de dados e no máximo três. Os dados são, segundo especificação da AVISO, do tipo GDR-M (geophysical data record). Essa denominação é dada quando as informações são computadas com precisa determinação da órbita, com correções nas medidas altimétricas e parâmetros associados. Um arquivo corresponde a aproximadamente dez dias de coleta de dados, equivalente a uma cobertura total do globo terrestre ou um ciclo T/P. Dentro de cada arquivo existem subarquivos relativos às órbitas do satélite. Os dados se dividem em um cabeçalho, no formato ASCII, no qual encontram-se a identificação, histórico do processamento e informações gerais sobre os dados. A seguir encontram-se os dados científicos, gravados na forma de inteiros binários. Cada informação segue um padrão de comprimento em bits ou bytes, especificados no manual do usuário dos produtos T/P AVISO. Os tipos de dados encontrados no CD são divididos nos seguintes grupos. (1) tempo, (2) localização, (3) altitude, (4) atitude, (5) série altimétrica, (6) correções do meio ambiente, (7) altura significativa de ondas, (8) coeficiente de retroespalhamento, (9) quantidades geofísicas, que incluem as informações de vento, (10) temperatura de brilho, (11) indicadores.

As informações obtidas pelo satélite são tomadas continuamente em pontos espaçados em torno de 5,0 Km

Os dados foram lidos através de uma rotina escrita em linguagem IDL. Dentro das subrotinas do programa foram feitas as seguintes operações:

1. Leitura dos dados : O programa se restringiu a retirar apenas as informações de interesse, que são : Tempo da coleta dos dados, latitude e longitude, Altura significativa de ondas (banda K), velocidade escalar do vento e parâmetro de qualificação dos dados, além do número do ciclo, número da órbita e dia juliano, utilizadas indiretamente na determinação do dia, mês e ano da aquisição de dados. Os subarquivos foram lidos sequencialmente e arquivados em um único arquivo.
2. Transformação da datação do satélite para a de uso corrente
3. Seleção das órbitas localizadas dentro da área de estudo : Informações fora do quadrante 10°N - 50°S de latitude, e longitudes delimitadas pelas fronteiras da América do Sul e África, foram descartadas.
4. Separação dos dados em órbitas : Cada órbita, correspondente a um subarquivo, foi separada por um cabeçalho, colocado no início do conjunto de informações, referentes a cada órbita, contendo o dia, mês, ano e número da órbita. Essa divisão possibilita extrair informações referentes a dias específicos, o que é fundamental para a comparação com o modelo.

4.1.2. DADOS DO MODELO DE PREVISÃO DE ONDAS (SAWMO)

As informações que alimentam o SAWMO começam com a entrada de dados meteorológicos, adquiridos do CPTEC, no modelo atmosférico japonês denominado LAM (Limited Area Model). Este modelo constrói os campos de vento, intensidade, direção e sentido, na mesma região de atuação do SAWMO. Tendo os campos de vento como entrada, o SAWMO é rodado fornecendo informações com até 48 horas de antecedência. No presente trabalho os dados foram preparados para prever os campos de ondas no dia 27 de maio de 1997 e 30 de maio de

1997. Estes dias foram particularmente escolhidos por apresentarem intensa agitação marítima e ser o acontecimento mais recente desta grandeza, dentro do período que a base de dados disponível cobre (1992 a 1998). Os dados de ventos foram preparados a partir do dia 25 de maio do ano em questão, simulando uma previsão para os dias 27 e 30. Inicialmente o dia 30 foi o foco do trabalho. No entanto, com o desenrolar das análises, surgiu a necessidade de verificar o desempenho do modelo em situações de ondas menos intensas. A data 27 de maio de 1997 se mostrou a mais ideal pelos seguintes fatores: As órbitas deste dia são imediatamente paralelas às do dia 30, possibilitando a cobertura de áreas com características parecidas. A antecedência em três dias do evento principal, mostra com maior clareza a evolução do modelo no tempo, e por fim, a base de dados estava preparada, evitando nova preparação e extração de dados do SAWMO.

Os dados de saída dos ventos foram arquivados a cada três horas de integração. Como o SAWMO considera o mar inicialmente em repouso, os seus melhores resultados são obtidos após 48 horas de integração, tempo no qual adquire energia suficiente em sua simulação para representar eventos coerentes com a realidade. Os dados de ondas foram gravados a cada meia hora de integração do modelo, o menor intervalo de tempo de saída permitido pelo SAWMO.

4.1.3. AJUSTE DOS DADOS DO SATÉLITE E DO MODELO

A comparação entre as informações do satélite e modelo é feita órbita a órbita. No dia 27 o satélite passou 5 vezes pela região de estudo e suas órbitas foram numeradas de 1 a 5. No dia 30 o satélite também passou cinco vezes e as órbitas foram numeradas de 6 a 10. A numeração, a disposição e a área de cobertura de cada órbita considerada neste estudo pode ser acompanhada na representação feita na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Disposição das órbitas TOPEX/Poseidon.

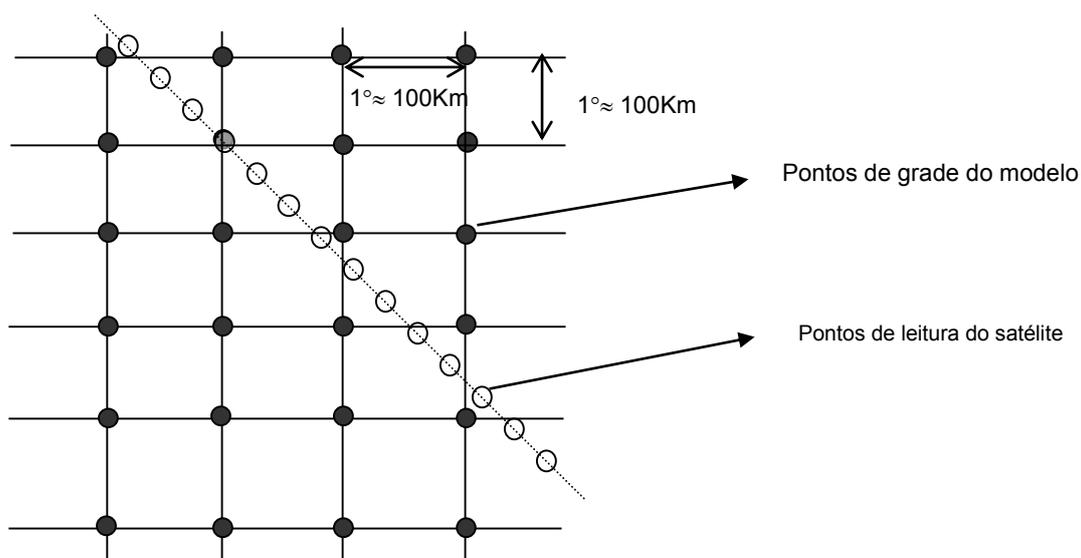


O satélite passou 5 vezes na região de estudo nos dias 27/05/97 e 30/05/97.

Fonte: Produção do autor.

A disposição dos dados do satélite e do modelo são diferentes. O modelo opera em grade regular de aproximadamente 1° de latitude e longitude (cerca de 100 Km), já o satélite dispõe seus pontos de aquisição de dados projetando na superfície do oceano a sua órbita, como mostra a figura 4.2.

Figura 4.2 - Representação de parte da malha do modelo cortada pelos pontos de coleta de dados do satélite

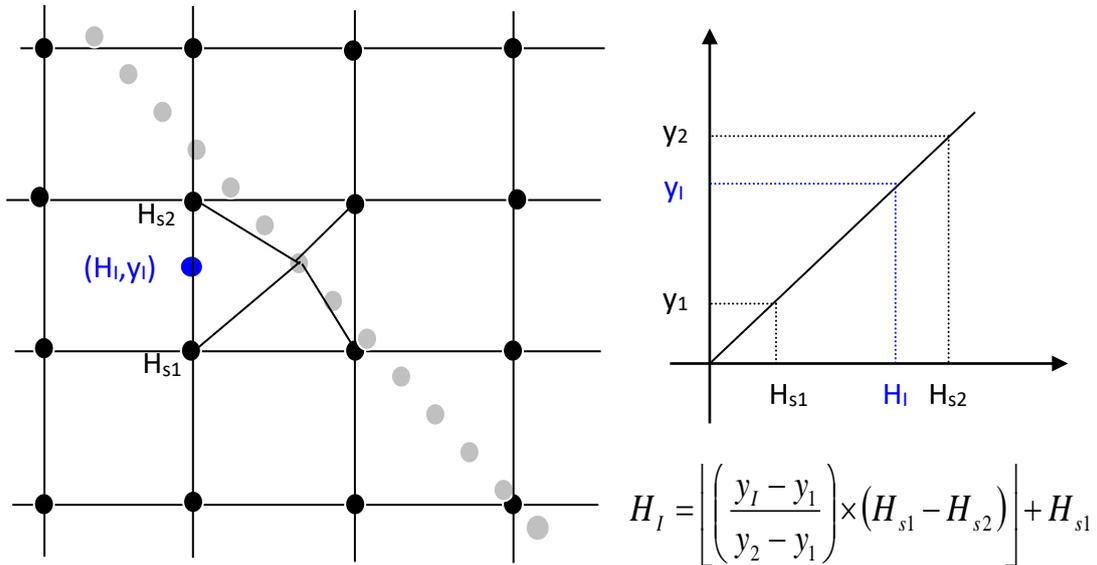


Fonte: Produção do autor.

A disposição temporal dos dados de satélite e modelo raramente é coincidente. Portanto existe, além de uma diferença espacial, a diferença temporal entre os conjuntos de informações. Para remediar tais diferenças adotou-se o seguinte procedimento. Observando a figura 4.2 pode-se concluir que existem no mínimo quatro pontos de grade do modelo envolvendo cada ponto no qual o satélite fez a leitura. Assumindo os dados do satélite como representantes mais fiéis da realidade, a localização e o horário de leitura destes foram tomados como referência para os quais as informações do modelo foram interpoladas. Utilizou-se a interpolação linear para o tempo e espaço de forma que os valores mais próximos temporal e espacialmente do satélite tivessem maior peso no cálculo do valor final. Considerou-se somente as informações dos quatro pontos da grade envolvendo o ponto de aquisição do satélite, chamados aqui de Anel Menor (A.Me.). Optou-se pelo interpolador linear em primeiro lugar, pela sua simplicidade. Partiu-se do pressuposto que, para uma primeira avaliação, o interpolador utilizado representaria bem o desempenho do modelo, visto que o valor interpolado não deveria divergir muito dos quatro valores vizinhos. No entanto questionou-se a representatividade ao considerar somente quatro valores da grade do modelo. Concluiu-se que, a escolha de um interpolador mais adequado a esse tipo de comparação, deveria ser feita mais criteriosamente numa próxima avaliação destinada a esse fim. Mas, de forma a obter um indicador para futuros testes, optou-se por demonstrar o comportamento dos doze pontos que envolvem o anel menor, denominado aqui de Anel Maior (A.Ma.), através de seus valores máximos e mínimos. O método de interpolação linear foi aplicado tomando-se os pontos da grade dois a dois, como ilustra a figura 4.3. Faz-se primeiro a interpolação dos dois pontos do A.Me. do lado esquerdo do ponto de leitura do satélite. Estes pontos são interpolados de modo que o resultado corresponda a mesma posição no eixo Y (latitude) do dado do satélite. O mesmo procedimento é feito para os pontos de grade do A.Me. à direita do ponto de leitura do satélite, para que finalmente seja feita a interpolação na direção X. Portanto para cada ponto de leitura do satélite são realizados três

cálculos dos valores do modelo para que complete o processo de interpolação.

Figura 4.3 - Esquemática do método de interpolação empregado.



Representação do primeiro dos 3 cálculos necessários para se completar o processo de interpolação.

Fonte: Produção do autor.

4.1.4. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO

Os parâmetros estatísticos utilizados na comparação entre satélite e modelo, se basearam na metodologia de Khandekar (1996), que compara as informações extraídas do Modelo de Previsão de Ondas de primeira geração com dados de bóias. Esses parâmetros são :

- Erro Médio (EM) :

$$EM = \frac{1}{n} \sum (\text{mod} - \text{sat}) \quad (4.1)$$

- RMSE :

$$rmse = \left[\frac{1}{n} \sum (\text{mod} - \text{sat})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

- Índice de dispersão (IE):

$$IE = \frac{rmse \times 100}{\text{media_dos_valores_do_satélite}} \quad (4.3)$$

- Desvio Padrão dos Erros (σ):

$$\sigma = \sqrt{(rmse)^2 - (EM)^2} \quad (4.4)$$

- Coeficiente de Correlação Linear(r):

$$r = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left(X_i - \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{X_k}{N} \right] \right) \left(Y_i - \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{Y_k}{N} \right] \right)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left(X_i - \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{X_k}{N} \right] \right)^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left(Y_i - \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{Y_k}{N} \right] \right)^2}} \quad (4.5)$$

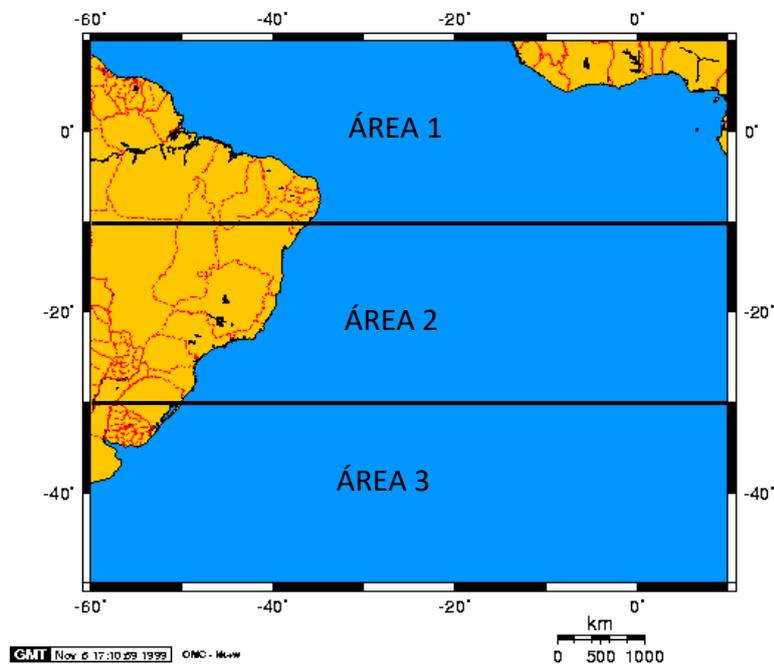
4.2. CLIMATOLOGIA DAS ONDAS PELO SATELITE TOPEX/Poseidon

A base de dados do satélite TOPEX/Poseidon utilizada, cobre um período de aproximadamente cinco anos. Começa em 01/12 de 1992 e se estende até 06/06 de 1998. O arquivo de dados utilizados nesta etapa, segundo especificação encontrada no manual do usuário AVISO, são do tipo “crossover point”. Tais arquivos, similarmente aos utilizados na comparação com o modelo, são do tipo GDR-M e correspondem a um ciclo T/P. O cabeçalho, contendo o histórico do processamento, e os dados científicos, estão colocados em diferentes arquivos. Os dados científicos contam com dados referentes às orbitas ascendentes e orbitas descendentes. A grande particularidade desses dados é que a localização espacial das informações esta sobre o ponto em que as órbitas se cruzam. Quatro dados acima e abaixo dos pontos de encontro das orbita são interpolados usando o interpolador “*cubic splines*”. No entanto se existir uma descontinuidade no tempo, entre os pontos de coleta, os dados “crossover” não são gravados. São utilizados vários testes de validação das informações, que são detalhadamente explicados no manual do usuário AVISO (Archiving Validation and Interpretacion of Satellite Oceanographic data). As informações disponibilizadas nos arquivos “crossover” são similares às utilizadas anteriormente. A climatologia foi feita com os dados de vento e Altura Significativa de Ondas, que foram lidos e arquivados utilizando uma rotina computacional, escrita na linguagem IDL, especificamente construída para este fim. A utilização dos arquivos “crossover” facilita bastante o processamento dos

dados, sem perda de representatividade, devido ao seu tamanho bem mais reduzido e qualidade previamente testada.

A região de estudo foi dividida em três sub-áreas, limitadas pelas latitudes de 10°N e 10°S, denominada ÁREA 1, 10°S a 30°S, denominada ÁREA 2, e 30°S a 50°S, denominada ÁREA 3. A oeste as áreas são limitadas pela América do Sul e a Leste pelo continente Africano (Figura 4.4). A divisão do oceano Atlântico Sul em sub-regiões, visa discriminar o regime dos ventos e ondas nas 3 áreas.

Figura 4.4 - Representação das três sub-áreas nas quais foi dividida a região de estudo

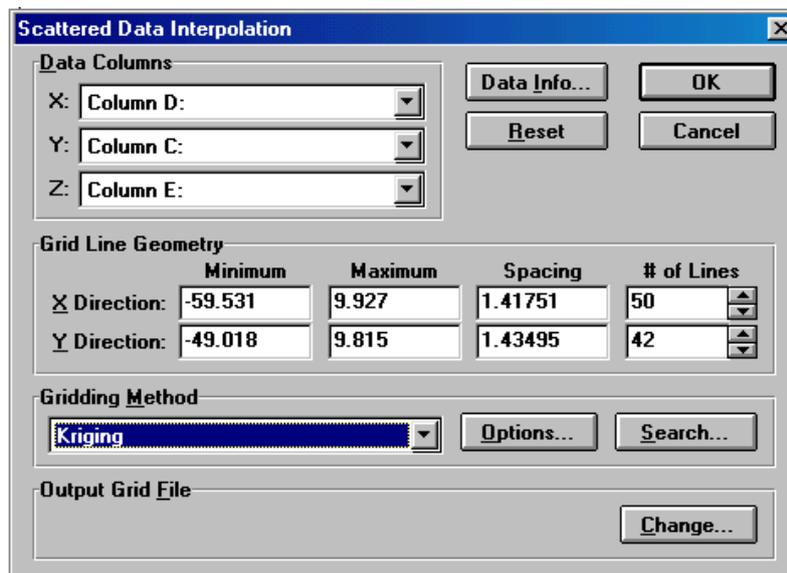


Fonte: Produção do autor.

A primeira parte da climatologia foi a partir de dados que representam a média em cada uma das três áreas representadas na figura 4.4. A média nas três regiões foram calculadas tanto para as informações de ventos como para as de ondas. Cada valor médio foi calculado para um ciclo do satélite T/P, aproximadamente dez dias. Calculou-se também o desvio padrão do conjunto de dados referentes aos ciclos, de forma a dar uma idéia da amplitude de variação das Hs e Velocidade dos Ventos, dentro desse período. Finalmente outro valor médio foi calculado tomando-se três ciclos T/P de forma a disponibilizar uma média aproximadamente mensal.

Utilizando o programa “*Surfer*” a mesma base de dados foi colocada em grade mostrando os valores médios de Velocidade do Vento e Altura Significativa de Ondas para as estações de 1992 a 1998. A figura 4.5 demonstra as especificações utilizadas no programa para importação e gradeamento dos dados. O método utilizado, destacado em azul, foi o “*Kriging*”. Este interpolador foi o que melhor representou a distribuição de ventos e Hs, quando comparado a climatologias já conhecidas da mesma região e quanto à coerência na distribuição das informações.

Figura 4.5 - Especificações do método de interpolação de dados utilizados no programa “*surfer*”



Fonte: Produção do autor.

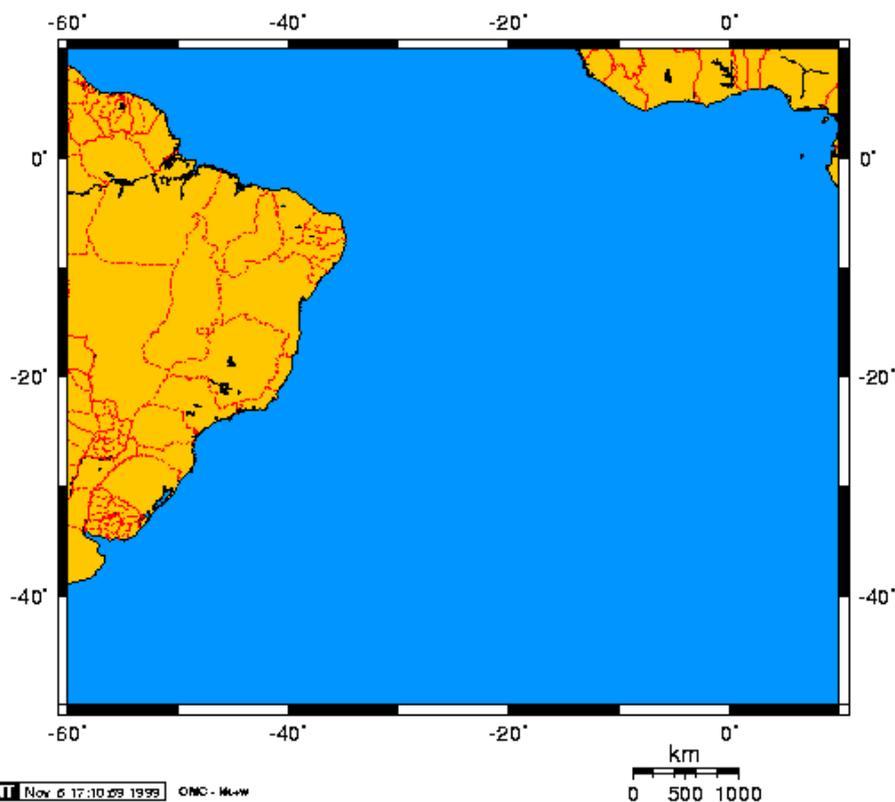
Foi utilizado uma interpolação linear pelo programa, desconsiderando quaisquer tendências na distribuição das informações. Os dados que porventura estivessem na mesma localização espacial foram representadas tomando-se a média.

5 CAPÍTULO 5: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização da área de estudo focaliza dois aspectos. Os elementos climáticos, pressão e vento, visando descrever o regime de circulação dos ventos, que é a principal fonte geradora de ondas de gravidade. O segundo aspecto aborda a climatologia das ondas, baseando-se no parâmetro estatístico Altura Significativa de Ondas (Hs). Este ponto servirá de referencial para o leitor ao se deparar com os resultados obtidos.

A área de estudo compreende, em sua maior parte, a bacia do Oceano Atlântico Sul, tendo como fronteiras as Longitudes 60°W e 10°E e as latitudes 10°N e 50°S, conforme mostra a figura 5.1.

Figura 5.1 - Bacia do Oceano Atlântico Sul representando a área de estudo.



Fonte: Produção do autor.

5.1. REGIME DOS VENTOS E ONDAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

De forma geral, o regime dos ventos sobre o Atlântico Sul é mais intenso nas altas latitudes decaindo no sentido das latitudes mais baixas. Segundo Young e Holland (1996), o oceano Atlântico Sul é dominado por

fortes ventos de deriva oeste, com variações do fluxo dos ventos durante todo o ano. Estes ventos são predominantes nas altas latitudes, principalmente perto da costa Africana.

Os principais agentes reguladores dos ventos nesta região são: o centro de alta pressão semi-permanente do Atlântico Sul e os centros migratórios de alta e de baixa pressão. O centro semi-permanente de alta pressão localiza-se, segundo Peterson e Stramma (1991), próximo a 32°S 5°W, no verão, e cerca de 27°S 10°W, no inverno do Hemisfério Sul, e age como uma barreira, defletindo os ventos oriundos das altas latitudes. Este centro é formado na região de movimento descendente entre as células de Hadley e Ferrel. Os centros de alta e de baixa pressão se estendem, alternadamente, ao longo das altas latitudes, geralmente ao sul da latitude -30°, e se propagam para Leste. A estes estão associados o aparecimento de ciclones e anticiclones, os quais são os principais geradores de ondas de grande porte que assolam a costa da América do Sul. No Hemisfério Sul os centros de alta pressão dão origem a ventos que giram no sentido anti-horário, ou seja, aos anticiclones. Já os centros de baixa estão associados à formação de ciclones.

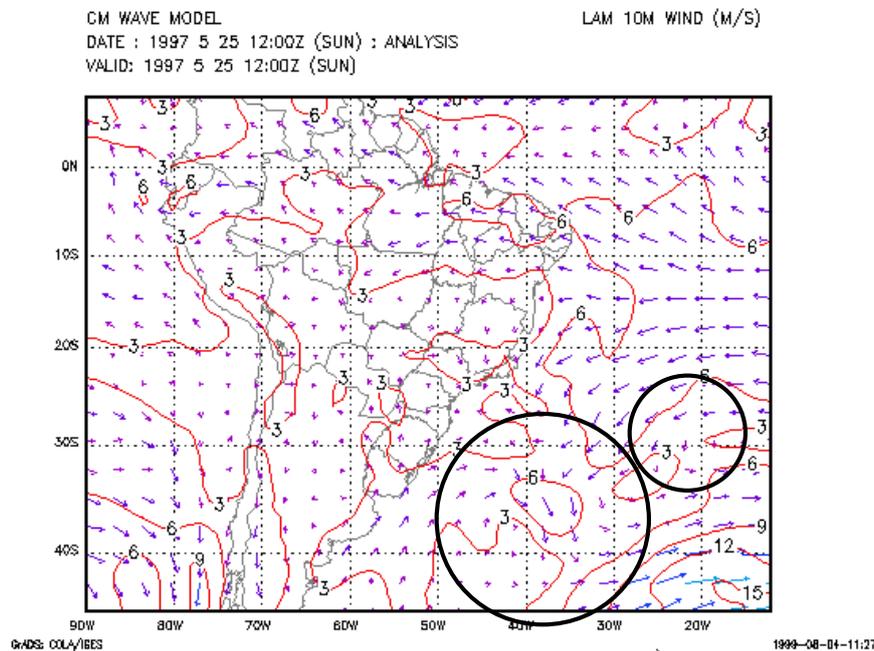
Sinclair (1997) monitorou a rota dos ciclones e anticiclones no Hemisfério Sul no período de 1980 a 1994, destacando alguns centros mais ativos. Segundo o autor os ciclones tendem a se formar e intensificar nas latitudes médias, migrando para o leste e polo sul. Já os anticiclones geralmente se concentram entre 25° e 40°S. A frequência da ciclogênese varia consideravelmente com as estações climáticas. A ciclogênese, segundo o autor, atinge o pico nos meses de maio, junho e julho, diminuindo nos meses iniciais e finais do ano.

As figuras que se seguem mostram a evolução dos ventos na região dominada pelos centros de baixa prevista por um modelo atmosférico de área limitada denominado LAM. As principais características deste modelo podem ser encontradas em Innocentini (1995). São mostradas até 120 horas de previsão, sendo que cada figura retrata a configuração dos ventos num intervalo de 24 horas a começar pelo dia 25 de maio de 1997. Este evento culminou na ressaca que castigou a costa brasileira em 30 de

maio de 1997 e retrata a dinâmica de ciclones e anticiclones quando estes afetam o continente.

Na Figura 5.2 a configuração dos ventos referentes à data 25/05 no horário 12:00hs, dois círculos destacam a formação de um anticiclone (círculo menor) e o esboço de um ciclone (círculo maior). Basta acompanhar o sentido do vetor velocidade do vento representado na figura. Pode-se dizer que existe uma interface de vento comum a estes dois eventos.

Figura 5.2 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 25/05/1997.

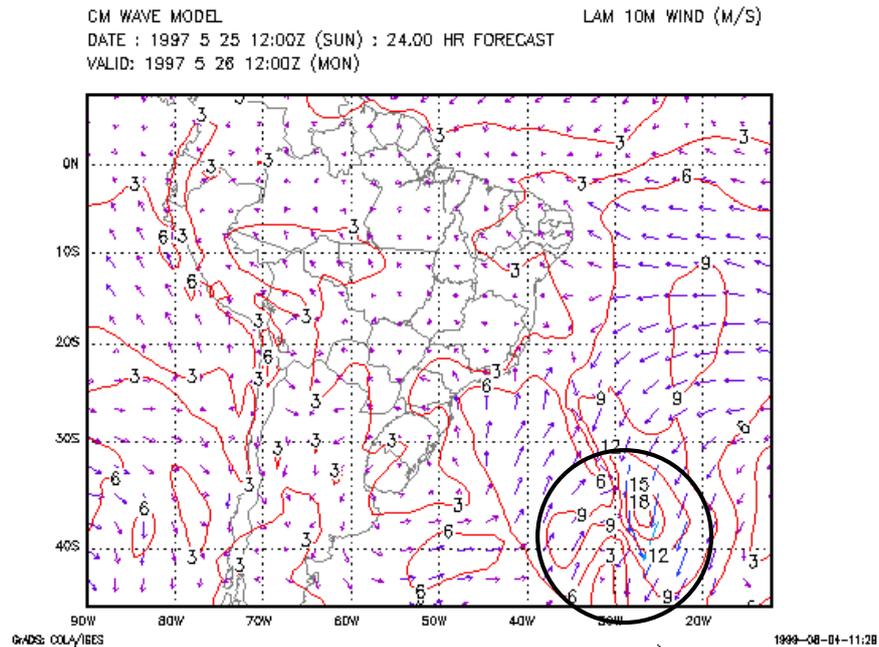


Mapa de previsão dos ventos destacando a formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 25/05/1997.

Fonte: Produção do autor.

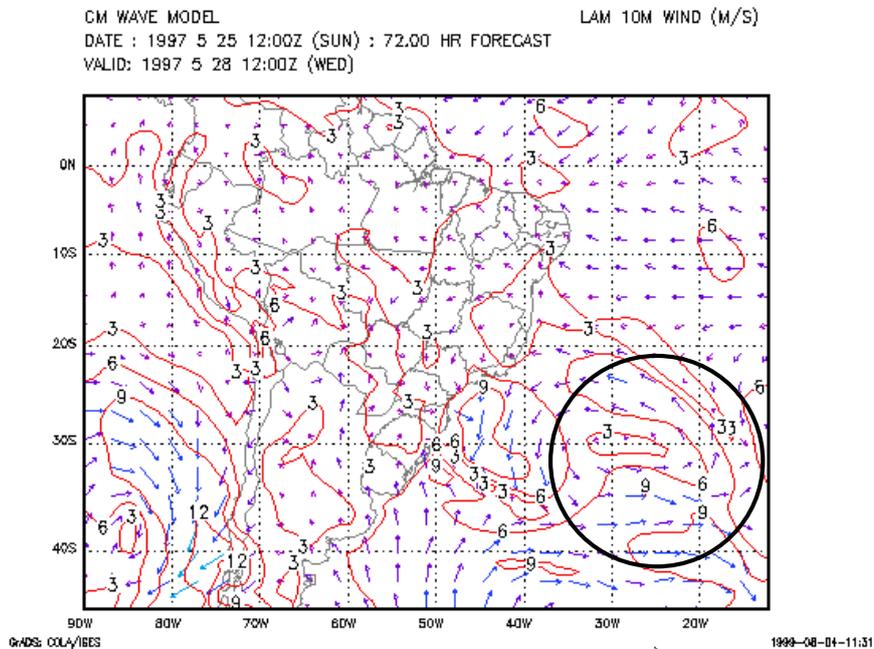
A figura-5.3 mostra a dissolução dos sistema anteriormente citados, resultando na intensificação do campo de ventos destacado pelo círculo maior. O círculo menor destaca a formação de um novo anticiclone.

Figura 5.3 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 26/05/1997.



Mapa de previsão dos ventos destacando a formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 26/05/1997. (24 horas de previsão)

Figura 5.4- Mapa de previsão dos ventos para o dia 27/05/1997.

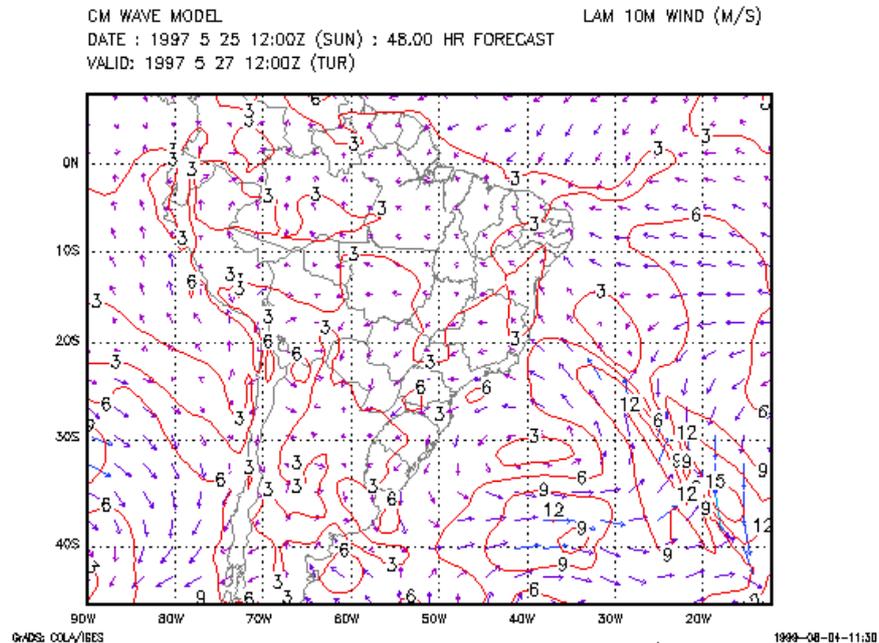


Mapa de Previsão dos ventos destacando a formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 27/05/1997. (48 horas de previsão).

Fonte: Produção do autor.

Na figura 5.4 o anticiclone que se formara sobre o continente se deslocou para leste continuando com ventos intensos a sua direita.

Figura 5.5 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 28/05/1997.



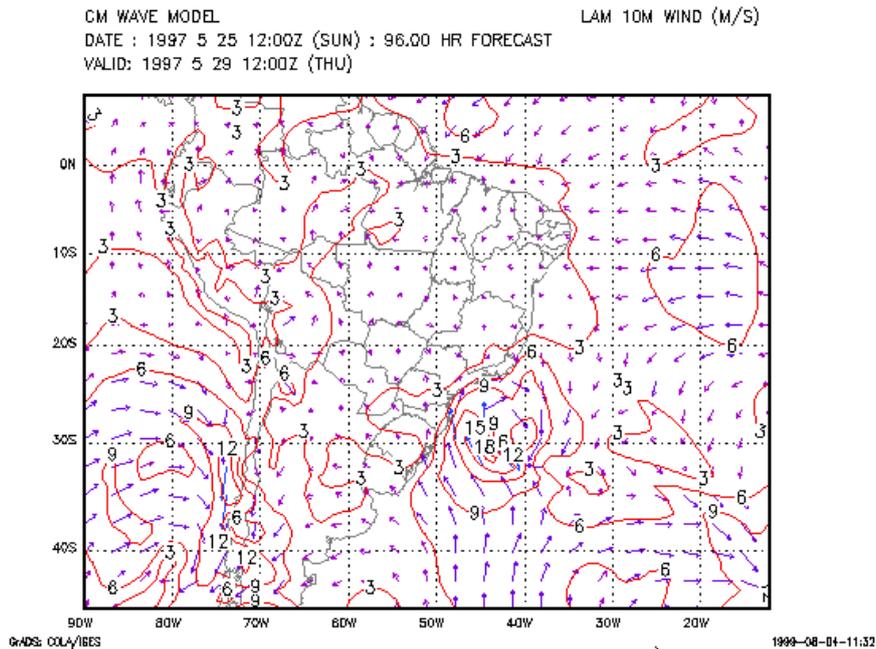
Mapa de previsão dos ventos com formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 28/05/1997. (72 horas de previsão).

Fonte: Produção do autor.

24 horas depois, figura 5.5, o anticiclone se deslocou mais para leste, havendo perda de energia dos ventos antes localizados a sua direita. Entretanto um novo foco de ventos intensos se forma na porção esquerda do circulo em destaque.

Os ventos deste foco se intensificam, agora formando um ciclone próximo da costa, no dia 28 (Figura 5.6). No dia 30 de maio (Figura 5.7) o ciclone se intensificou ainda mais, mostrando ventos de até 18 m/s gerando ondas que castigaram a costa leste da América do Sul. A formação de fortes ciclones e anticiclones extra-tropicais são comuns nas altas latitudes mas nem sempre sua configuração de ventos afetam a costa como neste caso. Quando isso acontece o litoral é assolado por ondas intensas, muitas vezes causando perdas materiais e humanas.

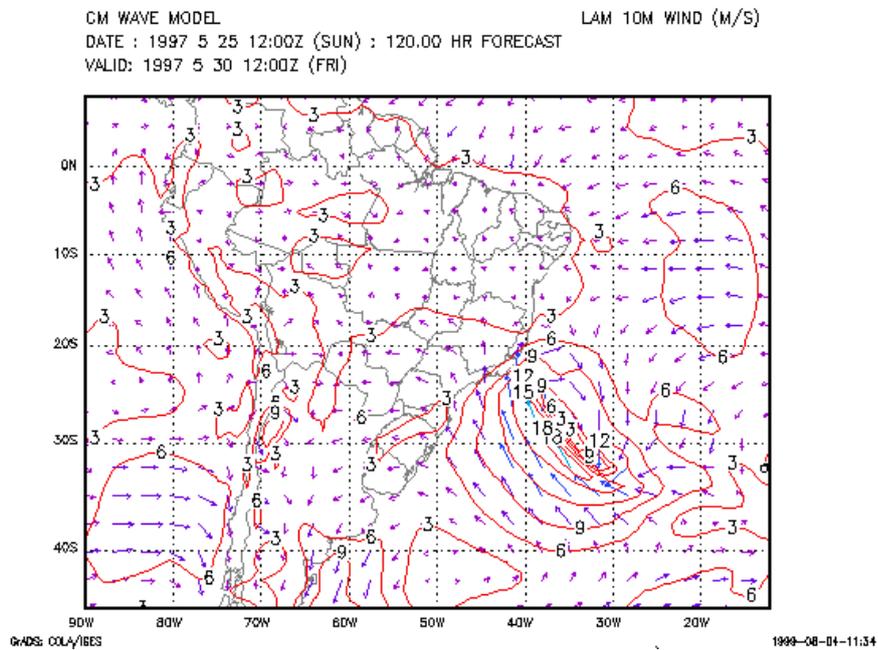
Figura 5.6 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 29/05/1997.



Mapa de previsão dos ventos com formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 29/05/1997. (96 horas de previsão).

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.7 - Mapa de previsão dos ventos para o dia 30/05/1997.



Mapa de previsão dos ventos destacando a formação de ciclones e anticiclones, retratada pelo modelo LAM para o dia 30/05/1997. (120 horas de previsão).

Fonte: Produção do autor.

A figura 5.7 mostra ainda, logo abaixo do núcleo do ciclone, a configuração dos ventos formando uma grande pista indo de encontro ao litoral. Estas pistas influenciam diretamente na geração de ondas intensas conforme sua intensidade e tamanho.

É comum, também a formação de ciclones tropicais no Atlântico Norte. Geralmente estes são gerados próximos ao equador e se deslocam para noroeste. Ao atingirem a costa da América do Norte estes são defletidos e perdem força até se extinguirem. Algumas exceções, como a ocorrida nos dias próximos a 24 de outubro de 1999 mostram outra dinâmica. Ao atingir a costa o ciclone se intensificou e seguiu rumo a nordeste chegando próximo à Inglaterra. Os fortes ventos associados ao ciclone geraram ondas de grande porte que se propagaram por grandes distâncias. Tais ondas atingiram a costa das regiões Norte e Nordeste do território brasileiro causando grandes estragos. Este exemplo retrata o que já é bem caracterizado: os campos de vento no Hemisfério Norte, em algumas circunstâncias, geram as maiores ondas que atingem, principalmente, a costa nordeste brasileira voltada para o Atlântico Norte.

O regime das ondas, no geral, acompanha os campos de vento, já que como visto, a maioria das ondas superficiais são decorrentes da ação dos ventos. Candella (1997) ratifica este fato ao afirmar que as principais ondas presentes no Atlântico Sul são geradas nas médias e altas latitudes por tempestades originadas nos centros de baixa pressão.

O valor das Alturas Significativas de ondas, apresentadas por Young e Holland (1996), na região de estudo, teve seu valor médio máximo entre 3 e 4m, predominantemente no meses de maio, numa faixa à sul da latitude -30° . Em julho, as Alturas Significativas médias atingiram 5m em 40° S em setembro, os valores máximos foram compatíveis com os apresentados em maio mas com uma área maior de abrangência em relação a este mês. Ressalta-se que as médias de junho e agosto não foram reportadas pelos autores.

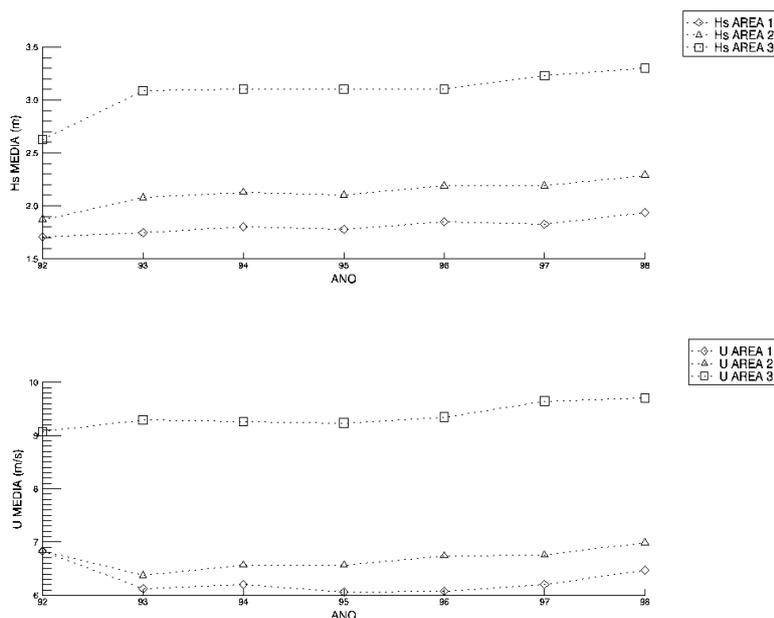
A exemplo do que foi feito por Young e Holland (1996), com dados extraídos do satélite Geosat, é apresentado a seguir a climatologia de

ventos e ondas no período de 23/07/1992 a 09/03/1998, construída a partir dos dados oriundos do satélite TOPEX/Poseidon.

5.2. CLIMATOLOGIA T/P DOS VENTOS E ONDAS NO ATLÂNTICO SUL

Os valores médios anuais de Hs e U, nas três regiões consideradas (figura 5.8), indicam uma leve tendência de aumento da média com o passar dos anos. Nos anos de 1992 e 1998 o período de abrangência menor da base de dados influenciou nitidamente no cálculo da média, principalmente no ano de 1992. Neste ano os dados abrangem os meses finais, como mostra a figura 5.9. Já no ano de 1998 as informações cobrem os meses iniciais. Destacadamente pode-se observar a área 3 com valores médios, tanto de Hs quanto de U mais intensos em relação às áreas 2 e 3.

Figura 5.8 - Média anual das Alturas Significativas de Ondas (Hs) e velocidade escalar dos ventos (U) do satélite TOPEX/Poseidon nas três subáreas do Oceano Atlântico Sul.



Fonte: Produção do autor.

São agora apresentados gráficos que mostram valores médios de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade Escalar do Vento (U) num período de aproximadamente dez dias, ou um ciclo completo do satélite TOPEX/Poseidon. Os gráficos (Figuras 5.9 a 5.22) são divididos em três seções relatando valores médios referentes a regiões distintas do oceano Atlântico Sul, as latitudes sendo indicadas no lado direito dos gráficos. As linhas verticais tracejadas selecionam um período de aproximadamente

um mês com valores médios mostrados na parte superior de cada seção vertical. As linhas pontilhadas envolvendo os valores médios mostram o desvio padrão. Cada figura retrata o comportamento de Hs e U para cada ano. Os anos de 1992 e 1998 são incompletos pela abrangência limitada da base de dados.

Baseando-se nos valores médios, os resultados mostrados na figura 5.9 confirmam que tanto Hs como U, em todos os meses, são mais intensos quanto mais ao sul estiver a região. Os desvios padrão nesta mesma figura seguem na grande maioria, o mesmo sentido de crescimento, levando à conclusão de que a diversidade na altura de ondas aumenta no sentido das altas latitudes.

No período analisado, de 23 de setembro de 1992 a 1 de janeiro de 1993, o valor médio máximo de Hs para o ano de 1992 foi determinado entre 23 de setembro e 3 de outubro nas áreas 1 e 2 e entre 3 de outubro a 1 de novembro na área 3. Já os valores médios mínimos de Hs se alternaram entre 3 de outubro a 1 de novembro para a área 1 e de 1 de dezembro a 1 de janeiro para as áreas 2 e 3, como está detalhado na figura 5.9. O conjunto de dados demonstram uma tendência de crescimento a partir do mês de dezembro nas três áreas, com acentuado aumento no desvio padrão nas áreas 1 e 2 no ciclo 8 do satélite.

Na figura 5.10 estão retratados os valores médios de U no ano de 1992. Os valores médios máximos de U correspondem ao período de 23 de setembro a 3 de outubro nas três áreas. Os valores médios mínimos de U estão no período de 1 de dezembro a 10 de janeiro nas três áreas.

