

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Meteorologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**



Dissertação

**Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e águas  
adjacentes do Oceano Atlântico Sul**

**Dayanis Montero Borges**

Pelotas, 2019

**Dayanis Montero Borges**

**Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr Marcelo Félix Alonso

Coorientador: Dr. Humberto Lázaro Varona González

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

B732s Borges, Dayanis Montero

Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e águas adjacentes do oceano Atlântico Sul / Dayanis Montero Borges ; Marcelo Félix Alonso, orientador ; Humberto Lázaro Varona Gozález, coorientador. — Pelotas, 2019.

94 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Modelagem numérica. 2. Ressacas. 3. Costa sul do Brasil. I. Alonso, Marcelo Félix, orient. II. Gozález, Humberto Lázaro Varona, coorient. III. Título.

CDD : 551.524635

Elaborada por Ubirajara Buddin Cruz CRB: 10/901

Dayanis Montero Borges

Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e águas adjacentes  
do Oceano Atlântico Sul

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.

Pelotas, 27 de fevereiro de 2019.

Banca examinadora:

.....Prof.  
Dr. Marcelo Félix Alonso (Orientador). Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

.....Prof.  
Dr. André Becker Nunes. Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

.....Prof.  
Dr. Leonardo Calvetti. Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (USP).

.....Prof.  
Dr. Douglas Lindemann. Doutor em Meteorologia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).



## **Agradecimentos**

A meus pais, são a minha força para seguir adiante.

A meu Orientador Marcelo pela paciência e guia em todo o trabalho feito.

A coordenação da Pós-Graduação em Meteorologia, pela ajuda que brinda a todos os estudantes do programa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos fornecida.

## Resumo

BORGES, Dayanis Montero. **Sistema de previsão de ondas oceânicas no litoral sul do Brasil e água adjacentes do Oceano Atlântico Sul**. 2019. 94 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema de previsão de ondas para as águas profundas do Oceano Atlântico sul e águas rasas do litoral de Rio Grande do Sul mediante o acoplamento entre o modelo *Global Forecast System* (GFS) e dois modelos de ondas oceânicas: *WaveWatch III* (WW3) e *Simulating Waves Nearshore* (SWAN). Na primeira etapa do trabalho fez-se uma análise sinótica das condições do vento, no mar adjacente à costa sul do Brasil, que geram ressacas. Analisaram-se os possíveis erros introduzidos aos modelos de ondas pelo GFS a partir dos registros de vento das bóias. Os campos de ondas no Oceano Atlântico Sul e no litoral gaúcho foram simulados a partir dos modelos WW3 e SWAN, e avaliados comparando-se os dados simulados com os registros de ondógrafos e bóias na área de estudo. O período simulado corresponde à passagem de uma frente fria e a fortes gradientes de pressão entre um sistema de alta e baixa pressão, gerando fortes ressacas entre os dias 22-28 de março do 2016. O WW3 teve melhor comportamento em situações de forte ressacas e perto da área de geração delas, enquanto o SWAN foi melhor no prognostico de ondas fracas e afastadas da área de geração.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica; ressacas; costa sul do Brasil.

## **Abstract**

BORGES, Dayanis Montero. **Forecasting system of ocean waves on the south coast of Brazil and adjacent water of the South Atlantic Ocean**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

This work aims to developed a wave prediction system for the deep waters of the South Atlantic Ocean and shallow waters off the coast of Rio Grande do Sul through the coupling between the GFS model and two ocean wave models (WW3 and SWAN). In the first stage of the work was made a synoptic analysis of the wind conditions that generate intense waves in the sea adjacent to the south coast of Brazil. It was analyze the possible errors introduced to the wave models by the GFS from the wind records of the buoys. The wave field was simulated in the South Atlantic Ocean and the coast of Rio Grande with the WW3 and SWAN models respectively. The outputs of the wave models were evaluated with the registers of waveforms and buoys of the area. The simulated period corresponds to the passage of a cold front and strong pressure gradients between a high and low pressure system, this generates intense waves between days 22-28 march 2016. WW3 had better in intense waves situations and near the generation area, while SWAN was better in the weak wave forecast and away from the generation area.

**Keywords:** Numerical modeling; surf; south coast of Brazil.

## Lista de Figuras

Figura 1	Perfil vertical das ondas oceânicas idealizadas, mostrando seus elementos .....	21
Figura 2	Formas de perfis superficiais para diferentes ondas gravitacionais progressivas.....	33
Figura 3	Mapa da costa da região sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul de interesse.....	37
Figura 4	Média mensal do vento em 1000hPa (m/s) e pressão ao nível do mar (hPa) para os meses de janeiro, abril, julho e outubro respectivamente.....	38
Figura 5	Mapa com as ubicações geográfica dos três domínios experimentos usados para determinara melhor configuração para as simulações do modelo WW3.....	47
Figura 6	Configurações dos domínios de simulações com os modelos WW3 e SWAN respectivamente, assim como a evolução no tempo e espaço da passagem da frente fria e de sistemas altas e baixas pressões.....	49
Figura 7	Mapa com as ubiquações geográficas das bóias e ondógrafos oceanográficos usados na avaliação do campo de ondas e vento simulado pelos modelos WRF, WW3 e SWAN. ....	51
Figura 8	PNMM (hPa) em linhas de azul, linhas de corrente em 1000 hPa em cinza, correspondentes aos dias 25 (A) e 26 (B) de março do 2016 às 00UTC.....	56
Figura 9	Imagens de satélites correspondentes aos dias 25 (A) e 26 (B) de março do 2016 às 00UTC.....	56

Figura 10	Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 25 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC ( <b>A</b> , <b>B</b> , <b>C</b> e <b>D</b> ) respectivamente.....	57
Figura 11	Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 26 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC ( <b>A</b> , <b>B</b> , <b>C</b> e <b>D</b> ) respectivamente.....	58
Figura 12	PNMM (hPa) em linhas de azul, linhas de corrente em 1000 hPa em cinza, correspondentes aos dias 27 ( <b>A</b> ) e 28 ( <b>B</b> ) de março do 2016 às 00UTC.....	59
Figura 13	Imagens de satélites correspondentes aos dias 27 ( <b>A</b> ) e 28 ( <b>B</b> ) de março do 2016 às 00UTC.....	59
Figura 14	Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 27 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC ( <b>A</b> , <b>B</b> , <b>C</b> e <b>D</b> ) respectivamente.....	60
Figura 15	Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 28 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC ( <b>A</b> , <b>B</b> , <b>C</b> e <b>D</b> ) respectivamente.....	61
Figura 16	Variabilidade temporal do campo de vento do GFS (vermelho) e o registros (azul) na bóia de Rio Grande.....	62
Figura 17	Variabilidade temporal do campo de vento do GFS (vermelho) e o registros (azul) na bóia de Santos.....	63
Figura 18	Distribuição espacial da Hs (m) no dia 28 de março do 2016 às 23UTC para o Dom2_ww3.....	64
Figura 19	Distribuição espacial da Hs (m) no dia 28 de março do 2016 às 23UTC para o Dom3_ww3.....	65
Figura 20	Evolução temporária dos registros de Hs (m) na bóia de Rio Grande, Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	66
Figura 21	Evolução temporária dos registros de Tp (s) na bóia de Rio Grande, Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	68
Figura 22	Evolução temporária dos registros de Hs (m) na bóia de Santos, Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	69
Figura 23	Evolução temporária dos registros de Tp (s) na bóia de Santos, Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	70
Figura 24	Evolução temporária dos registros de Hs (m), simulado e registrado no ondógrafo de Cassino.....	74
Figura 25	Evolução temporária dos registros de Tp (s) no ondógrafo de	

Figura 26	Cassino, Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	74
	Evolução temporária dos registros de Hs (m) no ondógrafo de	
Figura 27	Tramandaí Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	75
	Evolução temporária dos registros de Tp (s) no ondógrafo de	
Figura 28	Tramandaí Dom2_ww3 e Dom3_ww3.....	76
	Distribuição espacial do campo de Hs (m) e direção média	
	(grau) simulado pelo modelo WW3 nos dias 25 (A), 26 (B), 27	
Figura 29	(c) e 28 (D) de março do 2016 às 00UTC .....	78
	Evolução temporária dos registros de Hs (m) no ondógrafo de	
Figura 30	Cassino, Dom2_WW3 e SWAN.....	80
	Evolução temporária dos registros de Hs (m) no ondógrafo de	
Figura 31	Tramandaí, Dom2_WW3 e Dom3_WW3.....	80
	Distribuição espacial do campo de Hs (m) simulado pelo	
	modelo SWAN nos dias 25 e 26 às 00 e 12UTC de março do	83
Figura 32	2016 respectivamente (A, B, C e D) .....	
	Distribuição espacial do campo de Hs (m) simulado pelo	
	modelo SWAN nos dias 27 e 28 às 00 e 12UTC de março do	
	2016 respectivamente (A, B, C e D).....	84

## Lista de Tabelas

Tabela 1	Classificação de ondas atendendo a profundidade relativa.....	25
Tabela 2	Relação entre os elementos de onda e a profundidade na identificação das posições das fronteiras entre as zonas de evolução.....	27
Tabela 3	Física das simulações com o modelo WW3.....	45
Tabela 4	Bóias oceanográficas que são empregadas na avaliação do campo de vento e ondas oceânicas simulado e suas respectivas coordenadas geográficas.....	51
Tabela 5	Ondógrafos que são empregados na avaliação do campo de ondas simulado e suas respectivas coordenadas geográficas..	51
Tabela 6	Índices estatísticos das saídas do WW3 nas bóias de Rio Grande e Santos no período de 25-28 de março do 2016.....	71
Tabela 7	Índices estatísticos da simulação da Hs para a bóia de Rio Grade nos períodos de 24, 48 e 72h .....	72
Tabela 8	Índices estatísticos das simulação da Hs para a bóia de Santos nos período de 24, 48 e 72h.....	73
Tabela 9	Índices estatístico das saídas do WW3 nos ondógrafos de Cassino (Cs) e Tramandaí no período de 25-28 de março do 2016.....	77
Tabela 10	Índices estatísticos das saídas do SWAN nos ondógrafos de Cassino (Cs) e Tramandaí (Tm) no período de 25-28 de março do 2016.....	81
Tabela 11	Resumo dos erros das simulações com os modelos WW3 e SWAN no ondógrafo de Cassino.	82
Tabela 12	Resumo dos erros das simulações com os modelos WW3 e SWAN no ondógrafo de Tramandaí.....	82

### Lista de abreviaturas e siglas

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Coeficiente de Correlação
CEM	<i>Coastal Engineering Manual</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DIA	<i>Discret Interaction Approximation</i>
DP	Desvio Padrão
DPO	Desviação Padrão dos dados Observados
DPP	Desviação Padrão dos dados Prognosticados
DR	Dispersão Relativa
Cs	Cassino
EA	Erro Absoluto
ENOS	El Niño Oscilação do Sul
EQM	Erro Quadrático Médio
ER	Erro Relativo
ERG	Elevado de Rio Grande
ETOPO1	<i>Global 1 Arc-minute Ocean Depth and Land Elevation</i>
GEBCO	General Bathymetric Charts of the Oceans
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GRADS	<i>The Grid Analysis and Display System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LAM	Limited-area Atmospheric Model
MEA	Média do Erro Absoluto
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NMM	Nível Médio do Mar
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>



OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PNMM	Pressão a Nível Médio do Mar
REFDIF	<i>Combined Refraction/Diffraction Model</i>
SPM	<i>Shore Protection Manual</i>
SWAN	<i>Simulating Wave Nearshore</i>
SWM	<i>Ocean Surface Wave Model</i>
Tm	Tramandaí
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
USP	Universidade de São Paulo
UTC	<i>Universal Time Coordinate</i>
VCAN	Vórtices Ciclônico de Altos Níveis
WAM	<i>Ocean Waves Model</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WW3	<i>WaveWatch III</i>

## Lista de símbolos

### Maiúsculas Romanas

H	Altura da onda
L	Comprimento da onda
T <sub>p</sub>	Período pico da onda (s)
H/L	Declive da onda
C	Velocidade de fase da onda
H <sub>s</sub>	Altura significativa da onda (m)
E	Energia total do espectro unidimensional
U, V	Componentes de velocidade do fluido
F(t, x, y, σ, θ)	Espectro de frequência
C <sub>g</sub>	Velocidade de grupo da onda
C <sub>σ</sub> , C <sub>θ</sub>	Velocidades de propagação no espaço espectral
S <sub>t</sub>	Soma de sumidouros e fontes de energia na onda
S <sub>in</sub>	Energia transferida pelo vento à onda
S <sub>nl</sub>	Interações não lineares entre ondas
S <sub>ds</sub>	<i>Whitecapping</i>
S <sub>bot</sub>	Ruptura da onda pelo fundo em águas rasas
A	Espectro de densidade de ação da onda
R	Radio da terra
U <sub>θ</sub> , U <sub>λ</sub>	Componentes das correntes
N(σ, θ)	Balanço de ação
U <sub>10</sub> , V <sub>10</sub>	Componentes zonal e meridional do vento a 10 a
	10 metros de altura sobre o solo
P	Prognostico do modelo
O	Observações da bóia
S <sub>db</sub>	Rompente pelo fundo
S <sub>tr</sub>	Interações de onda-onda por triadas
S <sub>sc</sub>	Disipação da energia da onda por caraterística do
	fundo
S <sub>ice</sub>	Termo de interação com gelo
S <sub>ref</sub>	Termo da reflexão

### Minúsculas romanas

h	horas
---	-------

$d$	Profundidade do aquífero
$t$	Tempo
$x, y$	Dimensões espaciais
$f$	Parâmetro de Coriolis
$g$	Aceleração de gravidade
$k$	Número de ondas
$m$	Metros
$km$	Quilômetros
$hPa$	Hectopascal
$s$	Segundos
$min$	minutos

### **Maiúsculas Gregas**

$T$	Período da onda
$\Theta$	Direção de onda
$\delta$	Operador derivada parcial
$\nabla$	Operador gradiente
$\sigma$	Frequência intrínseca

### **Minúsculas Gregas**

$\varepsilon$	Sobre elevação do nível médio do mar
$\mu$	Coeficiente de viscosidade turbulenta do ar
$\Upsilon$	Coeficiente de viscosidade turbulenta do água do mar
$\omega$	Frequência angular

## Sumário

<b>1 Introdução.....</b>	<b>16</b>
<b>2 Revisão de literatura.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Conceitos básicos de ondas oceânicas.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Classificação das ondas.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Zonas de evolução das ondas.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Fatores que influenciam no desenvolvimento das ondas.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5 Transformações das ondas.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6 Teorias de ondas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7 Modelagem numérica de ondas oceânicas.....</b>	<b>33</b>
<b>3 Metodologia.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Área de estudo.....</b>	<b>38</b>
3.1.1 Características costeiras da costa sul do Brasil.....	38
3.1.2 Regime de vento na costa sul do Brasil.....	39
3.1.3 Regime de ondas na costa sul do Brasil.....	42
<b>3.2 Modelos numéricos <i>WAVEWATCH</i> III e <i>SWAN</i>.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 <i>WAVEWATCH</i> -III.....	44
3.2.1.1 Experimento numérico de configuração do WW3.....	49
3.2.2 <i>SWAN</i> .....	50
<b>3.3 Domínios de simulação.....</b>	<b>52</b>
<b>3.4 Dados empregados.....</b>	<b>53</b>
<b>3.5 Análise Sinótica .....</b>	<b>55</b>
<b>3.6 Índices estatístico de desempenho.....</b>	<b>55</b>
<b>4 Resultados.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Análise sinótica.....</b>	<b>59</b>

<b>4.2 Análise dos erros introduzido aos modelos de ondas pelo campo de vento.....</b>	<b>67</b>
4.2.1 Bóia de Rio Grande.....	67
4.2.2 Bóia de Santos.....	69
<b>4.3 Experimento numérico da configuração do domínio WW3.....</b>	<b>70</b>
<b>4.4 Análise temporal das simulações com o modelo WW3 nos domínios Dom2_ww3 e Dom3_ww3 para as bóias.....</b>	<b>72</b>
4.4.1 Bóia de Rio Grande.....	72
4.4.2 Bóia de Santos.....	74
<b>4.5 Análise estatístico das simulações como o WW3 nas bóias.....</b>	<b>76</b>
<b>4.6 Análise temporal das simulações com o modelo WW3 nos domínios Dom2_ww3 e Dom3_ww3 para os ondógrafos</b>	<b>80</b>
4.6.1 Ondógrafo de Cassino.....	80
4.6.2 Odógrafo de Tramandaí.....	81
<b>4.7 Análise estatístico das simulações como o WW3 nos ondógrafos.....</b>	<b>82</b>
<b>4.8 Saídas gráficas das simulações com o WW3.....</b>	<b>84</b>
<b>4.9 Simulação com o modelo SWAN.....</b>	<b>85</b>
<b>4.10 Análise estatístico das simulações como o SWAN.....</b>	<b>87</b>
<b>4.11 Saídas gráficas do modelo de ondas SWAN.....</b>	<b>89</b>
<b>5 Conclusões e recomendações.....</b>	<b>92</b>
<b>Referências.....</b>	<b>95</b>

## 1 Introdução

Ao longo do litoral sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul, numerosas são as atividades que se vem desenvolvendo de importância para a região e que são dependentes do regime de ondas. A região costeira conta com vários portos de importância que tem sido um suporte econômico como são: Porto de Paranaguá, de Itajaí, de Laguna e de Rio Grande entre outros mais. Este último porto considerado um dos mais importantes no continente em termos de produtividade, inclusive no desenvolvimento do comércio internacional. As águas oceânicas adjacentes à costa, servem de cenário para a pesca. Outras atividades de destaque na região são o turismo e a recreação, onde de uns anos para cá esportes como o *Kitesurf*, *windsurf* e *stand up paddle* são da preferência na população devido às características naturais de ventos e ondas (CUCHIARA, 2008).

A região costeira do sul do Brasil está caracterizada por um regime de vento constante de nordeste (GRIMM, 2009) e ondas geradas no Oceano Atlântico Sul que se propagam de longas distâncias, assim como vagas geradas por ventos locais (CANDELLA, 1997). Sistemas meteorológicos, como frentes frias, geram condições de vento muito forte alterando assim o estado do mar, colocando em risco a segurança da navegação e das atividades costeiras com perdas materiais e econômicas na região e no país, além da perda de vida humana Pezzi et al., (2016).

No Brasil os primeiros estudos na área de modelagem de ondas oceânicas foram desenvolvidos com modelos de segunda geração nos anos 90s. Innocentini e Dos Santos Caetano Neto, (1996) fizeram uma simulação numérica do campo de ondas de um ciclone no Oceano Atlântico Sul. Para isso ele propôs o uso integrado

do modelo atmosférico *Limited-area Atmospheric Model* (LAM), para gerar forçante do vento, com um modelo de ondas superficial oceânico de segunda geração chamado *Ocean Surface Wave Model* (SWM). Romeu (2000) empregou o modelo de ondas de segunda geração *Combined Refraction/Diffraction Model* (REFDIF) para a costa de Santa Catarina com a inclusão de ilhas como corpos que provocam a arrebentação das ondas.

Palha et al., (2006) fizeram um análise comparativa entre os modelos numéricos de ondas de segunda geração REFDIF e REFDIF\_S para a costa de Rio Grande do Sul entre Torres e Mostardas. Com o avanço no conhecimento do tema interação oceano-atmosfera, observou-se que os modelos de segunda geração apresentam problemas na transmissão da energia das ondas vagas ao virar em ondas de marulhos (LIZANO, 2001), impulsionando assim a geração de modelos de ondas de terceira geração.

Cuchiara (2008), simulou o campo de ondas na costa de Rio Grande do Sul com o modelo de ondas de terceira geração SWAN, mas não usou um modelo de geração de ondas em águas profundas. O modelo SWAN foi criado para propagar e transformar as ondas em águas rasas, mas não foi concebido para gerar ondas. O que se deve fazer é combinar o modelo SWAN com um modelo recomendado especialmente para modelagem de ondas na área de geração e sua posterior propagação para a costa, como é o caso do WW3 (TOLMAN, 2002; ARRIAGA; RUIZ, 2014). Atualmente está implementado um sistema operacional de prognóstico de ondas com o WW3 versão 3.14 no Centro de Previsão de tempo e estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Por todo o exposto, pelos poucos estudos feitos na modelagem de ondas na costa sul do Brasil e principalmente dada a importância do tema para o país, se faz necessário e são objetivos do trabalho:

### **Objetivo principal**

- Avaliar o sistema de previsão de ondas oceânicas para o litoral sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul mediante a acoplagem do modelo GFS e dois modelos de ondas oceânicas WW3+SWAN.

### **Objetivos específicos**

- Fazer uma análise sinótica das condições do vento nas águas adjacentes à costa sul do Brasil;
- Analisar os possíveis erros introduzidos aos modelos de ondas pelo GFS a partir dos registros de vento das bóias;
- Simular Hs e Tp das ondas em águas profundas do Oceano Atlântico Sul mediante o emprego dos modelos GFS+WW3;
- Simular Hs e Tp das ondas em águas rasas do litoral sul do Brasil mediante o emprego dos modelos GFS+WW3+SWAN;
- Avaliar a Hs e Tp simulados com os registros das bóias e ondógrafos oceanográficos na área.



## 2 Revisão de literatura

### 2.1 Conceitos básicos de ondas oceânicas

**Ondas oceânicas** são movimentos ondulatórios em que as partículas oscilam em relação a sua posição de equilíbrio. Istos movimentos são influenciados por diferentes fatores do fluido, no qual as partículas estão submetidas à ação conjunta das forças geradoras e restauradoras. As ondas se manifestam na superfície, mas seu movimento se transmite até as camadas inferiores (OMM, 1998).

Quando se faz referência à posição de equilíbrio das partículas do fluido que oscilam junto com o movimento da onda, utiliza-se como base o nível médio do mar (NMM) indicando certo nível ideal. O NMM se obtém pela média de múltiplas observações feitas cuidadosamente durante um longo tempo (meses ou anos) para obter uma serie longa de dados (CEM, 2006). Com o objetivo de formular uma teoria de ondas para descrever seu movimento, se faz necessário definir certos parâmetros de ondas como feito na teoria linear de ondas (AIRY, 1845). A seguir serão dadas as distintas definições dos parâmetros das ondas que foram estabelecidas pela OMM (1998), observados na Figura 1.

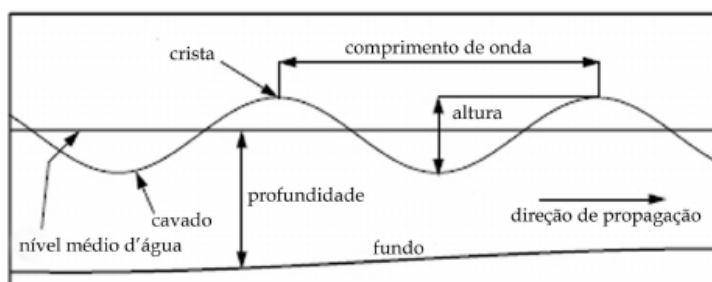


Figura 1 - Perfil vertical das ondas oceânicas idealizadas, mostrando seus parâmetros.