Entre os valores médios obtidos para o ano de 1993, retratados no lado direito da figura 5.11, é menor o valor na área 1, aumentando na área 2 até atingir o maior valor médio de 3,09m na área 3. A variância dos dados cresceu no mesmo sentido da média comparando-se as regiões. Esse perfil de Hs concorda com o que é normalmente registrado no Atlântico Sul. A área 1 apresentou o maior valor médio no período de 7 de julho a 8 de agosto. Neste mesmo período a área 2 apresentou seu maior valor médio de Hs. No entanto, na Área 3, o maior valor registrado refere-se ao período de 7 de junho a 7 de julho. Os valores de Hs médios mensais nas

três regiões foram mais baixos no início do ano, crescendo no meio do ano e tornando cair nos meses finais de 1993.

No período de 10 de janeiro a 08 fevereiro pode-se reconhecer padrões dos valores médios semelhantes às três regiões. A identidade entre a forma da curva nas três áreas se apresenta em muitos períodos. Este fato sugere que na média, toda a região de estudo, neste ano, foi influenciada de forma semelhante quanto aos agentes geradores de ondas. No entanto as semelhanças se restringiram à forma das curvas não acontecendo o mesmo com as intensidades de Hs.

As velocidades dos ventos médios no ano de 1993, retratados na figura 5.12, revelam valores máximos na média mensal no período de 7 de junho a 7 de julho para a área 1, de 7 de julho a 8 de agosto para a área 2 e novamente no período de 7 de junho a 7 de julho para a área 3. Os menores valores médios neste ano foram registrados nos períodos de 8 de fevereiro a 10 de março e de 5 de setembro a 4 de outubro, na área 1, de 10 de março a 9 de abril na área 2 e de 8 de fevereiro a 10 de março na área 3. Os dados de U mostram variação menor em torno do valor médio obtido em cada região neste ano em relação aos dados de Hs no mesmo período.

No ano de 1994 os valores médios mensais máximos foram registrados no período de 09 de junho a 09 de julho para as áreas 1, 2 e 3 (Figura 5.13). Já os valores médios mínimos estão dentro do período de 08 de agosto a 07 de setembro, na área 1, de 02 de janeiro a 10 de fevereiro, nas áreas 2 e 3. O fato mais marcante nos dados de Hs apresentados neste ano é que ocorre um caso raro em que a média no período de 02 de janeiro a 10 de fevereiro é menor na área 2 em relação à área 1 dentro do mesmo período. A aparente causa deste acontecimento está associada a cobertura de tempo maior da base de dados T/P neste período (cerca de 40 dias). A ocorrência de tempestades isoladas também podem acarretar discordâncias desta natureza, mas estas não foram investigadas neste trabalho.

A figura 5.14 mostra a configuração dos ventos para o mesmo ano de 1994. Os ventos acompanharam os resultados das ondas com valores

médios mensais maiores na área 2 em relação a área 1 no mesmo período de pouco menos de 40 dias contados a partir de 02 de janeiro. Na área 1 o maior valor médio registrado compreende o período de 01 de maio a 09 de junho. O valor médio mínimo nesta mesma área foi registrado no período de 02 de janeiro a 10 de fevereiro. Nas áreas 2 e 3 o valor médio máximo foi determinado no período de 09 de junho a 09 de julho. Já os valores médio mínimos nas áreas 2 e 3 foram encontrados na faixa de 02 de janeiro a 10 de fevereiro, a exemplo da área 1.

A figura 5.15 retrata os valores médios de Hs para o ano de 1995. Os maiores valores médios mensais relatados neste ano são referentes ao período de 01 de julho a 10 de agosto nas áreas 1 e 2 e de 01 de junho a 01 de julho para a área 3. Já os menores valores médios se apresentaram nos primeiros meses do ano. Na área 1 de 04 de janeiro a 02 de fevereiro, sendo que o valor registrado neste espaço de tempo se repetiu na faixa de 03 de abril a 03 de maio. O menor valor médio relatado para área 3 compreende em sua maioria o mês de janeiro. Na área 2 o valor médio mais baixo é referente ao mês de fevereiro. É importante destacar que existe uma falha na base de dados utilizada no período de 07 de novembro a 07 de dezembro sendo, portanto, coberto com aproximadamente 20 dias de dados ao invés dos 30 dias normalmente utilizados no cálculo da média.

Os ventos registrados no ano de 1995 estão retratados na figura 5.16. Os valores médios mensais máximos, nas três áreas, foram encontrados no período de 1 de julho a 10 de agosto. Os menores valores médios referem-se ao período de 2 de fevereiro a 4 de março nas três áreas. Quando comparados os valores médios máximos de Hs e U estes se mostram coerentes, ou seja, valores altos de U resultam em elevadas Hs. A exceção ocorre com a área 3. Nesta região o pico de Hs média ocorreu no mês seguinte ao pico de U, no entanto não houve muita variação nos valores médios de Hs de 1 de junho a 8 de setembro. Comparando-se os valores médios mínimos de Hs e U as concordâncias nos períodos de ocorrência ficou restrita a área 2 na data de 2 de fevereiro a 4 de março.

A figura 5.17 refere-se aos valores médios de Hs no ano de 1996. Os valores médios mensais máximos ocorreram no período de 2 de junho a 2 de julho nas três áreas. Na área 1 destaca-se o valor médio de Hs referente ao período de 5 de janeiro a 4 de fevereiro. Normalmente Hs médias nos primeiros meses do ano são menores se comparados aos meses característicos de outono e inverno. Neste caso o valor de 1,90m, referente ao mês de janeiro, é curiosamente próximo do valor mensal máximo (1,95m) registrado nesta mesma área. As outras áreas não revelaram o mesmo perfil. Os fatos sugerem que a região 1 possa ter sido afetada por alguma tempestade tropical ocorrida no primeiro mês de 1996 acarretando o aumento da média calculada para este período. O valor médio mínimo mensal registrado na área 1 compreende a base de dados que vai do dia 9 de outubro a 8 de novembro. Este fato é incomum visto o período em que os valores médios mínimos mensais são encontrados em outros anos. Para as áreas 2 e 3 fevereiro é o mês em que os valores médios mínimos mensais são encontrados. Um fato interessante encontrado neste ano é a feição na forma de M encontradas nas áreas 1 e 2 entre agosto e setembro. Neste mesmo período a área 1 apresentou apenas um decaimento suave nos valores de Hs médios.

Na figura 5.18 são mostrados os valores médios de U calculados para o ano de 1996. A intensidade dos ventos, a exemplo do que ocorreu com Hs, é elevado na área 1 no mês de janeiro, chegando a superar o valor médio mensal calculado para a área 2, normalmente mais intenso. A média mensal máxima foi registrada nos períodos de 8 de novembro a 8 de dezembro na área 1, de 2 de julho a 1 de agosto, na área 2 e em 2 de junho a 2 de julho na área 3. Já os valores médios mensais mínimos foram encontrados nos meses de fevereiro e março na área 1, janeiro na área 2 e em dezembro na área 3. Este último foi o resultado de uma contínua queda na intensidade dos ventos nesta área, chegando em dezembro a um valor médio inferior aos registrados nas outras duas áreas, contrariando o que normalmente é verificado.

O decaimento contínuo registrado pelos dados de Hs e U a partir de agosto, principalmente na área 3, refletiu nos valores médios de Hs no

ano de 1997 referentes à figura 5.19. Nas três áreas o valor médio mensal mínimo ocorreu em janeiro. Os valores médios mensais máximos neste ano foram registrados em maio nas áreas 1 e 2 e em junho na área 3, sendo que a média referente a este mês se repetiu em setembro. Este ano é de especial interesse pois nele ocorreram os eventos estudados neste trabalho. As fortes ondas registradas no dia 30 de maio foram coerentemente confirmadas pelos valores médios calculados. Este fato reforça a confiabilidade nos dados TOPEX/Poseidon e indica a validade da metodologia empregada. O ciclone que gerou intensas ondas no final de maio atingiu o seu ápice, segundo o modelo climático LAM, na fronteira imaginária que divide as áreas 2 e 3 (-30° de latitude). Os resultados do satélite ratificaram estas áreas como sendo as mais afetadas por este evento. Segundo os valores médios de Hs, na área 3 as ondas se intensificaram após a data 30 de maio. Na área 2 e principalmente na 3 após esta data houve uma nítida queda nos valores médios de Hs. O valor médio máximo registrado no mês de maio na área 1 sugere que ventos intensos ocorridos nas altas latitudes podem afetar, em situações que exigem maior investigação, a climatologia das ondas nas baixas latitudes.

Os valores médios de U no mesmo ano de 1997 não refletiram tão claramente a influência do ciclone do dia 30 de maio como ocorreu com as Hs, como relata a figura 5.20. Na área 1, mais distante da região do ciclone, o valor médio mensal máximo ocorreu mês de maio, no entanto na área 2 o valor médio máximo foi encontrado no período de 3 de agosto a 1 de setembro. Na área 3 houve uma ascensão nos valores médios de U a partir do mês de maio culminando em julho. Os valores médios mínimos de U estão nos períodos de 1 de outubro a 10 de novembro na área 1. Nas áreas 2 e 3 o valor médio mínimo de U ocorreu de 6 de janeiro a 5 de fevereiro.

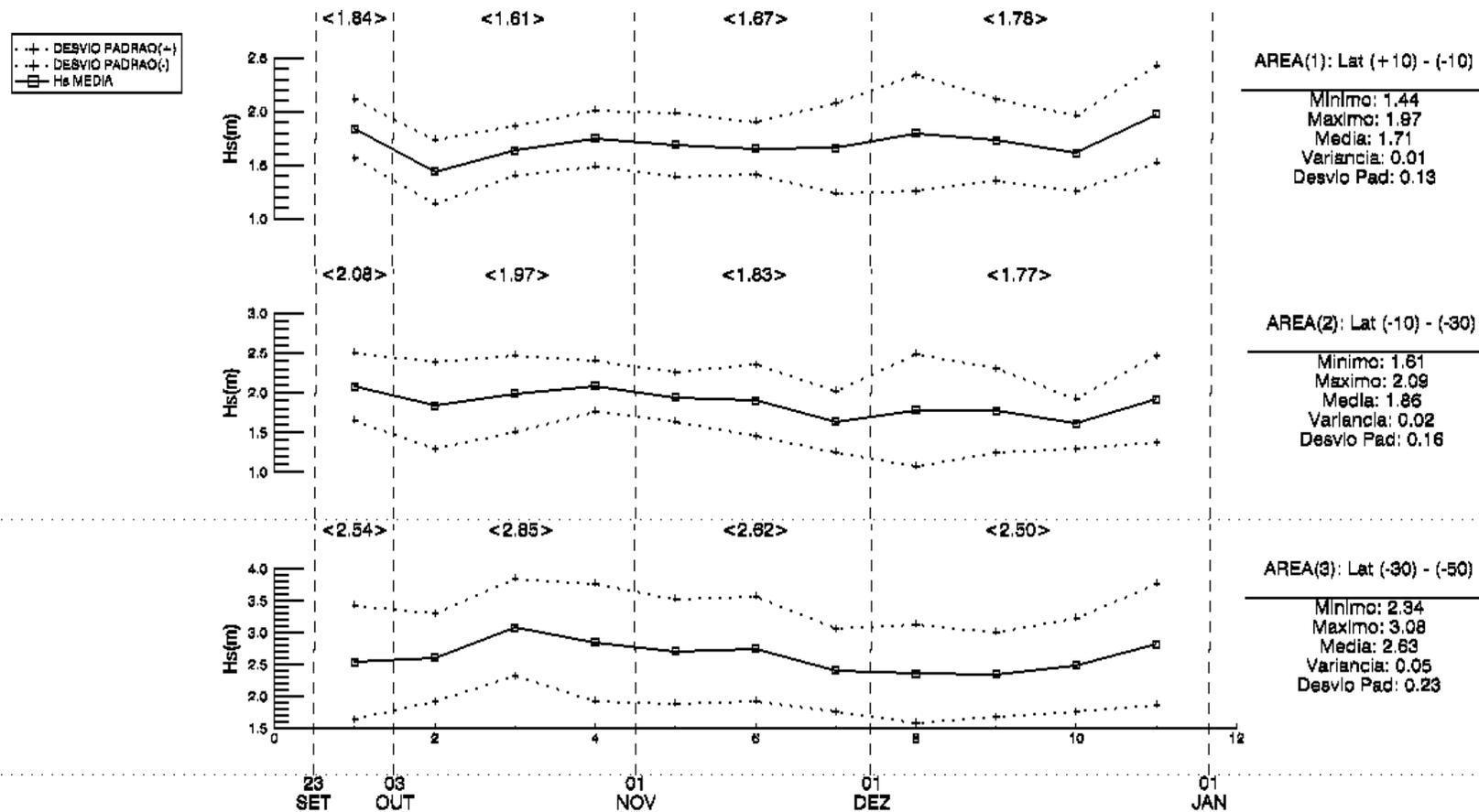
No ano de 1998 a base de dados cobre o período de 8 de janeiro a 3 de setembro, como mostra a figura 5.21. Dentro desta faixa de tempo o valor médio máximo ocorreu no mês de agosto nas três áreas, sendo que na área 2 o valor médio máximo encontrado se repetiu no mês anterior. Os

valores médios mensais mínimos ocorreram entre 7 de fevereiro a 3 de março nas áreas 1 e 2. Na área 3 o valor médio mínimo ocorreu no mês de janeiro mas com pouca diferença para o valor médio calculado para o mês de fevereiro.

A velocidade escalar dos ventos médios, para o ano de 1998, pode ser acompanhada pela figura 5.22. O vento médio mais intenso ocorreu no período de 7 de abril a 7 de maio na área 1. Na área 2 o valor médio mensal mais intenso ocorreu entre 6 de julho e 4 de agosto, enquanto que para a área 3 foi relatado entre 7 de maio e 6 de junho. Considerando os valores médios mensais mínimos de U, os períodos de ocorrência foi de 7 de fevereiro a 9 de março nas três áreas.

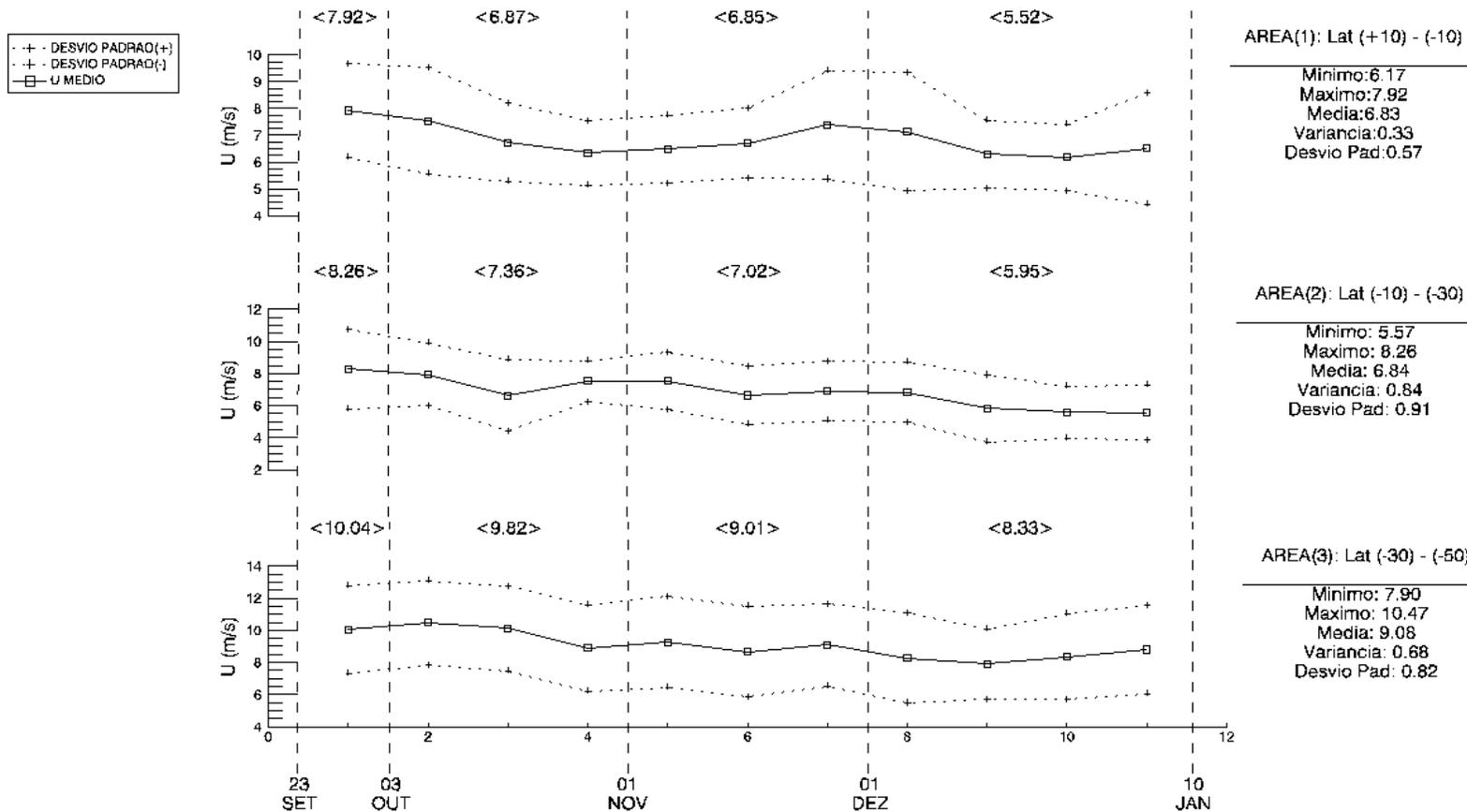
Valores de Hs e U, divididos em períodos equivalentes às estações climáticas, colocados em grade, são apresentados na seção seguinte.

Figura 5.9 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1992



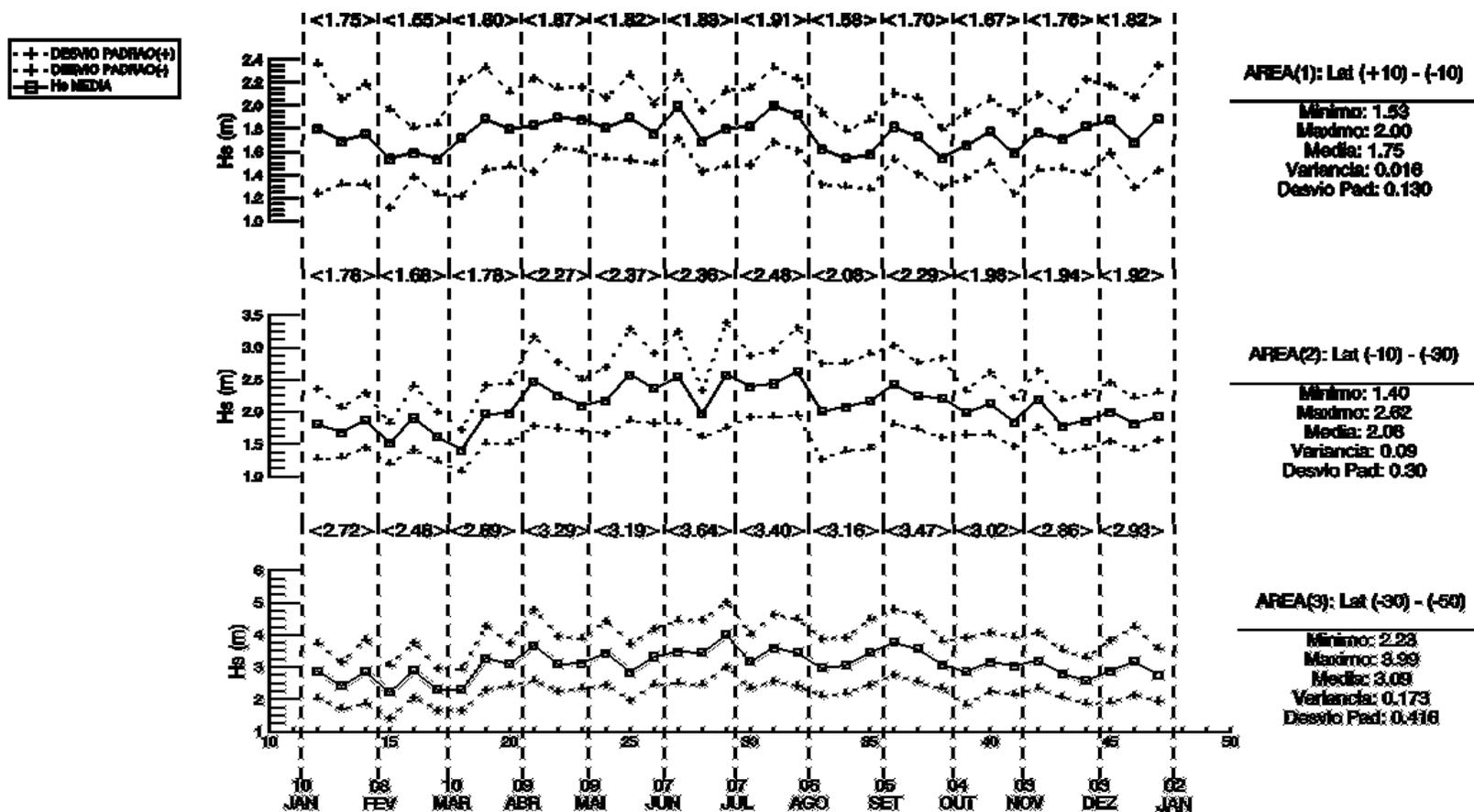
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.10 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1992



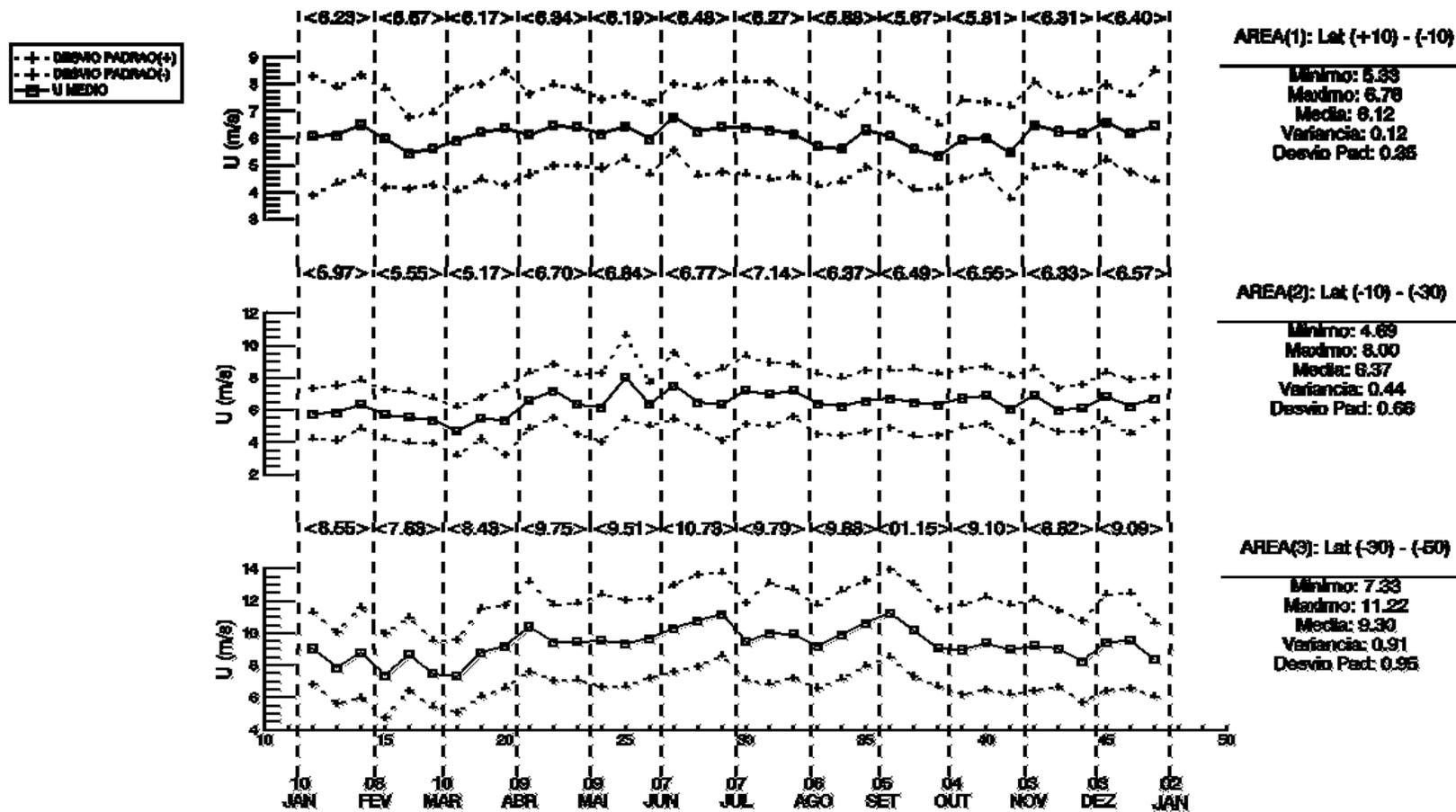
Fonte: Produção do autor

Figura 5.11 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1993



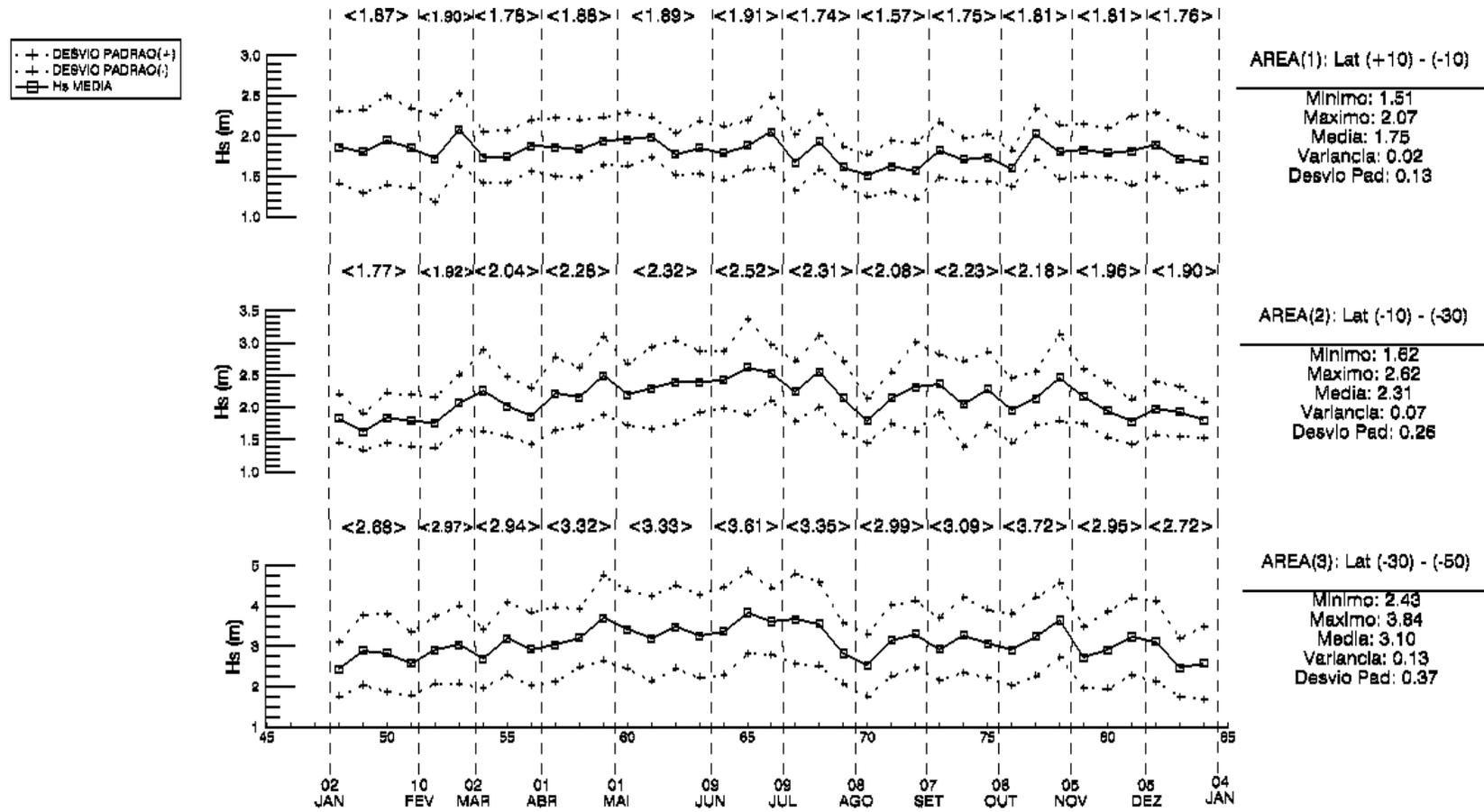
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.12 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1993



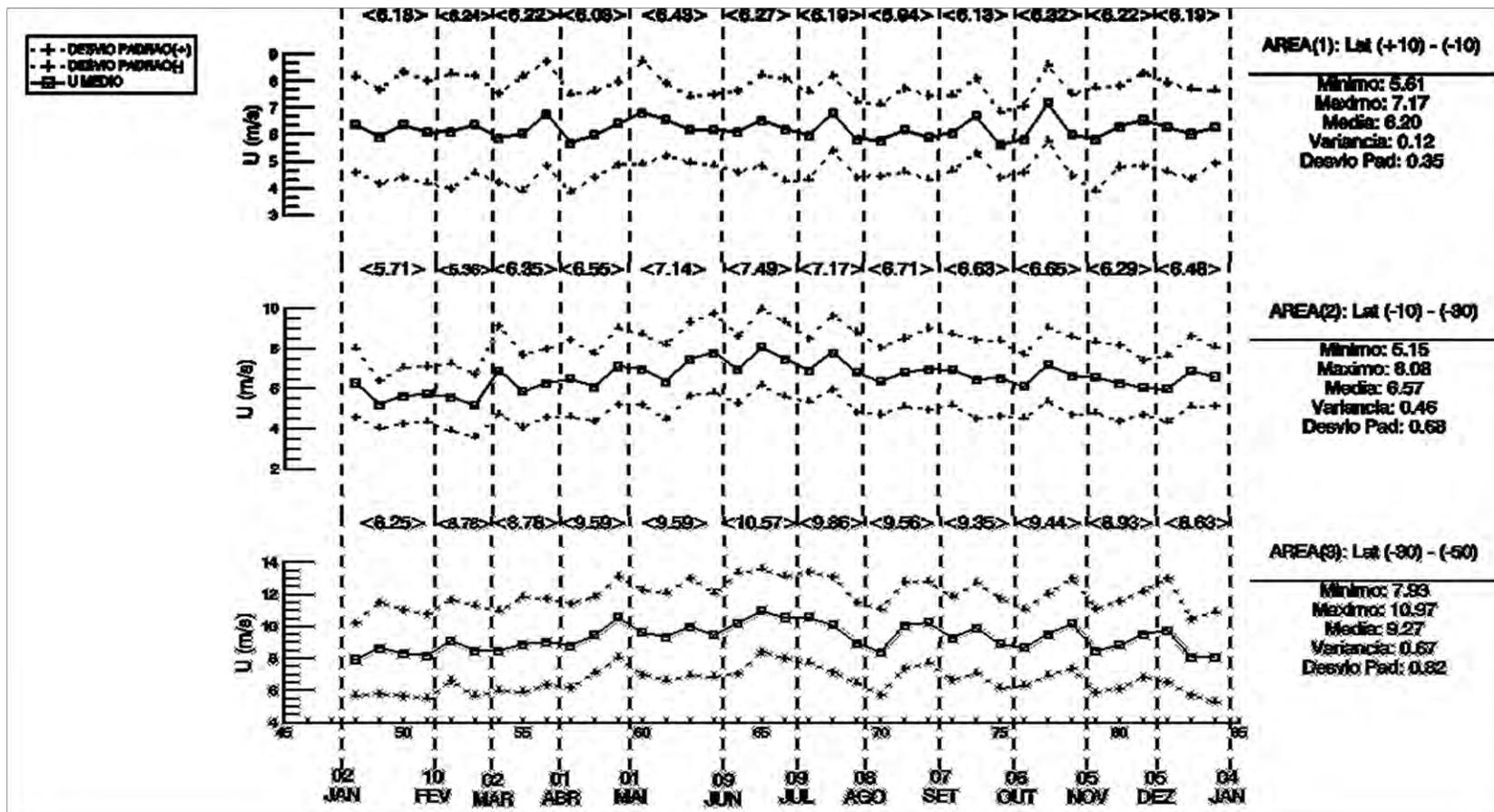
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.13 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1994



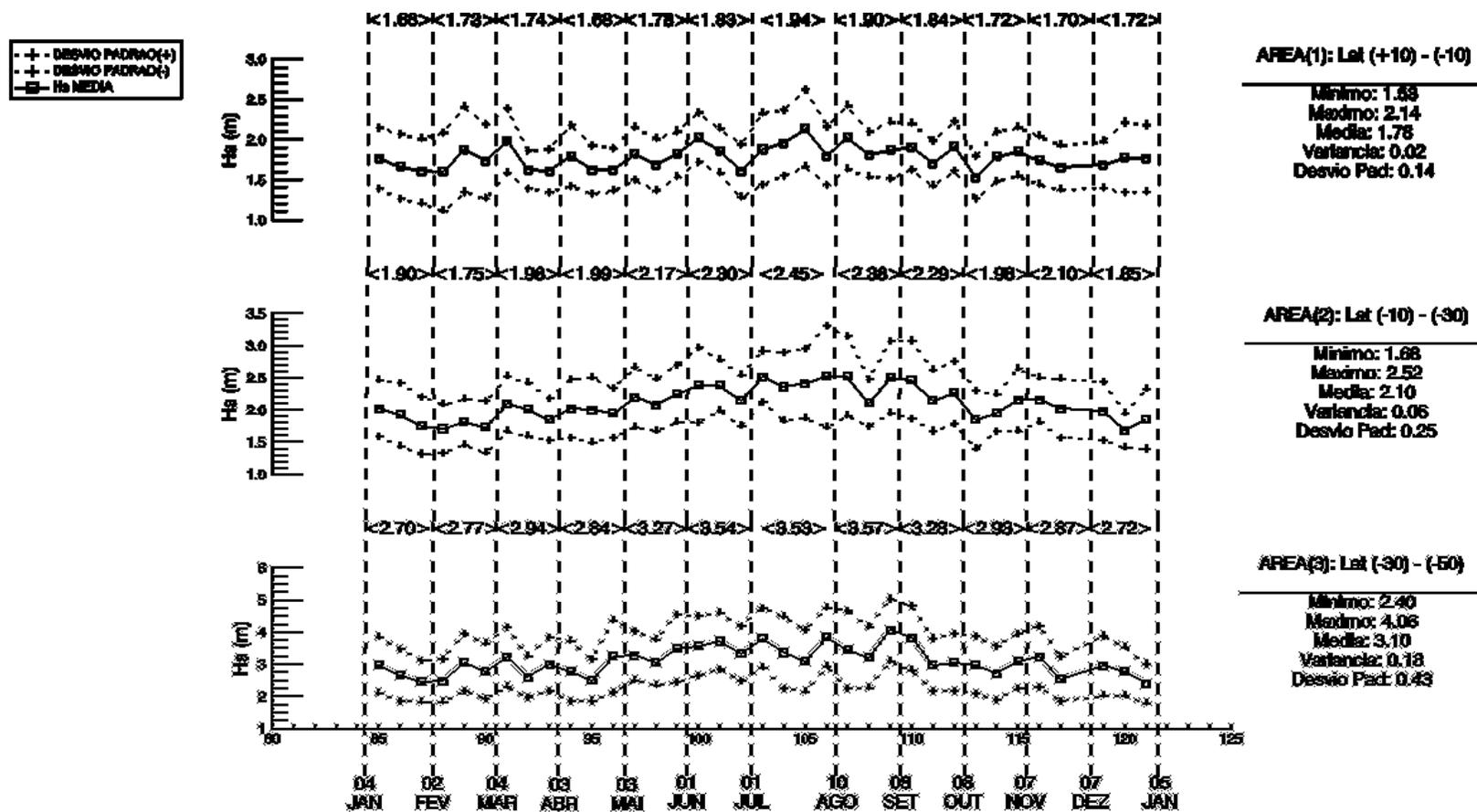
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.14 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1994



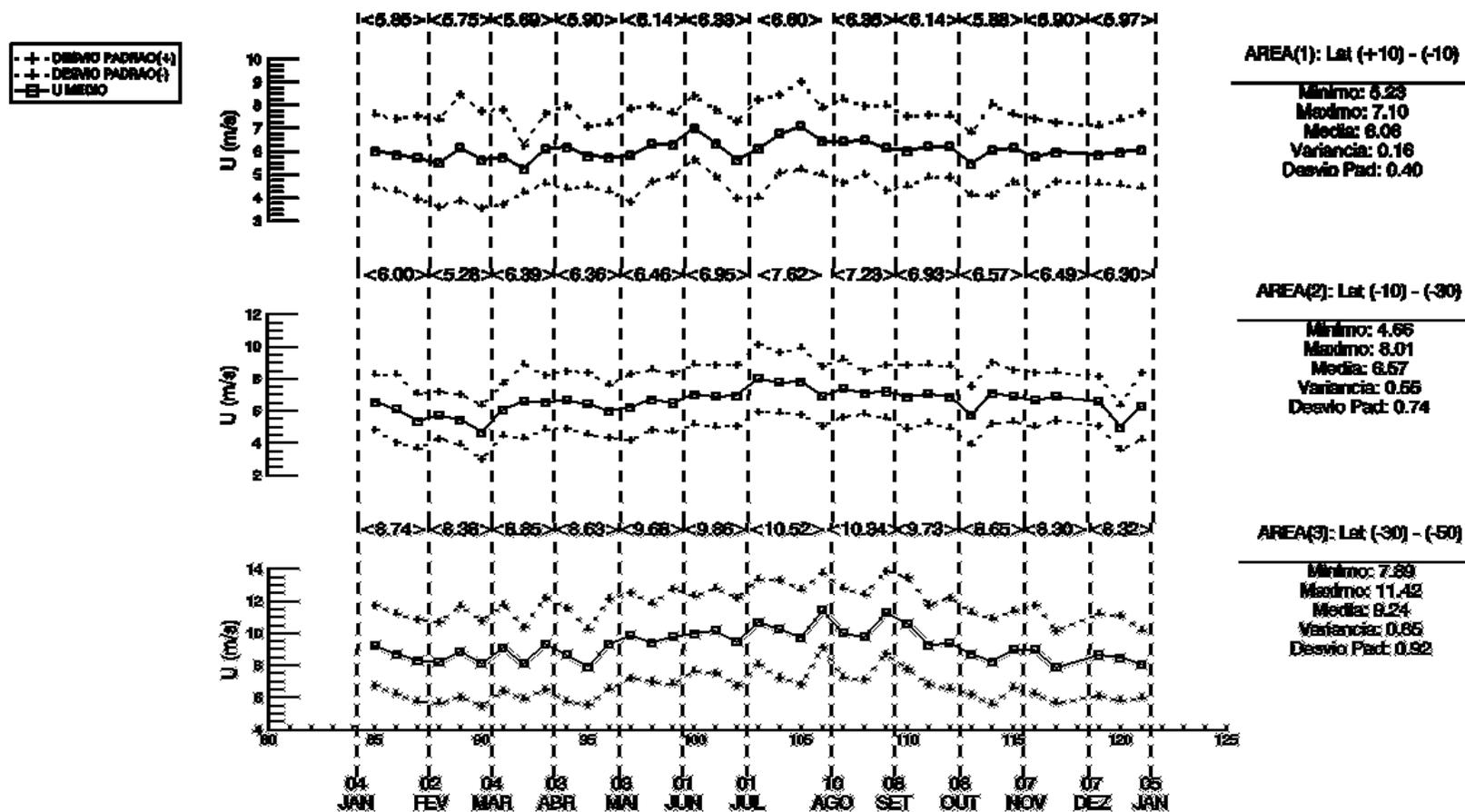
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.15 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1995



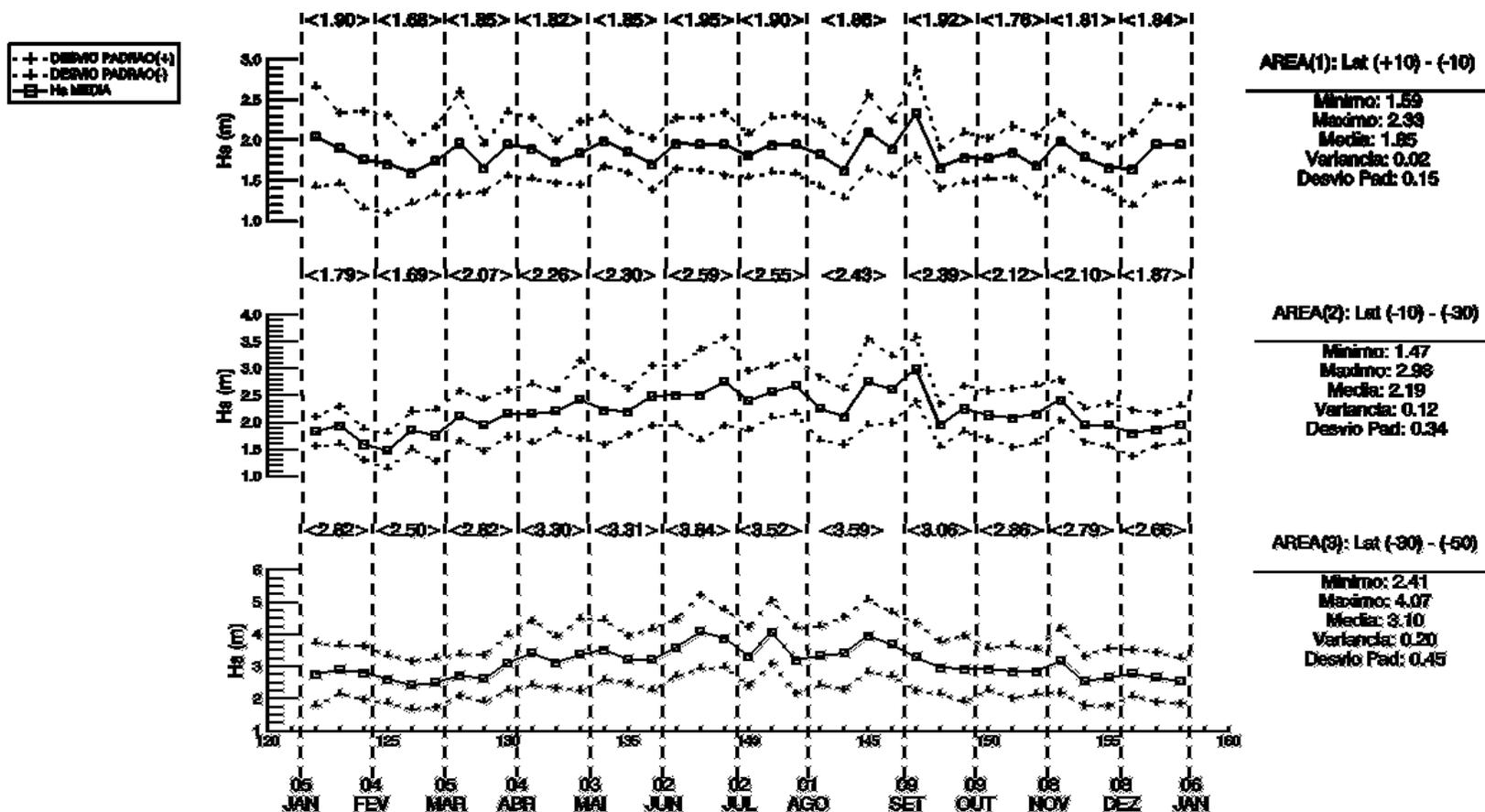
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.16 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1995