Fonte: MEIRELLES; VIOLANTE-CARVALHO, 2007, p.556.

- Perfil: Linha curvada resultante de um corte vertical da onda em sentido de sua direção de propagação.
- Crista: Parte da onda que sobressai por cima do NMM.
- Cume: Ponto mais alto da crista.
- Cavado: Parte da onda por baixo do seu nível médio.
- Base: Ponto mais baixo do cavado.
- Altura (H): Distância entre a crista e o cavado. É igual ao dobro do raio de órbita ou amplitude de uma onda progressiva.
- Comprimento (L): Distância entre duas cristas ou dois cavados.
- Período (Tp): Tempo que demora a passagem de duas cristas ou dois cavados por um ponto. Também é o tempo em que demora uma partícula para completar uma órbita. Em ondas estacionárias, é o tempo que demora uma partícula em recorrer toda sua amplitude.
- Pendente ou declive (H/L): Relação entre altura e comprimento. Tendo a profundidade (d), o máximo valor que se permite para as ondas é  $d/L=1/7$ , que é o valor crítico a partir do qual as ondas rompem-se. Isto acontece inclusive em águas profundas e é comum observar cristas coronadas com espuma.

Em ondas progressivas se agregam os seguintes elementos

- Direção de onda ( $\theta$ ): Direção a partir da qual estão se propagando as ondas, onde o norte é  $0^\circ$ .
- Frente de onda: Plano perpendicular ao sentido de propagação da onda.
- Raio de onda: Linha perpendicular ao frente de onda num ponto, coincide com a direção de propagação da onda.

- Velocidade cíclica ou de propagação: Velocidade com que uma crista se traslada. Aqui a partícula descreve uma órbita numa distância (L), durante um tempo (t), tal que ( $C=L/t$ ).

Se define como altura significativa da onda ( $H_s$ ) à média do terço superior das ondas, quando ordenadas de forma decrescente. Se pode calcular no domínio de frequência como mostra a equação, onde (E) é a energia total do espectro unidimensional (CANDELLA; SOUZA, 2013).

$$H_s = 4.01 \sqrt{E} \quad (1)$$

## 2.2 Classificação das ondas

As ondas oceânicas podem ser classificadas de várias formas. Ondas periódicas, são aquelas que para igual intervalo de tempo, repetem seu movimento e perfil em superfície (SPM, 1984).

De acordo com **as forças restauradoras** as ondas oceânicas podem ser (SPM, 1984):

- Capilares: quando a força de restauração é a tensão superficial do líquido.
- gravitacionais: quando a força de restauração é a gravidade.

De acordo com **a sua forma**:

- Bidimensionais com um comprimento de onda maior que o comprimento da crista ou tridimensionais, para um comprimento de onda igual ao comprimento da crista (CEM, 2006; SPM, 1984).

Dependendo **das relações entre as dimensões horizontais e verticais**:

- Largas, quando o comprimento de onda é muito maior que a altura ou curtas, quando o comprimento de onda é comparável ou menor que altura da onda (AIRY, 1845; CEM, 2006; SPM, 1984).

Pelo **seu deslocamento**:

- Progressivas (oscilatórias), quando no fluido o movimento ondulatório se traslada e as partículas se movimentam em órbitas fechadas, circulares ou elípticas. A teoria linear ou de Airy (1945) representa puras ondas oscilatórias. E em estacionárias, quando a onda se forma de duas ondas que estão avançando em sentido oposto com igual amplitude e comprimento entrando assim em interferência. Nas cristas e cavados os movimentos só vão ser verticais e entre as zonas de amplitudes máximas vão ter pontos que permanecem imóveis (SPM, 1984).

Atendendo a **sua variabilidade temporal**:

- Estáveis, que é quando varia pouco suas dimensões e as instáveis, que se desenvolvem ou se retraem (CEM, 2006).

Pela **posição no fluido**:

- Internas, quando se originam dentro do fluido, e superficiais quando se originam na superfície.

Atendendo à **variabilidade da altura e período**:

- Regulares para ondas com períodos e alturas constantes. Estas ondas são consideradas bidimensionais. As ondas irregulares, para períodos e alturas não constantes, são ondas tridimensionais e sua distribuição se acerca mais à realidade da superfície marinha (CEM, 2006).

Conforme **a sua profundidade relativa** (delimitada pela relação  $d/L$ ):

- Se podem dividir em profundas, intermediárias e rasas de acordo à relação que há entre h e L. Essa classificação é muito importante e prática no ponto de vista da engenharia costeira. Para classificar as ondas com este critério, na Tabela 1, se tem os seguintes valores (OMM, 1998).

Tabela 1 - Classificação das ondas atendendo a profundidade relativa.

<b>Tipos de água</b>	<b>h/L (Teórico)</b>
Águas profundas	$d/L > 1/2$
Águas intermediárias	$1/2 < d/L < 1/20$
Águas rasas	$d/L < 1/20$

Pela sua **representação matemática**:

- Simples, quando podem ser descritas por simples termos matemáticos. Um perfil superficial de uma onda sinusoidal ou monocromática, por exemplo, pode ser descrito pela função seno e cosseno e é por isso que se considera como uma onda simples. Complexas (trem de ondas), quando são formadas de muitos componentes e se dificulta descrever a forma e o movimento (CEM, 2006; SPM, 1984).

As ondas oceânicas, também podem ser classificadas de acordo com **a permanência da força geradora**:

- Livres, quando não há mais força geradora atuando sobre elas e ondas forçadas, quando ainda as ondas continuam sendo forçadas pela força geradora.

Por último de acordo **às forças que as geram** podem ser anemobárica, sísmicas, de maré ou eólicas

- Anemobárica, é dada pela combinação conjunta do vento e do gradiente de pressão. As sísmicas geradas pelos movimentos da crosta terrestre associados com vulcões e terremotos, como são os tsunamis. As de maré pela ação de atração que exercem as forças gravitacionais periódicas da Terra e da Lua sobre as massas de

água no oceano mais próximas e mais afastadas. E as eólicas que se produz como resultado da interação oceano-atmosfera, onde o vento sopra sobre a superfície marinha alterando o estado de equilíbrio do mar. Estes movimentos estão associados ao fator meteorológico, onde as partículas do fluido estarão submetidas à ação conjunta das forças geradoras como é a tensão superficial do vento e uma força recuperadora como é a gravidade (OMM, 1998).

É válido salientar que, em ondas eólicas, para que elas sejam livres só se vai manifestar em duas situações. Na primeira a onda sai da área de geração onde não vai estar mais sob a ação do vento. No segundo caso, diminui a força do vento ficando a onda na área de geração. No caso de ondas livres vamos falar de **marulhos** e ocupa uma parte mais estreita do espectro. Os **marulhos**, no inglês **swell**, são geralmente ondulações regulares com cristas bem definidas e períodos longos. As **ondas de vento forçadas**, se lhes conhecem como **vagas**, no inglês sea wave, e elas são geradas pela ação de vento local sobre a superfície (DIAS DA SILVA, 2013; CANDELLA, 1997).

Verifica-se, portanto, que no oceano tem-se uma grande variedade de ondas desde as marés, tsunamis até as ondas de vento. Estas ondas eólicas são precisamente o tema de interesse na pesquisa. É por isso que na sequência da revisão bibliográfica o termo ondas será usado para referir-se às ondas de vento superficiais e gravitacionais.

### 2.3 Zonas de evolução das ondas

As zonas de evolução das ondas podem ser classificadas como águas profundas, águas pouco rasas, zona de rompente e zona de ressaca. Estas posições das fronteiras entre as zonas de evolução variam em relação aos parâmetros da onda e a profundidade. De acordo à classificação mais tradicional (OMM, 1998; CEM, 2006), na Tabela 2, se tem as seguintes classificações das zonas.

Tabela 2 - Relação entre os elementos de onda e a profundidade na identificação das posições das fronteiras entre as zonas de evolução.

Zonas de evolução	Relações	
Águas profundas	$H > L/2$	
Águas rasas	$H = L/2$	
	Zona de rompente	$h < 0.06L$
	Zona de ressaca	$H < 1.28d$

Em águas profundas as ondas se desenvolvem livremente, sob a ação do campo de vento. Ao trasladar-se até águas rasas, diminuem suas dimensões devido à fricção com o fundo. Ao trasladar-se na zona de rompente diminui sua velocidade de translação na parte dianteira e com isso seu comprimento de onda, mas a tendência de conservação da energia interna faz que recupere altura rapidamente e se incline para frente. Isto é conhecido como efeito de fundo, no inglês *shoaling* (CEM, 2006).

## 2.4 Fatores que influenciam no desenvolvimento das ondas

O crescimento das ondas não é ilimitado, o momento em que a onda deixa de crescer é chamado como condição de **mar completamente desenvolvida**. Temos como fatores que vão influenciar no crescimento das ondas a velocidade do vento, a permanência do mesmo, o alcance espacial (no inglês *fetch*) e a profundidade do aquífero. Estes fatores vão ser diretamente proporcionais aos parâmetros das ondas, no caso do aumento na magnitude de qualquer fator há um aumento nas dimensões da onda e a diminuição da magnitude implica dimensões da onda menores (SPM, 1984; CEM, 2006).

**A velocidade do vento**, por ser a força geradora das ondas, é o fator mais importante. Com um aumento da velocidade do vento; a altura, o comprimento e o período da onda aumentam, diminuindo a frequência. Para cada intervalo de velocidade do vento identifica-se um nível de desenvolvimento máximo das ondas

independentes do tempo e do alcance espacial. Características que permitem a elaboração de um método mais simples para prognósticos de ondas, conhecido como escala de Beaufort, amplamente utilizado nos serviços de vigilância do estado do mar. No momento que se analisa o comportamento das ondas como um processo estacionário, só se produziria uma alteração com a mudança na velocidade e direção do vento (CEM, 2006).

Adicionalmente, tem-se **a duração da influência do vento** na ordem de várias horas, com velocidade e direção estáveis, apresentando um intervalo de variabilidade de  $\pm 2.5\text{m/s}$  e com um arco de  $15^\circ$ . Esse processo é conhecido como permanência do vento. **O alcance espacial do vento** (*fetch*), é a distância em quilômetros que recorre o vento conservando a velocidade e direção mais ou menos constantes (SPM, 1984; CEM, 2006). Os câmbios admissíveis são  $\pm 2.5\text{m/s}$  e um arco de  $\pm 15^\circ$  respectivamente. Por último, e não por isso menos importante, vamos ter a **profundidade do aquífero**. Devido à fricção com o fundo as ondas são adsorvidas e qualquer que seja a velocidade do vento não sobrepesa o valor permissível pela configuração costeira e o relevo submarinho do aquífero.

## 2.5 Transformações das ondas

As características dos campos de ondas incidentes em qualquer região costeira são dadas pelas mudanças abruptas na orientação da linha de costa, do relevo do fundo marinho e pela influência antrópica. Isto ocorre porque ao entrar em águas rasas a onda começa a sentir os efeitos do fundo e os processos de transformação das ondas começam a ser visíveis. Entre os processos de transformação das ondas tem-se a refração, a reflexão e a difração (OMM, 1998; SPM, 1984; CEM, 2006).