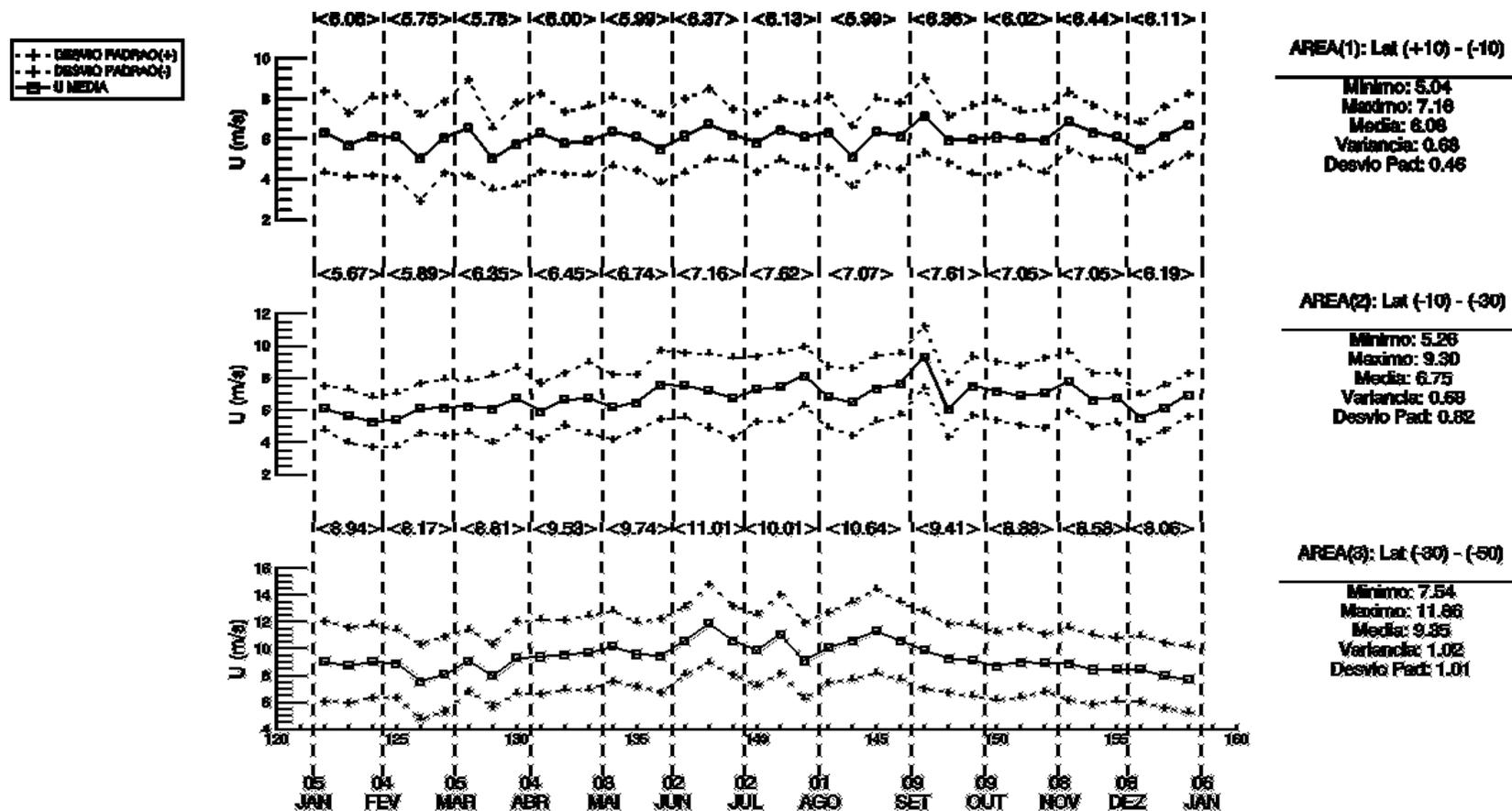
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.17 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1996



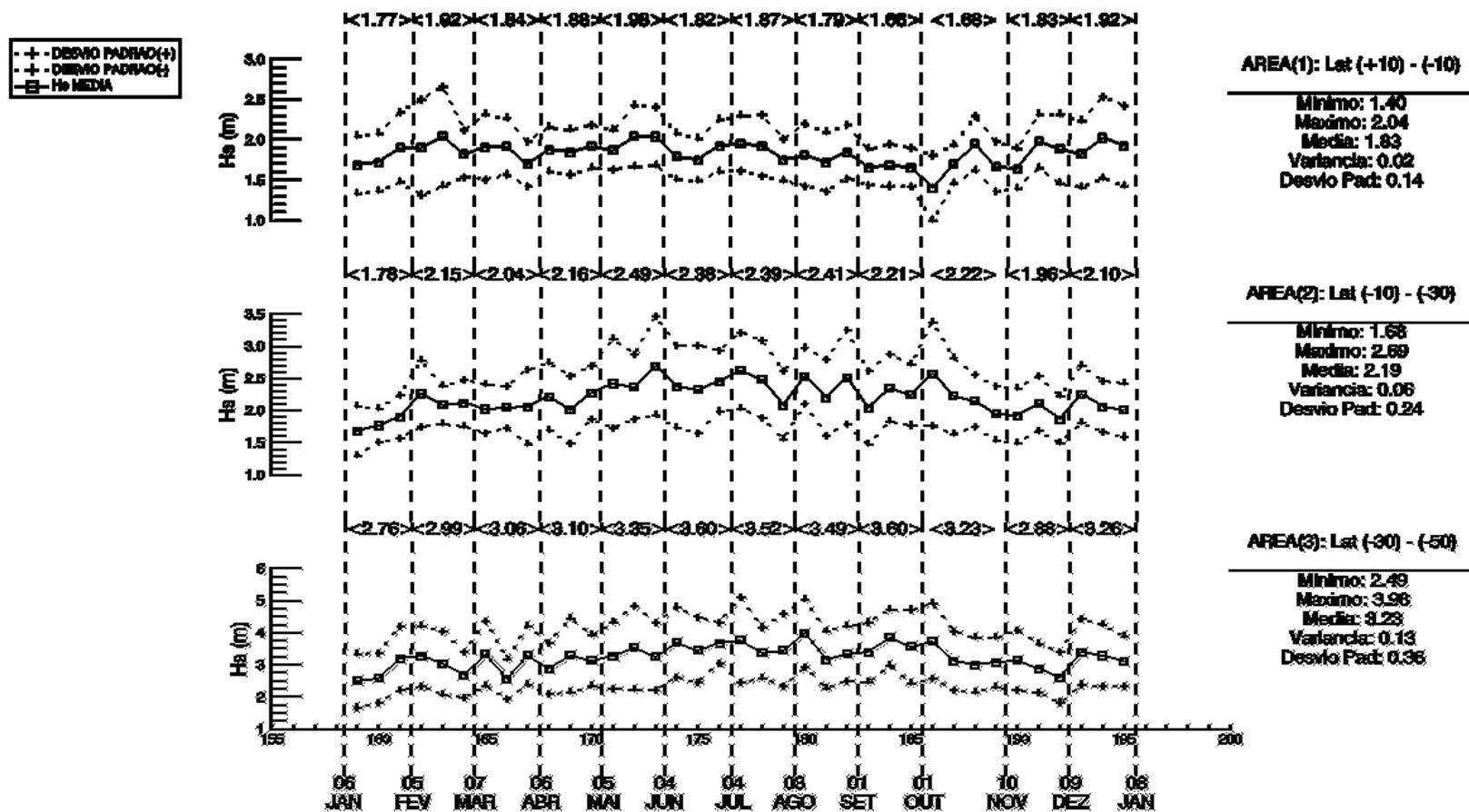
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.18 - Média da Velocidade dos Ventos (U) por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1996



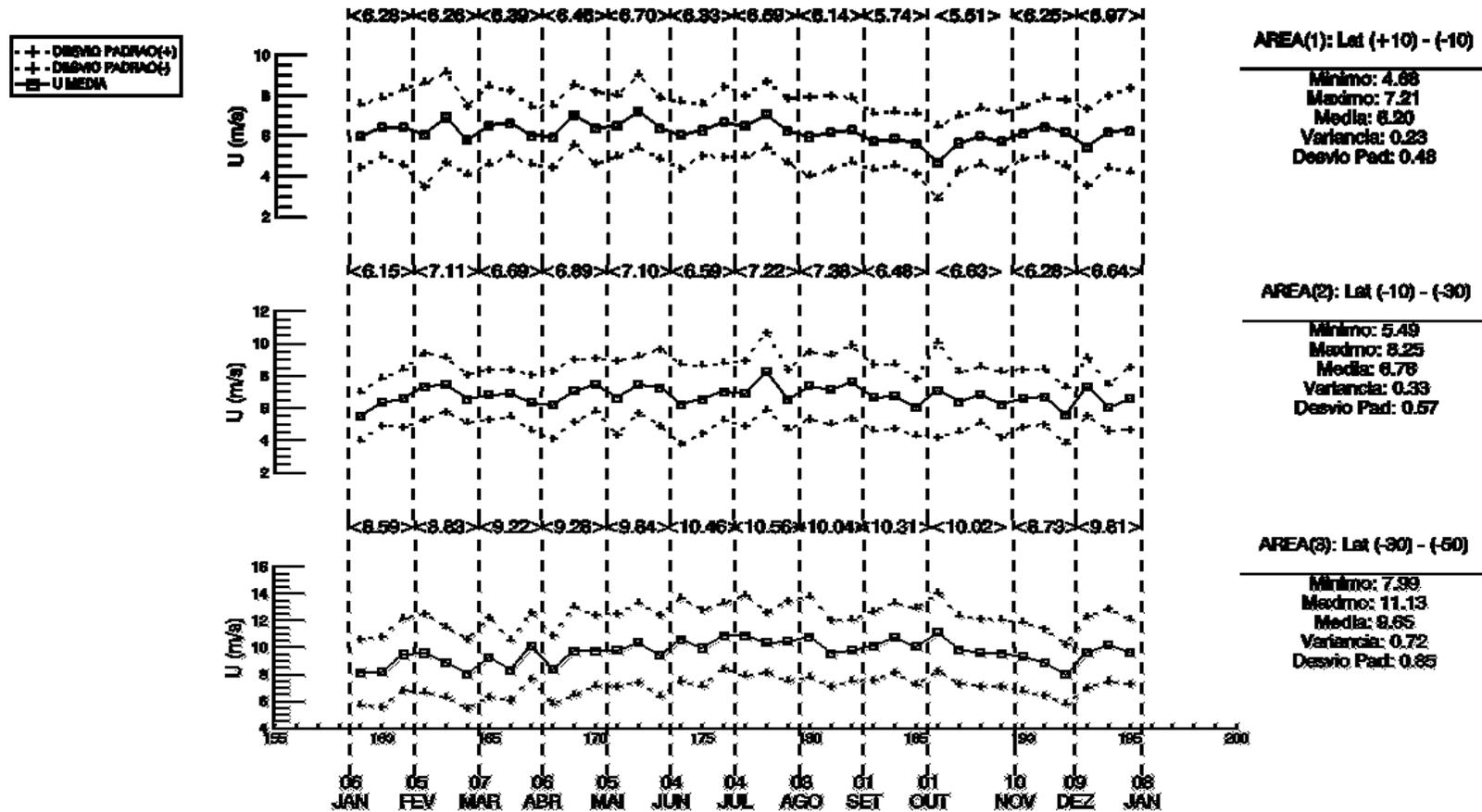
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.19 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1997



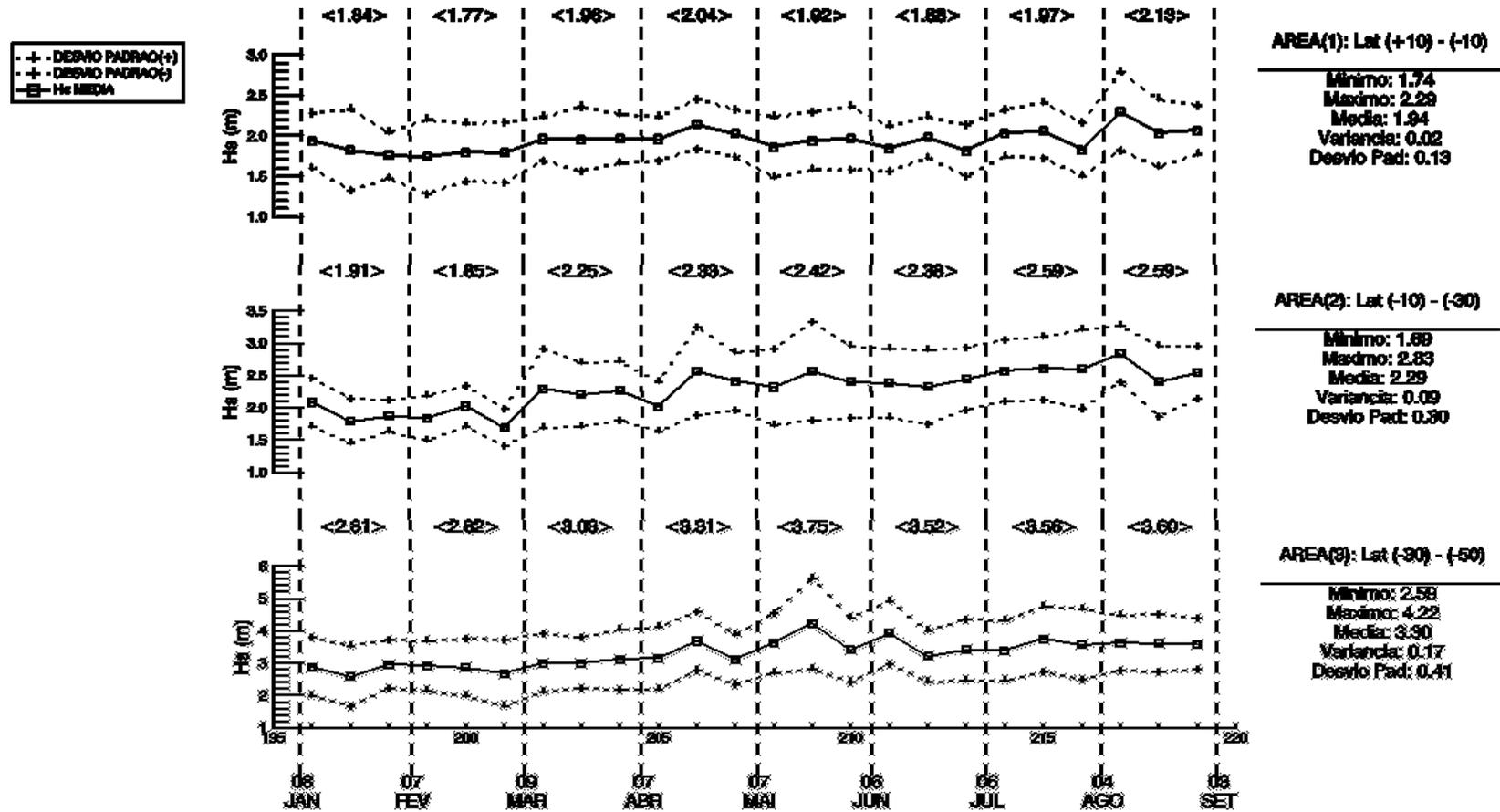
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.20 - Média da Velocidade dos Ventos (U) por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1997



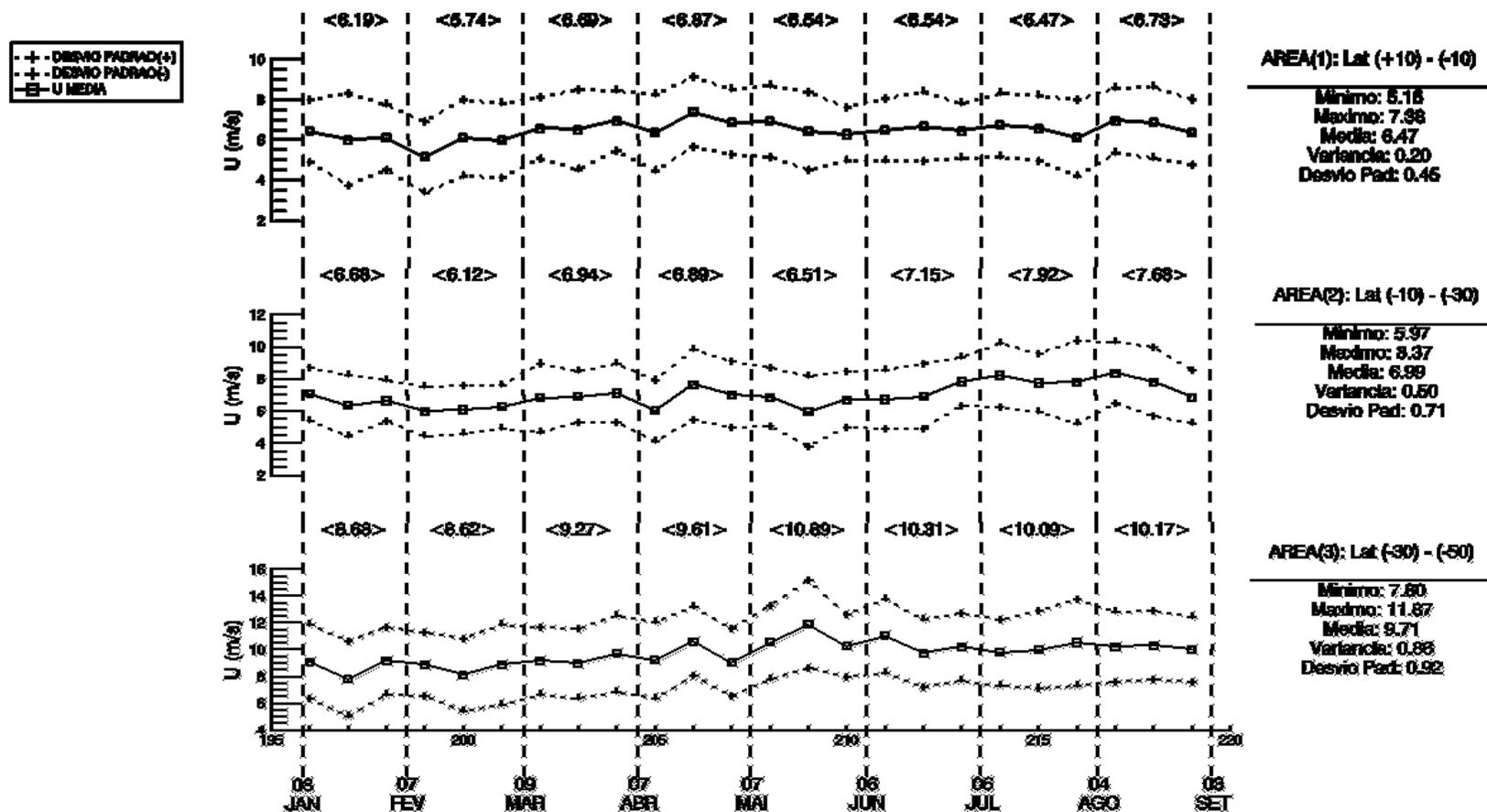
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.21 - Média das Hs por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1998



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.22 - Média da Velocidade dos Ventos por ciclo TOPEX/Poseidon no oceano Atlântico Sul. ANO: 1998



Fonte: Produção do autor.

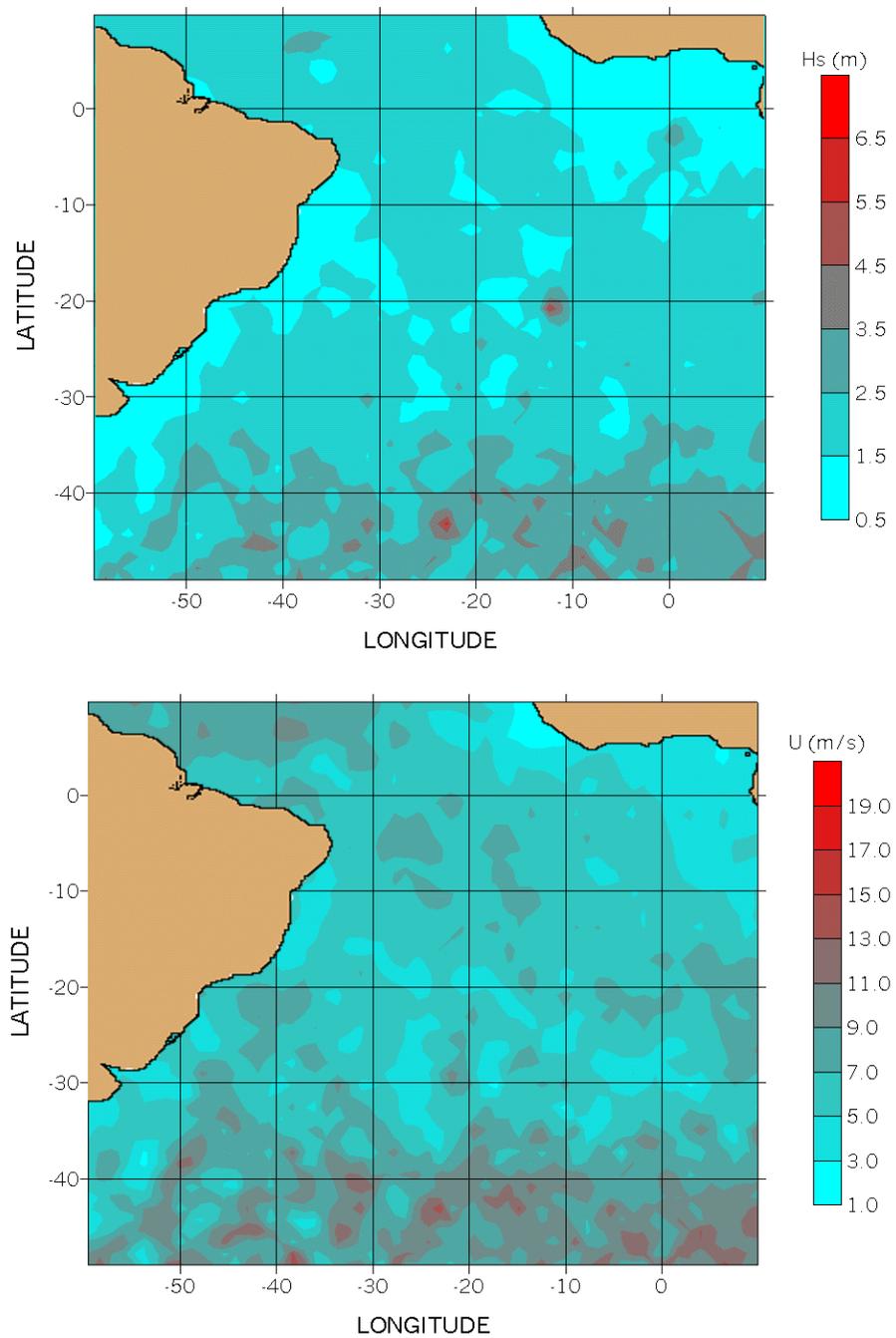
5.2.1. VERÃO

Young e Holland (1996), no Atlas Oceânico, utilizando dados do satélite GEOSAT, retratam valores médios mensais, correspondentes aos meses de janeiro, março, maio, julho, setembro e novembro, de Hs e U no Oceano Atlântico Sul. As informações em grade mostram que as Hs mais intensas, no mês de janeiro, ocorreram na região entre as latitudes -40° e -50° e entre as longitudes -15° e 30° aproximadamente. Tais valores de Hs variaram entre 3 e 4m. Os menores valores de Hs neste mesmo mês, foram encontrados ao redor da latitude 0° e longitude 0° , próximo à costa africana. As Hs registradas nesta região variaram entre 0 e 1m. Os valores de Hs interpolados em grade neste trabalho, partindo de informações fornecidas pelo satélite TOPEX/Poseidon se mostram coerentes, de forma geral, com os resultados apresentados pelos autores acima citados. Mesmo havendo diferenças no período em que as informações foram trabalhadas (dados T/P mensais e GEOSAT trimestrais), as regiões de ocorrência de valores máximos e mínimos foram coerentes. A diferença entre escalas de Hs utilizadas neste trabalhos e as utilizadas pelos autores dificulta a comparação entre as intensidades das duas fontes. No entanto, mesmo com a acuidade visual prejudicada, não foram encontradas diferenças marcantes de intensidade, relevando-se a diferença entre os períodos e como foram feitas as médias apresentadas aqui. É importante lembrar que as médias foram tomadas somente nos pontos coincidentes para posterior interpolação. Este processo não mascara alguns pontos extremos dando uma aparência menos uniforme aos gráficos. A presença de algumas regiões correspondentes a Hs abaixo de 1,5 m na região central da bacia do Atlântico Sul nos dados T/P, contrariando as informações do Atlas, são provavelmente conseqüências do processamento e escalas utilizadas neste trabalho.

Os ventos mais intensos, retratados pelo Atlas, foram encontrados ao sul da latitude -30° e para Leste a partir da longitude -45° com ventos entre 10 e 12,5 m/s. Os ventos menos intensos, a exemplo das Hs, foram encontrados ao redor da latitude 0° e longitude 0° . Outra faixa sobre o

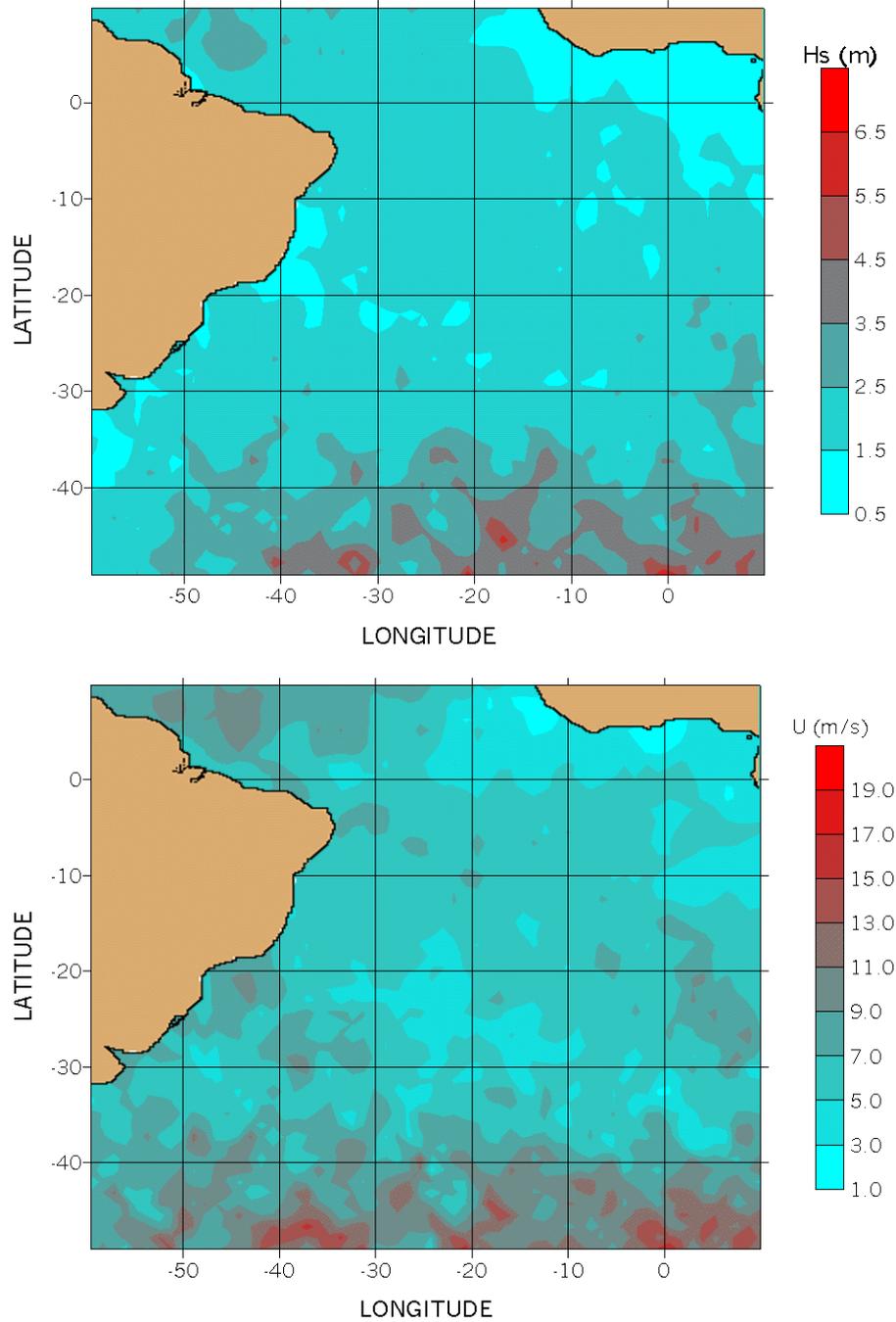
oceano, também correspondente a valores mínimos, é mostrada na região central da bacia do Atlântico Sul próxima às coordenadas 25°S e 10°O. A intensidade desses ventos ficou entre 2,5 e 5,0m/s. Comparando estes resultados aos do satélite T/P conclui-se que há coerência maior ou menor entre as informações conforme o ano a que os dados T/P se referem. A comparação entre as intensidades novamente esbarra com os problemas de escala levantados para Hs. Alguns poucos focos da grade T/P têm valores tanto maiores quanto menores aos apresentados pelo GEOSAT. Os ventos mais intensos T/P superaram os 16,0 m/s, como no verão de 1993/94, e os ventos mínimos oscilaram predominantemente entre 3,0 a 5,0 m/s na maioria dos anos.

Figura 5.23 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1992/93. (01/dez. a 28/fev.)



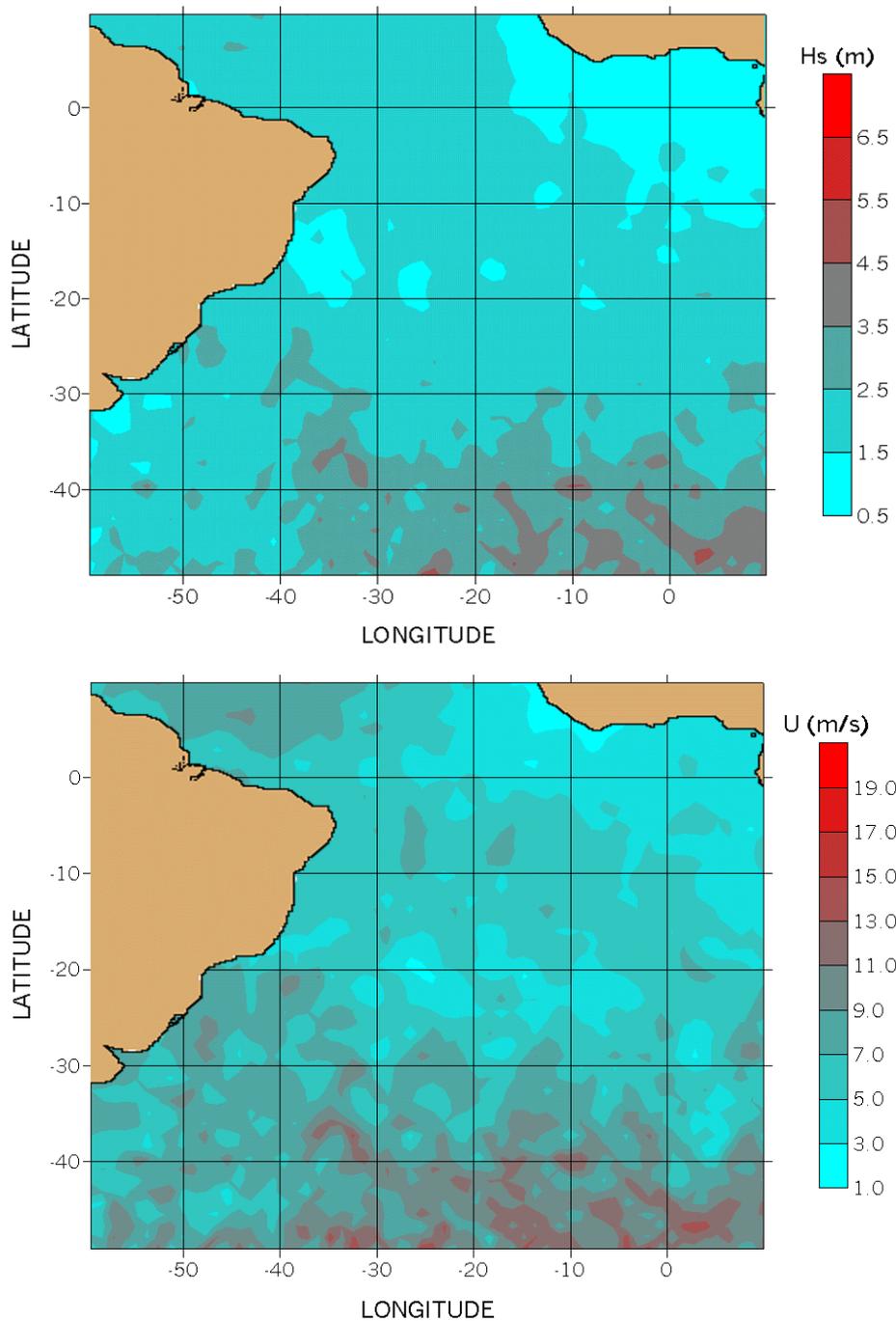
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.24 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1993/94. (03/dez. a 02/mar.)



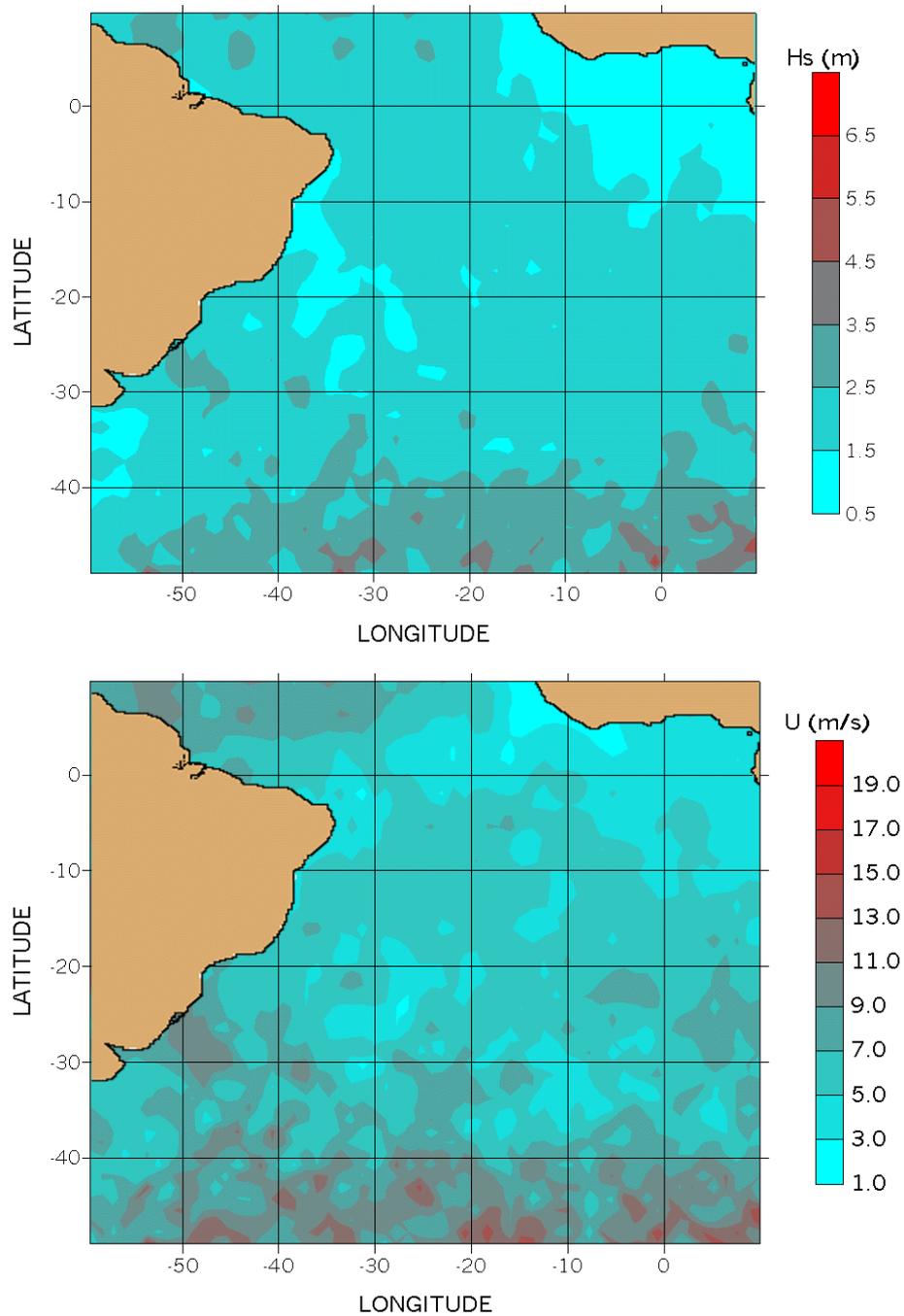
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.25 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1994/95. (05/dez. a 04/mar.)



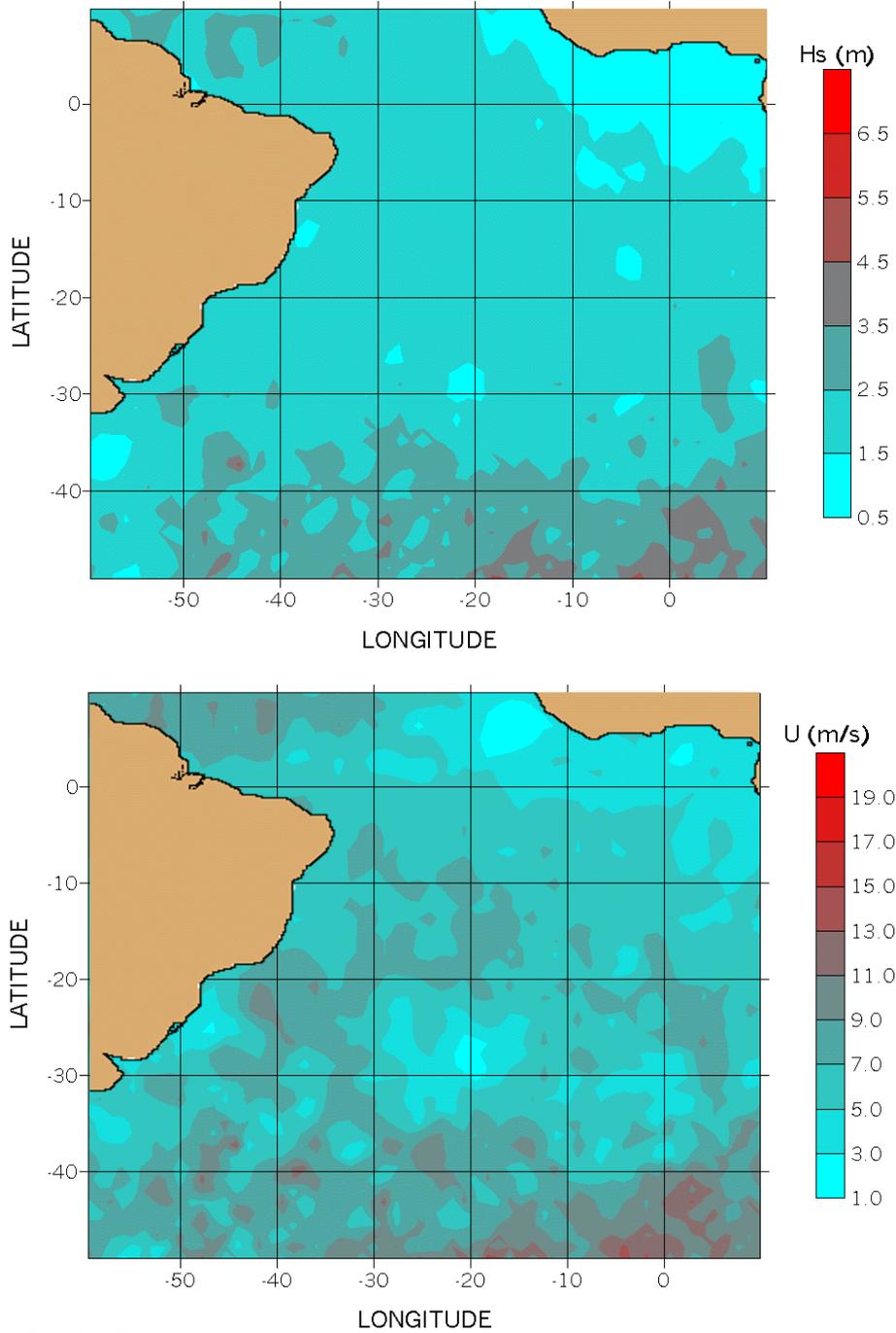
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.26 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1995/96. (17/dez. a 05/mar.)



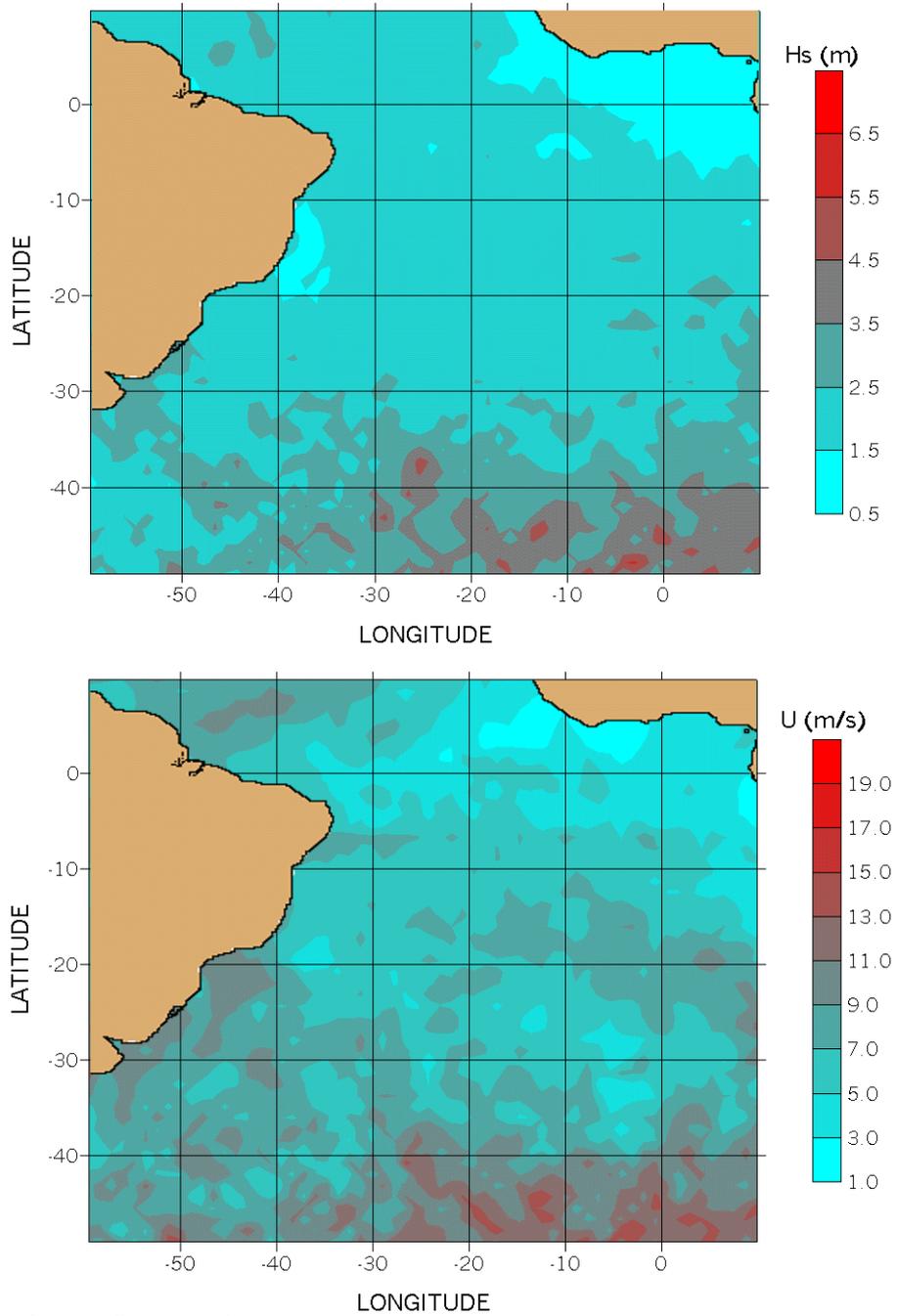
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.27 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao verão de 1996/97. (08/dez. a 07/mar.)



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.28 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em referente ao verão de 1997/98. (09/dez. a 09/mar.)



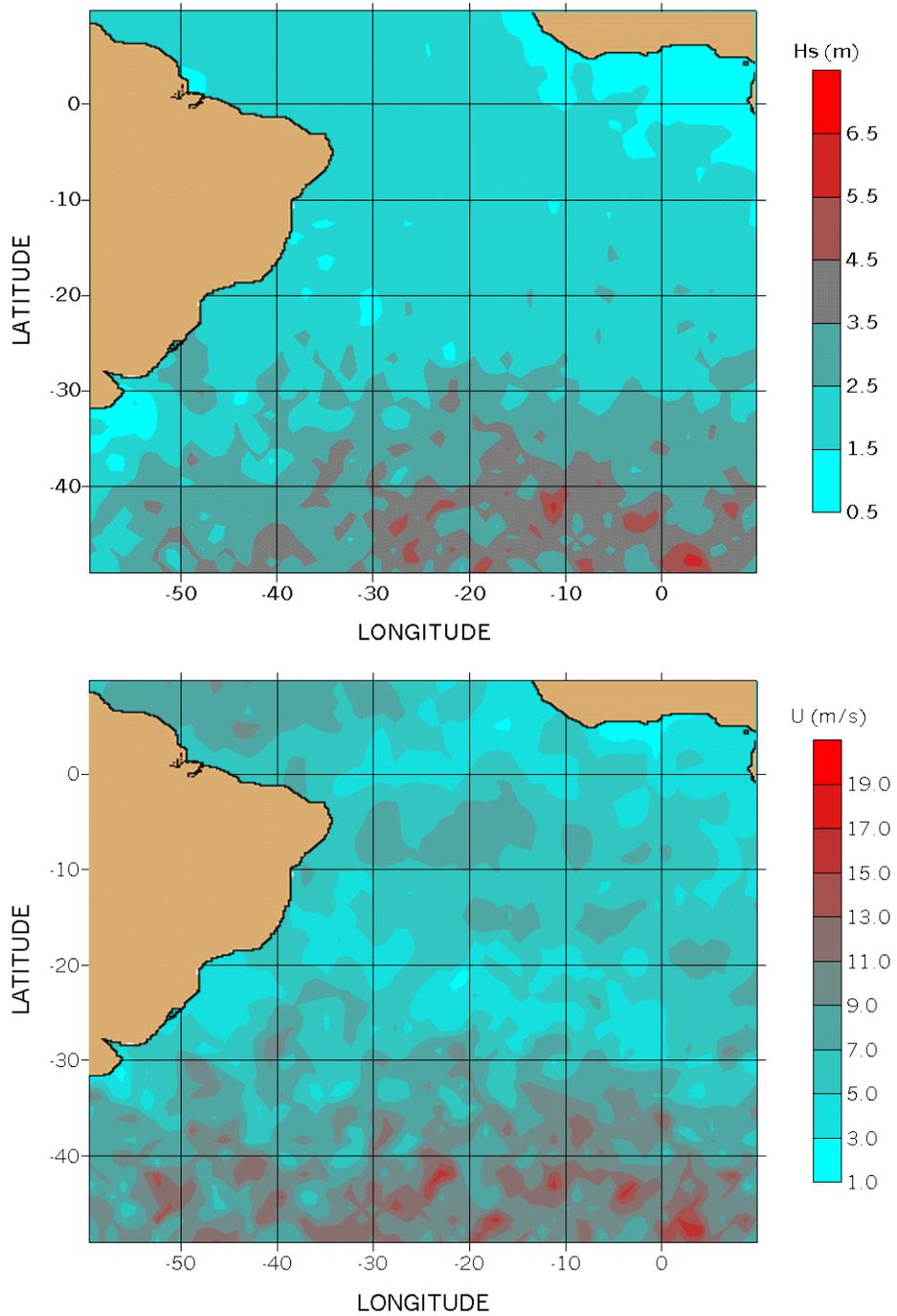
Fonte: Produção do autor.

5.2.2. OUTONO

O Atlas Oceânico, nos meses de março e maio, mostra uma abrangência maior das Hs entre 3,0 e 4,0 m. A maior porção das Hs deste porte se distribuíram na área ao sul da latitude 40°S e a leste da longitude -30°. Hs entre 0,0 e 1,0 m ficaram restritas a uma pequena área junto a costa africana, pouco acima do equador. A mesma evolução foi retratada pelos dados T/P. As Hs T/P não variaram significativamente quanto a intensidade no outono em relação ao verão, mantendo a predominância de valores entre 2,5 e 3,5 m. Os valores máximos reportados nesta estação não superaram 6,5 m. No entanto houve aumento na área associada às Hs acima de 3,5 m em todos os anos nesta estação em relação ao verão.

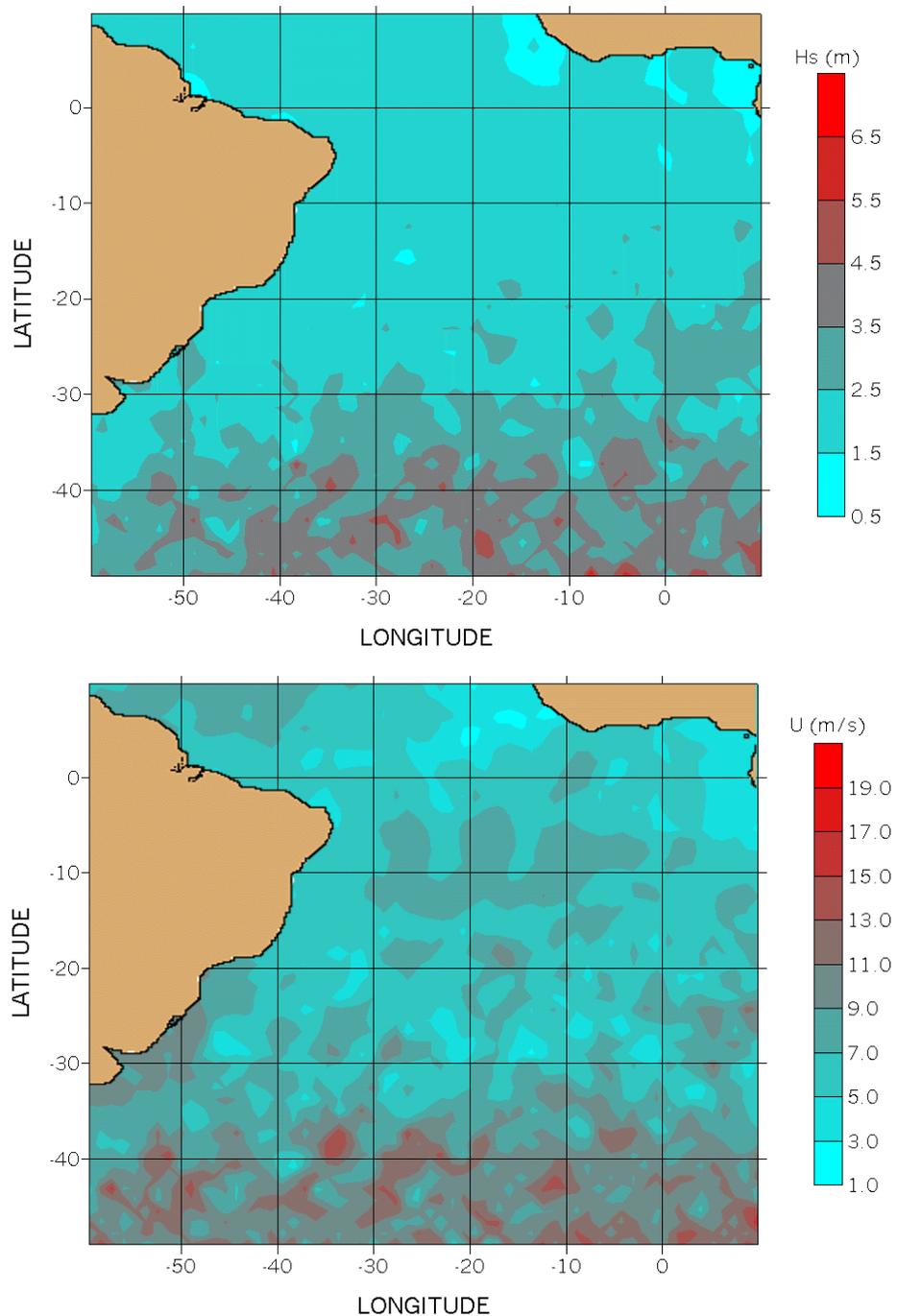
Os ventos do Atlas no mês de março, naturalmente, seguiram a mesma tendência das Hs. Na altura do equador, principalmente junto a costa africana, os ventos foram predominantemente mais fracos variando entre 2,5 e 5,0 m/s. Seguindo para latitudes mais altas os ventos se intensificaram. Ao redor da latitude -30° os ventos dominantes atingiram de 7,5 a 10,0 m/s. Ao sul da latitude -40° estão os ventos mais intensos, predominantemente entre 10,0 e 12,5 m/s. Em relação à média de janeiro os ventos mais intensos ocuparam uma área mais extensa. Segundo os dados interpolados do satélite T/P, no outono o equador foi dominado por ventos entre 1,0 a 7,0 m/s. A latitude -30° foi dominada por ventos acima de 7,0 m/s com ventos chegando a 13,0 m/s em todos os anos. Entre as latitudes -40° e -50° a intensidade dos ventos dominantes ficou acima dos 13,0 m/s atingido velocidades de até cerca de 17,0 m/s.

Figura 5.29 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1993. (28/fev. a 07/jun.)



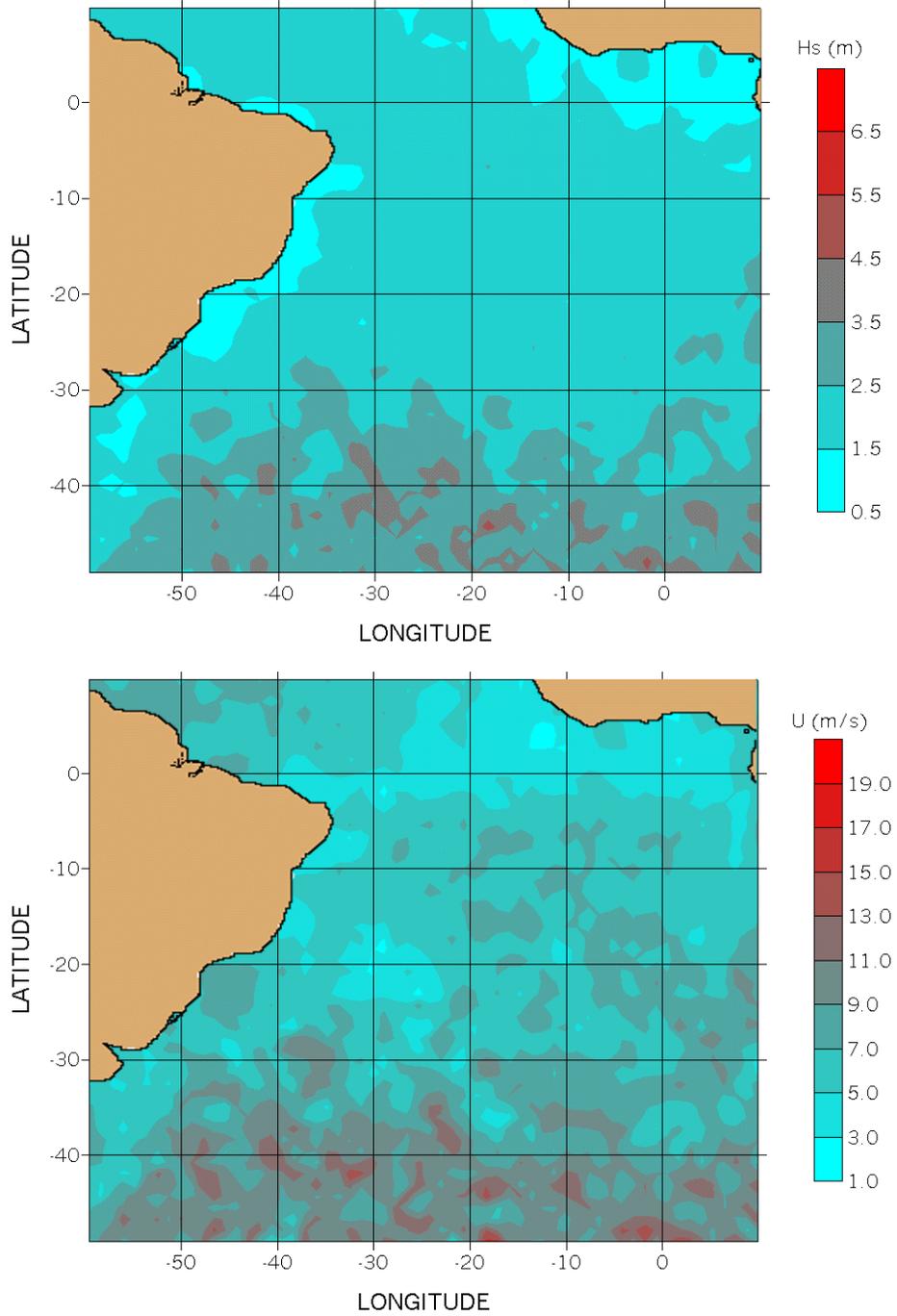
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.30 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1994. (02/mar. a 09/jun.)



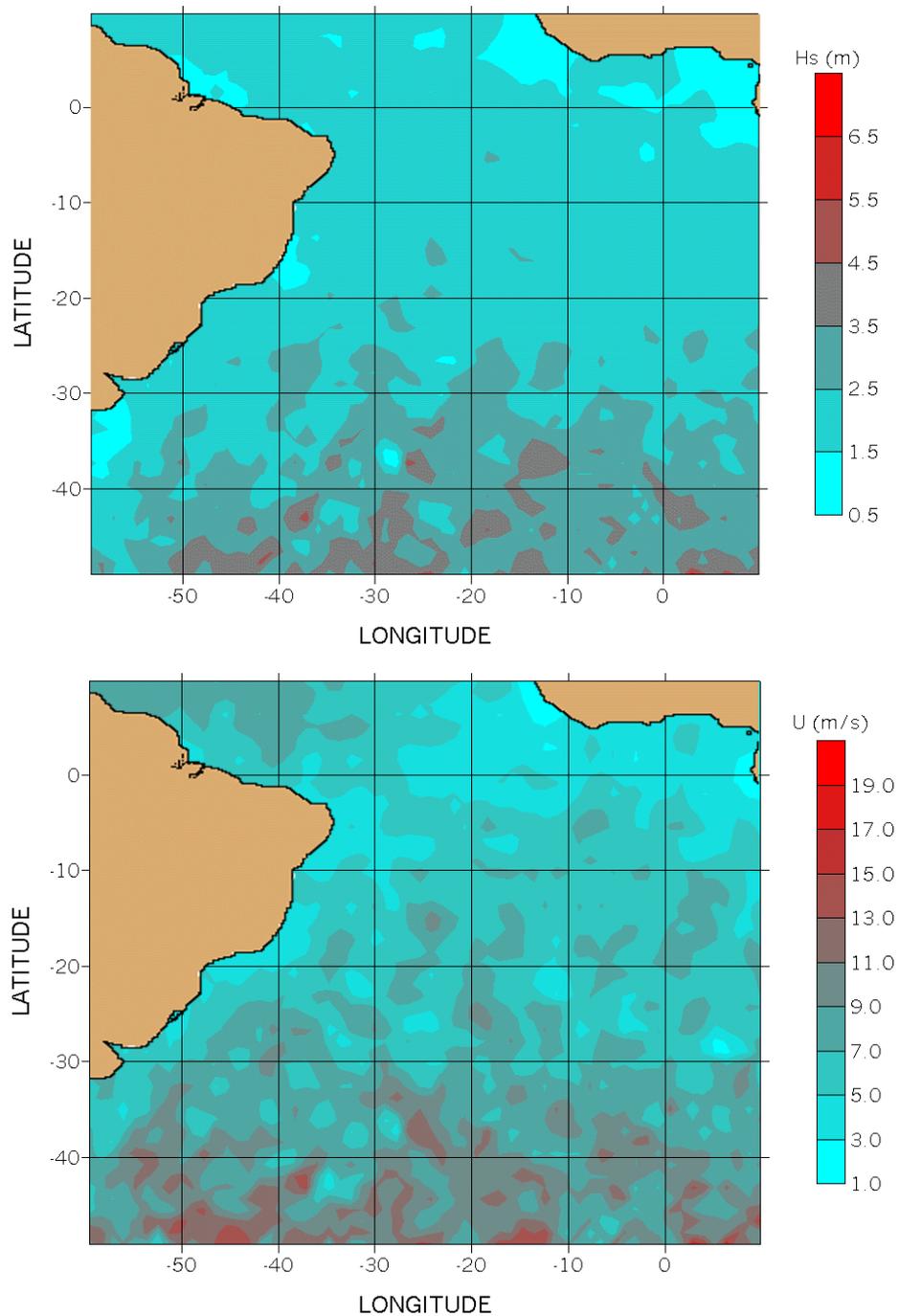
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.31 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1995. (04/mar. a 01/jun.)



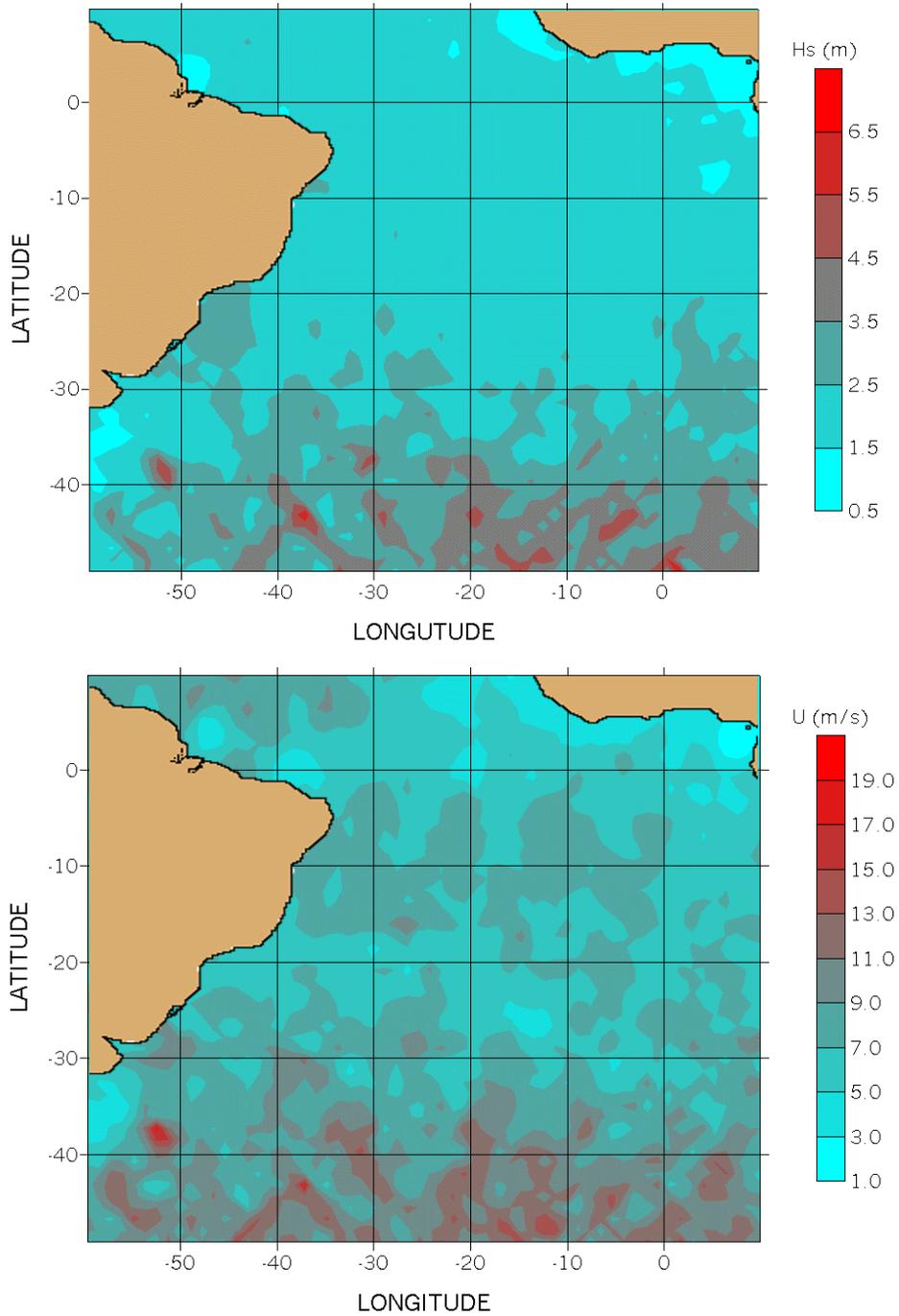
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.32 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1996. (05/mar a 02/jun.)



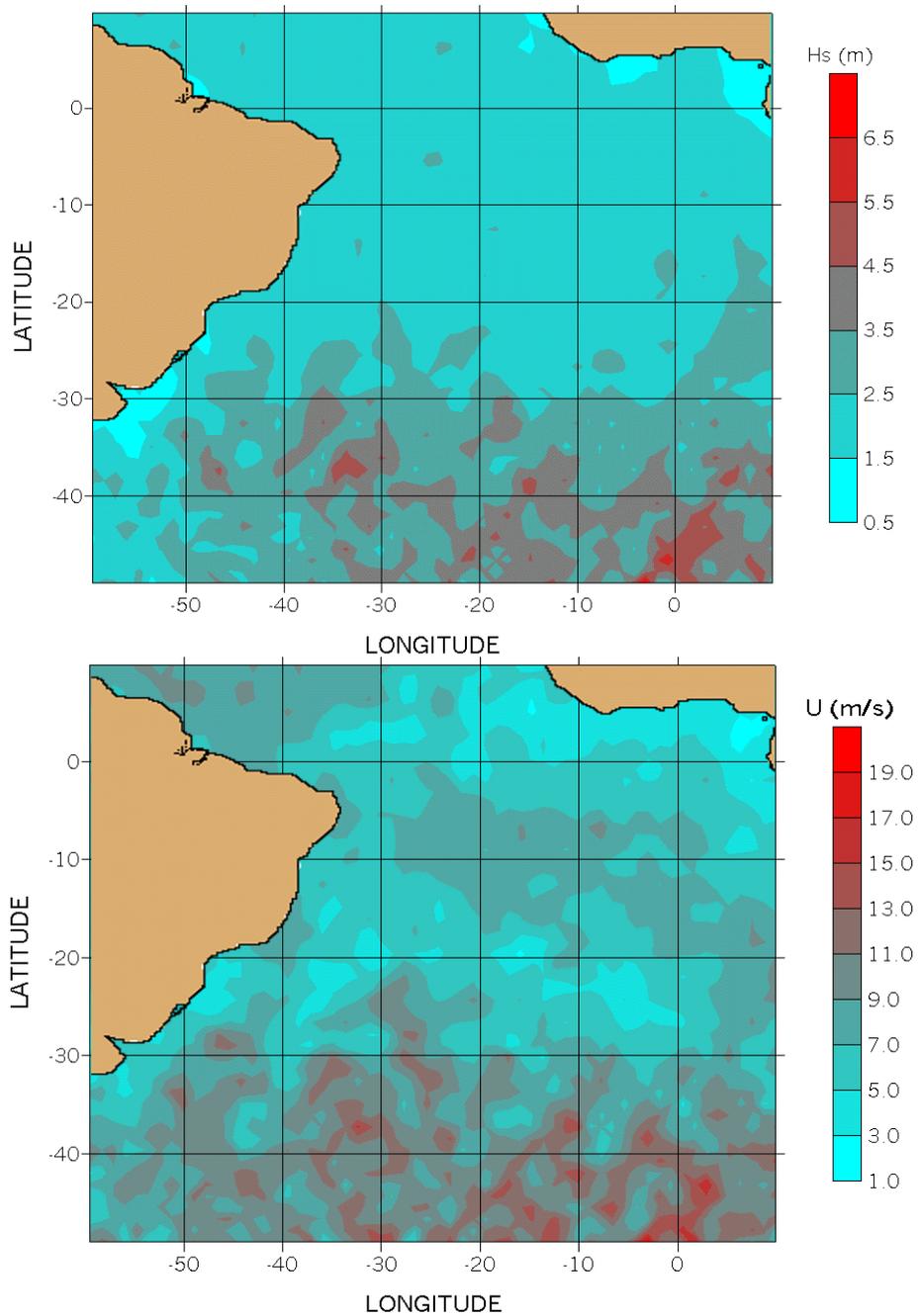
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.33 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1997. (07/mar. a 25/mai.)



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.34 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao outono de 1998. (09/mar. a 06/jun)



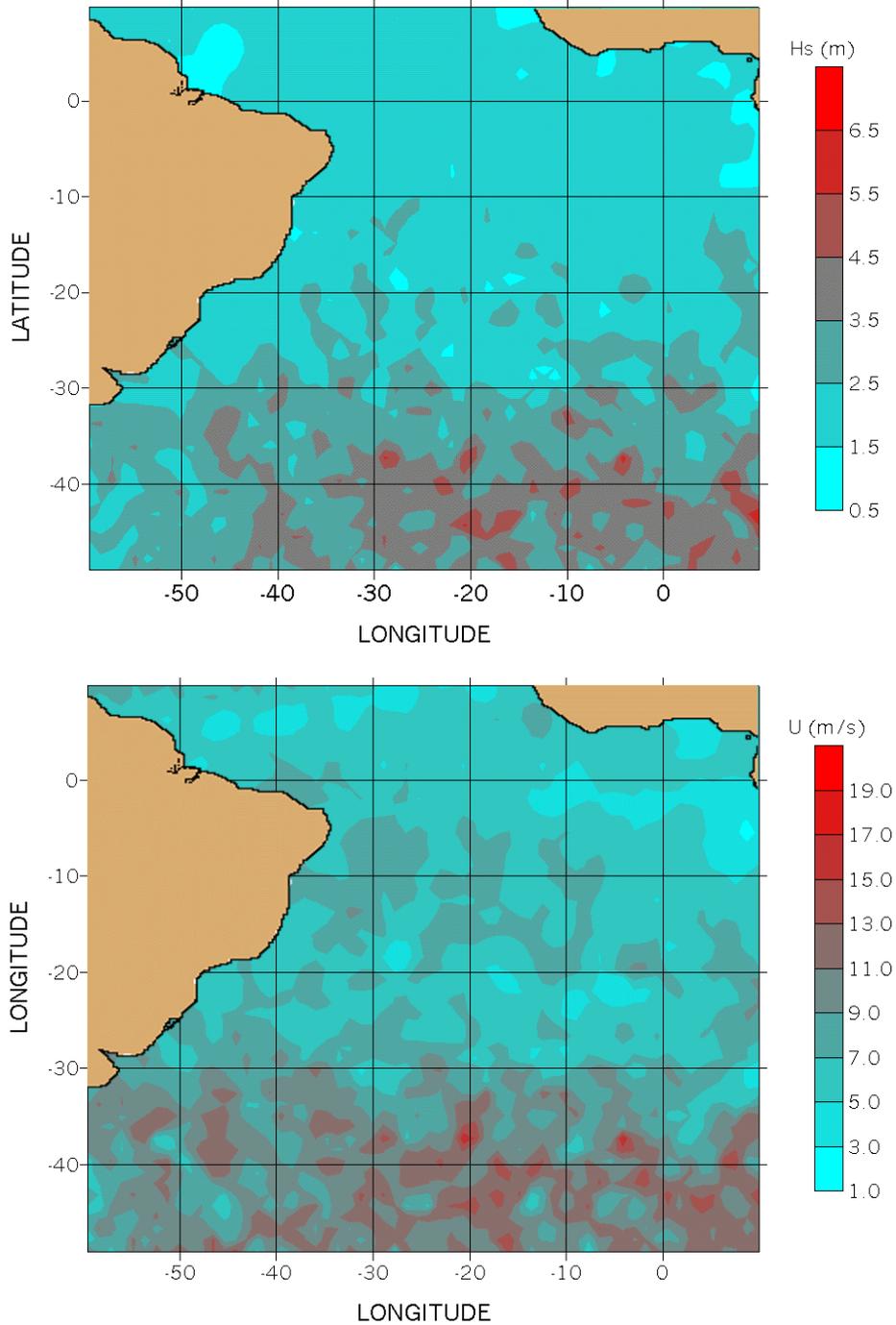
Fonte: Produção do autor.

5.2.3. INVERNO

O mês de julho foi caracterizado pelo Atlas como o período de ondas mais intensas. Acima da linha do equador, as Hs atingiram valores entre 1,0 e 2,0 m. Do equador até a latitude -30° , Hs entre 2,0 e 3,0 m foram predominantes. Ao sul da latitude -30° as Hs se dividiram entre valores de 3,0 a 4,0 m, principalmente a Oeste da longitude 0° . A Leste desta, Alturas Significativas entre 4,0 e 5,0 m dominaram a região. Os dados T/P em relação às outras estações, também registraram neste período as Hs mais intensas. Acima da linha do equador há predomínio de Hs entre 1,5 e 2,5 m. Do equador até a latitude -30° , predominaram valores de Hs acima de 1,5 m até 2,5 m. No entanto, a ocorrência de Hs acima desta faixa cresceu em relação às outras estações. Ao Sul da Latitude -30° o satélite T/P registrou ondas entre 2,5 m até 6,5 m em todos os anos.

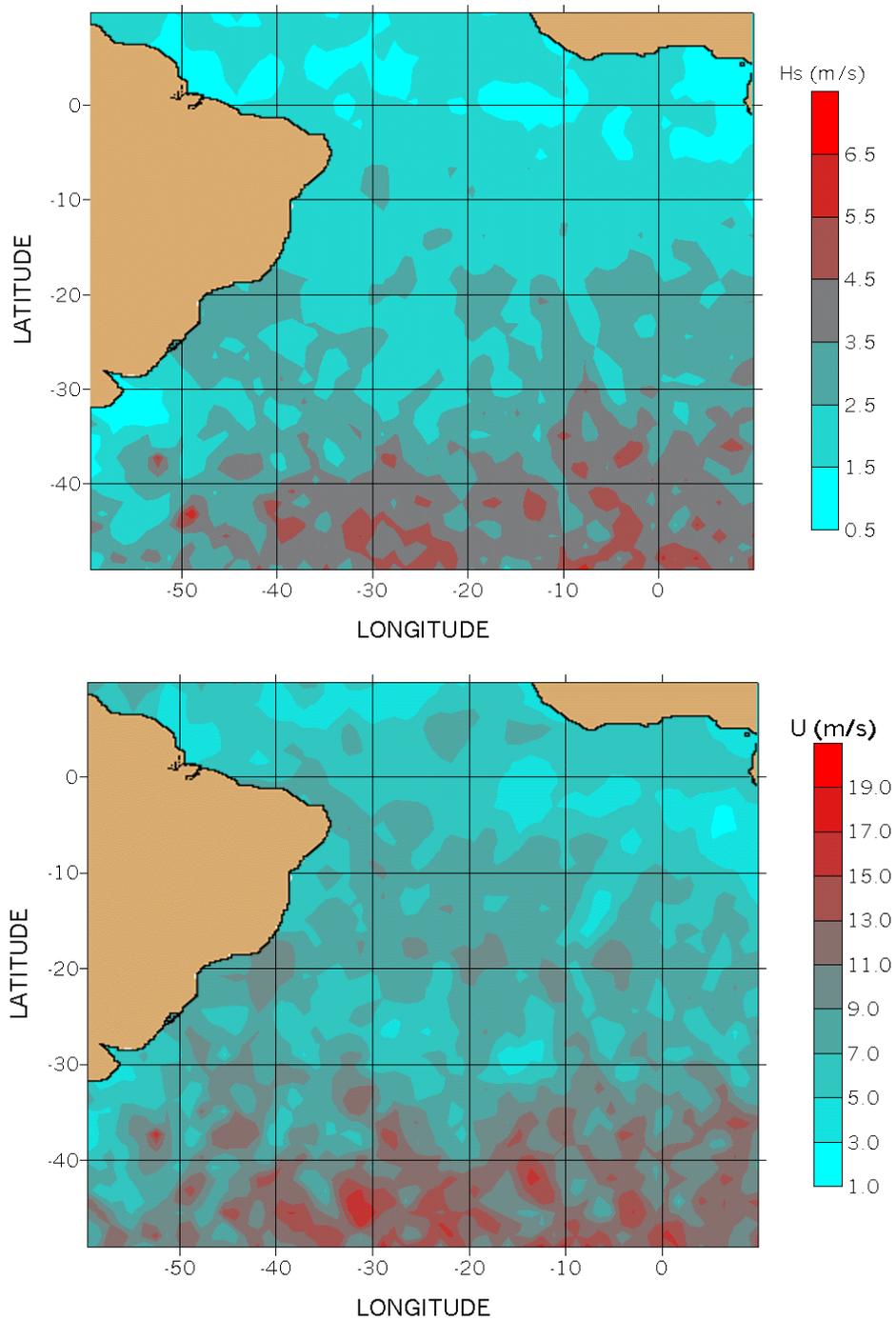
Os ventos registrados pelo Atlas se mantiveram predominantemente na faixa de 5,0 a 7,5 m/s na região acima do equador. Na altura da latitude -10° destaca-se uma faixa oceânica isolada, próxima ao litoral brasileiro, com ventos acima de 7,5 m/s com um pequeno foco de U entre 10,0 e 12,5 m/s. Ao redor da latitude -30° dominaram ventos entre 7,5 e 10,0 m/s. Logo abaixo desta ventos entre 10,0 e 15,0 m/s dominaram. O satélite T/P registrou acima do equador ventos predominantemente entre 5,0 e 7,0 m/s. Na altura da latitude -30° a intensidade dos ventos se manteve acima dos 9,0 m predominantemente. Abaixo desta latitude os ventos registrados pelo satélite T/P se mostraram ainda mais intensos chegando a superar, em alguns anos, a velocidade de 19,0 m/s.

Figura 5.35 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1993. (07/jun. a 05/set.)



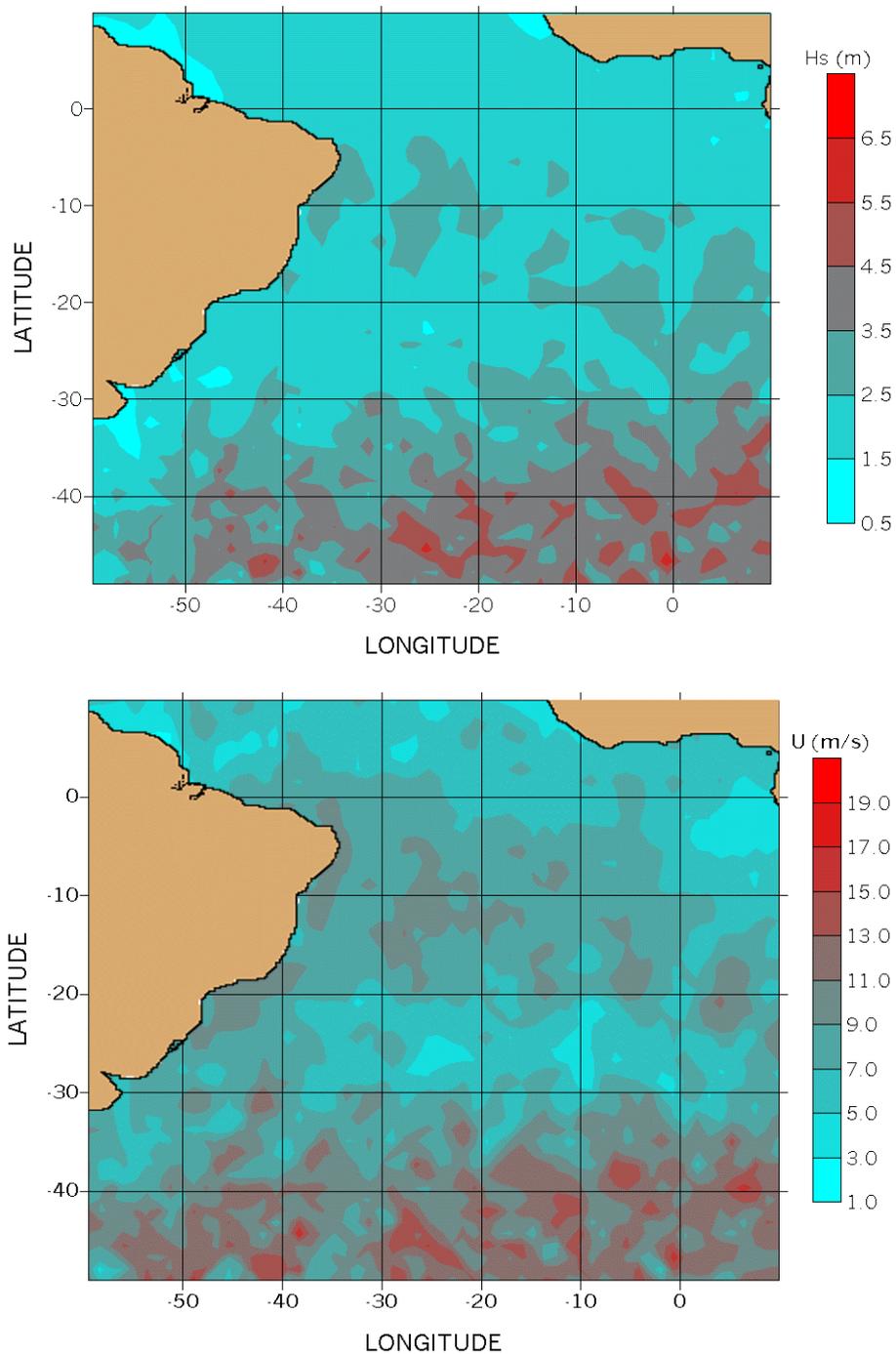
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.36 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1994. (09/jun. a 07/set.)



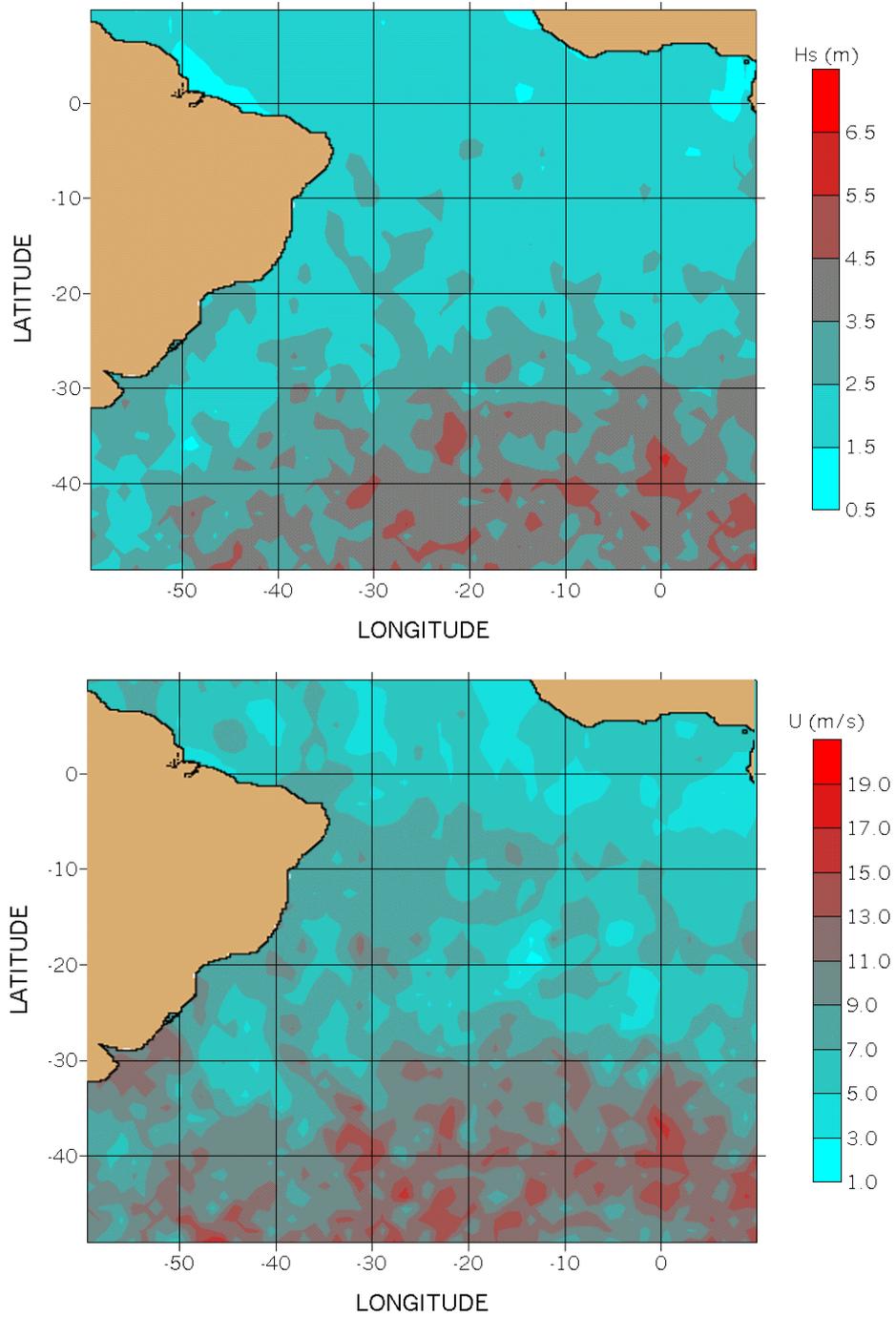
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.37 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1995. (01/jun. a 08/set)



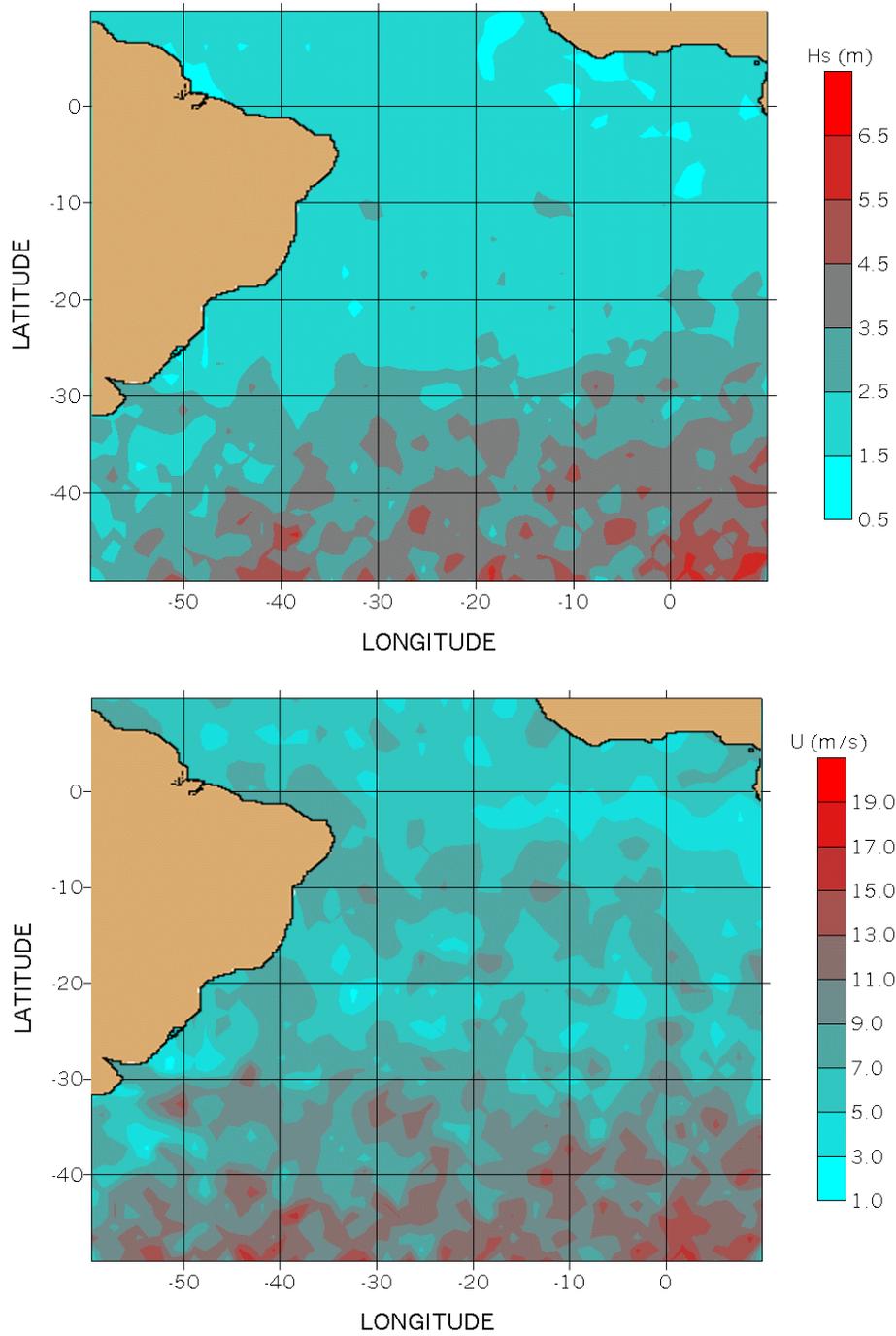
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.38 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1996. (02/jun. a 09/set.)



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.39 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente ao inverno de 1997. (04/jun. a 01/set.)



Fonte: Produção do autor.