**A refração** acontece quando a onda encontra uma variação de profundidade ou uma corrente marinha. Então uma deformação da frente de onda acontece ao transitar por águas rasas e interagir com o fundo marinho. Sobre o relevo variável a parte da onda que se encontra na zona profunda se movimenta mais rápido do que



a dianteira. Esta redução de velocidade faz que o comprimento de onda fique mais curto e a altura da onda seja maior. Tem-se que o raio da onda forma um certo ângulo em relação à normal das linhas de profundidade, pelo qual a onda tende a ficar paralela às isópatas e o ângulo formado começa a diminuir (OMM, 1998; SPM, 1984; CEM, 2006). Em costas convexas, a energia se concentra para os pontos mais sobressalientes e nas costas côncavas a energia da costa se dissipa.

**A reflexão** acontece quando a onda choca com algum obstáculo parcial em seu caminho. Parte da energia da onda é refletiva e a outra parte é transmitida ao obstáculo. Se produz uma onda estacionária que não rompe. Ela continua golpeando com força em um ponto, liberando parcialmente sua energia em cada golpe (OMM, 1998; SPM, 1984; CEM, 2006).

**A difração** acontece quando o trem de ondas é interceptado por obstáculo de origem natural (arrecifes, ilhas) ou artificial (rompe ondas). Se fala que a energia da onda incidente se transmite ao longo da crista. Então as ondas se reproduzem ao outro lado do obstáculo, inclusive se propagam em sentido oposto à direção do vento com uma altura de onda mais reduzida. O efeito se faz maior em áreas bem acidentadas no fundo marinho (OMM, 1998; SPM, 1984; CEM, 2006).

## **2.6 Teorias de ondas**

O jeito mais simples de descrever os princípios fundamentais da mecânica das ondas é a partir da consideração de que elas são regulares e bidimensionais (OMM, 1998). Esta é conhecida como teoria linear, de primeira ordem, teoria sinusoidal, teoria de pequena amplitude ou teoria de Airy (1845). Se parte de que as ondas são pequenas em amplitudes, sinusoidal e progressivamente definível pela sua altura e período para uma profundidade dada. Desta teoria, se pode estimar o movimento e deslizamento, a cinemática (velocidade e aceleração) e a dinâmica (pressões, forças resultantes e momentos) das ondas. A teoria não é adequada no caso em que a altura da onda começa crescer, que é quando a onda desvia-se da forma sinusoidal pura. Isto acontece devido ao fato da teoria linear não explicar

porque as cristas e cavados das ondas estão por cima e abaixo da linha média de água (CEM, 2006).

Como consequência, a teoria linear precisa de ajustes matemáticos para descrever processos mais complexos e é assim como surgem as teorias não lineares, de ordem superior. Isto acontece, por exemplo, quando as ondas ganham em altura, ou seja, quando viajam para a costa onde as águas são rasas e ficam mais altas (efeito de fundo ou *shoaling*) (CEM, 2006).

Ondas definidas por estas teorias não são ondas de oscilação pura mas sim periódicas já que seu fluido se está movendo em direção ao sentido de propagação da onda. A este tipo de movimento dá-se o nome de transporte de massas da onda. Em outras palavras, essas teorias são aplicáveis em águas rasas e representam melhor os fenômenos de refração, de transporte de massa, da ruptura da onda e da transmissão de energia (OMM, 1998; CEM, 2006).

Entre as teorias não lineares temos quatro principais (CEM, 2006): teoria de Stokes (1847, 1880), solitária de Russell (1844), cnoidal de Korteweg e Vries (1895) e Fenton (1988). Estas teorias ajudaram a uma melhor descrição das ondas gravitacionais superficiais. De maneira geral, as teorias não lineares, são soluções matemáticas mais complexas em comparação com a teoria linear a quais estão baseadas na solução exata das equações de Laplace.

No trabalho de Stokes (1847), abordou-se as diferenças existentes entre a teoria linear e sua proposição, definindo-se um parâmetro de expansão da perturbação em função da amplitude da onda e o número de ondas. A partir daqui se fala de um formato de onda como a somatória de uma série de termos dependentes do parâmetro de expansão da perturbação. O problema da teoria está na convergência da série que em teoria se resolve com uma maior quantidade de termos considerados na equação. No entanto, não há convergência em ondas com grande amplitude e muito inclinadas (Schwartz 1974; Willians, 1981).

A partir do trabalho pioneiro de Stokes (1847) surgiram outros trabalhos como Bretschneider, 1960; Skjelbreia e Hendrickson, 1961; Laitone, 1960, 1962 e 1965. Dentro de todos estes estudos se destaca o trabalho de Fenton (1985), que desenvolveu a teoria de Stokes até o quinto grau dando solução ao problema da convergência e fazendo assim computacionalmente eficiente a teoria em sua solução da série. A nova teoria formulada por Fenton inclui expressões assintóticas de forma fechada para águas profundas e rasas.

Em águas rasas, outro limitante para a teoria de ordem superior de Stokes tem relação com a altura da onda em função da profundidade à que pode ser aplicada. Esta só vai poder ser aplicada em ondas com altura até a metade da profundidade (FENTON, 1985). Então para ondas maiores em altura temos que aplicar uma diferente teoria (PEREGRINE, 1976), ou o que é conhecido como teorias não lineares de ondas para águas rasas (*Shallow Water*). Para isso, é necessário definir um novo parâmetro de perturbação para as expressões matemáticas de ondas em águas rasas assim se tem em conta a influência combinada da dispersão de amplitude e frequência (WHITHAM, 1974; MILES, 1981).

As teorias para águas rasas são um exemplo de extensão da teoria de Stokes (1847). Dentro desta teoria incluem-se as teorias de cnoidal, de onda solitária e a aproximação de Fourier aplicada por Fenton (1988). Assim o conjunto de equações obtidas por estas teorias chama-se equações de águas rasas ou *Shallow Water* pelo seu nome em inglês, ver equações 2.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + fv - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - fu - \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \gamma \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\
 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(h+\varepsilon)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(h+\varepsilon)] &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Onde

$u, v$  – componentes de velocidade do fluido.

$x, y, t$  – coordenadas espaciais e temporais.

$\xi$  – Elevação do NMM.

$f$  – Parâmetro de Coriolis.

$\mu$  – Coeficiente de viscosidade turbulenta do ar.

$\Upsilon$  - Coeficiente de viscosidade turbulenta da água do mar.

$g$  – Aceleração da gravidade.

Na teoria cnoidal se tem um comprimento e altura de onda muito maior que a profundidade que está baseada na teoria de Boussinesq. Aplicam-se às ondas em águas rasas com amplitude finita e consta dos processos: da não linearidade e dispersão. As ondas cnoidais são periódicas com cristas pontiagudas separadas com grande comprimento de ondas e amplitude finita. Essas ondas são típicas em águas rasas na zona anterior à zona de quebra de onda (CEM, 2006).

Com respeito à teoria de onda solitária, este tipo de onda não é oscilatória nem tem canais. Ela é uma onda de translação de massa d'água e bem difícil de observar no meio natural. Um exemplo de ondas com comportamento similar a onda solitária é o tsunami. Este tipo de onda se utiliza muito em águas rasas e a presença de pequenas pendentes de fundo gera problemas.

Como se vê na Figura 2, o perfil superficial da onda de Airy (1945) vai estar simétrico em relação ao NMM. Para a teoria de Stokes (1847) em comparação com a teoria de Airy (1945), o perfil superficial da onda vai ter cristas mais estreitas e pronunciadas com cavados mais rasos e largos (USACE, 1942). A onda cnoidal tem a maior parte das cristas por cima do NMM com os cavados abaixo deste nível. As ondas solitárias tem todo seu perfil superficial acima do nível médio do mar.

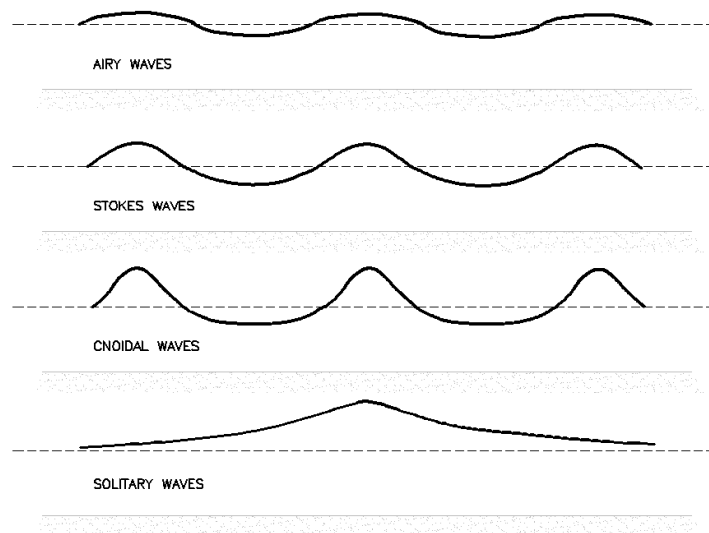


Figura 2 - Formas de perfis superficiais para diferentes ondas gravitacionais progressivas.

Fonte: (CEM, 2006, p.40)

## 2.7 Modelagem numérica de ondas oceânicas

Na história da ciência o fenômeno das ondas oceânicas, principalmente as ondas eólicas, tem sido objeto de estudo. Já desde a antiga Grécia, se tinha o conhecimento do processo de interação oceano-atmosfera, onde se falava acerca do papel do vento como fator gerador. Entre os séculos XVI e XIX começam a surgir as primeiras teorias básicas junto a alguns conceitos básicos, como é o espectro de frequências, permitiram explicar a irregularidade e variabilidade das ondas do ponto de vista estatístico. Nos anos 40, final da segunda guerra mundial, com o objetivo de prognosticar o estado do mar como vantagem nas estratégias militares da marinha se chegou ao desenvolvimento das teorias das funções aleatórias e matemáticas estatísticas. Este avanço no conhecimento da dinâmica de ondas foi crucial para o entendimento das ondas como fenômeno aleatório (GIOC, 2002; OMM, 1998).

A partir dos anos 50 são muitos os trabalhos desenvolvidos na área do espectro de ondas. Mas cabe destacar o trabalho de Pierson e marks (1952) que

reconheceram a irregularidade das ondas e introduziram o conceito de espectro de frequência de ondas. Mas somente no início da década 60, Pierson et al., (1966) descrevem as principais técnicas estatísticas das ondas. O espectro de frequência escalar de *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) (HASSELMANN, 1963) e suas modificações feitas por Donelan et al., (1985) reproduziram muito bem as interações não lineares das ondas. Ou seja, o espectro de JONSWAP é uma redistribuição de energia baseada num espectro de forma já determinada para expressar a parametrização da interação não linear. Ele foi elaborado a partir de modificações feitas no espectro de frequências de Pierson e Moskowitz (1964) especialmente para o mar do norte (CANDELLA, 1997; CEM, 2006; RAMÍREZ; ARIAS, 2007).

Os primeiros modelos numéricos de prognósticos e geração de ondas que surgiram durante e depois da Segunda Guerra mundial foram os empíricos. Estes modelos se baseavam nas relações empíricas para prever os parâmetros dependentes ( $H_s$ ,  $T_p$ , etc) a partir dos parâmetros independentes (velocidade do vento, *fetch*, profundidade, etc). Ou seja, estão baseados nas relações empíricas entre os campos dependentes das ondas e os parâmetros independentes. Sua vantagem está no prognóstico local de águas profundas num estado de mar com condições constantes de velocidade e direção do vento e do *fetch*. De forma geral, estes modelos são ineficientes em análises bidimensionais e não se pode obter informações espectrais das ondas (RAMÍREZ; ARIAS, 2007).

Com o objetivo de dar soluções aos problemas dos modelos empíricos é que surgem os modelos físicos, que por sua vez consideram a evolução espacial e temporal da energia levando em consideração o aumento e decaimento das ondas, assim como a irregularidade do oceano. Eles resolvem a equação da energia das ondas dada abaixo, na equação 3 (RAMÍREZ; ARIAS, 2007).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (c_g F) + \sigma \frac{\partial \left( c_\sigma \frac{F}{\sigma} \right)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (c_\theta F)}{\partial \theta} = S_t \quad (3)$$

Onde

$$S_t = S_{i,n} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$$

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

$F(t, x, y, \sigma, \theta)$ , espectro de frequência,  $(\sigma)$  a frequência intrínseca,  $(\omega)$  frequência angular,  $(k)$  numero de ondas,  $C_g$  é a velocidade de propagação do grupo dependentes das condições de água profundidade do aquífero,  $(C_\sigma)$  e  $(C_\theta)$  velocidades de propagação no espaço espectral (frequência e direção) e  $(S_t)$  a soma de todos sumidouros e fontes de energia no processo de geração e propagação da onda.  $(S_{in})$  é a energia transferida pelo vento,  $(S_{nl})$  são as interações não lineares entre ondas.  $(S_{ds})$  é o termo de dissipação da energia pela ruptura da onda em água profundas (*whitecapping*) e a ruptura da onda pelo fundo em águas rasas e  $(S_{bot})$  é o termo de dissipação pela fricção com o fundo em águas rasas e com correntes marinhas na profundidade (RAMÍREZ; ARIAS, 2007).

Os modelos físicos de geração de ondas podem ser classificados em primeira, segunda e terceira geração. Os modelos de primeira geração se apresentam como pacotes de energia em duas dimensões do espectro. Eles foram definidos antes do desenvolvimento das teorias não lineares de Hasselmann (1962). Por isso  $S_t$  é expresso como se segue na equação 4, (RAMÍREZ; ARIAS, 2007).

$$S_t = S_{i,n} + S_{ds} \quad (4)$$

Hasselmann et al., (1973) e Mitsuyasu (1968) demonstraram que na fase do crescimento das ondas a principal fonte de energia para o espectro era a transmissão não linear. Conclui-se portanto que os modelos de primeira geração sobrestimam a ação do vento e subestimam a força de transferência não linear (WANDI GROUP, 1988). Os modelos de segunda geração, pelos problemas

mencionados acima, incorporam o termo não linear na equação espectral de energia da seguinte forma mostrado na equação 5.

$$S_t = S_{i,n} + S_{ds} + S_{nl} \quad (5)$$

Neste caso  $S_{in}$  se obtém mediante medidas diretas de stress exercido na superfície da onda.  $S_{ds}$  continua sendo termo modulador do crescimento de ondas. Dentro das  $S_{nl}$  temos as interações onda-onda em quadrupletas e interações onda-onda em triadas. As interações entre quadrupletas determinam a evolução do espectro ao transferir energia do pico do espectro a baixa frequências, são aplicáveis em águas profundas e intermediárias. Por outro lado, as interações entre triadas são processos que predominam em águas rasas (LIZANO, 2001), onde as baixas frequências transferem energia às altas frequências do espectro (VEGA FUENTES, 2017).

Os modelos de segunda geração são chamados modelos paramétricos de ondas vagas porque desenvolvem as vagas mediante um jeito espectral independente dos outros processos. Por outro lado os marulhos se obtém ou se propaga com uma forma espectral, independentemente do esquema das vagas (LIZANO, 2003). O problema destes modelo está na transmissão da energia de ondas vagas a marulhos (LIZANO, 2001).

Os modelos de terceira geração não tem o problema da transferência da energia de ondas vagas para os marulhos. O primeiro modelo desta geração foi o *Ocean Waves Model* (WAM) ciclos 1-4 (WAMDI GROUP, 1988), onde a parametrização da função exata da transferência não linear de energia contém o mesmo número de graus de liberdade que o espectro. A partir do modelo WAM outros se desenvolveram anos mais tarde o modelo WW3 (TOLMAN, 1989, 1991, 2002) para águas profundas, MRI-III (MITSUYASU, 2002) e o SWAN desenvolvido na Holanda (BOOIJ; HOLTHUIJSEN; RIS, 1996, 1999) para águas rasas. Os termos de fonte e sumidouro na equação do espectro de energia são encontrados de forma distinta em cada modelo.



### 3 Metodologia

#### 3.1 Área de estudo

##### 3.1.1 Características da costa sul do Brasil

A zona costeira do Sul de Brasil, está localizada na parte leste da região banhada pelo Oceano Atlântico Sul como observa-se na Figura 3. A linha costeira tem uma orientação meridional de SW-NE formando uma sinuosidade (VILLWOCK et al., 1984). Tem uma extensa costa de aproximadamente 630km e uma plataforma continental larga. A plataforma continental tem dimensões que oscilam entre 150-200km de extensão, profundidade máxima entre 100-140m e suave declividade da ordem de 0.5-1.5m/km. Com um relevo de fundo bem homogêneo e suave, a região está caracterizada por linhas isobatimétricas bem paralelas entre si. Ao longo da costa, o transporte e a deposição de sedimento na região se dá pela ação das ondas.

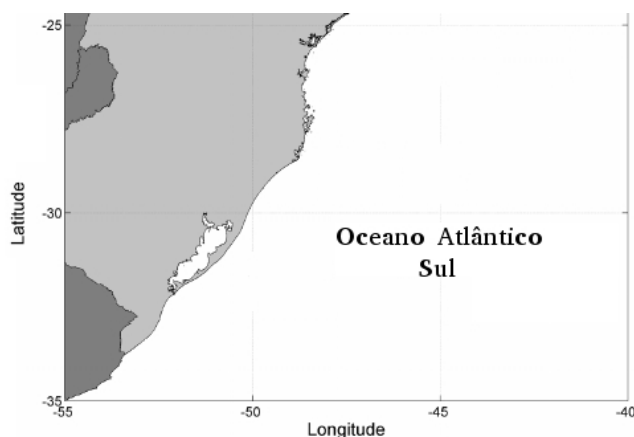


Figura 3 - Mapa da costa da região sul do Brasil e águas adjacentes do Oceano Atlântico Sul de interesse.

Fonte: CANDELLA; SOUZA, 2013, p.443.

### 3.1.2 Regime de vento na costa sul do Brasil

Para compreender o comportamento das ondas, é necessário o conhecimento do regime de vento local. Na região costeira do sul do Brasil, o vento em superfície é influenciado principalmente pela ação do sistema de alta pressão quase estacionário do Oceano Atlântico Sul. Este sistema está associado a uma circulação anticiclônica, movimentos de subsidência na vertical e divergência do ar desde o centro de alta pressão até a costa impondo assim um regime de vento médio constante de nordeste/leste na área de estudo (Figura 4). Este padrão de vento está presente em todas as estações do ano e tem como direção secundária à de sudeste (GRIMM, 2009).

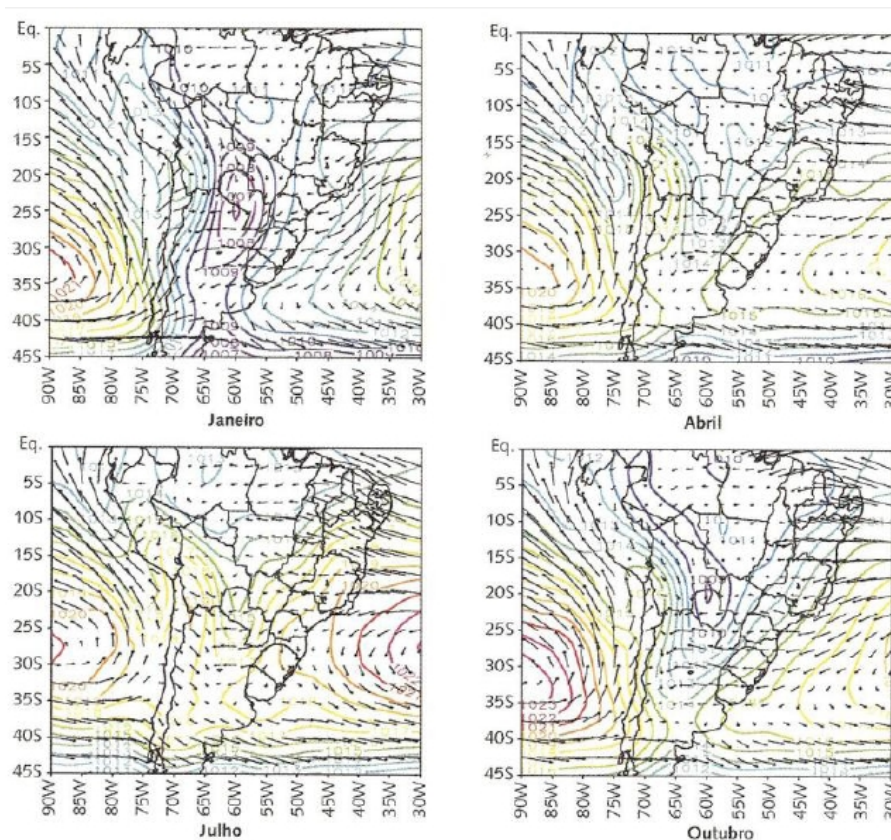


Figura 4 - Vento em 1000 hPa (m/s) e pressão ao nível do mar (hPa) para os meses de janeiro, abril, julho e outubro respectivamente.

Fonte: GRIMM, 2009, p.264.

O regime de ventos na costa sul do Brasil, caracteriza-se como um regime de alta energia. O vento é mais intenso nos meses de primavera e verão austrais. Para a estação de Rio Grande, nos meses de inverno austral os ventos são predominantemente de sudeste (TOMAZELLI, 1992). Sistemas meteorológicos que alteram as condições do tempo na região são: frentes frias, os anticiclones migratórios polares, os ciclones extratropicais, sistemas convectivos de meso escala, os episódios de El Niño e de La Niña (ENOS) no Pacífico Equatorial, os Vórtices Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e bloqueios atmosféricos. Todos estes fenômenos geram alterações na dinâmica atmosférica da região e no regime de ondas característico da zona (GRIMM, 2009; FIRPO; SANSIGOLO; ASSIS, 2012; Pezzi et al., (2016).

### **3.1.3 Regime de ondas na costa sul do Brasil**

Na região Sul do Brasil são poucos os estudos desenvolvidos sobre a climatologia de ondas oceânicas utilizando diferentes fontes de dados. No litoral costeiro de Rio Grande, têm-se ondas geradas no Oceano Atlântico Sul que se propagam desde largas distâncias e vagas geradas por ventos locais. Os meses de abril e maio são os de maior reporte de ressacas provocadas pela passagem de frentes frias. (BARLETTA, 2000; CUCHIARA, 2008).

A partir de registros em ondógrafos instalados em águas rasas em Tramandaí, obtido para período de 30 anos, define-se uma altura máxima de onda de 7.0m e um valor máximo de altura significativa de 4.8m na região. Para 100 anos, o cálculo do período de retorno diagnostica uma altura máxima de onda de 7.6m e o valor máximo de altura significativa de 5.5m. Em um estudo para caracterizar a agitação local e determinar a onda de projeto nos Molhes da Barra de Rio Grande a partir de ondógrafos, obteve-se uma Hs média de 1.0m na direção 100° próxima ao leste e altura significativa média de 1.5m na direção 160° próximo ao sul\_sudeste. Também se observou valores máximos de Hs de 4.2m com direção de propagação de 140° próximo ao sudeste (CUCHIARA, 2008).