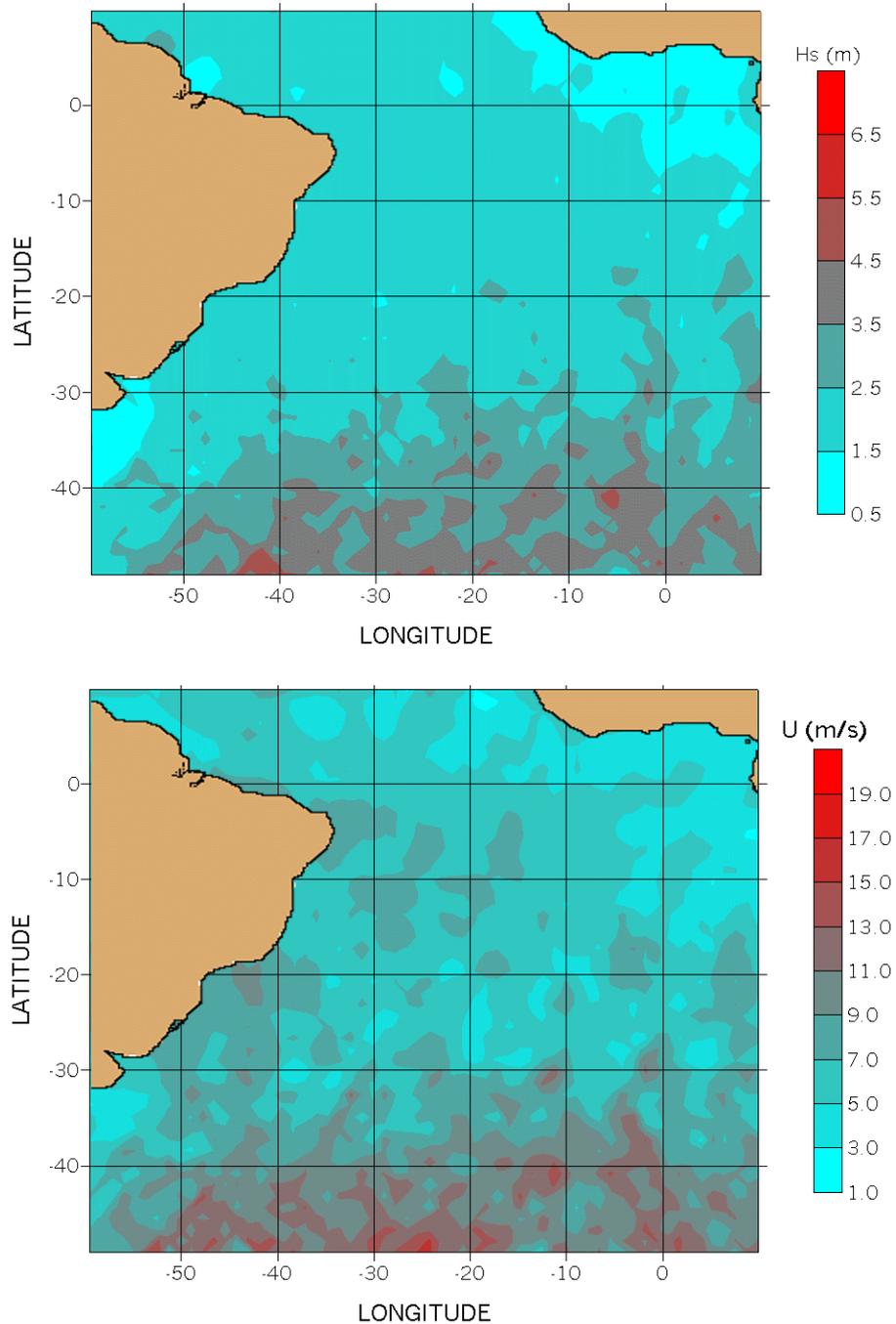
5.2.4. PRIMAVERA

A climatologia dos ventos e ondas segundo o Atlas oceânico indicam a diminuição na intensidade de Hs no mês de setembro e novembro, em relação a julho. As Hs mais elevadas ficaram entre 3,0 a 4,0 m em setembro, se mantendo neste patamar em novembro, com a diferença de que neste último mês a área de ocorrência de Hs deste porte diminuiu consideravelmente. A região de ondas mais intensas ficou restrita ao sul da latitude -30° . Uma faixa menor de Hs entre 2,0 e 3,0 m predominou entre as latitudes -30° e -20° , principalmente no mês de setembro. Ao Norte da latitude -20° predominaram Hs acima de 1,0 m e abaixo de 2,0 m. Os dados interpolados do satélite T/P indicam que as Hs mais intensas também ocorreram ao sul da latitude -30° com valores variando entre 1,5 a 5,5 m. A região entre as latitudes -30° e -20° foi dominada por Hs entre 1,5 e 2,5 m com alguns pontos apresentando valores acima destes em proporções que variaram de ano para ano. Ao norte da latitude -20° predominaram Hs de 1,0 a 2,5 m.

Os ventos mais intensos apresentados pelo Atlas, nos meses de setembro e novembro, se localizam nas altas latitudes, principalmente a partir da latitude -40° . Os ventos nesta região variaram entre 12,5 e 15,0 m/s, sendo que a área associada a estes ventos diminuiu de setembro para novembro. No entanto a maior porção desta área foi tomada por ventos entre 10,0 e 12,5 m/s. Ao redor da latitude -30° predominaram ventos na faixa de 7,5 a 10,0 m/s. Ao norte desta latitude se destacaram os ventos entre 5,0 e 7,5 m/s, sendo que em setembro foram registradas regiões isoladas com ventos acima e abaixo desta faixa. O mês de novembro também apresentou esse padrão mas com áreas com ventos acima de 7,5 m/s bem menores.

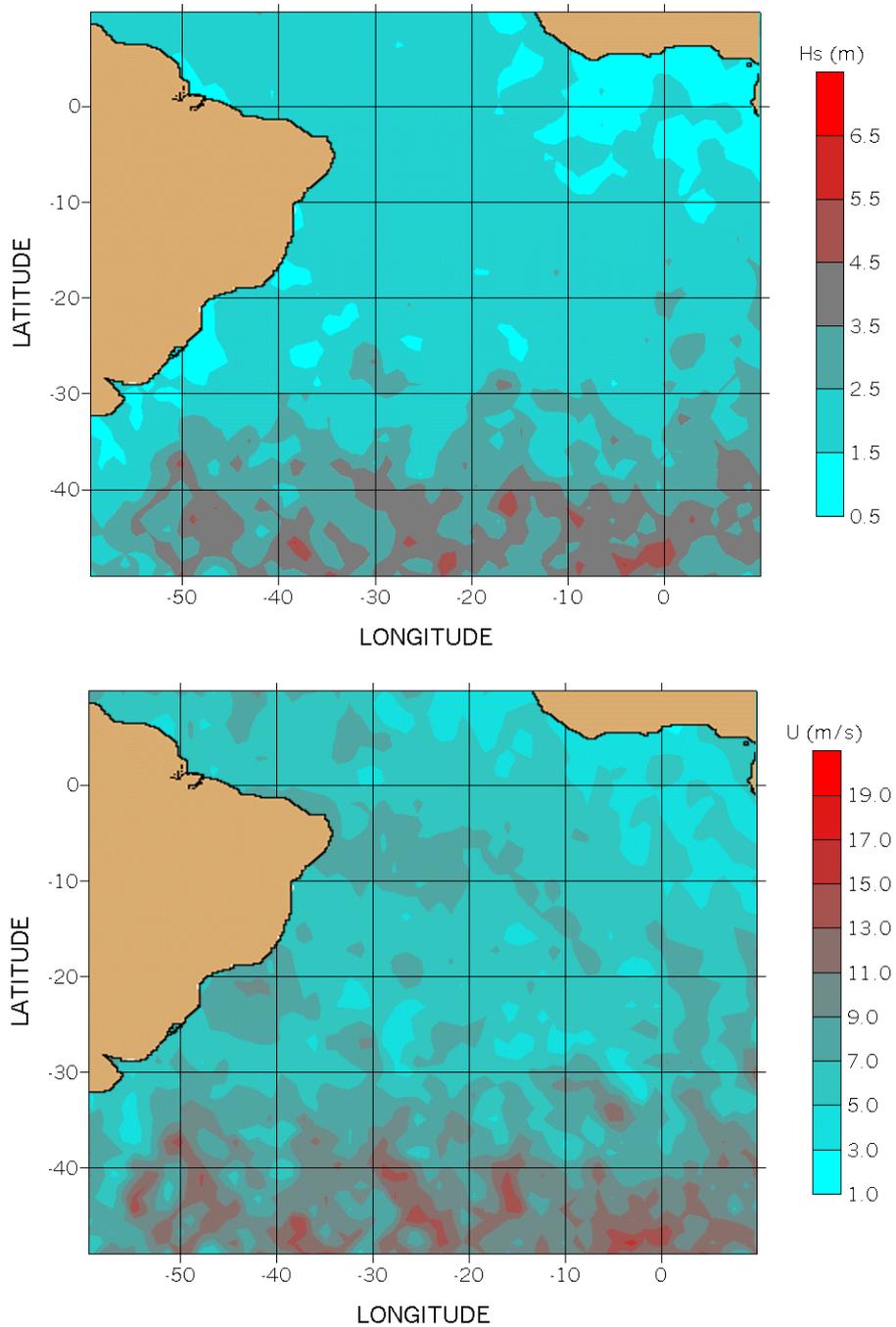
Os dados interpolados do satélite T/P registram ao sul da latitude -40° os ventos mais intensos, com valores variando predominantemente de 11,0 a 15,0 m/s. A presença de ventos desta grandeza ao norte da latitude -40° variou de ano para ano não extrapolando consideravelmente a latitude -30° . Ao norte desta latitude houve variação nos ventos dominantes entre os anos mas sem, no entanto, extrapolar o patamar de 11,0 m.

Figura 5.40 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1993. (05/set. a 03/dez.)



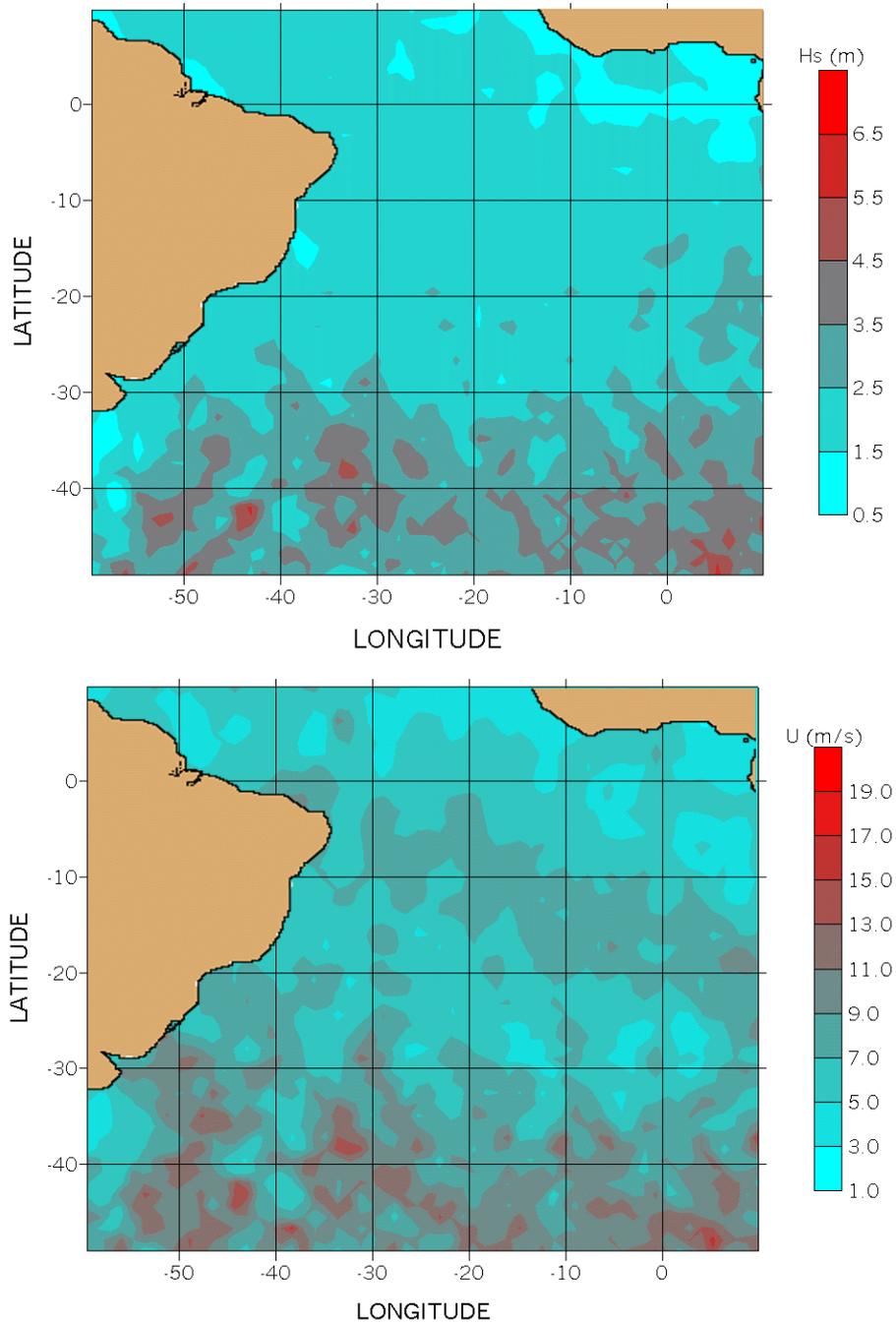
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.41 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1994. (07/set. a 05/dez.)



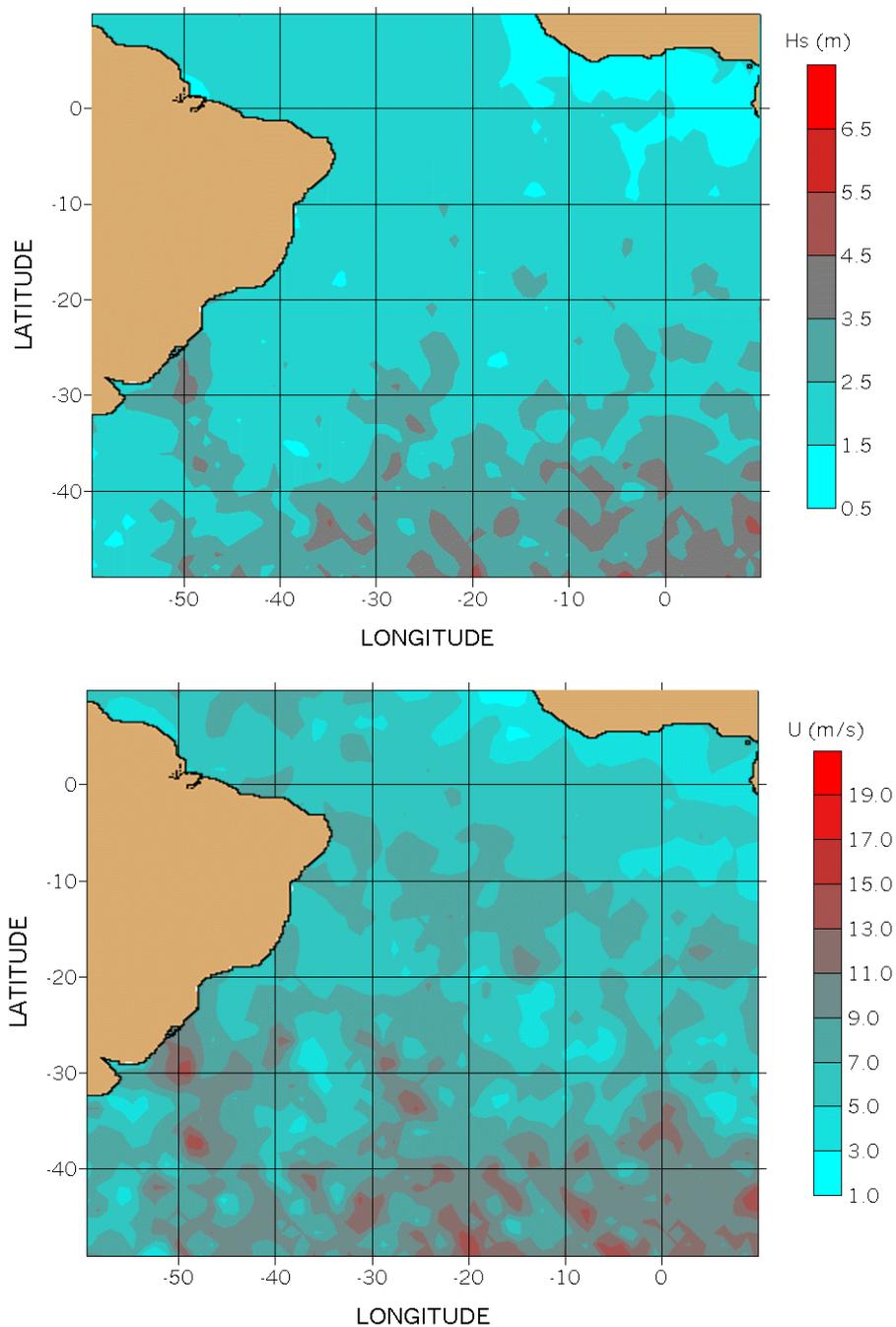
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.42 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1995. (08/set. a 07/dez.)



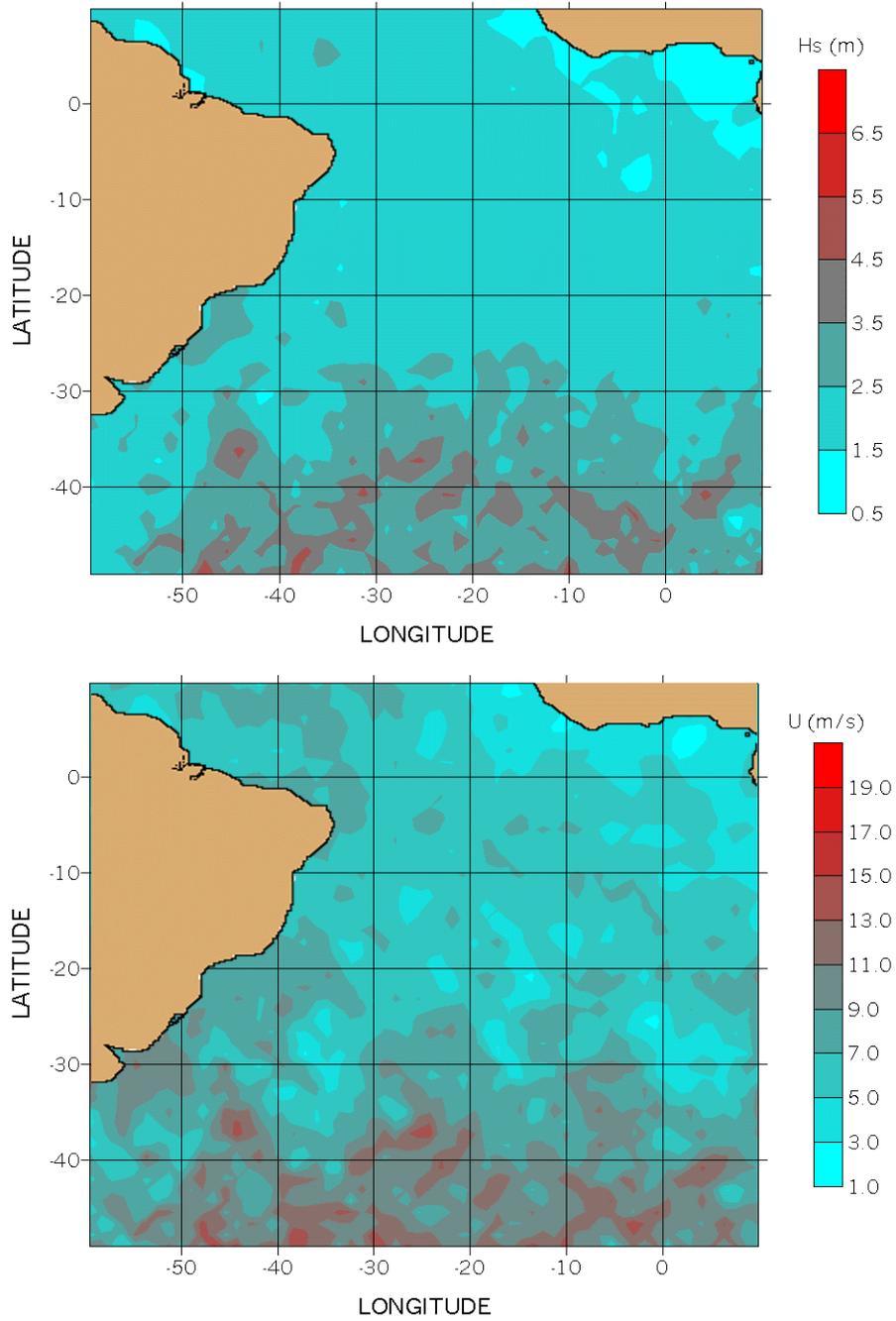
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.43 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1996. (09/set. a 28/nov.)



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.44 - Dados de Altura Significativa de Ondas (Hs) e Velocidade do Vento (U) do satélite TOPEX/Poseidon interpolados em grade referente à primavera de 1997. (01/set. a 30/nov.)



Fonte: Produção do autor.

6 CAPÍTULO 6: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos e a abordagem utilizada em sua obtenção, antes de identificar parâmetros ou propor correções que visem implementar melhorias no modelo de previsão de ondas, buscaram responder algumas questões ainda tema de pesquisas. São colocados os seguintes fatos:

- É comum encontrar, na literatura que aborda o tema, a afirmação de que os campos de vento são o principal agente responsável pelos maus resultados nos modelos de previsão de ondas.
- Nas regiões de fronteira, modelos de área limitada, tanto de ventos como de ondas, mostram sinais de desempenho menos eficaz.
- Alguns modelos apresentam melhores resultados para eventos com maior energia.

A análise deste trabalho prioritariamente buscará situar o SAWMO frente a estas questões, entendendo este, como sendo o primeiro passo no aperfeiçoamento das informações fornecidas pelo modelo, e na confirmação da utilização de satélites altimétricos como ferramentas úteis neste tipo de estudo.

Neste trabalho, os dados coletados pelo radar altímetro à bordo do satélite TOPEX/Poseidon, são considerados os que melhor representam a realidade do clima de ondas da superfície oceânica, servindo portanto como base de comparação para os dados dos modelos. No entanto, é sabido que as informações registradas por satélites altimétricos, também estão expostas a uma série de erros, apontados no capítulo 3. Assim, para que haja maior lucidez na interpretação dos resultados, inicialmente, será feita uma retrospectiva de alguns trabalhos resultantes da comparação de leituras altimétricas T/P (Altura Significativa de ondas e ventos) com outros modelos de ondas e bóias.

Em seguida serão apresentados os resultados da comparação entre o satélite T/P e o modelo SAWMO. Inicialmente são apresentados parâmetros estatísticos que, de forma global, esboçam os resultados que serão comparados. A abordagem se dará levantando aspectos gerais, visando levar ao leitor informações sobre a característica das órbitas, que

possivelmente, influenciam nos resultados. No final da apresentação dos resultados, é feita uma análise mais detalhada de como se comportaram os resultados do modelo e dados do satélite, buscando identificar maiores ou menores erros conforme a localização geográfica, faixa de Hs e velocidade dos ventos.

6.1. RESULTADOS TOPEX/Poseidon

Cotton e Carter (1994) apresentam uma proposta de intercalibração entre Alturas Significativas de Ondas medidas por satélites. Entre os resultados é mostrado o desempenho dos satélites T/P, ERS-1 e Geosat em relação a bóias localizadas nos oceanos Atlântico e Pacífico norte. As Alturas Significativas T/P, adquiridas no período de outubro de 1992 a setembro de 1993, são levemente maiores do que os resultados das bóias. Analisando os valores médios mensais, comparado a uma das bóias localizada no Golfo do México, a leitura T/P também mostrou valores mais elevados. Esta mesma análise, feita para outra bóia localizada no Pacífico mais distante da costa, mostra alguns valores médios T/P pouco menores.

Staabs e Bauer (1998) comparam Alturas Significativas de Ondas (Hs) registradas pelos satélites ERS-1 e T/P e o modelo de ondas WAM de terceira geração. A comparação apresentada entre Hs TOPEX e Hs WAM, mostra que os valores registrados pelo altímetro são menores para Hs acima de 2,7 m, e maiores para valores abaixo deste.

Young (1999) compara Hs e ventos dos satélites GEOSAT, TOPEX e ERS-1. Ao confrontar Hs TOPEX com bóias distribuídas nos oceanos Atlântico e Pacífico, localizadas na altura dos Estados Unidos e Canadá, o autor encontra a seguinte relação linear:

$$Hs(\text{bóia}) = 1.067 (\text{TOPEX}) - 0.079$$

Mesmo revelando uma concordância muito boa, nestes resultados existe uma pequena subestima dos dados TOPEX em relação às bóias. Neste mesmo trabalho o autor destaca a concordância entre regressão linear que apresenta e a encontrada por Cotton e Carter (1994). Ao confrontar

medias mensais dos ventos registradas pelas bóias e pelo TOPEX, Young (1999) apresenta a seguinte regressão linear entre os dados:

$$U(\text{bóia}) = 0.943U + 1.847$$

Usando as palavras do autor: “Os valores TOPEX são claramente menores do que os dados de bóia...”. Ressalta-se que estes ventos foram tomados a uma altura de 10,0 m acima da superfície oceânica.

6.2. RESULTADOS SATÉLITE x MODELO

6.2.1. CASO 27 DE MAIO DE 1997

6.2.1.1. ANÁLISE GERAL

Através da tabela 6.1 pode-se avaliar, de forma genérica, o desempenho do SAWMO em relação ao satélite T/P.

Tabela 6.1 - Parâmetros estatísticos que comparam as alturas significativas de ondas do modelo SAWMO com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 27/mai/1997.

	N de Pontos	Mínimo (m)		Máximo (m)		Média		EM (m)	RMSE (m)	I.E. (%)	σ^2 (m ²)	r
		SAT.	MOD.	SAT.	MOD.	SAT.	MOD.					
27/mai/1997 órbita 1	116	0.60	0.05	2.20	0.63	1.54	0.31	-1.233	1.277	82.65	0.110	0.909
27/mai/1997 órbita 2	752	1.70	0.25	3.30	1.73	2.59	0.87	-1.719	1.735	66.95	0.055	0.744
27/mai/1997 órbita 3	385	1.90	0.43	4.20	2.54	2.68	1.52	-2.661	2.119	40.16	-2.589	-0.068
27/mai/1997 órbita 4	390	2.20	0.53	5.40	3.56	3.61	2.38	-2.692	2.081	33.90	-2.917	0.718
27/mai/1997 órbita 5	480	1.70	0.48	3.20	0.97	2.39	0.71	-2.593	2.111	53.27	-2.267	-0.119

Fonte: Produção do autor.

Estes primeiros resultados mostram que em todos os casos Hs do satélite são maiores do que as fornecidas pelo modelo. Cada órbita tem a sua particularidade. Número de pontos, localização geográfica, cobertura de regiões onde os eventos são mais, ou menos intensos. Todas estas características influenciam nos resultados, o que dificulta identificar padrões, baseando-se somente nestes índices estatísticos. Por exemplo, levando em conta somente os valores médios, verifica-se maior proximidade nos resultados do satélite e modelo nas órbitas 3 e 4. Por outro lado, os erros médios calculados para estas órbitas são os maiores e o índice de correlação cruzada (r), para a órbita 3 está entre os menores. Outro fato resultante da peculiaridade das órbitas é notado na órbita 1. Esta apresenta a melhor correlação cruzada (0,9), no entanto o

índice de dispersão (I.E.) é alto (82,65%), indicando que os resultados estão esparsos em relação aos pontos ideais. Associado a isto está o fato de que o número de pontos da órbita 1 é o menor. Deve se considerar, que o tamanho da amostragem, em qualquer análise estatística deste tipo é relevante.

Na tabela 6.2 os mesmos parâmetros, mostrados na tabela 6.1, foram apresentados, comparando os dados de vento utilizados pelo modelo e satélite T/P.

Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos que comparam a velocidade dos ventos do modelo LAM com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 27/mai/1997.

	N de Pontos	Mínimo (m/s)		Máximo (m/s)		Média		EM (m/s)	RMSE (m/s)	I.E.	σ^2 (m/s) ²	r
		SAT.	MOD.	SAT.	MOD.	SAT.	MOD.					
27/mai/1997 órbita 1	116	3.20	2.83	9.10	6.31	5.61	4.45	-1.166	1.435	25.56	0.70	0.926
27/mai/1997 órbita 2	752	2.70	2.71	13.20	10.56	7.44	6.55	-0.896	2.062	27.71	3.45	0.403
27/mai/1997 órbita 3	385	0.60	3.11	12.90	11.60	6.92	7.97	0.656	2.768	19.10	7.34	0.890
27/mai/1997 órbita 4	390	7.00	5.38	13.80	13.04	9.71	7.95	-2.144	3.029	17.62	4.58	0.769
27/mai/1997 órbita 5	480	0.70	1.59	9.50	7.75	5.30	5.74	-0.216	4.151	40.50	17.18	-0.560

Fonte: Produção do autor.

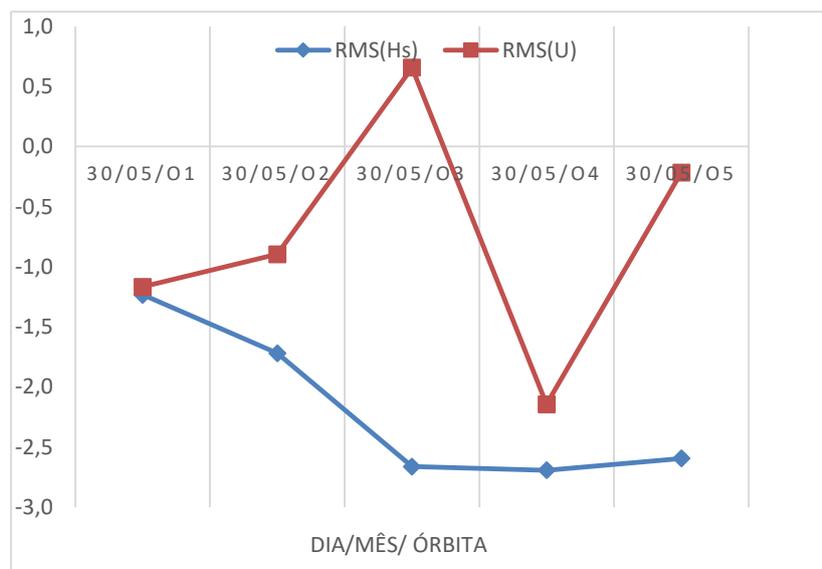
A mesma dificuldade de análise, encontrada com os dados de Hs, devido à particularidade das órbitas, também encontra-se com os ventos. Mesmo assim uma análise comparativa, entre ventos e ondas, baseando-se somente nos resultados apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2, mostra que houve melhor concordância entre os ventos. No entanto nos resultados do modelos de previsão de ondas, acabam se somando aos seus erros inerentes os erros de determinação dos campos de ventos. Desta forma, é natural que os erros nos campos de ondas sejam maiores. Caso os erros do modelo de ondas se mantenham constantes em todas as situações em que foi submetido é esperado que se estabeleça uma relação de proporcionalidade com os erros dos campos de vento. Estudos observacionais relacionando Altura Significativa de Ondas e intensidade de vento para espectros totalmente desenvolvidos mostram uma relação do tipo :

$$\text{Erro}(H_s) \propto (\text{Erro}(U_{10}))^2$$

Portanto um pequeno erro nos ventos implica em um erro muito maior na altura das ondas modeladas (Komen et al, 1994).

Com o objetivo de acompanhar de forma mais clara como se comportam os erros calculados para as Hs em relação aos calculados para as U, foram construídos gráficos que mostram, o comportamento dos parâmetros estatísticos calculados nas diferentes órbitas, para o vento e Hs.

Figura 6.1 - Erro Médio (EM) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 27/mai/1997



Fonte: Produção do autor.

O Erro Médio (EM) mostra, na média, a diferença entre modelo e valor observado. Da forma como os cálculos foram feitos, valores negativos significam que as informações observadas são maiores do que as descritas pelo modelo, e com valores concordantes quanto mais se aproximam de zero. Notoriamente, com exceção do vento registrado no caso 3, o EM mostra que de forma geral, tanto os ventos como as Hs lidas pelo satélite são maiores. Deve ser lembrado que o EM apresentado aqui não é relativo. Portanto um erro médio de 1m nas Hs, não tem o mesmo significado de um erro médio de 1m/s para os ventos.

A órbita 1, para ventos e Hs, apresentam valores de EM em torno de 1,2. Comparado às demais órbitas este representa o resultado de Hs mais de acordo com maior concordância entre modelo e satélite. Segundo Innocentini em comunicação pessoal, os modelo de área limitada, tanto de ventos como de ondas, são propícios a maiores erros em regiões de fronteira, no entanto, mesmo sendo este o caso da órbita 1, a sua

localização numa região mais protegida em relação aos eventos geradores de ondas mais intensas no Atlântico Sul, faz com que as ondulações sejam mais uniformes, diminuindo assim as diferenças entre a descrição do modelo e a leitura do satélite e conseqüentemente o EM. Exceções ocorrem por influência das tempestades tropicais, fora do domínio dos modelos de ondas e ventos. Não sendo este o caso, provavelmente a baixa variação dos campos de onda influenciou no cálculo do EM desta órbita e conseqüentemente neste inesperado resultado. O EM calculado para os ventos referentes a órbita 1 está mais coerente com o esperado sendo o segundo mais discordante entre as cinco órbitas. Tanto a influência da dinâmica da área quanto o desempenho do modelo de ondas em regiões de fronteira é objeto de investigação mais detalhada ainda neste capítulo.

A órbita 2 tem a característica de cobrir uma extensa área da região de estudo. Seus dois extremos estão em regiões de fronteira, e portanto, são submetidos aos problemas já abordados. O posicionamento desta órbita faz com que sua porção mais ao sul coincida com eventos mais intensos, por outro lado, sua parte em torno do equador, cobre eventos, normalmente menos intensos. Este fator, conforme a configuração dos campos de ventos e ondas no Atlântico Sul, pode resultar em erros maiores. Em relação às órbitas 3,4 e 5 este não é o caso da órbita 2. O EM desta órbita se mostra o segundo mais próximo de zero, para H_s e o terceiro mais próximo de zero para os ventos.

É importante ressaltar que modelos podem não localizar precisamente as coordenadas de um determinado evento ou, por seguirem uma descrição matemática, representarem os campos de ventos e ondas com gradientes altos em relação à realidade observada.

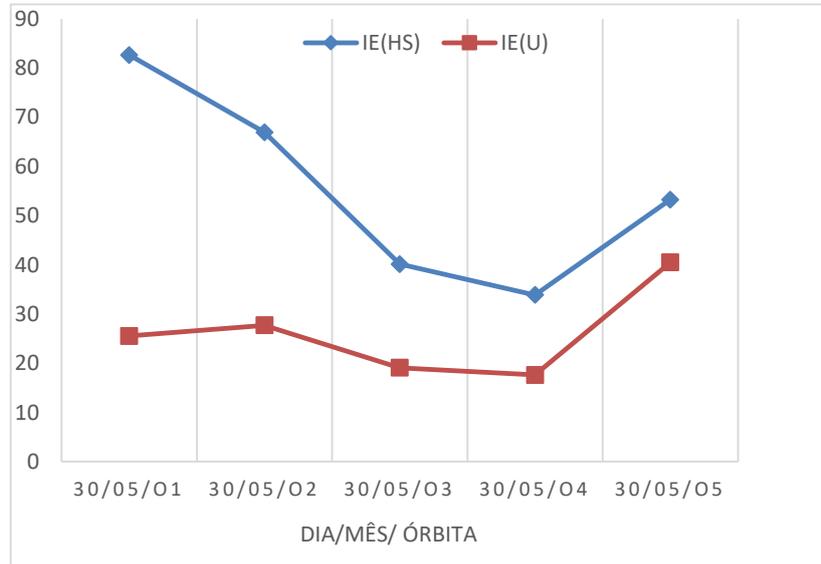
A órbita 3 cobre a região onde a maioria dos grandes eventos climatológicos de ondas e ventos acontecem. Alguns podem até alcançar a região costeira. Uma das extremidades desta órbita toca o continente enquanto a outra termina nos limites do modelo. A órbita 4 é ascendente e cobre latitudes semelhantes às da órbita 3, diferindo de inclinação por ser esta última descendente. Suas extremidades estão limitadas pelas

regiões de fronteira do modelo. A região de cobertura da órbita 4 é assolada, a exemplo da órbita 3, pelos eventos mais intensos na região estudada. No entanto a órbita 3 como a 4, coincidirão com o núcleo de eventos em seus estágios mais evoluídos conforme o acaso permita. Ressalta-se aqui que a maior porção de órbita analisada neste trabalho, a órbita 5, não necessita mais do que vinte minutos para ser completada pelo satélite T/P. O EM calculado para estas duas órbitas têm diferenças marcantes, quanto aos ventos, e resultados similares quanto Hs. A aparente razão deste resultado é que houve uma intensificação dos ventos entre o tempo de leitura do satélite na órbita 3, em torno das 14:00hs, e órbita 4, cerca de 22:00hs. O modelo registrou essa variação, no entanto, especificamente na localização das órbitas 3 e 4 tal aumento não foi confirmado. A média calculada para estes dois casos reflete bem este fato. A falha na determinação da localização dos eventos pelo modelo, já levantada, pode ter se manifestado neste caso. A curva das ondas registradas pelo modelo e satélite nesta órbita apresentaram formas semelhantes mas significativas diferenças de intensidade.

A órbita 5 é a que cobre a maior faixa da área de estudo. É uma órbita ascendente que acompanha quase que paralelamente a costa leste da América do Sul. Seus extremos são limitados pelas regiões de fronteira do modelo. O EM calculado para esta órbita foi o mais próximo de zero, para os ventos, e um dos mais discordantes para Hs. No horário da passagem do satélite, no romper do dia 27 para o dia 28, Hs registradas pelo modelo não chegaram a 1,0 m, caracterizando a região como tendo baixa energia. Quando registradas pelo satélite Hs chegaram a 3,2 m, mas se mantiveram, na grande maioria, em torno de 2,0 m. A baixa energia simulada pelo modelo, neste caso, pode ser o principal motivo do alto EM registrado para Hs. Deve ser lembrado que o processo de filtragem dos dados T/P eliminou apenas as informações apontadas pelos índices da AVISO. Alguns trabalhos utilizam uma filtragem mais refinada, eliminando dados que excedam um determinado desvio padrão calculado a partir de uma distribuição estatística como a Gaussiana. O processo de filtragem certamente influencia nos valores estatísticos apresentados, no

entanto, em primeira instância, a abordagem deste trabalho não presume tal refinamento.

Figura 6.2 - Índice de dispersão (IE) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 27/mai/1997

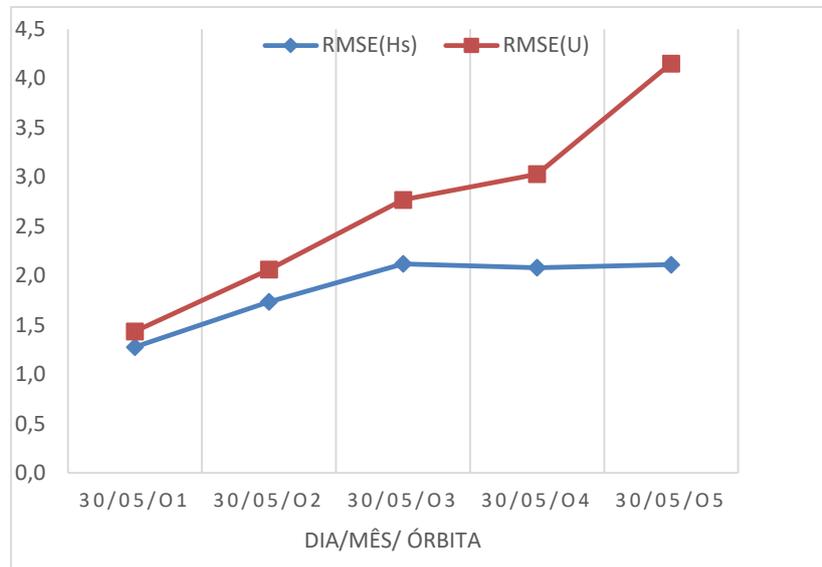


Fonte: Produção do autor.

O índice de dispersão calculado para os ventos e Hs, nas órbitas 3, 4 e 5, mostram perfis semelhantes, ou seja, um alto IE nos ventos acarreta em um alto IE de Hs, acontecendo o mesmo com os outros valores mais baixos. As órbitas 2, e principalmente a 1, fogem a essa regra. Influenciam no cálculo do índice de dispersão o RMSE e a diferença entre os valores observados e valores médios. Na figura 6.3, que mostra o comportamento do RMSE, nota-se, que para órbitas 1 e 2, há uma boa concordância entre os ventos e Hs. Portanto, identifica-se como o principal responsável pelo desencontro no IE dessas órbitas, a diferença entre os valores observados e valores médios. Nestes dois casos existe uma grande amplitude de variação dos dados de vento. Os campos de ondas do satélite acompanham esta amplitude, no entanto, o modelo não o faz da mesma forma, ocasionando as visíveis diferenças entre os resultados de ventos e ondas. É comum, em modelos de previsão, subestimar a altura das ondas em regiões onde os eventos estão fora do foco gerador de ondas. A órbita 1 e 2 se enquadram neste caso, levando-se em conta o horário da leitura do satélite, em torno de 01:00h, para

órbita 1 e 12:00hs para a outra. Associado a estes acontecimentos está a contribuição do pequeno número de pontos da órbita 1.

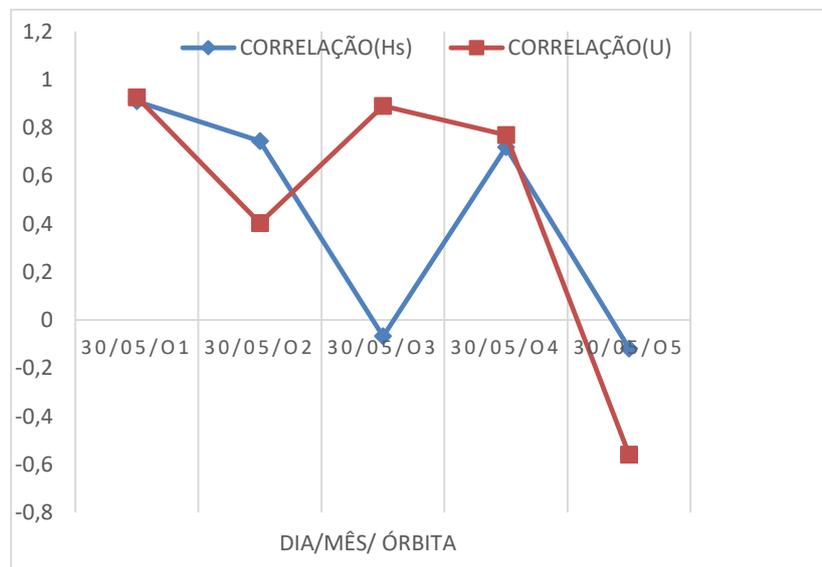
Figura 6.3 - RMSE calculado para as cinco órbitas (T/P) do dia 27/mai/1997



Fonte: Produção do autor.

A forma das curvas de RMSE dos ventos e Hs mostram o resultado dos ventos sendo acompanhado pelos resultados de Hs.

Figura 6.4 - Correlação cruzada calculada para as cinco órbitas (T/P) do dia 27/mai/1997



Fonte: Produção do autor.

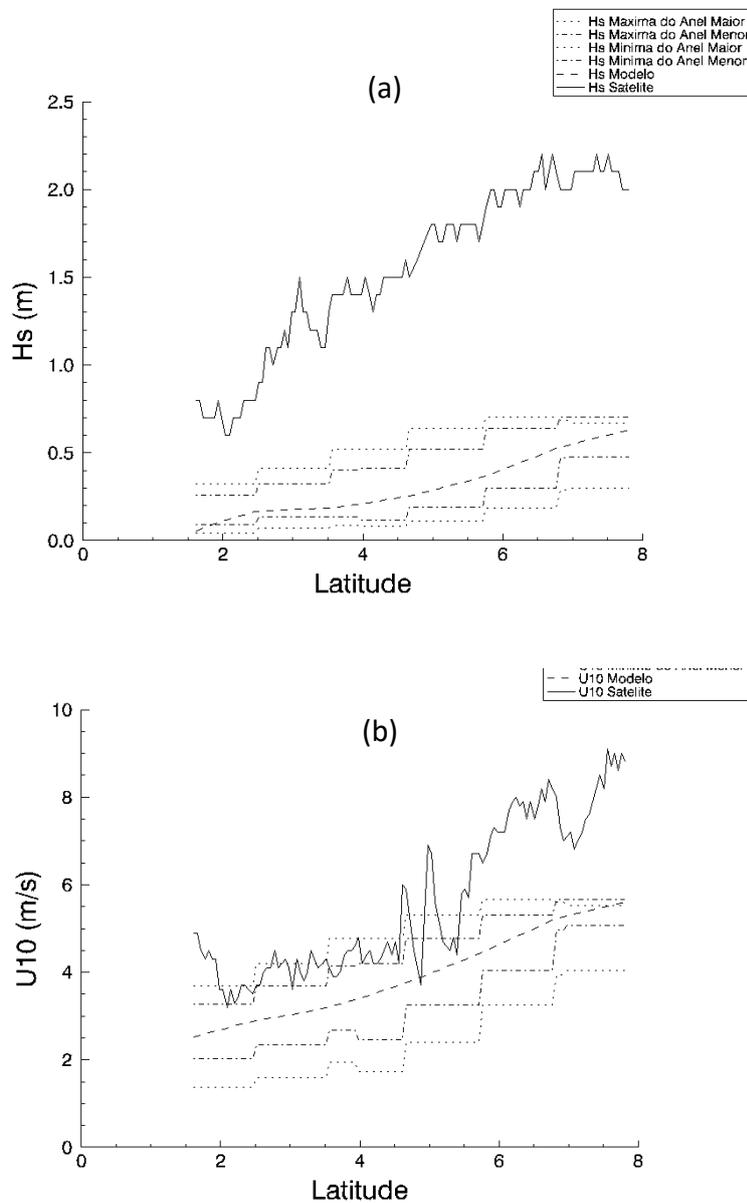
Analisando o índice de correlação cruzada, observa-se que, no geral, os dados de vento acompanham mais fielmente a leitura feita pelo satélite. O piores resultados dos ventos foram observados nas órbita 2, seguido da

5, enquanto que, para Hs, os resultados mais distantes do ideal são os das órbitas 3 e 5.