A partir de registros em navios, Coli (1994) analisou dados de altura e direção de ondas com dados altimétricos do satélite. Os resultados mostram que as ondas de inverno austral são maiores que as de verão austral. As ondas do nordeste, leste e sudeste possuem maior ocorrência na primavera e verão austrais, enquanto que as de norte, oeste e sudoeste se amplificam no outono e inverno austrais. Os valores mais frequentes de altura média correspondem respectivamente às direções sudoeste, sul, oeste e norte. Os dados demonstraram uma grande diversidade quanto à média anual da direção de propagação das ondas tendo ocorrência principal ondas provenientes de nordeste, seguidas pelas ondulações de sul. Na porção sul da área analisada predominam maiores ondas em relação à porção norte. Abaixo da latitude 33°S se tem a permanência de núcleos de maiores altura de onda, os que se intensificam e ganham tamanho no outono austral alcançando um máximo no inverno austral.

Anos mais tarde (COLI, 2000), desenvolveu outro trabalho de climatologia de ondas para a região próxima aos Molhes da Barra de Rio Grande a partir de reporte de navios e um ondógrafo. Em sua pesquisa concluiu que ondas de curto prazo tinham Hs entre 1.0 e 1.5m, período médio entre 5.0 e 6.0s e direção predominante sudeste. Não foram encontradas Hs de ondas maiores que 4.0m nem período médio maior a 12.0s nos registros do arquivo instrumental. Além disso, os parâmetros de Hs e período não tenham apresentado variações significativas entre as estações do ano. Por outro lado foram encontradas diferenças na forma do espectro da onda. Nos meses de verão austral a posição do pico espectral foi mais frequente na porção das vagas entre 8.0 e 10.0s. Enquanto no inverno austral esteve nos períodos característicos de ondulação entre 10.0 e 14.0s.

Com dados coletados na Praia do Cassino, Machado (2000) estimou a onda de projeto máxima para períodos de retorno de 1, 10, 20, 30, 50 e 100 anos. Se concluiu que as ondas apresentam dois regimes distintos. O primeiro corresponde a ondas locais ou vagas com direção predominante SE, em torno de 100°. O segundo também com direção predominante SE, mas em torno de 140°. Este último regime corresponde a ondas provenientes de tempestade ou marulhos.

O regime de ondas na região também é afetado pelos eventos de El Niño e La Niña no Pacífico Equatorial. Em anos de El Niño verificou-se um aumento da energia do vento e, conseqüentemente, um aumento na geração de ondas. Por outro lado, no período de evento de La Niña, registrou-se uma diminuição da energia do vento e na geração de ondas na região (SLOMP, 2004).

### 3.2 Modelos numéricos WAVEWATCH III E SWAN

#### 3.2.1 WAVEWATCH-III

De acordo a Tolman (1997, 1999, 2009), WW3, é um modelo numérico de ondas de terceira geração que foi desenvolvido pela *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Ele foi baseado nas versões anteriores do modelo WAN (WAMDI GROUP, 1988; KOMEN et al. 1994) e em seus antecessores WAVEWATCH I e WAVEWATCH II. O modelo difere-se muito dos seus predecessores enquanto às equações governantes, estrutura do programa, aproximações físicas e numéricas (TOLMAN, 2002). Ele resolve a equação de balanço do espectro da densidade de ação da onda dada pela equação 6 (TOLMAN, 2002a).

$$\frac{DA(k, \theta; x, t)}{Dt} = S(k, \theta; x, t) \quad (6)$$

Onde (A) é o espectro de densidade de ação da onda, **S** são os termos fontes e sumidouros da energia, ambos expressados em função de k e  $\theta$  das ondas. O modelo WW3 resolve A como uma função que varia lentamente no tempo e espaço, e dado a que k e  $\theta$  mudam espacialmente e temporalmente devido à perda e soma de energia nos termos fontes, k e  $\theta$  se expressam em função de x e t (TOLMAN, 2002a).

Partindo da relação entre o espectro de densidade de ação  $A$  e o espectro de densidade de energia  $F$  dada pela expressão  $A = F / \sigma$ , a equação 6 se pode expressar em coordenada esféricas como mostra a equação 7.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} F \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} F + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} F + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g F = \frac{s}{\sigma} \quad (7)$$

Onde  $\sigma$  é a frequência angular da onda.

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

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - k \frac{\partial U}{\partial m} \right]$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi}$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}$$

Os termos da direita da equação, o primeiro dá a variação temporal do espectro. O segundo e terceiro termos representam respetivamente a propagação do espectro em latitude e longitude com velocidade de grupo  $c_g$ , onde  $R$  é o raio da terra,  $U_\theta$  e  $U_\lambda$  são as componentes das correntes. O quarto e quinto termo representa respetivamente as mudanças de frequência relativa e refração a causa da variabilidade na profundidade e nas correntes (TOLMAN, 2002a).

A expressão dos termos fontes **S**, no modelo vai estar dada pela equação (8).

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad (8)$$

Onde  $S_{ln}$  é um termo linear usado para dar um crescimento de ondas na inicialização do modelo mais realístico. Ou seja que a propagação das ondas considera-se linear com com efeitos não lineares.  $S_{in}$ ,  $S_{nl}$  e  $S_{ds}$  são os termos para águas profundas e abordados no capítulo 2 e que identificam os modelos de terceira geração.  $S_{bot}$  é o termo da interações entre ondas com o fundo e de importância em águas rasas (refração de ondas),  $S_{db}$  rompente pelo o fundo (*Shoalin*) e  $S_{tr}$  interações de onda-onda por triadas (de importância em águas extremadamente rasas). Os termos de dispersão da energia da onda por característica do fundo ( $S_{sc}$ ), por interação com gelo ( $S_{ice}$ ) e por reflexão com a linha de costa ou objeto no mar ( $S_{ref}$ ). Pode-se agregar qualquer outro termo que o usuário quiser ( $S_{xx}$ ) (TOLMAN, 2016).

O uso do WW3 é recomendado especialmente para modelagem de ondas na área de geração e sua posterior propagação para a costa, por não incluir os efeitos da escala local no nível de detalhamento que se faz necessário (ARRIAGA; RUIZ, 2014). Também nos manuais do modelo WW3 (TOLMAN, 2002) se recomenda não utilizá-lo nas zonas onde o principal fator limitante seja a profundidade do mar, nem com resolução de ordem menor que dezenas de quilômetros. O que se deve fazer é combinar o modelo WW3 com um modelo costeiro que considere todos os detalhes de batimetria, relevo de fundo, configurações costeiras e uso do solo, como é o modelo SWAN.

Na Tabela 3 observa-se as parametrizações físicas usadas na simulações com o WW3. A versão empregada do modelo foi a 5.16. Para os **termos fontes de inicialização e dissipação** ( $S_{in}$  e  $S_{ds}$ ) seleciona-se a parametrização de Tolman e Chalikov (1994, 1996) melhorada por Tolman (2002). A parametrização desenvolve com detalhe a formação de marulhos, assim como sua propagação e amortecimento

em tempo e espaço. O esquema empregado para as interações não lineares (Snl) em águas profunda (quadrupletas) foi o de Hasselmann e Hasselmann (1985) que é conhecido como *Discret Interaction Approximation* (DIA) e é o mais usado. O esquema para a dissipação por quebra de onda induzida pela profundidade empregado foi o de Battjes e Janssen (1978) e para os processos de dissipação por fricção com o fundo (Sbt) o esquema JONSWAP de Hasselmann et al., (1973). Estes esquemas foram usados também por Dias Da Silva (2014).

Na física do modelo **WW3** utiliza-se o **esquema de propagação** de Tolman (2002). Ele contém técnicas que suavizam o efeito de difusão do vento, devido que quando o vento é muito forte se produz uma excessiva deformação na direção de propagação das ondas. Na aproximação espectral das ondas se empregou o esquema do espectro JONSWAP de fetch limitado. Ele foi considerado o mais adequado devido a que não se tem medições de ondas na área. O esquema JONSWAP não necessita dados para ser usado, e essa é sua principal vantagem. Aqui se calcula o espectro local de ondas usando a direção e velocidade local do vento tomando o tamanho da grade de simulação como fetch (PÉREZ, 2011).



Tabela 3 - Física da simulações com o modelo WW3.

Parametrizações	Esquema selecionado
Esquema de propagação (PRE3)	Tolman (2002)
Termos dissipativos (Sin-Sds)	Tolman e Chalikov (1994, 1996) Tolman (2002)
Entrada linear (LN1)	Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981) with filter*
Interações não lineares (NL1)	(DIA)
Atrito com o fundo (BT1)	JONSWAP (Hasselmann et al., 1973)
Rompente induzida pelo fundo (DB1)	Battjes e Janssen (1978)*
Interações triadas (TR0)	Desativada
Dispersão pelo fundo (BS0)	Desativada
Dispersão pelo gelo (ISO)	Desativada
Reflexão (REF0)	Desativada
Interpolação do vento (x,y)	Interpolação linear

### 3.2.1.1 Experimento numérico da configuração do WW3

Dado a que a configuração do domínio para WW3 vai determinar o comprimento do fetch, e portanto nos resultados do modelo, se fez experimentos numéricos para determinar a melhor configuração para o domínio. Dada à particularidade da área de ser o Oceano Atlântico Sul de uma basta extensão, foram definidos três domínios de experimentos. Na configuração dos três domínios foi

considerado que, as maiores ondas que atingem a costa sul e sudeste de Brasil são os marulho que vem-se propagando desde longas distâncias no oceano. Não se tem a possibilidade da passagem de grades ondas geradas no Oceano Pacífico ao oeste do Oceano Atlântico Sul. E além, é pouco provável a chegada ao lado oeste do Oceano Atlântico Sul de ondulações longínquas geradas no Oceano Índico dado às adversas condições de vento e correntes (CANDELLA, 1997).

Para o primeiro domínio (domínio1\_WW3), e o mais extenso, procurou-se uma configuração que cubra a maior quantidade de fronteiras de terra para assim ter um fetch mais realístico limitado por condições geográficas. O domínio1\_WW3 estende-se entre os  $-70^{\circ}$  a  $25^{\circ}$  de longitude e os  $-55^{\circ}$  a  $-13^{\circ}$  de latitude, com um total de nós de 64389 (381x169).

Uma segunda configuração do WW3 (Domínio2\_WW3) estende-se entre os  $-70^{\circ}$  a  $4^{\circ}$  de longitude e os  $-55^{\circ}$  a  $-13^{\circ}$  de latitude, com um total de nós de 50193 (297x169). E o terceiro domínio de WW3 (Domínio3\_WW3) estende-se entre os  $-70^{\circ}$  a  $-20^{\circ}$  de longitude e  $-55$  a  $-13^{\circ}$  de latitude, com um total de nos de 33969 (201x169). Os três domínios do ww3 são representados na Figura 5.