Neste ponto do trabalho, após feitas as observações gerais e levantadas algumas hipóteses, segue-se uma análise mais detalhada dos dados do satélite e modelo levantados no dia 27 maio de 1997, buscando maior solidez nas conclusões futuras.

6.2.1.2. ANÁLISE DA ÓRBITA 1

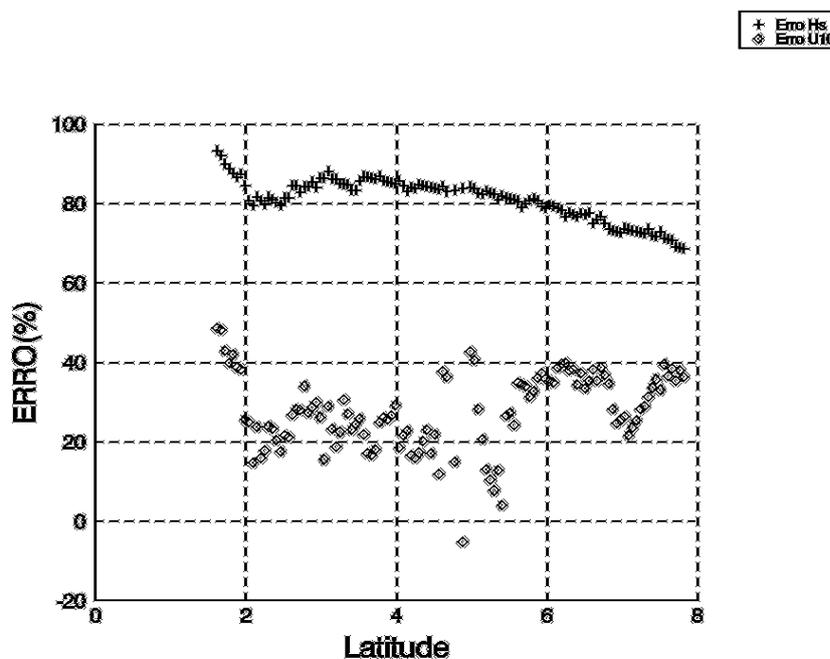
Figura 6.5 - Hs(a) e U₁₀(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 1



Font

Iniciando pela órbita 1, podemos notar pela figura 6.5 uma grande defasagem nos dados de Hs interpolados, apresentados pelo modelo, em relação ao mostrado pelo satélite. Os máximos registrados, em pontos de grade afastados até 2 graus em relação ao centro de coleta, não revelaram valores equivalentes aos registrados pelo satélite. Mesmo havendo relevantes diferenças entre os valores de Hs observados e modelados, a curva do modelo acompanhou a curva do satélite, como se uma constante adicionada bastasse para sobrepor as duas. Esse fato foi registrado pela correlação cruzada calculada, de 0,909, entre as curvas. Os ventos interpolados do modelo concordaram mais com os dados de vento, lidos pelo satélite, tanto nos valores quanto na evolução das curvas. Nas latitudes acima de 6 graus, os resultados de vento comparados mostraram maior quantidade de dados em discordância. Calculando a porcentagem de erro do modelo em relação ao satélite, mostrado na figura 6.6, verifica-se os erros máximos, cerca de 41%, para os ventos, e em torno de 93%, para as Hs, próximo à latitude de 2 graus. No caso desta órbita, esta representa a região costeira.

Figura 6.6 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 1

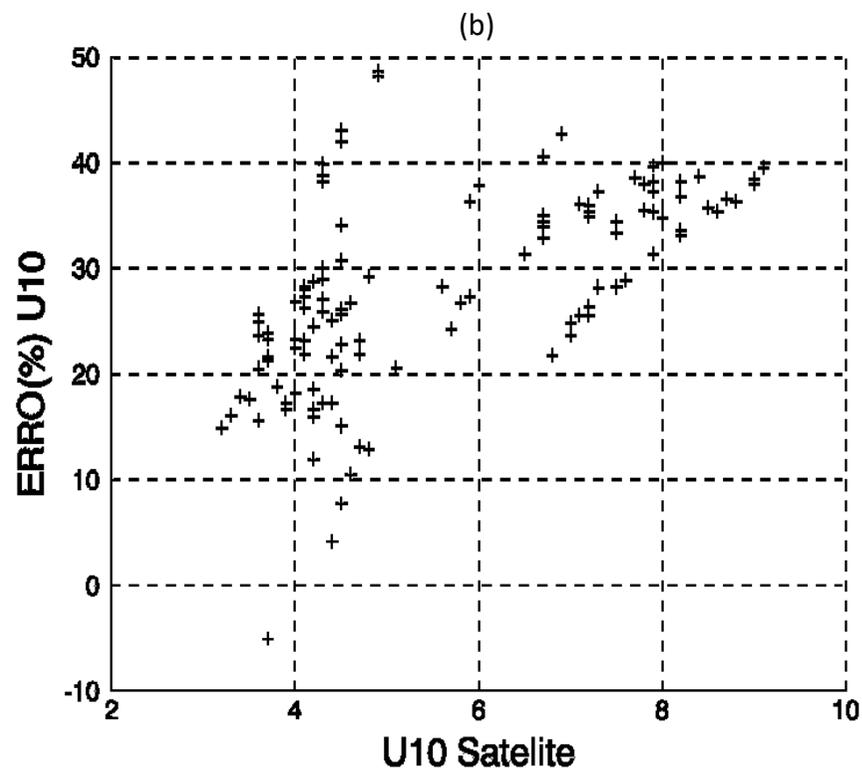
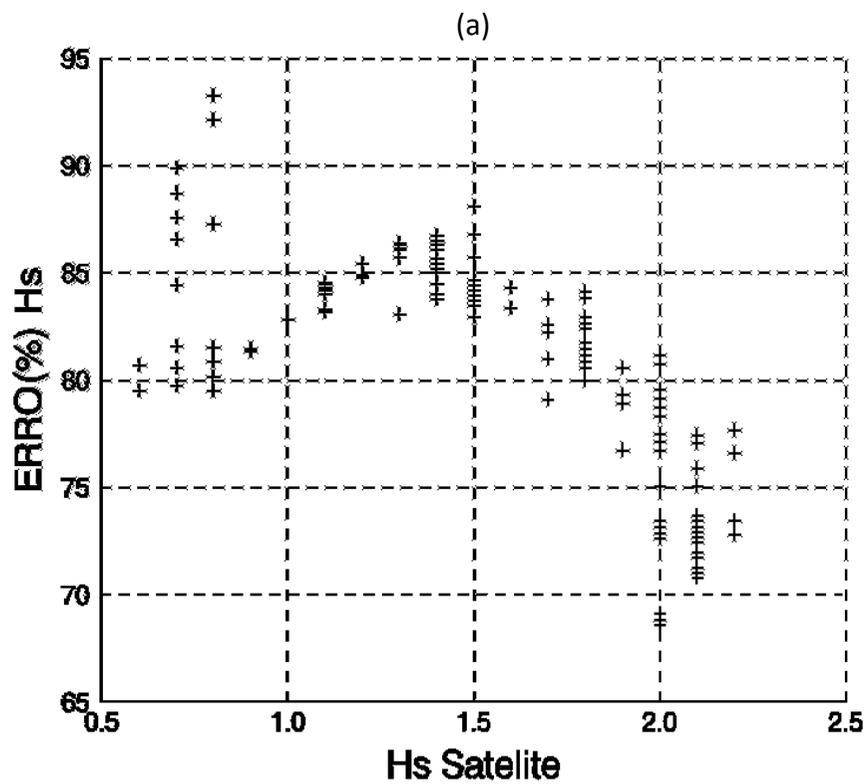


Fonte: Produção do autor.

A figura 6.7 dá a porcentagem de erro de Hs em função de Hs registradas pelo satélite.

Nota-se que os maiores erros, de 80-93%, estão associados às menores Hs, na faixa de 0.5 a 1.0 m. Já os menores erros percentuais, de 65-75%, foram encontrados somente para Hs iguais ou maiores do que 2,0 m. As outras Hs, entre 1-1,5 m mostraram erros que variaram de 75-90%. A faixa de ventos de 2-4 m/s, apresentou erros percentuais que variaram entre 0-20%, na sua maioria. Ventos de 4-6 m/s apresentaram erros que variaram entre -10 a 42 %, registrando inclusive o maior erro percentual registrado para os ventos, mas, na sua quase totalidade, permaneceram entre 0-20 %. Pode-se distinguir outro grupo de ventos na faixa de 6 a 8 m/s. Os erros percentuais associados a este grupo ficou, em grande parte dentro de 20-40 %, no entanto, pode ser verificado que alguns poucos dados desta faixa atingiram erros que variam de 15-20 %. Os ventos maiores do que 8m/s apresentaram erros em torno de 30 %.

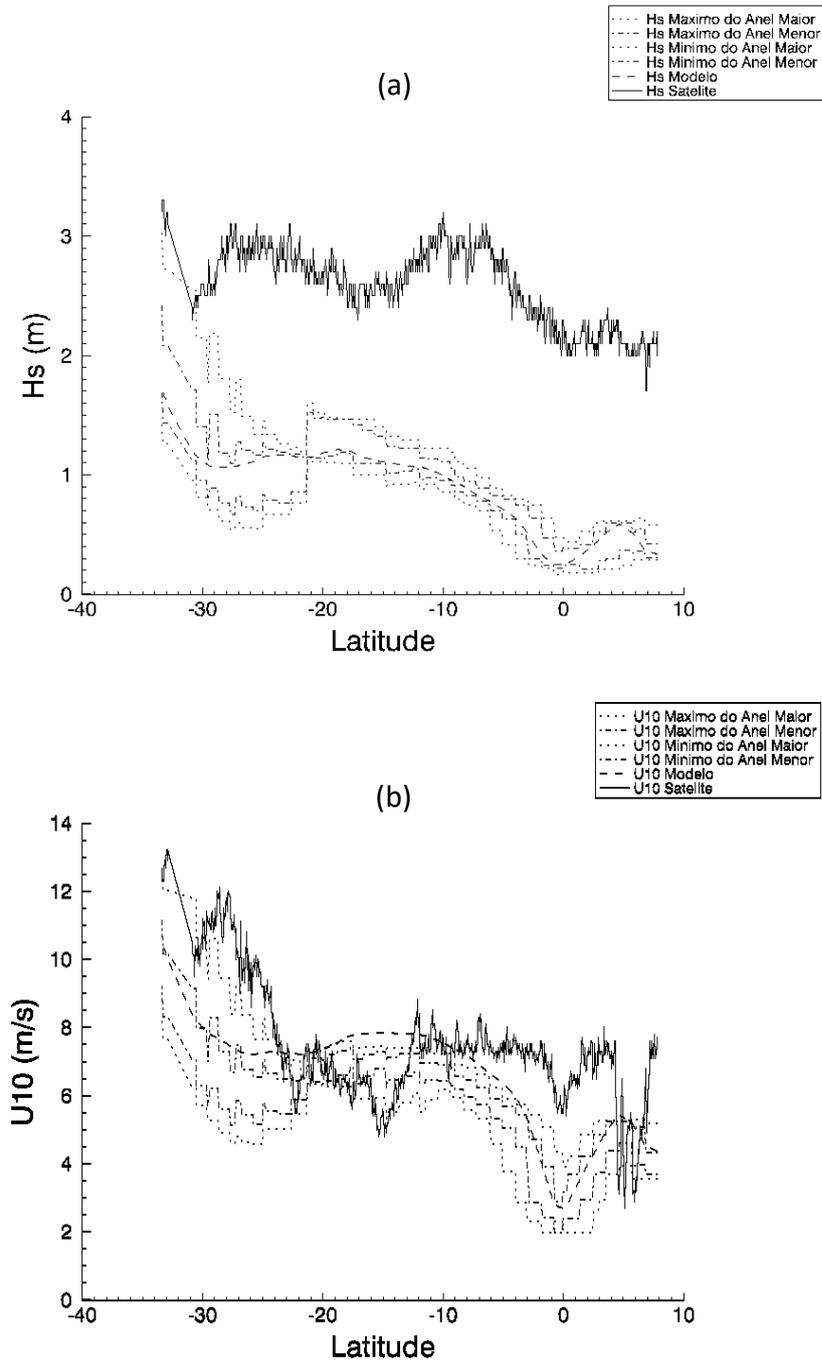
Figura 6.7 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 1.



Fonte: Produção do autor.

6.2.1.3. ANÁLISE DA ÓRBITA 2

Figura 6.8 - Hs(a) e U₁₀(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 2.

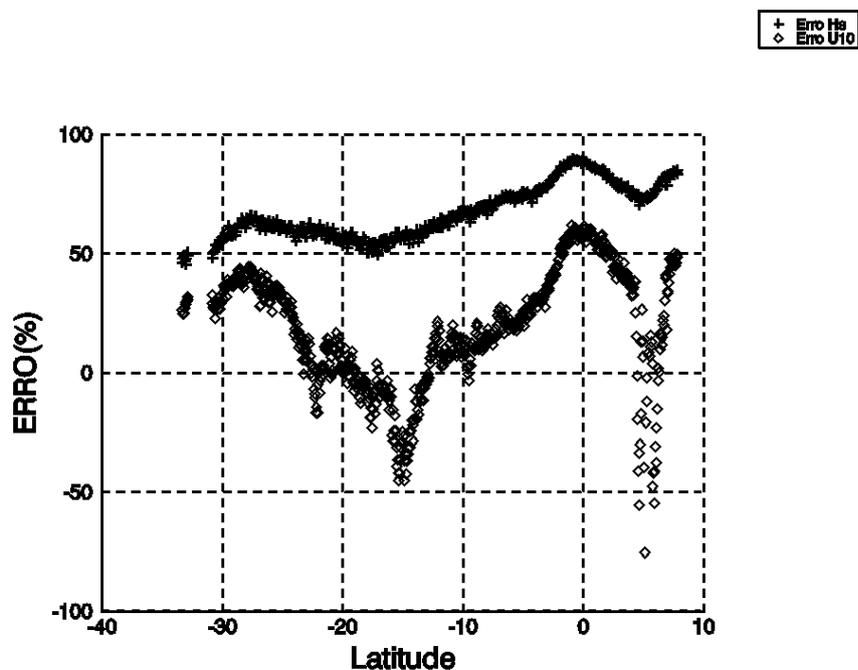


Fonte: Produção do autor.

A órbita 2, nos aspectos gerais, apresenta algumas similaridades com a órbita 1. Na figura 6.8(a), pode-se ver uma subestima nos valores de Hs apresentados pelo modelo em relação ao satélite, mas acompanha,

mesmo que de forma mais acentuada, o decaimento dos valores de Hs das altas latitudes, ao sul, para as baixas latitudes. Os dados de vento neste caso também se ajustaram melhor do que Hs (Figura 6.8(b)). O fato curioso na curva dos ventos apresentada pelo modelo, é que esta parece estar ligeiramente deslocada para a esquerda, em relação aos valores registrados pelo satélite. Observando-se os valores máximos e mínimos, apresentados pelos dois primeiros anéis, da grade do modelo, que circundam o ponto de coleta do satélite, pode-se notar que, ao longo de toda a latitude, tais valores envolvem ou coincidem em grande parte com os dados do satélite. A figura 6.9 mostra que os erros percentuais de Hs permaneceram acima de 50%.

Figura 6.9 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 2



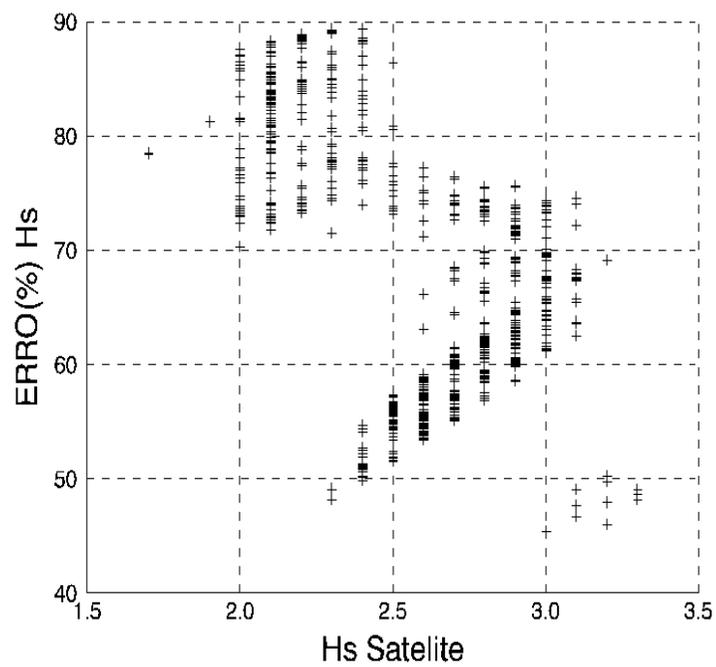
Fonte: Produção do autor.

Os valores máximos registrados, em torno de 90%, estão na região do equador. Nos dois extremos desta órbita, a configuração climática é bem diferente. Ao sul a atividade de ondas, registrada pelo modelo, é bem mais intensa do que o perfil apresentado na região norte. Os erros registrados para os ventos variaram entre +50% e -100%, representando, além de uma ampla variabilidade, uma alternância entre os valores registrados pelo satélite e modelo. A curva dos erros percentuais dos

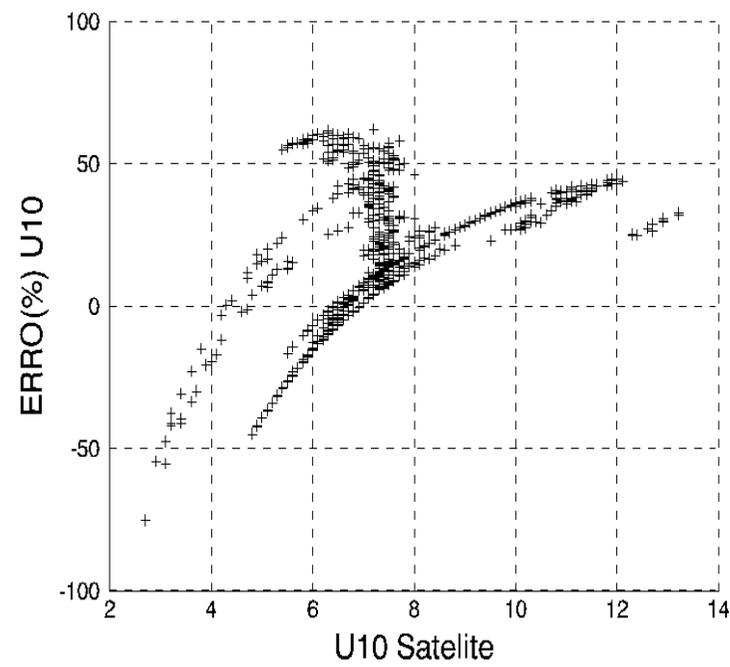
ventos apresentou uma forte descontinuidade nas latitudes -15° e $+5^\circ$. Perto dos -32° os dados foram desclassificados pelo padrão adotado pela AVISO. Este fato é um indicador da susceptibilidade a influências externas, como pesadas nuvens de chuva, ou operacionalidade dos aparelhos do satélite, a que os dados desta órbita foram submetidos. Descartando essas discrepâncias, verifica-se que os dados apresentaram erros que ficaram entre $\pm 50\%$, nas extremidades desta órbita e na latitude de -15° .

Através da figura 6.10(a), verifica-se que os maiores erros estão relacionados a Hs que variam de 2.0-2.5m, entre 70 e 90%. Algumas poucas exceções, nesta faixa, apresentam erros em torno de 50%. A maioria dos dados são representados por Hs que variam de 2.5-3.0m. Os erros associados a esta faixa fica entre os 50-80%. Hs acima de 3.0m, são as que apresentam os menores erros, abaixo de 50% para alguns poucos pontos. Outra parte de Hs acima de 3.0m acompanham o erro apresentado pela maioria, ou seja, de 50 a 80%. O gráfico 6.10(b), mostra que a maioria dos ventos têm uma intensidade que varia de 6 até 8m/s, aproximadamente com erros que variam entre -65 e 40% . Ventos menores do que 4m/s apresentaram erros em torno de 50%. Na faixa que varia de 5-6m/s os erros ficaram entre 0 e 50%, salvo os valores discrepantes mencionados anteriormente.

Figura 6.10 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 2.



(a)

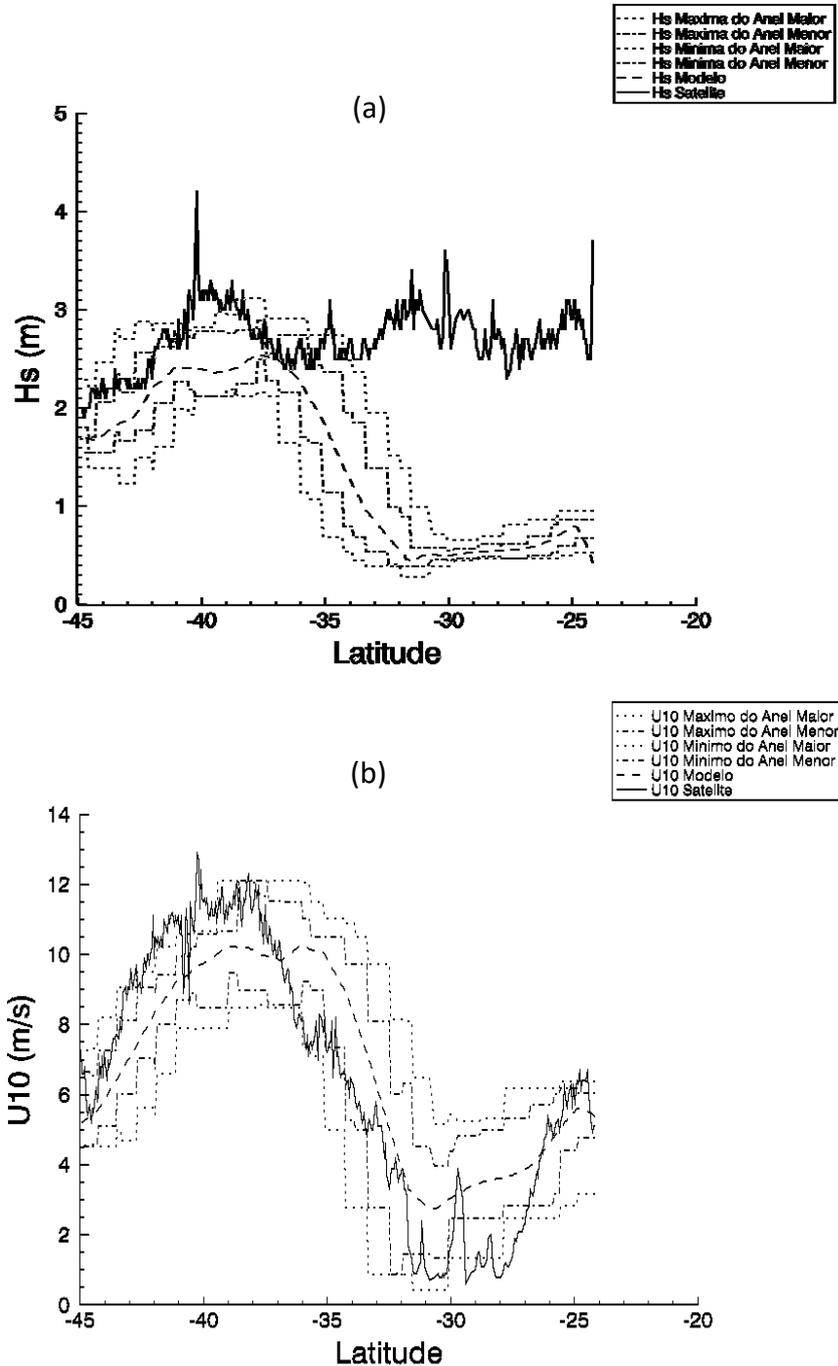


(b)

Fonte: Produção do autor.

6.2.1.4. ANÁLISE DA ÓRBITA 3

Figura 6.11 - Hs(a) e U_{10} (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 3



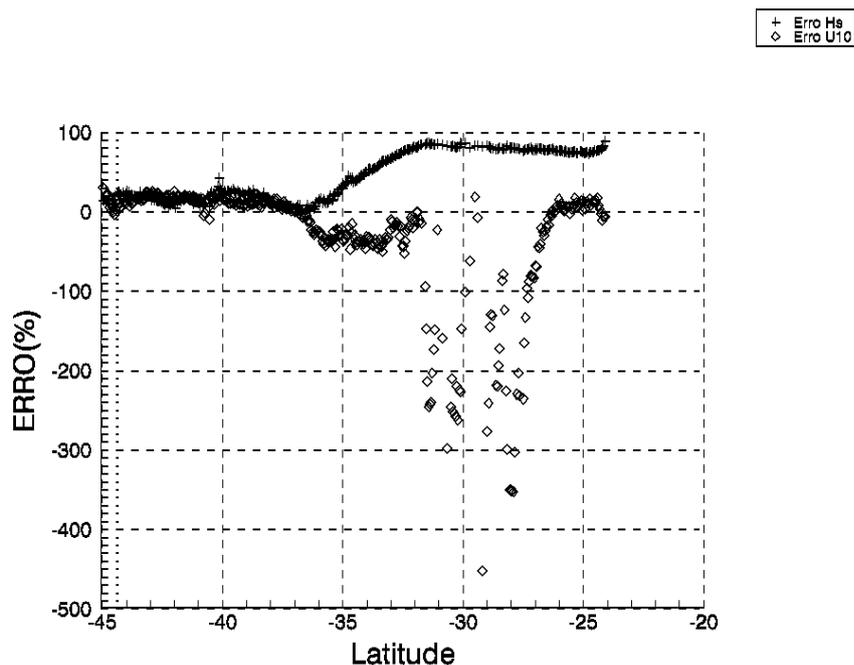
Fonte: Produção do autor.

Para a órbita 3 do dia 27 de maio de 1997 os dados de Hs observados e modelados concordaram relativamente bem até a latitude -37° , como pode ser verificado na figura 6.11(a). A partir daí houve uma brusca

queda nos valores modelados, enquanto que Hs registradas pelo T/P continuaram oscilando em torno de um patamar fixo.

Observando o campo de ondas fornecido pelo modelo nos horários mais próximos da passagem do satélite, conclui-se que na latitude em torno de -37° , encontra-se a fronteira que divide Hs menores (abaixo de 1m) das outras maiores. Os pontos que cobrem as regiões mais energéticas referem-se aos resultados mais concordantes entre modelo e satélite. Quando em regiões de menor energia, os resultados se desencontram. As feições das curvas de vento, do satélite e modelo, se assemelham no geral. A exemplo de Hs, existe um desajuste dos ventos a partir da latitude -37° para latitudes mais baixas, quando os valores modelados, são na sua grande maioria, maiores do que os do satélite.

Figura 6.12 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 3.



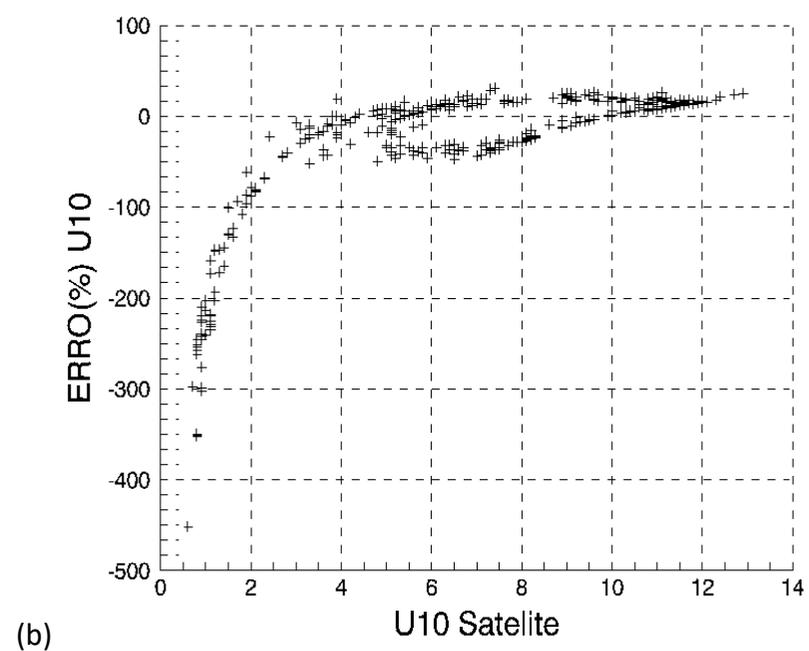
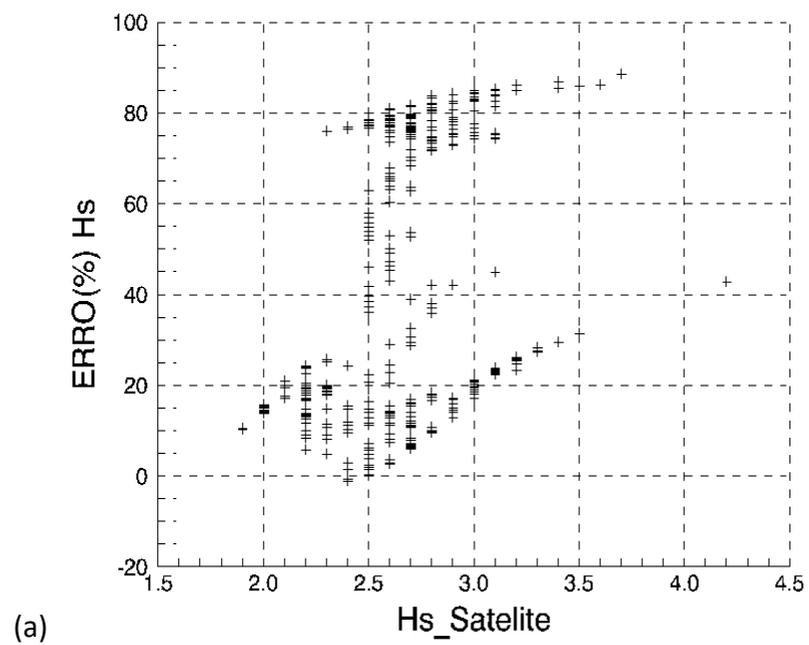
Fonte: Produção do autor.

Da latitude -45° até -37° os erros percentuais de Hs oscilaram entre 0 a 50%. Rompendo a latitude -37° , ocorreu um rápido crescimento dos erros para valores próximos a 100%. Os erros percentuais dos ventos acompanhou o padrão de Hs, apresentando erros percentuais que chegaram a 50%, mas permaneceram mais em torno de 0 nas latitudes maiores do que -37° . Latitudes mais ao norte, ao redor de -29° , os erros

destoaram da maioria, chegando até 600%. O restante registrou erros de 100%, nas latitudes mais próximas a -34 graus, e erro em torno de 0 ao redor da latitude -25° , como mostra a figura 6.12. A grande maioria de Hs registradas nesta órbita ficaram entre valores de 2 a 3m, figura 6.13(a).

A maioria dos dados formou um bloco de Hs com erros que variaram entre 0 e 20%. Outro bloco apresentou erros entre 60 e 80%. O restante se diluiu em erros entre 20 e 60% e acima de 80%. Foram registradas algumas poucas Hs acima de 3,0 m. Estas se dividiram, quase que em número igual, em erros maiores de 80% e erros entre 20 e 40%. Os erros percentuais registrados para os ventos, apresentam um padrão interessante. Os erros associados aos ventos com baixas velocidades, diminuem assintoticamente com o crescimento da intensidade do vento. A justificativa de tal acontecimento se apoia na transformação da intensidade dos ventos registradas pelo modelo a 10 m para 19,5 m, para que houvesse concordância com a altura de leitura do satélite. Ventos com velocidades maiores do que 4,0 m/s podem ser divididos em dois grupos. Um que apresentou erros próximos ou iguais a zero, e o outro com erros que chegaram à margem de 50%.

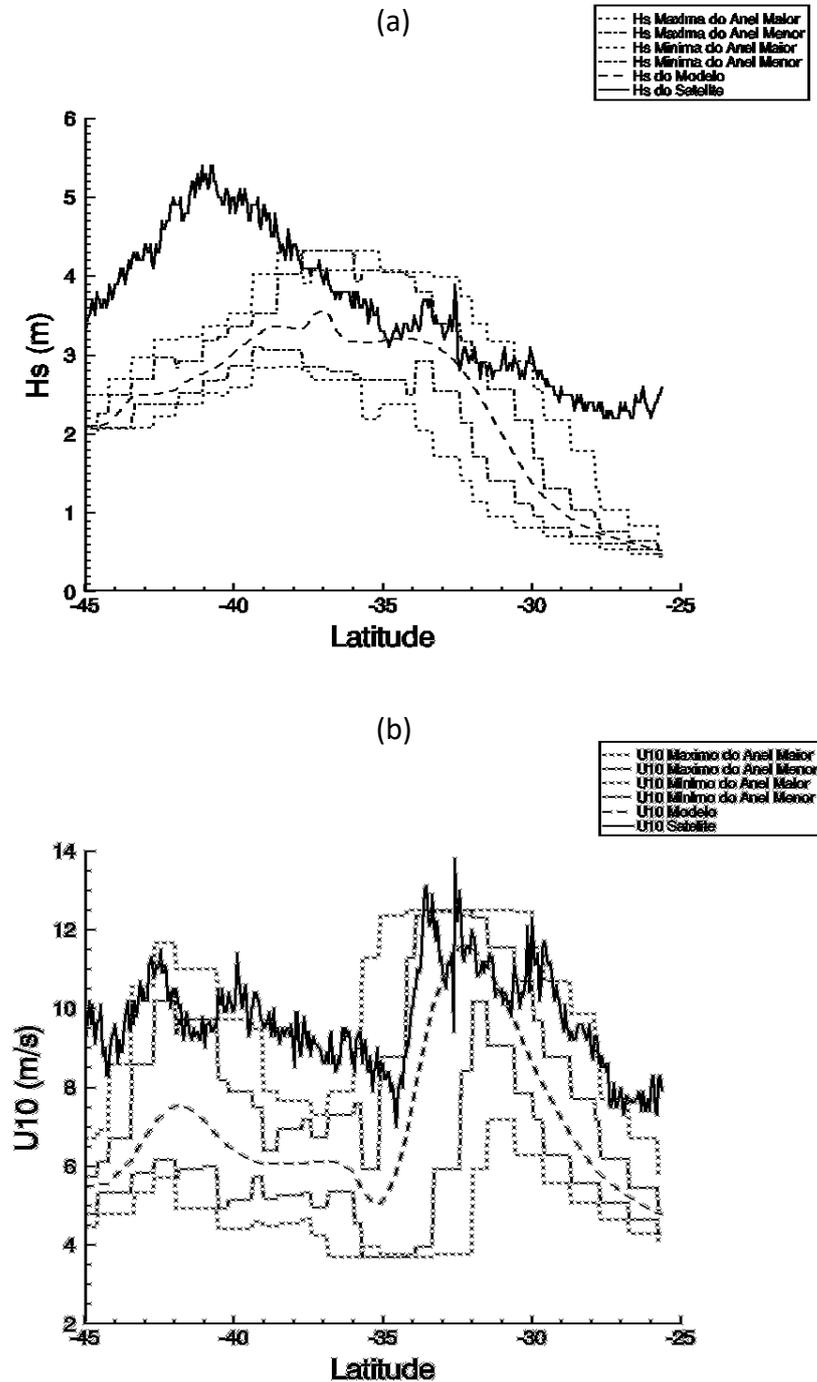
Figura 6.13 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 3.



Fonte: Produção do autor.

6.2.1.5. ANÁLISE DA ÓRBITA 4

Figura 6.14 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 4.

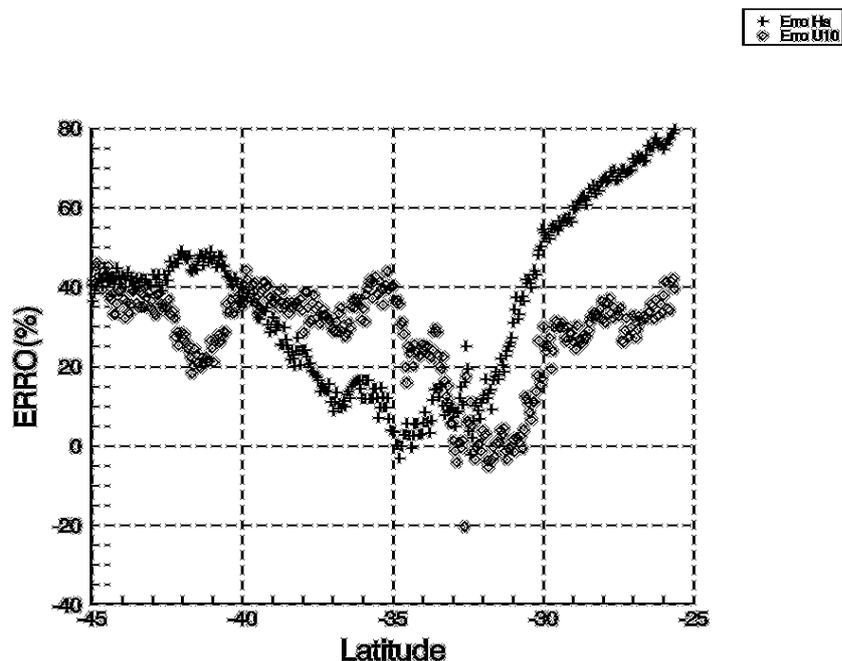


As Hs registradas na órbita 4 pelo satélite se mostraram predominantemente maiores do que as registradas pelo modelo, mostrado na figura 6.14(a). Pode-se delimitar uma faixa de latitude, de -39° a -30° , na qual os dados de ondas se mostraram mais concordantes,

nem tanto pelos valores interpolados do modelo, mas em decorrência dos máximos e mínimos dos seus anéis maior e menor. Entre estas latitudes, são encontradas as regiões de maior energia registrada pelo modelo, no momento da passagem do satélite.

Os ventos apresentaram perfis que se assemelham (Figura 6.14(b)). No entanto, nas latitudes maiores do que -35° e menores do que -30° , os valores interpolados do modelo estão subestimados. Os máximos dos anéis maior e menor do modelo acompanham, ora subestimando ora superestimando ou concordando, com a leitura do satélite. Na figura 6.15, pode-se verificar os erros percentuais dos ventos e Hs para esta órbita. Hs apresentaram os maiores erros nas suas extremidades. No extremo sul da órbita, os erros chegaram a quase 50%. Na extremidade norte, as diferenças percentuais atingiram 80%. Os menores erros de Hs, próximos de zero, se mantiveram na região em torno de -35° de latitude.

Figura 6.15 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 4.



Fonte: Produção do autor.

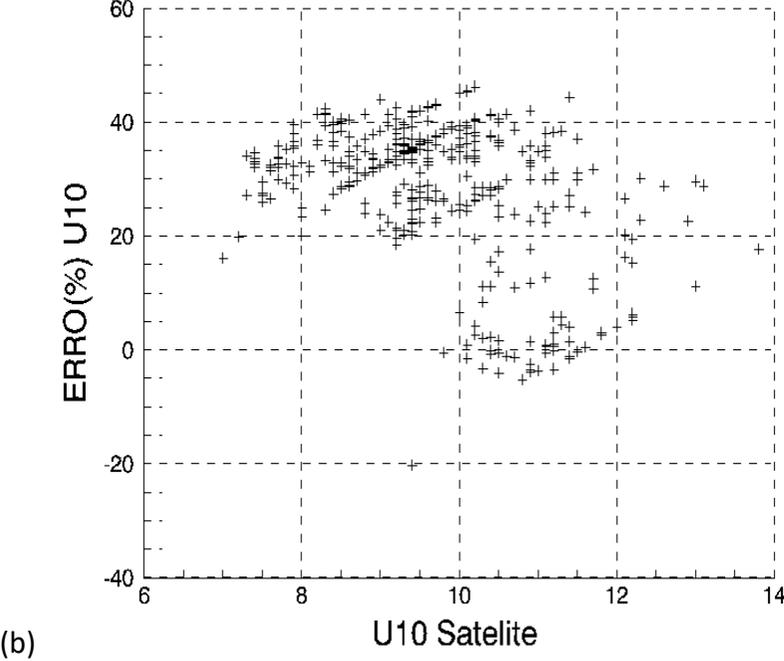
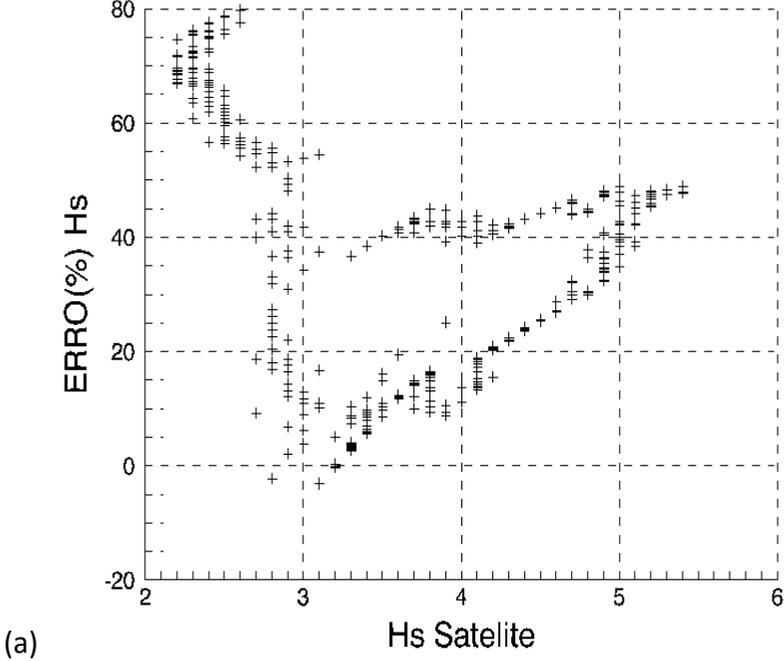
Os ventos também apresentaram erros maiores nas regiões referentes às extremidades da órbita 4, mostrando valores em torno de 40%. Todavia, ao redor de algumas latitudes os erros dos ventos também chegaram

perto dos 40%. São estas latitudes, -39°S e -35°S . Destaca-se erros variando de 10 a 20% próximo à latitude -32°S .

Na figura 6.16(a) pode-se verificar que os maiores erros estão associados a Hs menores do que 3m, 80%, mas numa amplitude que atingiu a faixa dos 0% . Hs entre 3 e 4m podem ser divididas em dois grupos. O da maioria, que apresenta erros variando entre 0 e 20%, e o restante, revelando erros predominantemente em torno de 40%. Para Hs entre 4 e 5m, foram calculados erros que variaram entre 10 e 50%. Hs acima de 5m estão associados a erros maiores do que 30% e menores do que 50%.

Pouco mais da metade dos dados de velocidade do vento apresentaram erros entre 20 e 40%, referentes em grande parte, a ventos maiores do que 8m/s e menores do que 12,0 m/s. Verificou-se na figura 6.16(b) que erros de 0-20% foram detectados em todas as intensidades de ventos, mas predominantemente de 8 a 12,0 m/s. Erros que variaram entre 0 e – 20% se mostraram associados aos valores de vento maiores do que 10,0 m/s e menores do que 12,0 m/s.

Figura 6.16 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 4.