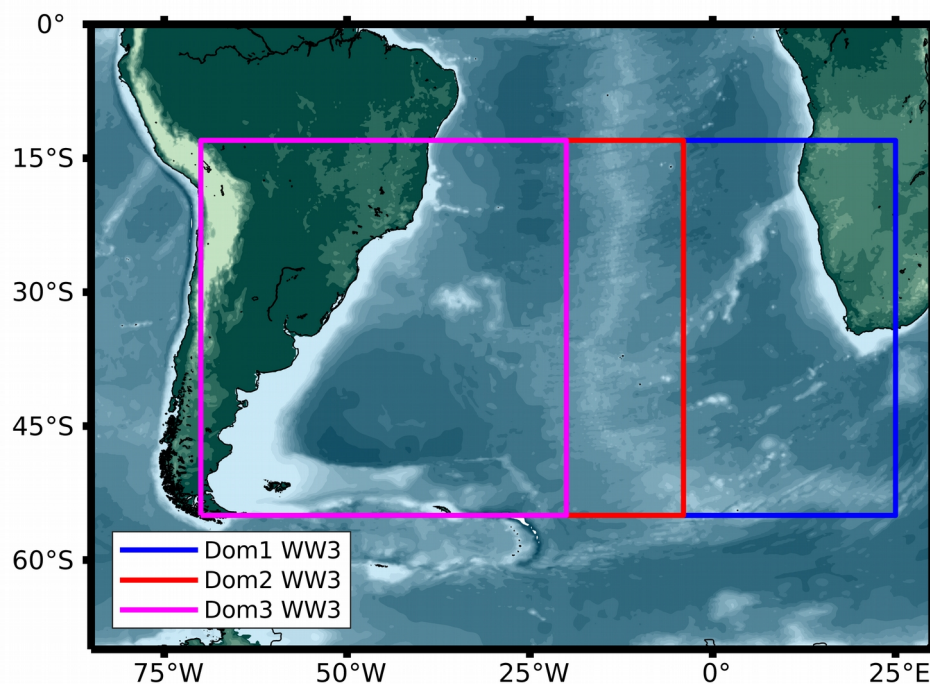


Figura 5 - Mapa com as localizações geográficas dos três domínios experimentais usados para determinar a melhor configuração para as simulações do modelo WW3.

O tempo de simulação nos modelos de ondas foi de 7 dias, com o objetivo de identificar o tempo de estabilização do modelo. Avaliou-se a variabilidade dos parâmetros  $H_s$  e  $T_p$  das ondas simuladas nos três domínios com os registros das bóias e ondógrafos oceanográficos disponíveis.

### 3.2.2 SWAN

Modelo de terceira geração elaborado pelos especialistas da *Delft University of Technology*, o modelo permite a modelação das ondas em águas profundas, intermediárias e rasas. O modelo foi criado para propagar e transformar as ondas em águas rasas, que é quando a onda sente a fricção de fundo marinho. Pode ser empregado no prognóstico do estado dinâmico da superfície marinha em zonas

costeiras e portos, assim como para o estudo do transporte de sedimento na costa. Ele tem todos os processos de transformação que sofre a onda ao entrar em água rasas (refração, difração e reflexão) (BOOIJ; HOLTHUIJSEN; RIS, 1996, 1999; LIZANO, 2001). O modelo resolve a equação espectral do balanço de ação  $N(\sigma, \theta)$  dada pela expressão 9 (HASSELMANN et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (9)$$

À esquerda da equação, o primeiro termo representa a variabilidade do tempo da densidade de ação no local dado. O segundo e terceiro termos representam a propagação de ação no espaço, onde  $c_x$  e  $c_y$  são as velocidade de propagação no espaço  $x, y$  respectivamente. O quarto termo dá as mudanças da frequência relativa por variações na batimetria e nas correntes. E a variabilidade da frequência relativa devido à profundidade e as correntes é dado no quinto termo, onde a velocidade de propagação no espaço  $\theta$  é dada por  $c_\theta$ . O termo  $S$  expressado na parte direita da equação, é o mesmo termo fonte de energia abordado em capítulos anteriores (RIS, 1997; LIZANO, 2001).

Se empregou a versão 41.10AB do modelo SWAN. No processo de transformação da onda pelo fundo marinho, ativou-se no SWAN os efeitos de shoaling, refração, reflexão, difração e interações entre triadas, dado a que estes processos são os que dominam em águas rasas (LIZANO, 2001; DIAS DA SILVA, 2013).

### 3.3 Domínios de simulação

Para o prognóstico de ondas se acoplaram os modelos GFS+WW3+SWAN em 2 domínios que diferem em tamanho e resolução como se mostra na Figura 6. O modelo WW3 gera simulações de ondas nas águas profundas do Oceano Atlântico Sul representada pela área de azul claro com igual resolução espacial do GFS (27km). O modelo WW3 gera condições de fronteiras a uma resolução espacial de 9 km e é acoplada ao modelo SWAN com o objetivo de propagar e transformar o trem de ondas até a costa ao interagir com o fundo marinho.

A área que cobre o domínio SWAN estende-se entre os  $-62^{\circ}$  a  $-40^{\circ}$  de longitude e entre  $-41^{\circ}$  a  $-22^{\circ}$  de latitude e é representada pelo cor magenta. Seleciona-se uma área grande para o domínio SWAN de acordo ao manual de usuário que recomenda ter bem afastada as fronteiras abertas de mar da área de interesse de simulação. As configurações dos domínios foram selecionadas de maneira tal que se simularam a geração das ondas desde o mesmo início em que qualquer fenômeno meteorológico atuante no Oceano Atlântico Sul atinga a área.

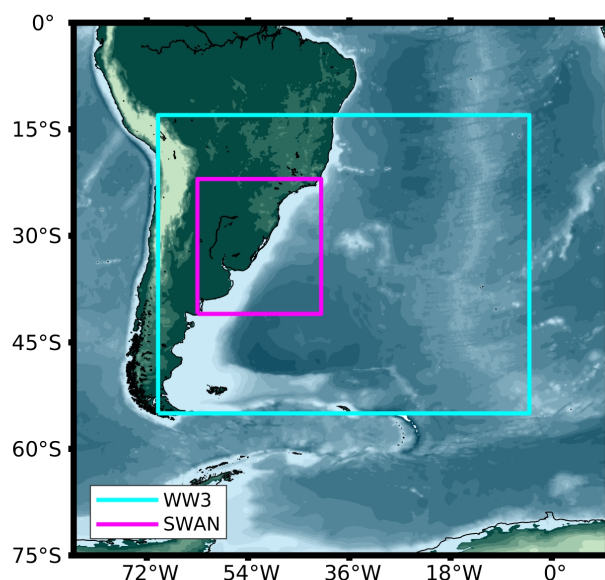


Figura 6 - Configurações dos domínios de simulações com os modelos WW3 e SWAN respectivamente.

### 3.4 Dados empregados

Nas simulações do modelo WW3 utilizou-se os dados de vento instantâneo a 10m do GFS. Foram usados os horários de análises às 00, 06, 12 e 18 de *Universal Time Coordinate* (UTC), com resolução de 0.25° (~27.78km). O reanalise esta disponível no site <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1>. Também utilizou-se a *Global 1 Arc-minute Ocean Depth and Land Elevation* (ETOPO1) com resolução de 1min de arco como dados de entrada nos modelos de ondas.

Os dados de bóias e do ondógrafos oceanográficos foram obtidos do programa **GOOS-Brasil**, que é um sistema nacional de observação dos oceanos visando a coleta, controle de qualidade, distribuição operacional de dados oceanográficos e monitoramento oceanográfico e climatológico no Oceano Atlântico Sul e Tropical. Estes dados serão usados na verificação das variáveis vento, Hs e Tp simuladas pelos modelos.

A Figura 7 mostra as localizações geográficas no mapa das bóias e ondógrafos empregados, enquanto as Tabelas 4 e 5 mostram respectivamente dados das bóias e ondógrafos oceanográficos que serão usados. Estes ondógrafos estão a uma profundidade menor aos 20m. Dado aos poucos registros que se tem para avaliar os modelos na costa de RG, é usado os dados da boia de Santos que esta fora do zona de interesse. Os registros de bóias das ondas e vento foram obtidos do site <http://www.goosbrasil.org>.

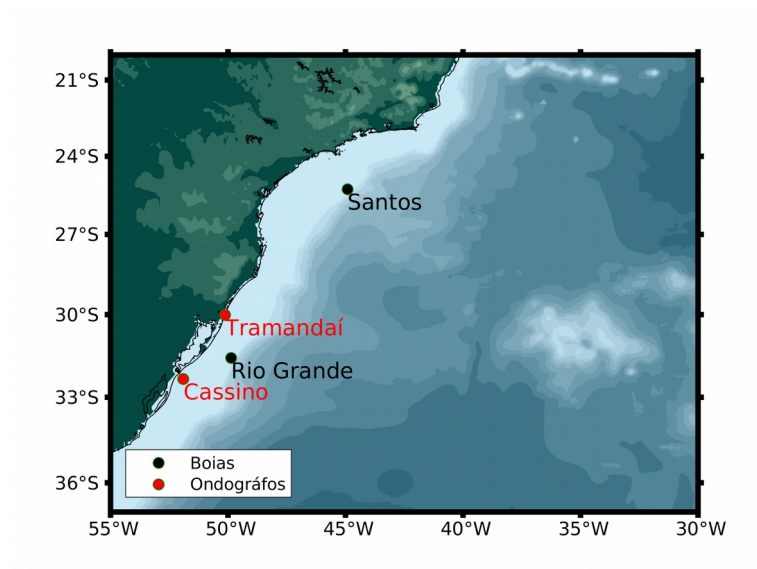


Figura 7 - Mapa com as localizações geográficas das bóias e ondógrafos oceanográficos usados na avaliação do campo de ondas simulado pelos modelos WW3 e SWAN.

Tabela 4 - Bóias oceanográficas que serão empregadas na avaliação do campo de vento e ondas oceânicas simulado e suas respectivas coordenadas geográficas.

Código	Bóias	Latitude	Longitude
31053	Rio Grande	-31.53°	-49.86°
157599	Santos	-25.273°	-44.92°

Tabela 5 - Ondógrafos que serão empregados na avaliação do campo ondas simulado no domínio2 e suas respectivas coordenadas geográficas.

Ondógrafos	Latitude	Longitude
Cassino	-32.34°	-51.90°
Tramandaí	-30.01°	-50.12°

Se tem para cada caso de registro das bóias e ondógrafos os dados em diferentes tempos. No caso das duas bóias é a cada 1h a partir dos 21min, no

ondógrafo de Cassino a cada 30min a partir de 07min (ou seja nas 07 e 37min de cada hora), e Tramandaí a cada 3h. Dado à grande diferença de tempo teve-se que fazer simulações independentes para cada caso de bóia e ondógrafo. Seleciona-se a data de simulação do 22-28 de março de 2016 pela existente falta de dados para avaliar os modelos. Ou seja, é o único período onde se tem disponibilidade de dados registrado em mais de uma boia e ondógrafo que coincide com um caso de ressaca na costa de Rio Grande do Sul.

### 3.5 Análise Sinótica

Se elaboram e analisam os mapas da pressão a nível médio do mar (PNMM) e vento no nível de 1000 hPa do análise GFS. Se tem como objetivo observar os movimentos e a localização correta dos sistemas sinóticos presentes na região durante os períodos de simulação, para assim definir áreas de geração de vagas. As variáveis utilizadas são as componentes zonal ( $U_{10}$ ) e meridional ( $V_{10}$ ) do vento a 10m de altura sobre o solo, onde se mapearam as linhas de corrente e magnitude do vento. Os mapas meteorológicos serão gerados com o programa *The Grid Analysis and Display System* (GRADS). Foram usadas imagens do satélite GOES 13 do canal infravermelho realçado para identificar área de tormentas, disponível no site <http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>.

### 3.6 Índices estatístico de desempenho

Para avaliar os resultados de  $H_s$  simulados pelos modelos de ondas a partir dos registos de ondas e ondógrafos, se realizou uma análise a partir de certos índices da estatística descritiva.