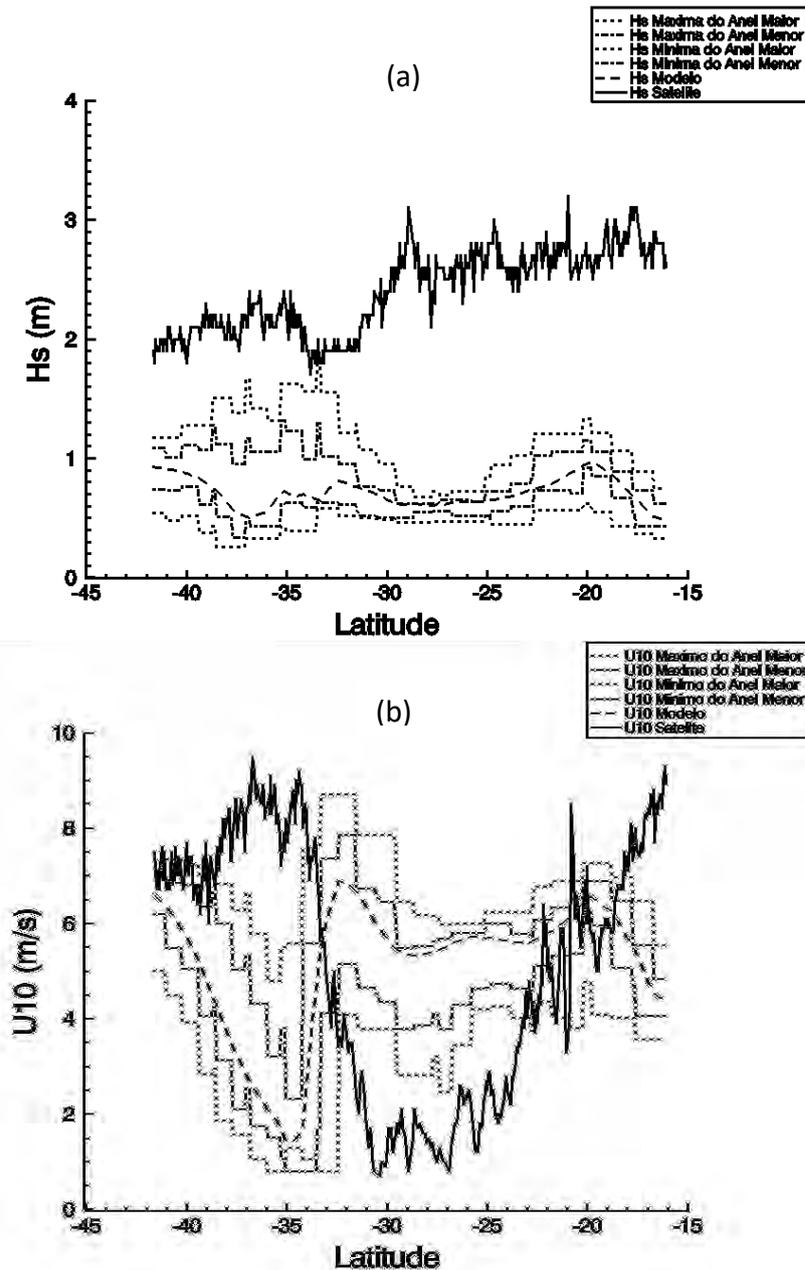


Fonte: Produção do autor.

6.2.1.6. ANÁLISE DA ÓRBITA 5

A mais extensa das órbitas, órbita 5, mostra valores de Hs do modelo interpolados sempre menores do que os lidos pelo satélite T/P (Figura 6.17(a)).

Figura 6.17 - Hs(a) e velocidade dos ventos (b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 5.



Fonte: Produção do autor.

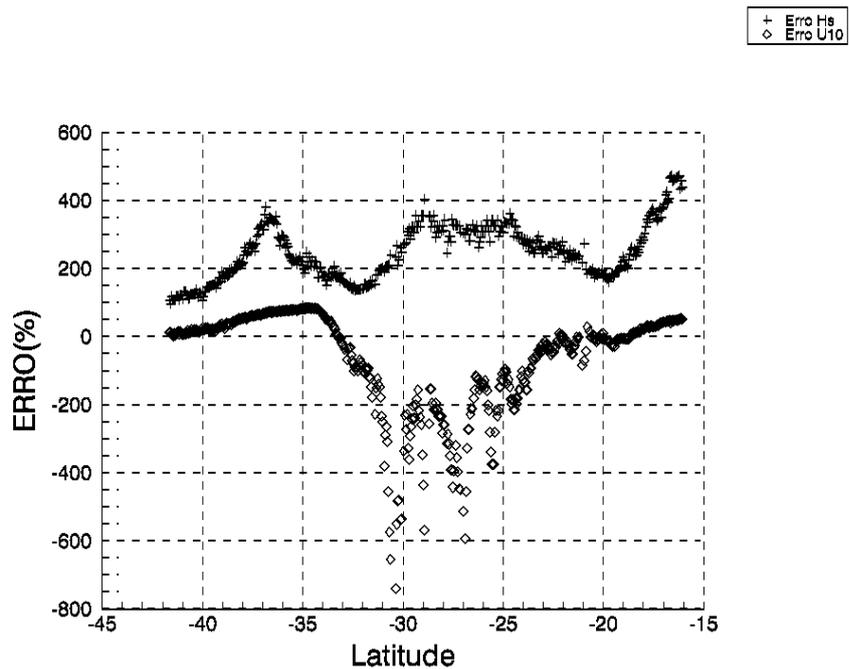
Aparentemente não se apresenta nenhuma similaridade entre as curvas de Hs construídas a partir das duas fontes de informações. A evolução

dos ventos em função da latitude mostra significativas diferenças entre satélite e modelo. O comportamento das curvas é tal que, na maioria dos pontos, quando o modelo registra ventos menos intensos o satélite fornece valores elevados.

Acompanhando as diferenças através dos erros percentuais, mostrados na figura 6.18, verificamos o seguinte: O maior erro percentual, perto de 500%, registrado para Hs, refere-se à porção mais ao norte desta órbita. Os menores erros percentuais de Hs ficaram em torno de 125%, no sul da órbita e nas latitudes -33° , -31° e -21° . Considerando a velocidade dos ventos, os erros foram menores na extremidade sul da órbita, chegando a 0%. Na latitude -21° , em conformidade com Hs, os ventos apresentaram baixos erros, também em torno de 0%. Finalizando as regiões de ventos com baixos erros, aponta-se a latitude -34° . Estes erros correspondem aos pontos onde os ventos, modelados e do altímetro, se cruzam, devido ao padrão de alternância entre eles. Os erros de Hs, como consequência, seguem o mesmo padrão. Na área delimitada pelas latitudes -32 e -23 , são registrados os maiores erros percentuais dos ventos, alguns poucos valores extrapolaram os -500% . O reflexo disto em Hs pode ser visto por um patamar, no qual os erros percentuais destas se mantiveram perto dos 400%.

A diferença percentual entre satélite e modelo estão apresentadas na figura 6.19. A faixa de Hs compreendida entre os valores de 2.5 a 3.0m apresentam a maior diferença percentual registrada para a órbita 5, pouco menor a 500%. Entretanto a maioria dos pontos desta órbita mostraram erros que ficaram entre 200 e 300%. Os menores erros percentuais estão associados a Hs menores do que 2.0m. Na faixa de 2.0m, inclusive, a 2.5, os erros percentuais variaram entre 100 – 400%, sendo que a maioria ficou entre 200 – 300%. Foram registrados alguns poucos valores de Hs acima de 3.0m, apresentando erros que variaram entre 200 a 400%.

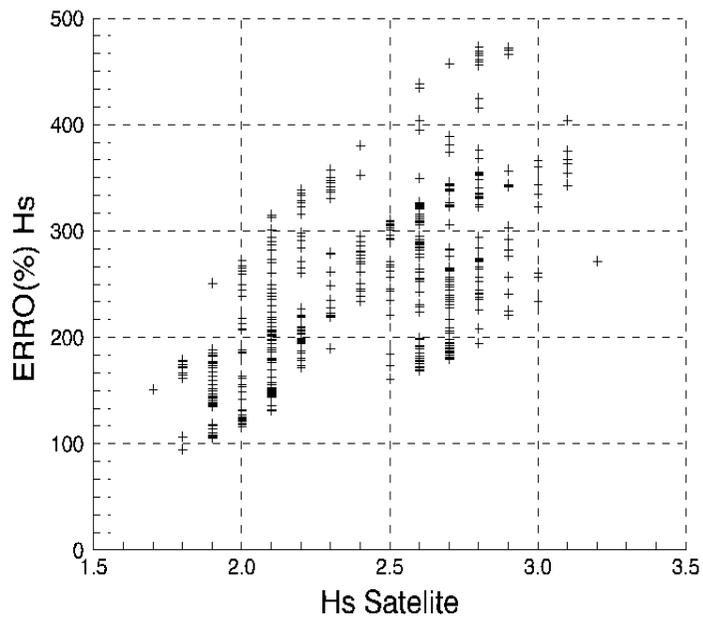
Figura 6.18 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 5.



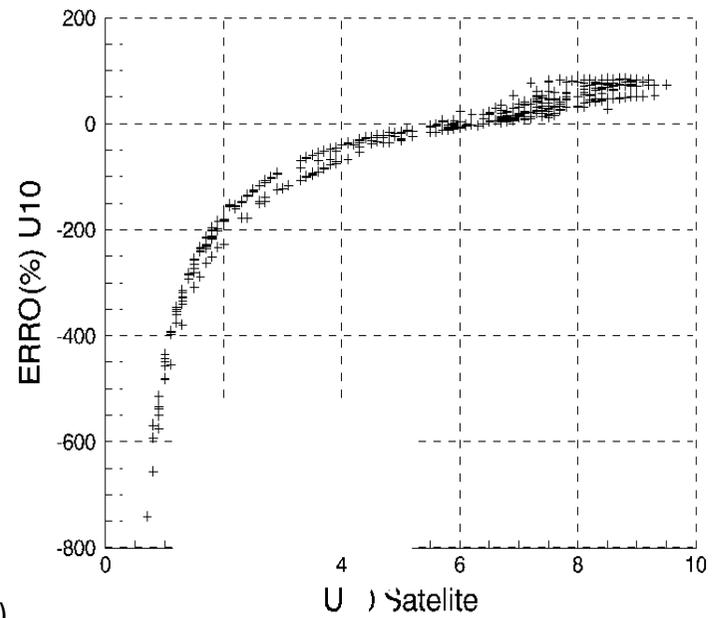
Fonte: Produção do autor.

Os erros dos ventos, figura 6.19(b), apresentaram um padrão similar ao registrado na órbita 3. O que reforça a ideia da influência da fórmula logarítmica, de conversão das alturas de registro dos ventos, no resultado. Pode-se definir uma região, entre 5 e 8m/s, na qual os resultados são mais próximos de zero.

Figura 6.19 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 5.



(a)



(b)

Fonte: Produção do autor.

6.2.2. CASO 30 DE MAIO DE 1997

6.2.2.1. ANÁLISE GERAL

O evento ocorrido no dia 30 de março de 1997 é caracterizado por ventos intensos oriundos de um ciclone e conseqüentemente por ondas de grande porte que atingiram o litoral brasileiro. Na tabela 6.3 alguns parâmetros estatísticos dão a ideia geral do comportamento de Hs na leitura do satélite T/P e do modelo SAWMO.

Tabela 6.3 - Parâmetros estatísticos que comparam as alturas significativas de ondas do modelo SAWMO com o satélite TOPEX/Poseidon em 30/mai/1997.

	N de Pontos	Mínimo (m)		Máximo (m)		Média		EM (m)	RMSE (m)	I.E. (%)	σ^2 (m ²)	r
		SAT.	MOD.	SAT.	MOD.	SAT.	MOD.					
30/mayo/1997 órbita 6	146	1.30	1.34	6.40	0.64	1.82	0.46	-8.503	3.840	30.13	-57.57	0.228
30/mayo/1997 órbita 7	656	1.40	0.24	2.50	1.43	1.87	0.825	-1.283	1.318	57.89	0.091	-0.574
30/mayo/1997 órbita 8	434	2.70	1.29	7.60	5.91	5.06	3.17	-2.784	2.431	36.88	-1.884	0.762
30/mayo/1997 órbita 9	276	2.70	0.67	5.20	1.67	3.99	1.06	-5.640	3.721	43.66	-17.97	0.311
30/mayo/1997 órbita 10	989	1.20	0.25	7.90	7.76	3.04	1.85	-1.192	1.317	43.21	0.313	0.962

Fonte: Produção do autor.

O primeiro fato marcante é notado nos valores máximos e mínimos retratados pelo satélite e pelo modelo. Em todos os casos o satélite apresentou valores máximos maiores do que os máximos representados pelo modelo, algumas vezes, como no caso das órbitas 6 e 9, a diferença entre os máximos das duas fontes são acentuadas. Este comportamento pode ser visto também no confronto dos valores médios do modelo e satélite. Em se tratando de valores mínimos identifica-se a órbita 6 como o único caso em que os valores do modelo são mais elevados.

Quando considerados os máximos e mínimos dos ventos, retratados na tabela 6.4, nota-se a tendência dos dados de satélite se mostrarem maiores, com exceções nas órbitas 7 e 10. Nestas duas órbitas também os valores mínimos do satélite são inferiores aos do modelo e, naturalmente este padrão se repete quando comparados os valores médios.

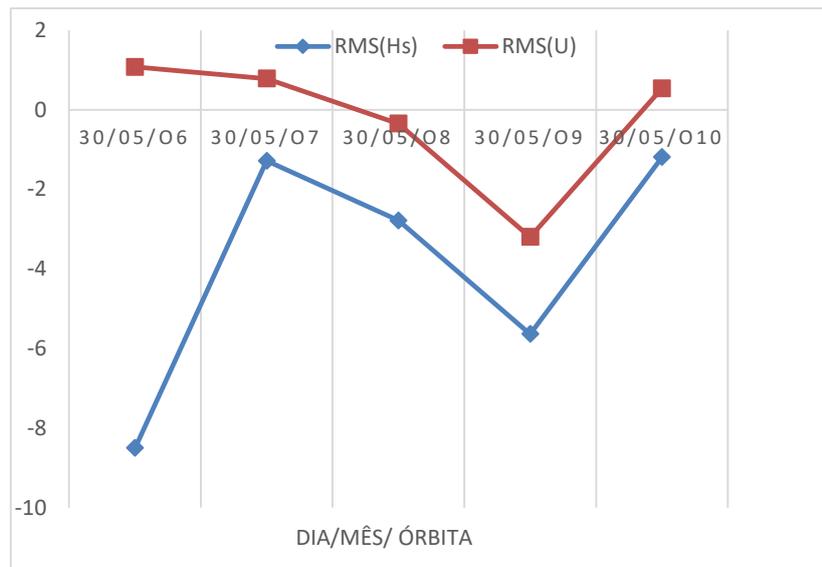
Tabela 6.4 - Parâmetros estatísticos que comparam os ventos do modelo LAM com o satélite TOPEX/Poseidon no dia 30/mai/1997

	N de Pontos	Mínimo (m/s)		Máximo (m/s)		Média		EM (m/s)	RMSE (m/s)	I.E. (%)	σ^2 (m/s) ²	R
		SAT.	MOD.	SAT.	MOD.	SAT.	MOD.					
30/mayo/1997 órbita 6	146	2.20	1.41	9.00	6.19	5.71	4.22	1.074	7.148	22.55	49.94	-0.786
30/mayo/1997 órbita 7	656	0.30	3.14	7.60	8.69	5.11	6.30	0.784	2.379	35.36	5.10	0.518
30/mayo/1997 órbita 8	434	5.60	4.80	18.80	19.90	13.41	12.86	-0.350	4.097	22.72	16.66	0.755
30/mayo/1997 órbita 9	276	3.30	1.31	9.80	9.29	7.31	5.81	-3.199	4.431	21.81	9.40	0.615
30/mayo/1997 órbita 10	989	0.00	0.40	16.80	25.56	7.89	8.43	0.539	3.216	40.77	10.05	0.897

Fonte: Produção do autor.

O Erro Médio (EM) calculados para Hs e U para as cinco órbitas do dia 30 de maio variaram de forma semelhante, exceto na órbita 6, como relata a figura 6.20. Ratifica-se que valores de EM negativos informam que os dados observados são em sua maior parte, superiores às informações modeladas. A mesma avaliação feita para a órbita 1 no caso 27 de maio é válida para a órbita 6 visto que essas órbitas varrem paralelamente a mesma região do oceano Atlântico Sul. Portanto a possível causa no alto EM encontrado para Hs nesta órbita é a proximidade da região de fronteira do modelo e continente e a baixa energia geralmente encontrada nesta região. A órbita 9 apresentou alto EM, se comparado às outras órbitas. Novamente atribui-se à elevada subestima do modelo em decorrência desta órbita ter seus extremos limitados pela fronteira do modelo. As órbitas paralelas que cobrem a mesma região (órbitas 1, 6 e órbitas 4, 9), mesmo em evento diferentes, foram as que apresentaram os erros médios mais elevados.

Figura 6.20 - Erro Médio (EM) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 30/mai/1997

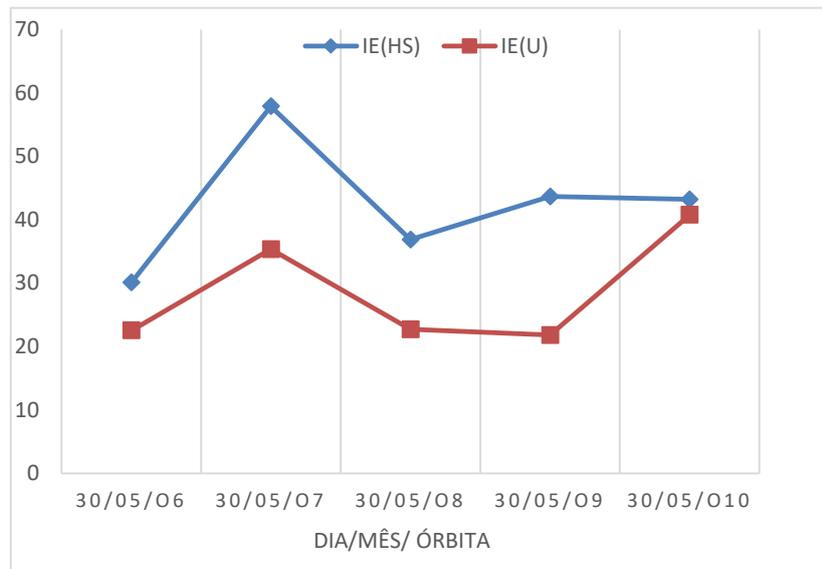


Fonte: Produção do autor.

No geral os Índices de Espalhamento (IE) apresentado pelos ventos foram acompanhados pelos IE de Hs, não se tratando de intensidades mas na forma das curvas apresentadas na figura 6.21. O mais elevado Índice de dispersão de Hs foi encontrado para a órbita 7. Esta órbita é emparelhada à órbita 2, apresentada no caso 27 maio, e carrega características muito semelhantes. Cercada pelas bordas do modelo as suas extremidades acabam relatando algumas vezes, como neste caso, valores subestimados em relação a sua região central. Como a leitura do satélite é alheia a estes efeitos, acaba havendo um desencontro de informações que são refletidas nos parâmetros estatísticos, inclusive no IE.

Estreitamente ligado ao cálculo do IE, juntamente com a diferença entre valores observados e valores médios, está o RMSE. O RMSE calculado para os ventos e Hs são retratados no figura 6.22. É encontrada aqui uma conformidade para este parâmetro calculado para Hs e U, a exemplo do que foi mostrado no caso 27 maio. Colocando lado a lado o IE e o RMSE verifica-se um desencontro entre estes parâmetros quase que de forma inversamente proporcional.

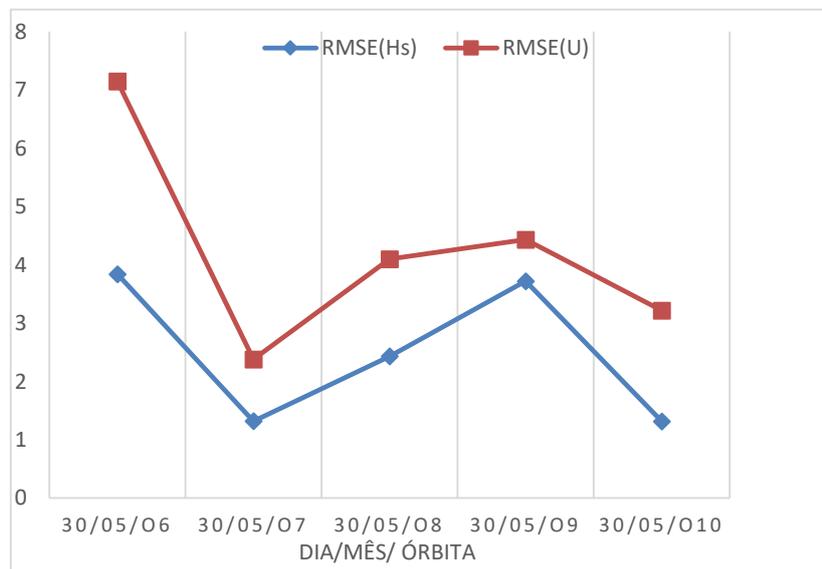
Figura 6.21 - Índice de dispersão (IE) calculado para as cinco órbitas (T/P) no dia 30/mai/1997



Fonte: Produção do autor.

Sendo o IE e o RMSE diretamente proporcionais supõe-se haver uma maior influência da diferença entre valores observados e a média nos padrões encontrados.

Figura 6.22 - RMSE calculado para as cinco órbitas (T/P) do dia 30/mai/1997

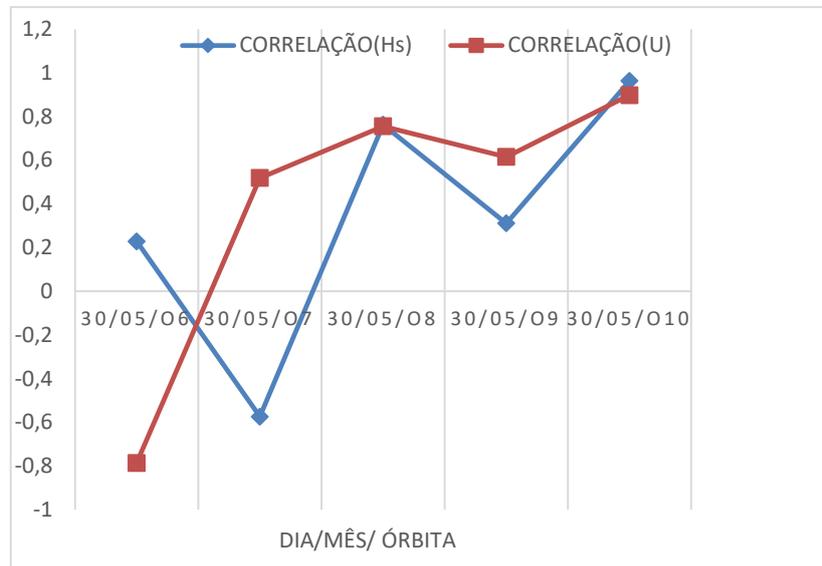


Fonte: Produção do autor.

A melhor Correlação Cruzada (r) encontrada é referente à órbita 10, tanto para os ventos como para Hs. Os piores resultados foram na órbita 7, para os ventos, e órbitas 6 e 9, para Hs. Comparando Hs e U destaca-se a órbita 6 como sendo a que, apesar de uma relativamente boa

correlação entre os dados de ventos, não apresentou boa correlação nos dados de ondas.

Figura 6.23 - Correlação cruzada calculada para as cinco órbitas (T/P) do dia 30/mai/1997



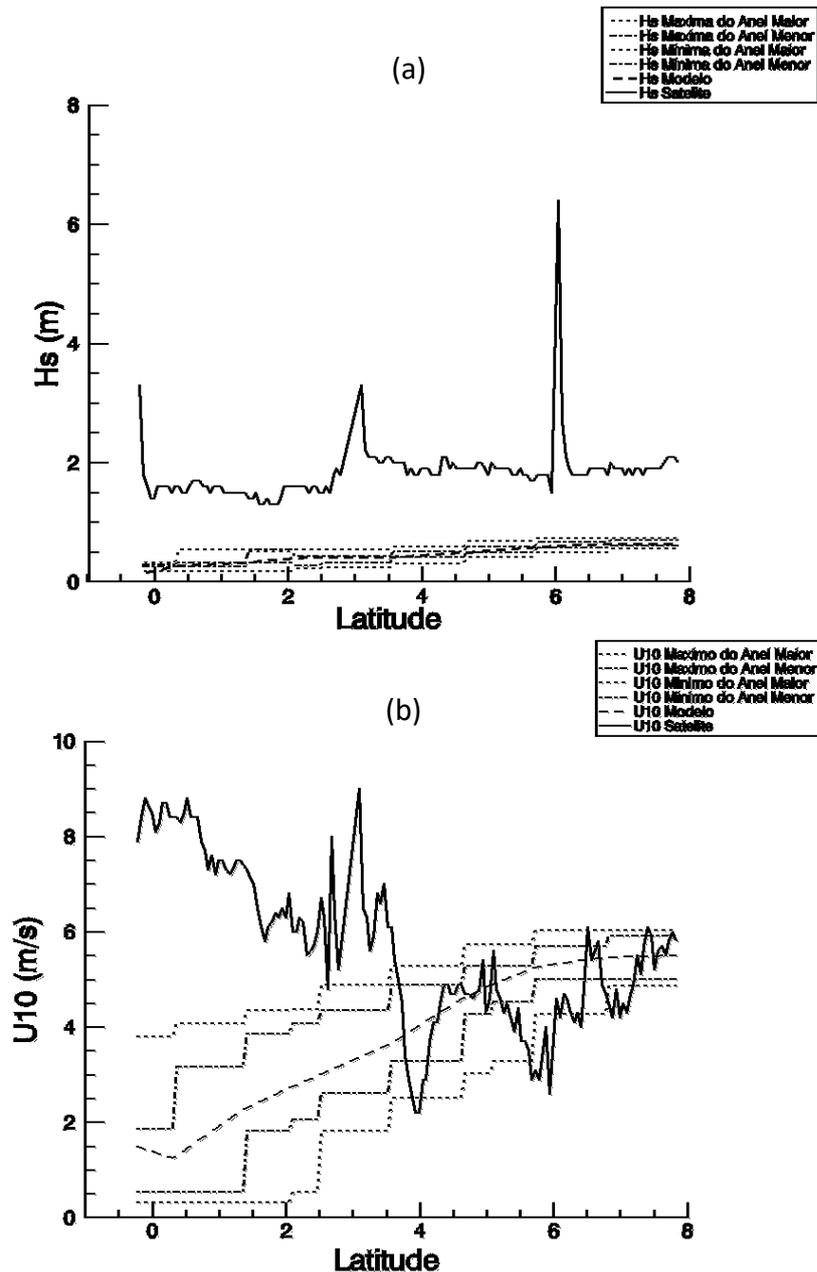
Fonte: Produção do autor.

6.2.2.2. ANÁLISE DA ÓRBITA 6

Hs registradas pelo satélite e valores interpolados do modelo nesta órbita, esquematizado na figura 6.24(a), mostram resultados do modelo nitidamente inferiores aos do satélite em toda sua extensão. No entanto, se desconsiderados os picos característicos da leitura do satélite, nota-se que as curvas de ambas as fontes evoluem de forma semelhante com a latitude. Os valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo são bem próximos dos valores interpolados não demonstrando assim, quaisquer relações de magnitude com os dados do satélite. Já os ventos registrados pelas fontes nesta mesma órbita, figura 6.24(b), revelam outro comportamento. A partir da latitude 3.5° , aproximadamente, os valores do modelo e satélite são próximos, sendo que os máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo envolvem quase que totalmente os registros do satélite, demonstrando boa compatibilidade entre as informações das duas fontes. Na medida em que a latitude se aproxima de 0° , ou seja, das bordas do modelo, a leitura das fontes se

divergem. Enquanto os dados do modelo seguem descendentes os do satélite ascendem.

Figura 6.24 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 6.

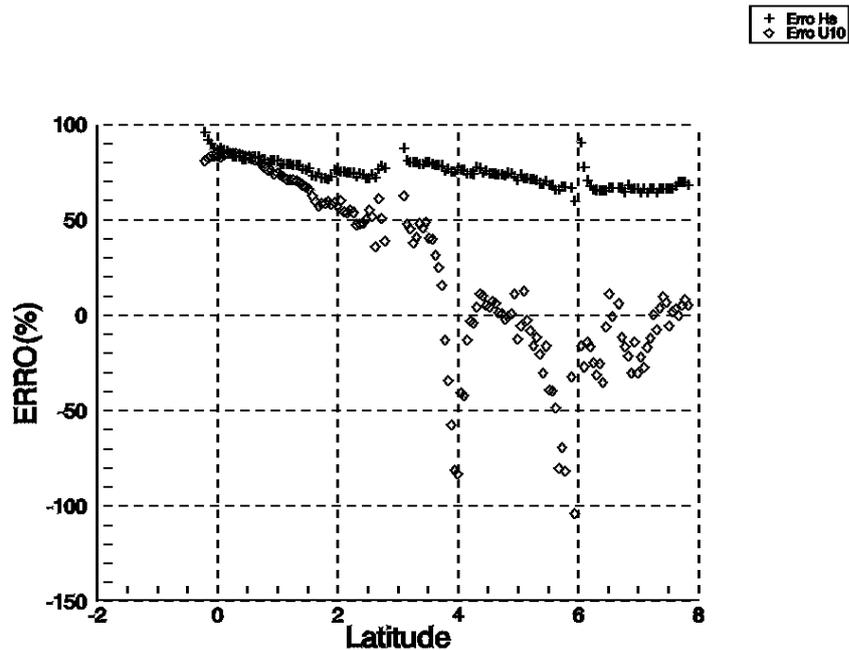


Fonte: Produção do autor.

A figura 6.25 compara os erros relativos de Hs e U do modelo em relação ao satélite em função da latitude. Os erros relativos de Hs permanecem numa faixa que varia de 50 a 100%, com erros oscilando em torno de aproximadamente 70% ao longo de toda a órbita.

Os erros relativos de U variaram entre 70% e -100% aproximadamente. Valores negativos, encontrados a partir de latitudes maiores do que 3,5°, caracterizam ventos do modelo maiores do que os do satélite. Nesta mesma faixa de latitude são encontradas a melhor concordância entre os dados do satélite e modelo nesta órbita.

Figura 6.25 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 6.

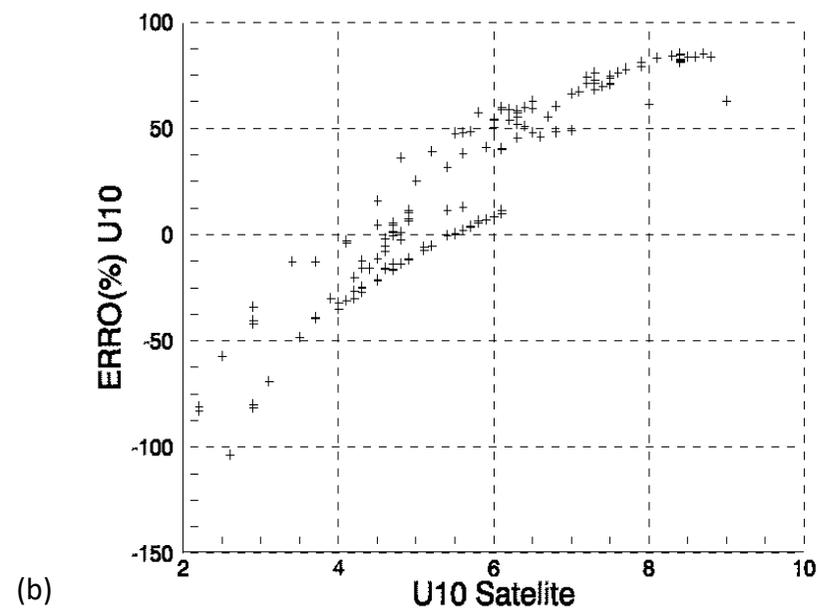
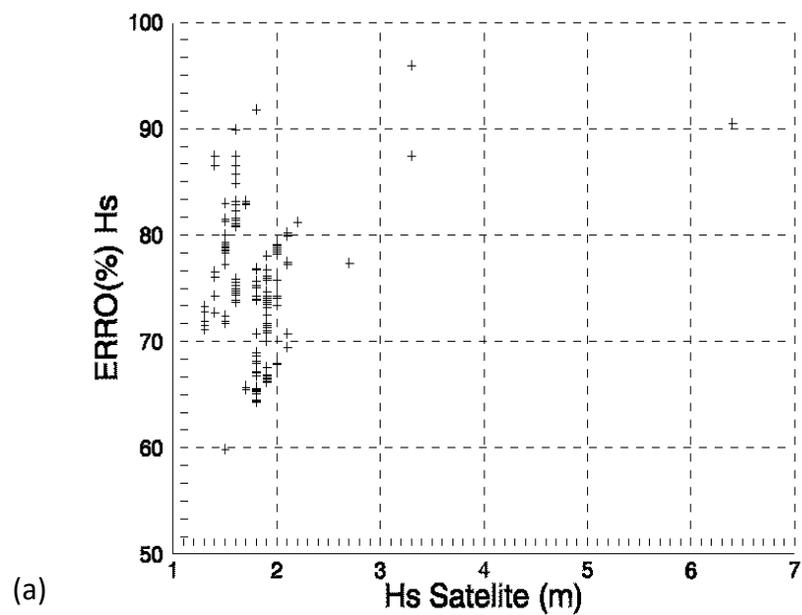


Fonte: Produção do autor.

As figuras 6.26 (a) e (b) mostram os erros relativos em função de Hs e U respectivamente.

A maioria de Hs encontrada pelo satélite estão numa faixa compreendida entre 1 e 2m, sendo que os erros associados variam entre 70-80% na grande parte das informações. Outra porção dos dados, nesta mesma faixa de Hs, mostram erros de 80-90% e de 60-70%. Poucas Hs maiores do que 2m mostram erros relativos entre 70 e 80%.

Figura 6.26 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 6.



Fonte: Produção do autor.

A intensidade de U se distribuem em valores compreendidos entre 2,0 e 9,0 m/s aproximadamente. A faixa de U com menores erros relativos estão associados a ventos entre 4,0 e 6,0 m/s. Abaixo de 4,0 m/s os ventos do satélite são menores do que os do modelo, com valores negativos variando entre 10 a 100% aproximadamente. Outra parcela mais significativa, com U acima de 6,0 m/s, tem erros relativos entre 50 e 90%.

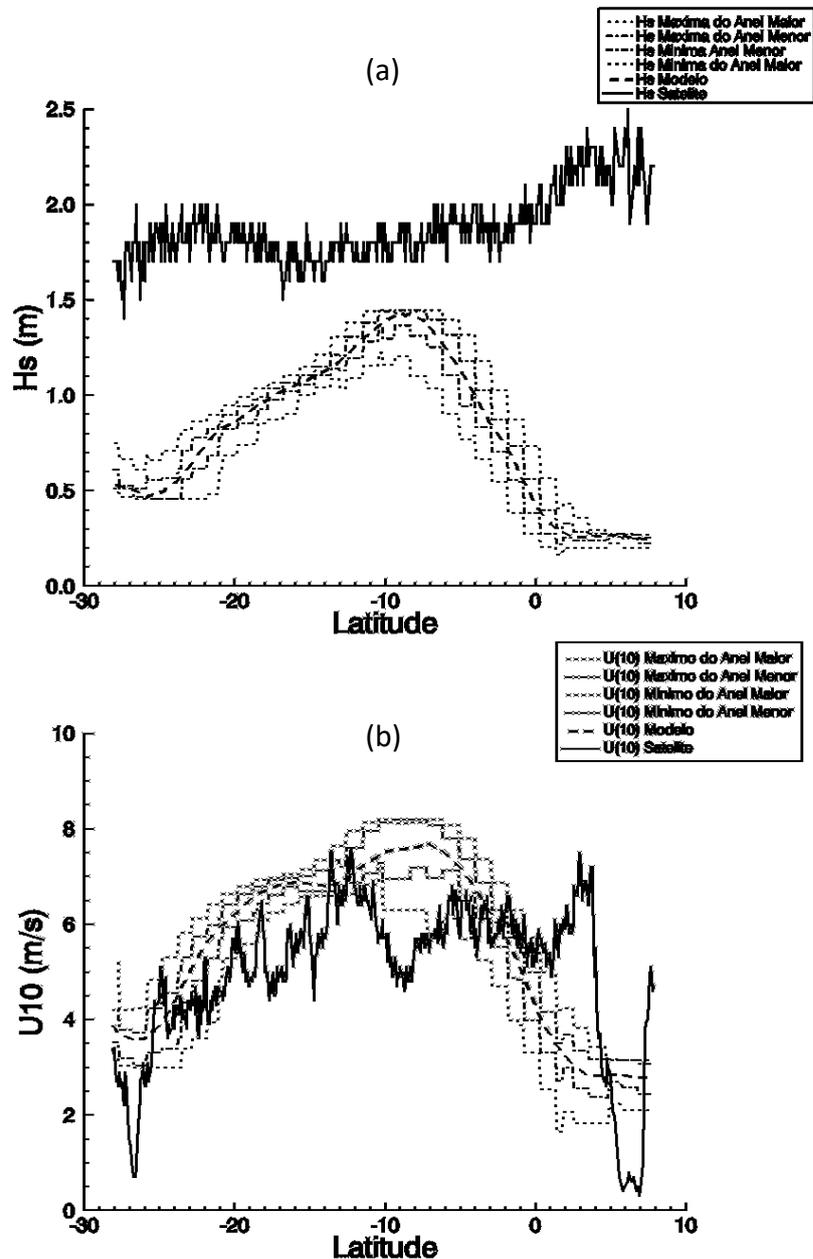
6.2.2.3. ANÁLISE DA ÓRBITA 7

As figuras 6.27 (a) e (b) retratam a variação das Alturas Significativas de ondas (Hs) e e Velocidade dos Ventos (U) entre o satélite T/P e modelo ao longo da órbita 7.

As informações de Hs do modelo e satélite se mostram diferentes tanto na forma quanto na intensidade. No que se refere à forma da distribuição, os dados T/P mostram um comportamento oscilatório em torno de valores paraticamente constantes com uma suave tendência de crescimento em latitudes acima de 10°. Já os valores do modelo, tem valores que se distribuem de forma semelhante a uma gaussiana. Os valores de Hs registrados pelo satélite variam entre 1,5 e 2,5 m, enquanto o modelo registrou valores entre 0,2 e abaixo de 1,5 m. Considerando os valores máximos e mínimos dos anéis menor e maior do modelo, estes se mostram próximos dos valores interpolados e não oferecem novas perspectivas de análise.

Já os valores de U das duas fontes de dados são mais concordantes com a característica dos valores do modelo se apresentarem mais elevados do que os do satélite em grande parte desta órbita. Na figura 6.28, onde os erros relativos do modelo e satélite são colocados em função da latitude, esse fato aparece mais nitidamente.

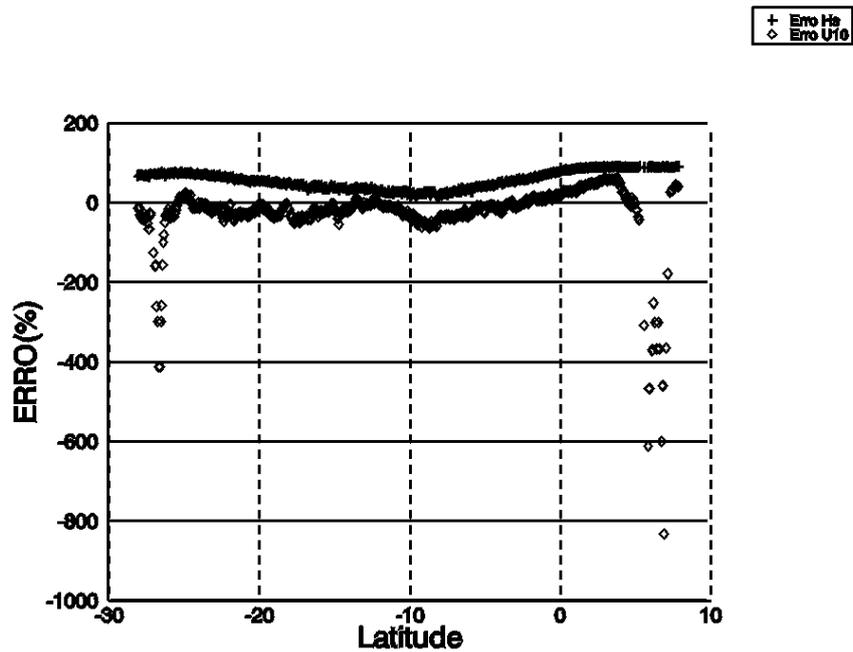
Figura 6.27 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 7.



Fonte: Produção do autor.

Nos extremos da órbita, com os respectivos valores de intensidade de ventos (U), apresentam os mais elevados erros relativos. Próximo à latitude -25° o erro atingiu pouco mais de -400% . Outro caso extremo, próximo à latitude 8° , o erro superou os -800% . Erros iguais ou próximos a zero se alternaram ao longo da parte central da órbita. Hs mostraram erros, sempre positivos, que oscilaram entre 50% , em torno da latitude -10° , e 100% nas extremidades da órbita.

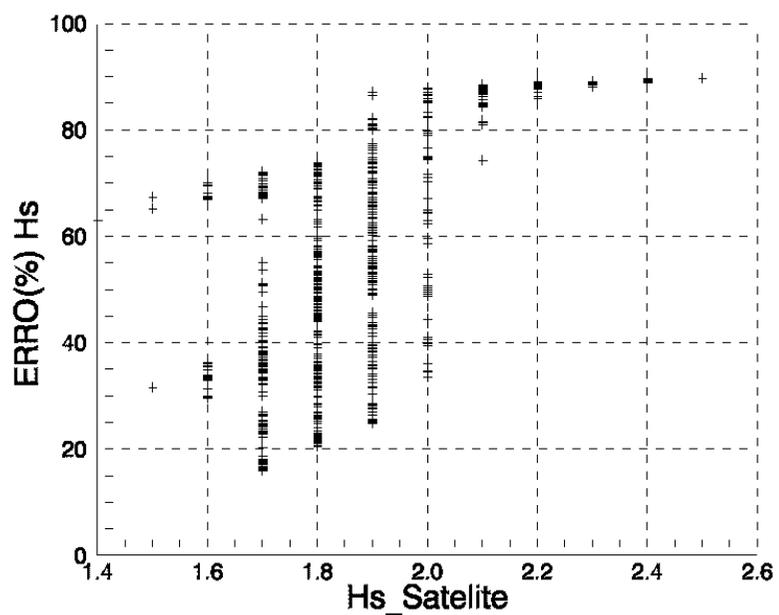
Figura 6.28 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 7.



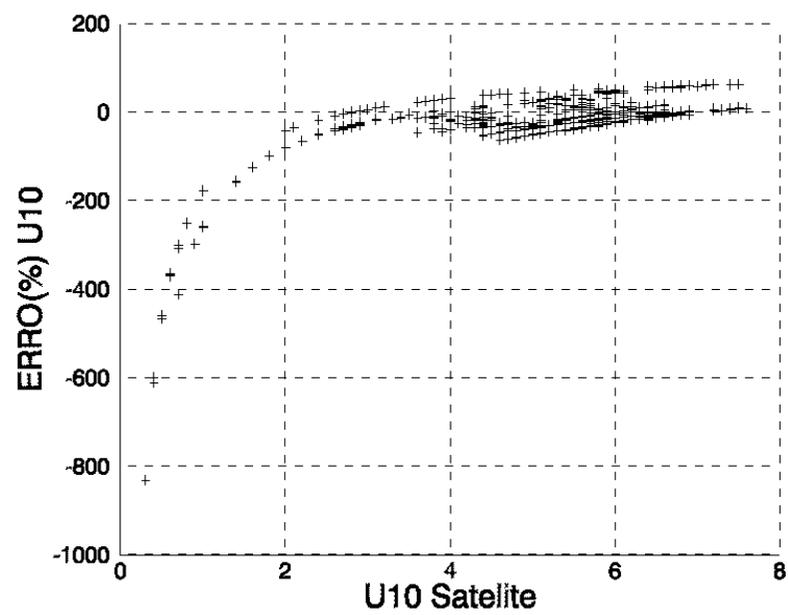
Fonte: Produção do autor.

As figuras 6.29 (a) e (b) colocam os erros relativos em função de Hs e U do satélite respectivamente. Os resultados mostram que Hs maiores do que 2,0 m apresentaram erros bem caracterizados próximos de 90%. Em sua maioria, Hs menores a este valor têm erros distribuídos de 20-80%. Os maiores erros relativos de U estão associados a ventos inferiores a 2,0 m/s.

Figura 6.29 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 7.



(a)

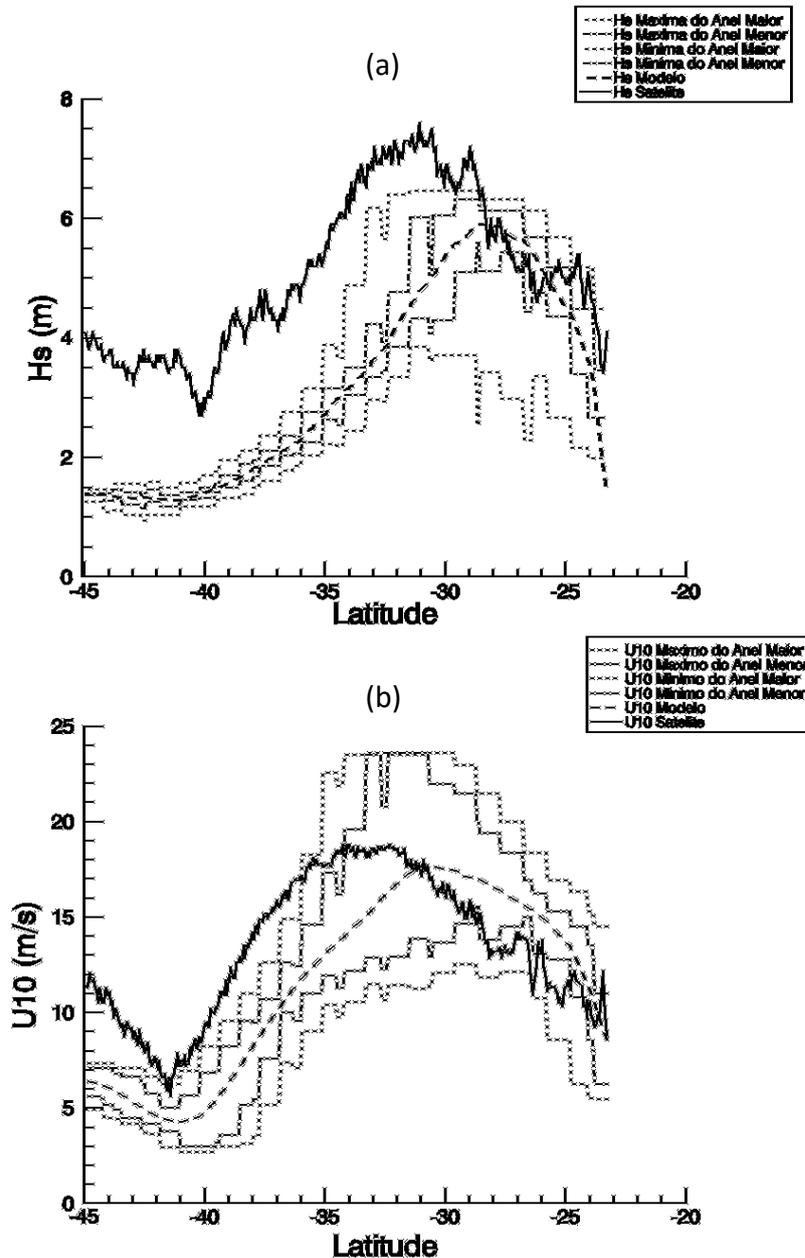


(b)

Fonte: Produção do autor.

6.2.2.4. ANÁLISE DA ÓRBITA 8

Figura 6.30 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 8.



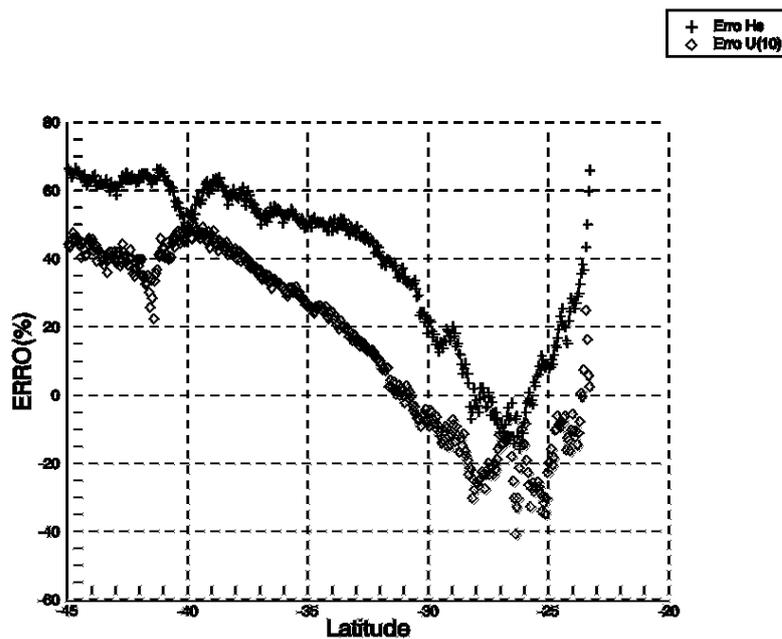
Fonte: Produção do autor.

Comparando a distribuição de valores de Hs do modelo e satélite (Figura 6.30(a)) estes apresentam formas coincidentes. No entanto os valores modelados se mostram defasados tanto na intensidade quanto na posição. O deslocamento do pico nas duas curvas reforça a hipótese da falha do modelo em localizar precisamente os eventos. Esta mesma característica é encontrada nos dados de U (Figura 6.30(b)) abrindo a

possibilidade desta deficiência ser importada do modelo de ventos utilizado pelo SAWMO.

Colocando os erros relativos de Hs e U em função da latitude (Figura 6.31) observa-se os maiores erros nas proximidades das bordas do modelo (-45° até -40°) e na porção da órbita que vai de encontro ao continente (próximo a -27°).

Figura 6.31 - Erro percentual $((SAT-MOD)/SAT) \times 100$, em função da latitude calculado para órbita 8



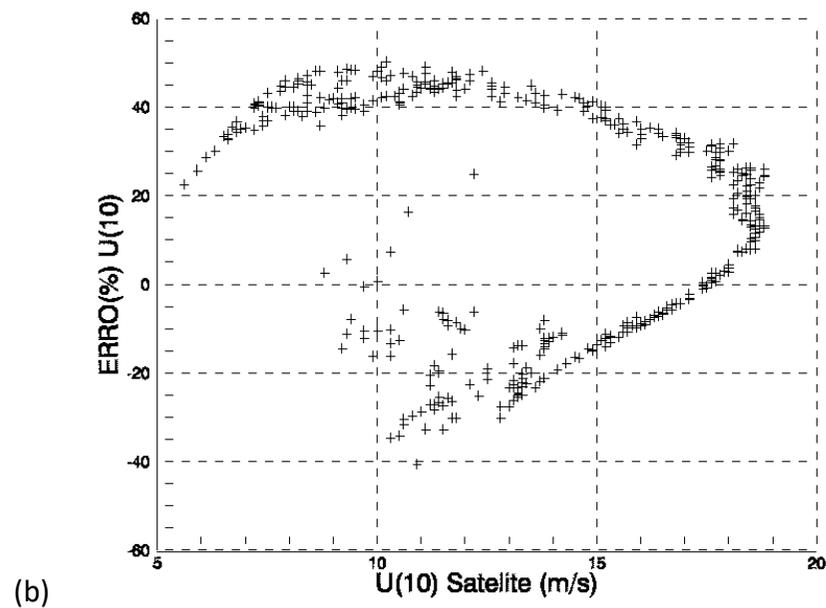
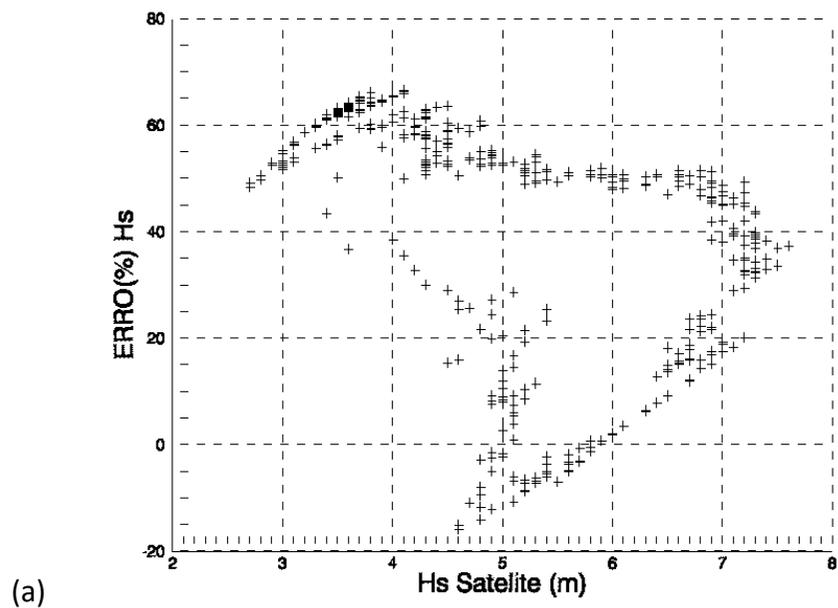
Fonte: Produção do autor.

Os menores erros estão na região tomada por eventos mais intensos entre -30° e -25°. Ressalta-se que os valores máximos dos anéis maior e menor do modelo de ventos são bem elevados em relação aos dados apresentados pelo satélite.

As figuras 6.32 (a) e (b) relatam os erros em função de Hs e U respectivamente. Os maiores erros de Hs, em torno de 65%, estão associados a Hs entre 3,0 e 4,0 m. Para Hs maiores do que 4,0 m o modelo mostra a tendência em subestimar, principalmente, ou superestimar seus valores em relação às informações do satélite. Na faixa de U que varia de 7,0 a 10,0 m/s foram encontrados os maiores erros, entre 40 e 50%. Para ventos acima de 10,0 m/s os erros obedecem o mesmo padrão encontrado nas ondas. Novamente abre-se a

possibilidade do SAWMO importar esta característica do modelo de ventos.

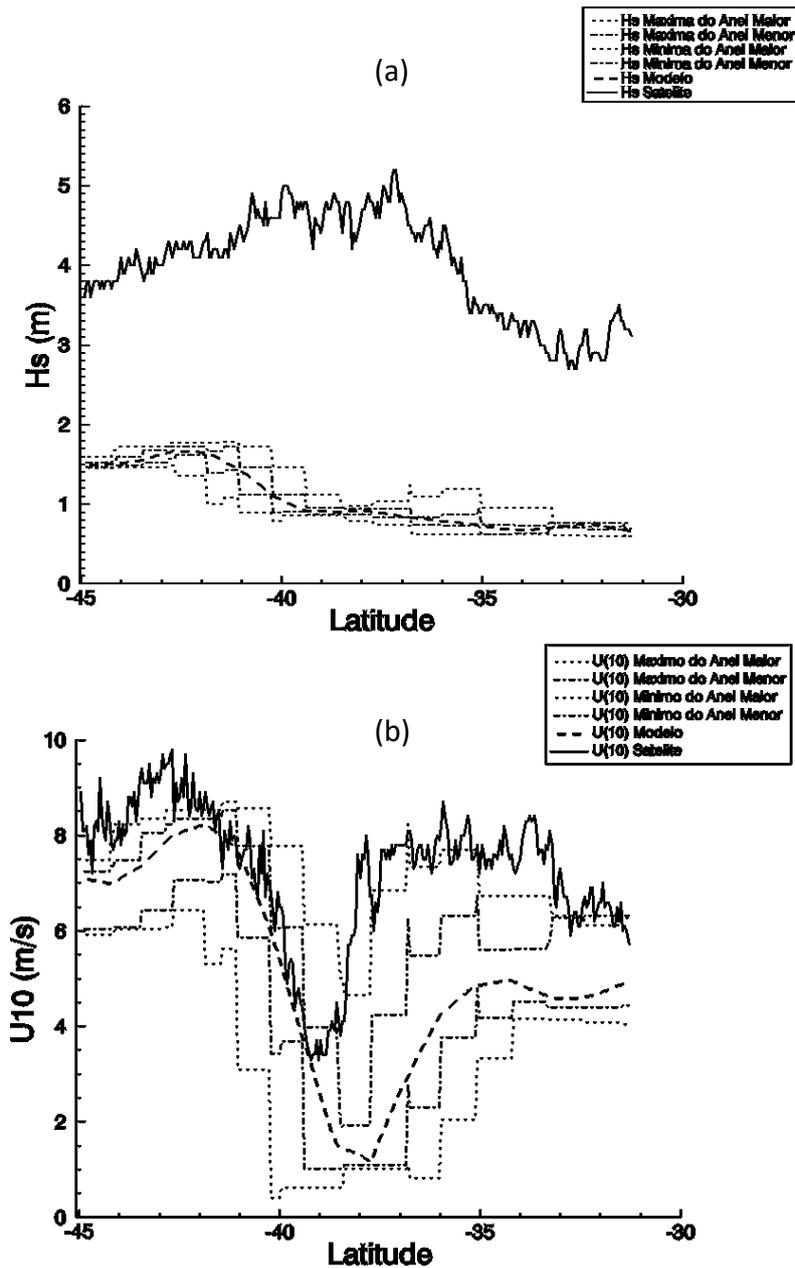
Figura 6.32(a) - Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 8.



Fonte: Produção do autor.

6.2.2.5. ANÁLISE DA ÓRBITA 9

Figura 6.33 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 9.



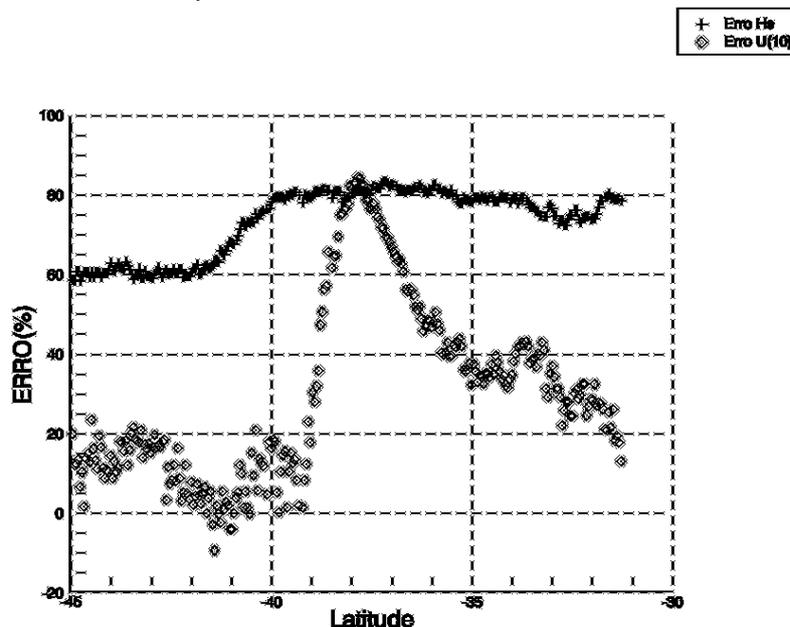
Fonte: Produção do autor.

Hs do modelo e satélite apresentados para esta órbita na figura 6.33(a) mostram valores modelados bem abaixo dos do satélite. Já a curva dos ventos apresentadas pelas duas fontes (Figura 6.33(b)) se mostram bem coerentes entre as latitudes -45° e -40° e diferindo somente em intensidade acima da latitude -40° . No entanto os valores máximos do

anel maior são compatíveis com os valores do satélite a partir desta mesma latitude.

Os erros percentuais de Hs, figura 6.34, mostram que entre as latitudes -45° e -42° os erros permaneceram em torno de 60%. A partir da latitude -42° houve uma rápida elevação dos erros para 80%, mantendo-se oscilante em torno deste valor a partir da latitude -40° . Nesta mesma figura estão retratado os erros dos ventos. O valor mais elevado associado a estes é na latitude aproximada de -38° . Entre as latitudes -45° e -40° os erros variaram em sua maioria de 0 a 20%. Acima da latitude -30° a porcentagem de erro oscilou entre 20 e 40%.

Figura 6.34 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 9



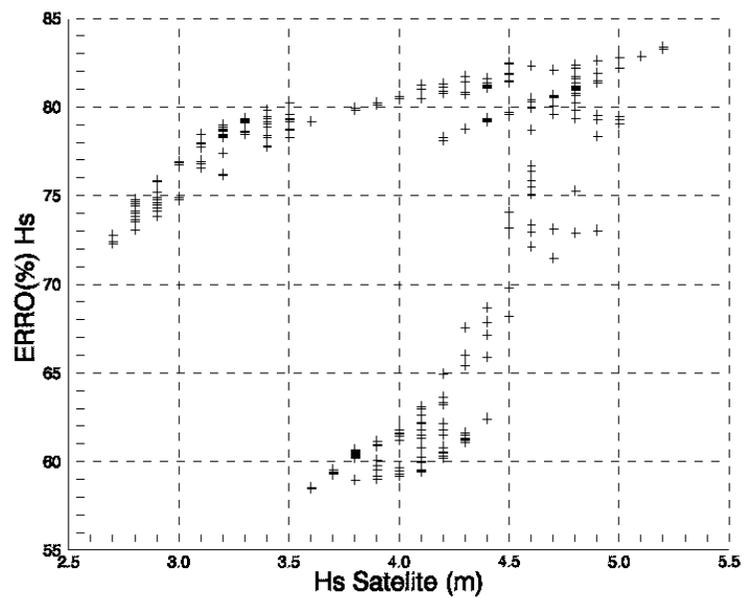
Fonte: Produção do autor.

Quando associados os erros de Hs do SAWMO e do satélite (Figura 6.35(a)), observa-se que os maiores erros estão associados a Hs maiores do que 4,5m. Hs entre 4,0 e 4,5m apresentam um grupo com erros entre 60 e 70%. Outro grupo menor têm erros próximos a 80%. Poucas Hs na faixa entre 3,5 e 4m foram observadas pelo satélite. A maioria destas apresentaram erros em torno de 60%. Um conjunto de Hs na faixa de 3,0 a 3,5m concentraram erros entre 75 e 80%. O grupo de Hs mais baixo nesta órbita, entre 2,5 e 3,0m mostrou erros entre 72 e 75%. A distribuição dos erros para esta órbita mostrou novamente a tendência do

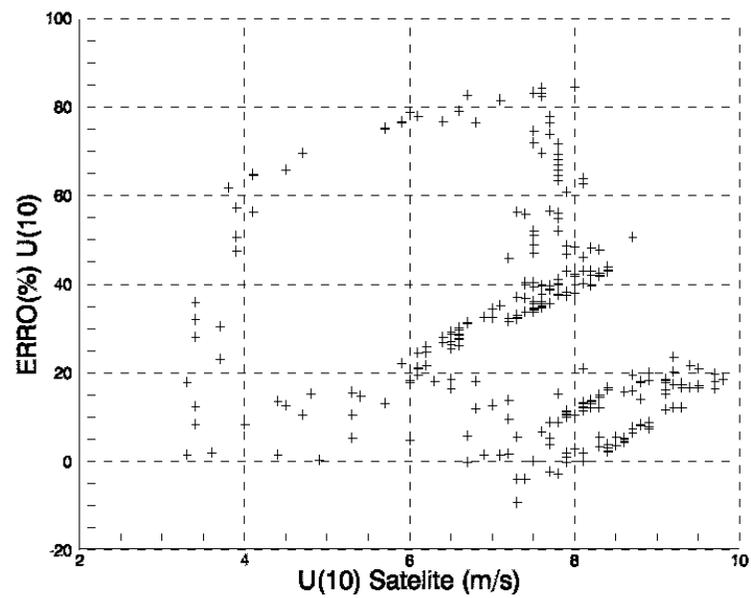
modelo relatar erros extremos para uma mesma faixa de ondas. Esta tendência é notada também na distribuição dos erros dos ventos (Figura 6.35(b)).

Ventos acima de 8m/s mostram erros concentrados entre 0 e 20%. Ventos na faixa de 6,0 a 8,0m/s apresentaram erros variando desde 0% até pouco acima de 80%. Este grupo de U já demonstra a mesma característica apontada para Hs. Esta característica é mais ressaltada na faixa de U entre 4,0 e 6,0m/s. A maior parte destas apresentam erros entre 0 e 20% e a outra erros entre 60 e 80%. Os ventos mais fracos, em torno de 3,0 a 4,0m/s, mostraram erros variando de 0 a 60%.

Figura 6.35 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 9.



(a)



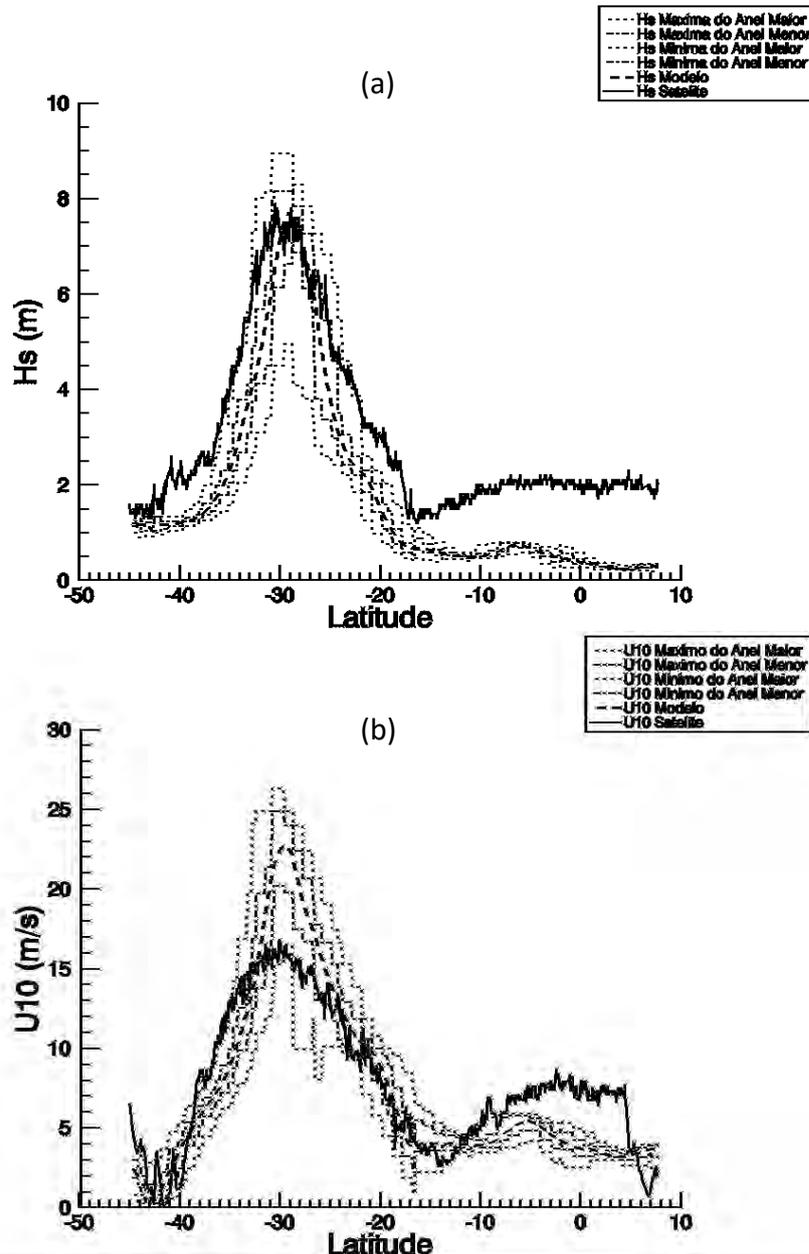
(b)

Fonte: Produção do autor.

6.2.2.6. ANÁLISE DA ÓRBITA 10

Esta órbita corta um núcleo de ondas intensas ocorridas no dia 30 de maio, caracterizado nas figuras 6.36(a) e (b), por um pico centrado em -30° de latitude.

Figura 6.36 - Hs(a) e velocidade dos ventos(b) registrados pelo satélite e modelo, e valores máximos e mínimos dos anéis maior e menor do modelo em função da latitude para a órbita 10.



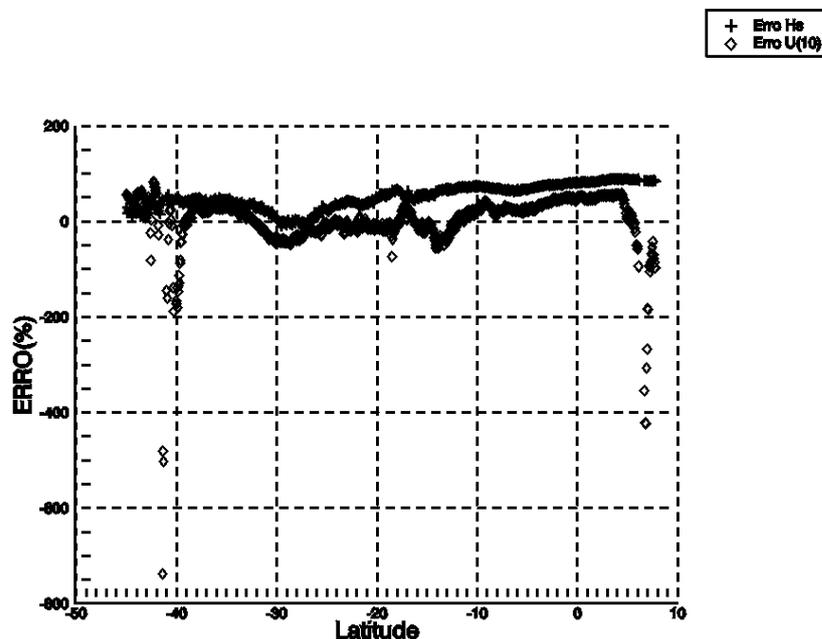
Fonte: Produção do autor.

Esta feliz coincidência possibilitou confrontar as informações do satélite e do modelo numa situação em que a simulação utiliza altas energias. Hs

das duas fontes de dados em função da latitude estão colocadas na figura 6.36(a).

Os dados de Hs se mostram bem concordantes, principalmente na região de ondas mais intensas. Na medida em que as informações se afastam do pico as diferenças se acentuam sem perderem características em comum. Há um crescente desencontro dos dados, a partir da latitude -10° , na medida em que a órbita se aproxima das fronteiras do modelo. Os dados de vento das duas fontes (Figura 6.36(b)) se mostram compatíveis de maneira geral. Mesmo o modelo apresentando um pico mais acentuado do que o satélite os valores mínimos do seu anel maior acompanham a observação do satélite. A proximidade da borda do modelo, a exemplo de Hs, acentua a diferença entre as duas fontes de dados, também a partir da latitude -10° . Os erros entre dados de satélite e modelo, em função da latitude, estão melhor discriminados na figura 6.37.

Figura 6.37 - Erro percentual $((\text{SAT}-\text{MOD})/\text{SAT})\times 100$, em função da latitude calculado para órbita 10.



Fonte: Produção do autor.

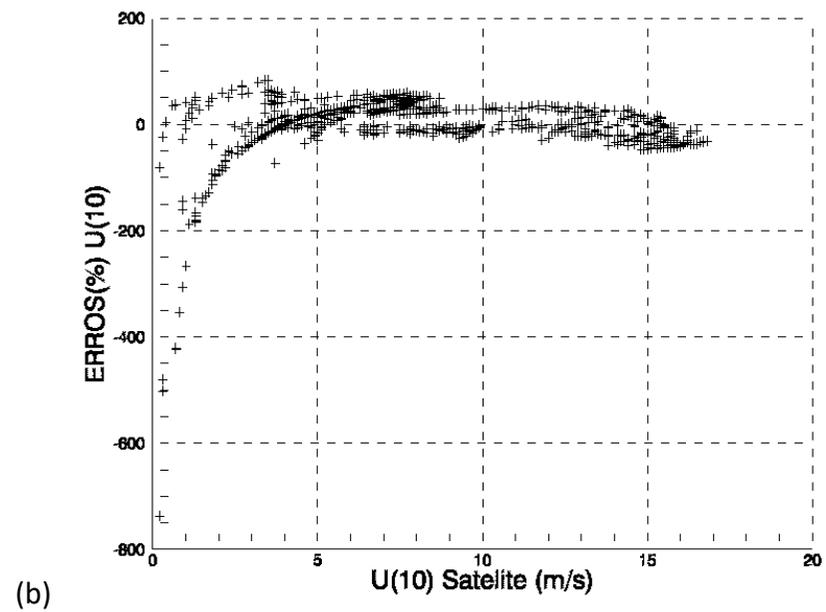
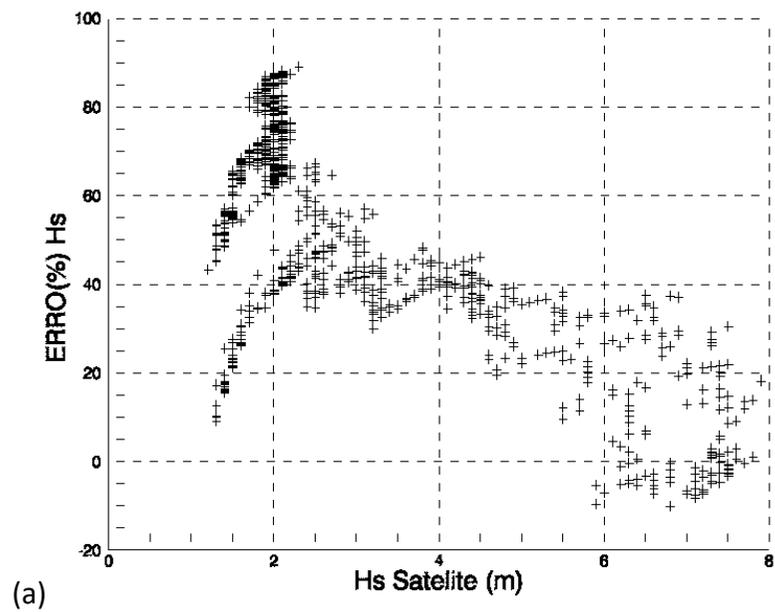
Os erros dos ventos mostram uma oscilação de valores mais intensos entre modelo e satélite. Nas extremidades da órbita o erro de U crescem

acentuadamente atingindo valores acima de 400% em alguns poucos casos.

Na maioria dos dados de U os erros oscilaram entre -50 a 50% com valores próximos de zero principalmente entre as latitudes -33° e -20° . Hs são mais concordantes pouco acima da latitude -30° . Até a latitude -10° os erros de Hs se mantiveram entre 0 e 50%, acima desta latitude os erros são crescente chegando perto dos 90%.

Os erros colocados em função de Hs do satélite (figura 6.38(a)) mostram que de maneira geral os maiores erros estão associados a Hs mais baixas. Hs acima de 6m têm erros entre -10% e 40%. Valores entre 4 e 6m têm erros entre 20% e 40%. Alturas Significativas abaixo de 4m e acima de 2,5m mostram erros variando entre aproximadamente 30% e 60%. Abaixo de 2,5 as Alturas significativas podem ser divididas em dois grupos. Um com erros entre 40 e 90% e outro com erros variando entre 10 e 50%.

Figura 6.38 - (a) Erro percentual em função da Hs do satélite. (b) Erro percentual em função da intensidade dos ventos do satélite. Órbita 10.



Fonte: Produção do autor.

7 CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

A utilização dos dados de Altura Significativa de Ondas e Velocidade Escalar do Vento extraídos do satélite altimétrico TOPEX/Poseidon, como subsídios na verificação do desempenho do modelo de previsão de ondas de segunda geração SAWMO, se mostrou aplicável. Comparação tão ampla, capaz de acompanhar eventos previstos pelo modelo em grande escala espacial, com informações tomadas em tempos próximos com tamanha proximidade da realidade e com custos baixos seria inviável atualmente sem o uso de plataformas orbitais. Ainda que longe do ideal em termos de resolução temporal para este tipo de análise, as cinco órbitas que cobriram os eventos do dia 27 e 30 de maio de 1997 foram suficientes para indicar o baixo desempenho do modelo em prever a realidade das ondas em regiões de fronteira, assim como em eventos de baixa energia. Ao mesmo tempo os dados do satélite possibilitaram a verificação da qualidade das informações do SAWMO em eventos de alta energia e ratificar a aplicabilidade do modelo no auxílio, principalmente, da população costeira e segurança da navegação e operações em alto mar. Entre os resultados obtidos, talvez o mais definitivo tenha sido a verificação de uma tendência a subestima dos valores Altura Significativa de Ondas do modelo em relação às informações do satélite. Estreitamente ligado a este fato está o campo de ventos que alimenta o SAWMO.

Os diagnósticos apontados neste trabalho poderão ser de grande valia como base de orientação à melhoria do desempenho do modelo e ampliação de sua utilização. O trabalho demonstra a viabilidade do uso de dados TOPEX em análises quantitativas na implementação de ajustes específicos do modelo, desde que se utilize um montante de informações suficientes para identificação de padrões. A seguir os apontamentos feitos aqui serão abordados mais detalhadamente.

7.1. QUANTO A RESOLUÇÃO TEMPORAL DO SATÉLITE

A abordagem empregada neste trabalho, comparando-se órbita a órbita as informações do satélite e modelo, se mostrou valiosa pela sua relativa

simplicidade. A execução se fundamentou no uso de um programa computacional capaz de interpolar os dados do modelo no tempo e no espaço. Outras alternativas, como colocar os dados do satélite em grade em uniformidade com as informações do modelo, demandariam no mínimo um gasto computacional bem maior. Por outro lado a sincronicidade entre a passagem do satélite e o evento nem sempre é possível pois fica dependente do horário de cobertura do satélite. Como já foi visto, o satélite TOPEX/Poseidon passa sobre o mesmo ponto somente a cada 10 dias, aproximadamente. Assim acaba se estabelecendo uma relação na qual quanto menor a área de estudo menor a probabilidade de cobertura no tempo desejado. Para remediar este fato, diminuindo o tempo de cobertura de uma determinada região, a integração de dados de varias plataformas seria o mais viável. Futuramente mais satélites operando em sincronia, com já tem sido feito com a série ERS, resolveria em grande parte a resolução temporal das informações.

7.2. QUANTO AS REGIÕES DE FRONTEIRA

Os resultados indicam problemas do modelo em prever eventos em regiões de fronteira. Os indícios mais fortes para se chegar a essa conclusão foram observados nas órbitas 1, do dia 27, e 6, do dia 30. Estas órbitas se localizam numa região que pode ser considerada de fronteira. Tanto no dia 27 como no dia 30 os erros de Altura Significativa e Velocidade Escalar do Vento encontrados para estas órbitas foram altos (Figuras 6.6 e 6.25). As órbitas 2 e 7 têm seus extremos limitados pelas fronteiras do modelo. Acompanhando os erros na Altura Singnificativa em função da latitude nessas órbitas (Figuras 6.9 e 6.28) identifica-se um padrão comum. A curva dos erros têm a forma côncava com um crescimento dos erros do centro para a extremidade das órbitas. O erro dos ventos mostra este mesmo padrão de forma mais acentuada. Erros maiores se mostram associados a regiões de fronteiras nas demais órbitas de forma menos acentuada conforme a presença de eventos mais intensos.

7.3. QUANTO A ENERGIA

Os gráficos de erro dos ventos em função dos ventos do satélite (Gráficos 6.7(b), 6.10(b), 6.13(b), 6.16(b), 6.19(b), 6.26(b), 6.29(b), 6.38(b)) indicam a tendência dos erros aumentarem com a diminuição da intensidade, ou seja, em 8 das 10 órbitas analisadas. Todos os gráficos referentes ao evento do dia 27, no qual havia menos energia, mostraram essa característica. Já os gráficos referentes ao evento do dia 30, que apresentou ventos mais intensos, essa tendência não foi sempre verificada. Embora não tenha sido possível se obter os valores definitivos de intensidade de vento associados aos maiores valores de erro, os resultados obtidos sugerem que os maiores desvios ocorrem para valores de ventos abaixo de 4m/s. Gráficos semelhantes de Altura Significativa de Ondas não apresentaram um padrão que pudesse associar erros maiores ou menores a determinadas altura de ondas. No entanto identificaram-se erros próximos ou iguais a zero em regiões com atividade de ondas maiores. Destaca-se como exemplo os gráficos 6.37 e 6.38(a), referentes à órbita 10, que cobriu o centro da área de intensas ondas ocorridas no dia 30.

7.4. QUANTO A SUBESTIMA DO MODELO

Os valores de Altura Significativa de Ondas do SAWMO se mostraram predominantemente inferiores aos retratados pelo satélite, principalmente quando estavam envolvidos valores mais baixos de ventos e conseqüentemente de ondas. Os resultados apresentados neste trabalho não indicam claramente as causas mais prováveis da subestima, principalmente dos valores de Altura Significativa. No entanto, em alguns casos, mesmo existindo certa coerência entre os dados de ventos das duas fontes os resultados de Hs do modelo se mostraram bem inferiores (Figuras 6.8, 6.27, 6.33). Essa pode ser uma indicação da dificuldade do modelo em reproduzir ondas que se propagam por grandes extensões (vagas), o que é comum em modelos de Segunda geração por não calcular diretamente as interações não lineares entre vagas e marulho. Em outros casos, como em regiões de fronteira, o modelo não tem como

considerar ondas que são geradas fora de sua área de atuação e propagam para dentro de seus limites.

7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pontos de grade do anel maior da grade do SAWMO, visualizado nas figuras 6.5, 6.8, 6.11, 6.14, 6.17, 6.24, 6.27, 6.30, 6.33 e 6.36, indicam que um interpolador que considere os pontos deste anel em seus cálculos pode trazer melhores resultados à comparação entre modelo e satélite.

Os dados da órbita 8 (Figura 6.30) sugerem que o SAWMO pode prever eventos com falhas de localização espacial.

Como sugestões a futuros trabalhos, o mais imediato seria utilizar dados de vento oriundos de plataformas orbitais no aperfeiçoamento das informações utilizadas pelo SAWMO. Outra linha a ser seguida é comparar o espectro de ondas do modelo, e não somente baseando-se em H_s , com o espectro construído a partir de dados de satélites altimétricos e bóias. A comparação dos espectros provavelmente possibilitaria a quantificação de alguns ajustes do modelo. Seria interessante também verificar a aplicabilidade da metodologia empregada neste trabalho em previsões nas quais o SAWMO trabalhe com maior resolução de grade. Essa possibilidade de operação já é implementada e funciona aplicada a áreas menores do que a estudada neste trabalho. Como complementação deste trabalho seria útil a comparação das informações obtidas com outra base de dados. As bóias são as fontes mais indicadas pela precisão e número de informações. Visando a identificação de áreas nas quais o modelo apresenta maiores falhas na previsão sugere-se o cruzamento da média de dez dias de previsão de U e H_s para o Atlântico Sul com as mesmas informações obtidas pelo satélite TOPEX/Poseidon interpoladas dentro do mesmo período e área. Seria utilizado para isso um programa de SIG (Sistema de Informação Geográfica) possibilitando, além da identificação de áreas com maiores diferenças entre as bases de dados, regiões associadas a diferentes níveis de desvio padrão, EM, RMSE e outros parâmetros estatísticos. A climatologia para aproximadamente cinco anos, apresentada neste

trabalho foi pouco explorada por não ser este o foco principal do trabalho. Estas informações, além de atualizadas, podem ser melhor aproveitadas. Inicialmente pode ser adotada a metodologia de Carter (1992) na qual o autor utiliza dados de Hs dos satélites Geosat e ERS-1 na construção e comparação das climatologias de janeiro a junho de 1992.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARNOLD, D.V. *et al.* **Measurements of eletromagnetic bias at Ku and C bands**. J. Geophys. Res., vol 100,NO C1, 969-980, 1995.

BISHOP, J.M. **Applied Oceanography** . A Wiley-Intercience Publication , New York , 1984.

BREIVIK, L., REISTAD, M. **Assimilation of ERS-1 Altimeter Wave Heights in na Operational Numerical Wave Model** . Weather and Forecasting.,9 : 440-451, 1994.

CANDELLA, R.N. **Estudo de Casos de ondas no Atlântico Sul Através de Modelagem Numérica**. Rio de Janeiro. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

CARTER, D. J. T. Global Wave Height Climatologies From ERS-1 Altimeter Data, and Comparison With Those From Geosat. In: Proccedings First ERS-1 Symposium, Cannes, 1992. **Anais**. ESA, 1993. SP-359, p.489-492.

CLANCY, R.M. *et al.* **The Fleet Numerical Oceanography Center Global Spectral Ocean Wave Model** . Bull.Amer. Meteor. Soc.,67 : 498-512 ,1986.

COTTON, P.D. and CARTER, D.J.T. **Cross calibration of TOPEX, ERS-1 and GEOSAT waves heights**. J. Geographys. Res., vol 99, NO C12, 25025 – 25033, 1994.

FRANCO, D.M.P. . **Um modelo de Previsão de Ondas de Superfície do Mar Geradas Pelo Vento** . 145p. (INPE-5970-TDI/574). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

FU, I.I., *et al.* **TOPEX/Poseidon Mission Overview** . J. Phys. Oceanogr.,99 : 24369-24382 ,1994.

GALZMANN, R.E. *et al.* **Evaluating models of sea state in satellite altimetry**. J. Geophys. Res.,99 : NO C6, 12581-12591, 1994.

GELCI, R. *et al.* Bull inform. Comitê Central Oceanogr. Etude Côtes 8, 170-187, 1956.

GELCI, R. *et al.* **Prevision de la houle. La méthode des densités spectroangulares**. Bull inform. Comitê Central Oceanogr. Etude Côtes 9, 416-435, 1957.

- GUILLAUME, A. **Statistical Tests for the Comparison of Surface Gravity Wave Spectra with Application to Model Validation** . J. Atmosph. Ocean. Tech.,7 :551-567 ,1990.
- HASSELMANN, K. *et al.*: **Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)**. Duet. Hydrog. Zeit., A 12, 95, 1973.
- HASSELMANN, K. *et al.* **A parametric wave prediction model**. J. Phys. Oceanogr., 6, 200 – 228,
- HASSELMANN, S; HASSELMANN, K., **Computations and parameterizations of nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum**. – Part 1, J. Phys. Oceanogr., 15 : 1369 – 1377, 1985.
- HASSELMANN, *et al.* **Computations and parameterizations of nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 2: Parameterization of nonlinear energy transfer for applications in wave models**. J. Phys. Oceanogr., 15 : 1378 – 1391, 1985.
- HAYNE, G.S., *et al.* **The Corrections for Significant Wave Height and altitude effects in the TOPEX Radar Altimeter** . J. Phys. Oceanogr.,99 : 24941-24956 ,1994.
- INNOCENTINI, V.; NETO, E.S.C., **The SAWMO model: A second generation wave model applied to the south atlantic**. Technical Report 01-94, Instituto de Pesquisas Meteorológicas, Bauru, Brazil, 1994.
- INNOCENTINI, V. **The gorbush storm wave activity simulated by SAWMO model**. Technical Report 03-95, Instituto de Pesquisas Meteorológicas, Bauru, Brazil, 1995.
- JANSSEN, P.A.E.M., *et al.* **Hindcasts and Data Assimilation Studies With the WAM Model During the Seasat Period** . J. Geophys. Res.,94 : 973-993,1989.
- JOLLY, G. Disponível : site WWW.satobsys.co.uk/altimetry , consultado em 04/03/99.
- KHANDEKAR, M.L. **Operational Analysis and Prediction of Ocean Wind Waves** . Springer-Verlag , New York, 1989. Cap.2,3,4,5,p.6-98.
- KHANDEKAR, M.L.; LALBEHARRY, R. . **An Evaluation of Enviroment Canad's Operational Ocean Wave Model Based on Moored Buoy Data** . Weather and Forecasting, 11 : 137-152,1996.
- KOMEN, G.J. *et al.* **Dynamics and modelling of ocean waves**. Cambridge University Press, 1994.
- LEFEVRE, J. M., *et al.* **A significant wave height dependent funtion for TOPEX/POSEIDON wind speed retrieval**. J. Geophys. Res., 99, NO C12, 25035-25049, 1994.

LONGUET-HIGGINS, M.S. **On the statistical distribution of the heights of the sea waves.** Journal Marine Research, vol 11, 245 – 266, 1952.

MCLELLAN, H. J. **Elements of Physical Oceanography.** Pergamon Press, 1977.

NEUMANN, G.; PIERSON, W.J. **Principles of Physical Oceanography.** Prentice Hall, USA, 545, 272 – 275, 1966.

PETERSON, R.G.; STRAMMA, L., **Upper level circulation.** Progress in Oceanography, 26: 1 –73 (1991).

PHILLIPS, O. M. **The equilibrium range in the spectrum of wind generated water waves.** Jor. Fluid. Mech., 4, 426-434- 1958.

PICKARD, G.L.; POND,S. **Introductory Dynamic Oceanography .** Pergamon Press , Oxford , 1978.

PIERSON, W.J. Jr.; MASKOWITZ, L. **A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii.** J. Geophys. Res. 69, : 5181, 1964.

PODAAC. Disponível : site <http://podaac-www.jpl.nasa.gov/> , consultado em 08/10/97.

ROBINSON, I.S. **Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists.** Ellis Horwood Limited, 1985.

SINCLAIR, M. R. **Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology.** Weather and Forecasting, vol. 12, NO 03, 595-612, 1997.

STAABS, C.; BAUER, E. **Statistical comparision of global significant wave heights from TOPEX and ERS-1 altimeter and from operational wave model wam.** Physical Chemistry Earth, vol. 23, NO 56, 581-585, 1998.

STEWART, R.H. **Methodos of Satellite Oceanography.** University of California Press, 1985.

SVERDRUP, H.U.; MUNK, W.H.. **Wind sea and swell: theory of relations for forecasting.** H.O. Pub. 601, US Navy Hydrographic Office, Washington, DC, 44p, 1947.

WITTER, D.L.; CHELTON, D.B. **A GEOSAT altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development.** J. Geophys. Res., 96 : 8853-8860. 1991.

YOUNG , I. R.; HOLLAND,G.J. **Atlas of the Ocean :Wind and Wave climate .**Pergamon , Austrália ,1996.

YOUNG, I.R. An intercomparison of GEOSAT, TOPEX and ERS-1 measurements of wind speed and wave height. Ocean Engineering, 26, 67-81, 1999.