**Média aritmética:** Tem o objetivo de apontar para a tendência central dos dados, ela é uma medida de localização. Onde  $n$  é o tamanho da mostra (WILKS, 2006).



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

**Erro absoluto (EA):** Valor modular da diferença entre os valores observados e os prognosticados. Onde **(P)** representa os valores de Hs pronosticado pelo modelo, e **(O)** são as observações nos registros das bóias.

$$EA = |P - O| \quad (11)$$

**Média do erro absoluto (MEA):** Média do valor absoluto das diferenças entre o pronosticado e o observado. Índice que dá em boa medida o desempenho geral do modelo, sendo muito útil para comparar os prognósticos baixo distintas condições. É uma medida de dispersão do dado que irá representar a variabilidade entre os dados. O MEA=0 se o prognóstico é perfeito, e incrementa a medida que aumenta as discrepância entre os prognósticos e as observações (WILKS, 2006).

$$MEA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (12)$$

Outra medida comum nos prognósticos é o **Erro quadrático médio (EQM)**. Devido a que o EQM é calculado a partir do quadrado dos erros dos prognósticos, este índice é mais sensível aos grandes erros e a valores atípicos. Para EQM próximos a zero se tem prognósticos perfeitos, mas a medida que as discrepâncias entre os prognósticos e observações aumentam o EQM vai aumentar também (WILKS, 2006).

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (13)$$

**Erro relativo (ER):** É o quociente da divisão entre o EA e o valor exato multiplicado por 100, onde se obtêm o porcentagem do erro. O índice estatístico não tem unidade.

$$ER = \frac{|P - O|}{|O|} * 100 \% \quad (14)$$

**Desvio padrão (DP):** Medida de variabilidade ou de dispersão dos valores com relação à média, é a raiz quadrada da variância. No trabalho se calcula para ambas séries a prognosticada e observada. Onde DPO é o DP dos dados observados de Hs e DPP o DP da série de Hs prognosticadas pelo modelo (WILKS, 2006).

$$DPO = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \overline{O})^2} \quad (15)$$

$$DPP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \overline{P})^2} \quad (16)$$

**Dispersão relativa (DR):** Oferece uma medida da dispersão e variabilidade relativa dos valores prognosticados em relação aos registrados (WILKS, 2006).

$$DR = \frac{DPP}{DPO} \quad (17)$$

**Coefficiente de correlação (CC):** Índice de proporcionalidade entre duas variáveis estatísticas, além de indicar a força e direção de uma relação linear. Considera-se que duas variáveis quantitativas estão relacionadas quando os valores de uma de elas muda sistematicamente com respeito aos valores da outra (WILKS, 2006).

$$CC(O, P) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \overline{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \overline{O})^2}} \quad (18)$$

## 4 Resultados

### 4.1 Análise sinótica

#### 25-28 de março de 2016

No período compreendido entre os dias 25 e 28 de março de 2016 a região costeira do sul do Brasil esteve sob a influência de diferentes sistemas meteorológicos. O dia 25 de março, uma frente fria sobre Argentina avançou até o norte do Uruguai e o extremo sudeste do Rio Grande do Sul onde ficou estacionária. A frente estacionária estendendo-se pelo Oceano Atlântico adjacente e depois como frente fria até a baixa associada em oclusão como se observa na Figura 9 (A). Na retaguarda do sistema frontal se tem um anticiclone migratório sobre o centro-leste da Argentina com valor de 1026hPa em torno de 41°S/60°W como se mostra na Figura 8 (A).

Observou-se, em imagens não mostradas, a partir das 12UTC a presença de um centro de baixa pressão com valor de 1008hPa centrado entre o nordeste da Argentina, oeste de Santa Catarina e o nordeste do Rio Grande do Sul. Este centro de baixa se observa em horários posteriores como são nas Figura 8 (B) e Figura 9 (B), nesta última se observa sobre a costa de Rio Grande do Sul a nebulosidade associada a esta área de instabilidade correspondente no dia 26 às 00UTC. O mesmo fenômeno é observado também na Figura 10 (C e D) das linhas de fluxo do vento para o dia 25 às 12 e 18UTC respectivamente.

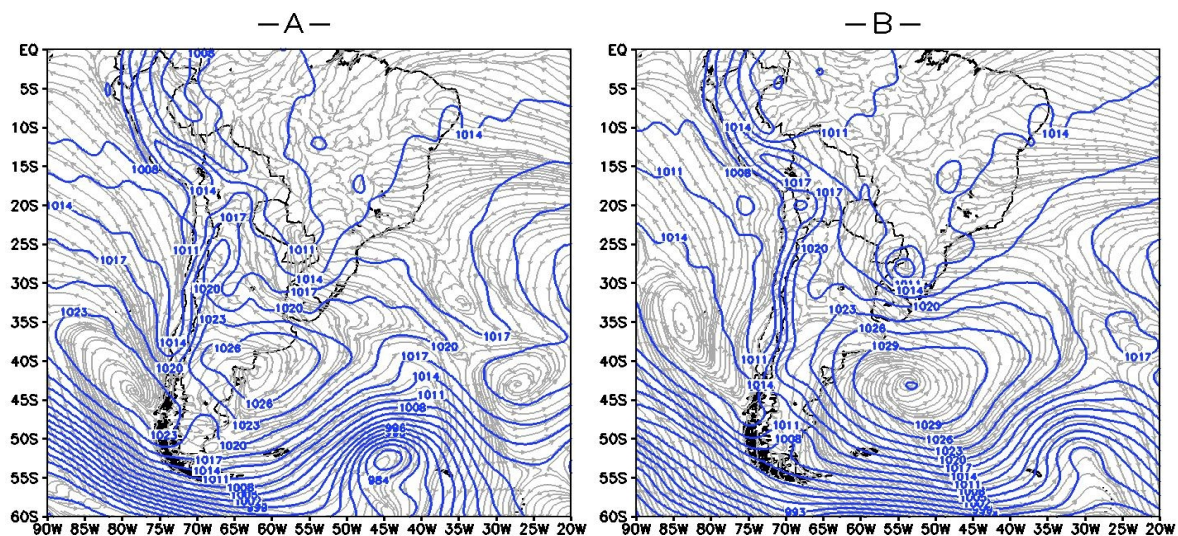


Figura 8 - PNMM (hPa) em linhas de azul, linhas de corrente em 1000hPa em cinza, correspondentes aos dias 25 (A) e 26 (B) de março do 2016 às 00 UTC.

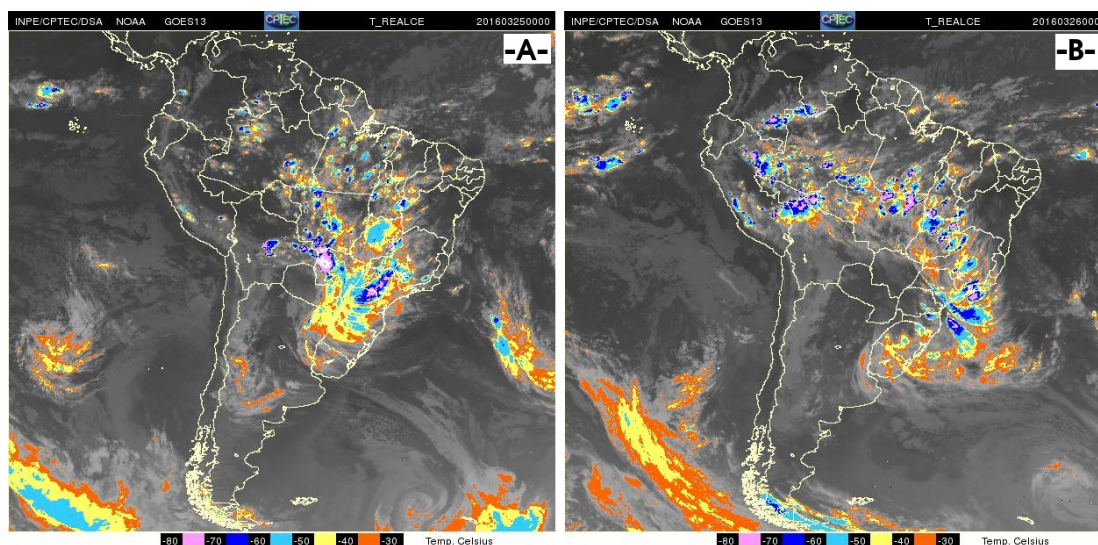


Figura 9 - Imagens de satélites correspondentes aos dias 25 (A) e 26 (B) de março do 2016 às 00UTC.

Fonte: Site do CPTEC, INPE.

No extremo sul da área oceânica de interesse, o dia 25 observou-se ventos do quadrante sul ao sudeste entre 10.8-13.8m/s. Na região central, durante as primeiras horas se tem ventos variáveis entre 1.6-3.3m/s associado a uma área de alta pressão, superior para a periferia. No extremo norte os ventos tiveram direção



predominante de sudeste a leste, com intensidade entre 8.0-10.7m/s durante todo o período como mostra a Figura 10.

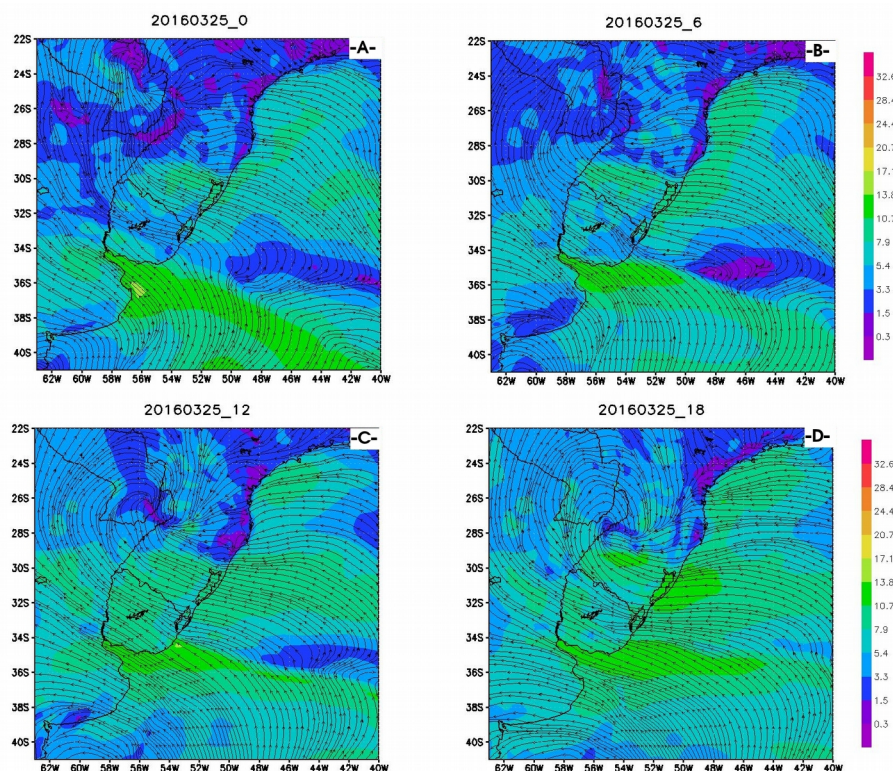


Figura 10 - Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10m para o dia 25 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18 UTC (A, B, C e D) respectivamente.

No dia 26 se tem uma baixa pressão de 1011hPa centrada entre o nordeste da Argentina e noroeste do Rio Grande do Sul. Durante o dia a baixa movimentou-se para sudeste até o centro-sul do Rio Grande do Sul. Um anticiclone de 1032hPa está em torno de 43°S/50°W estendendo uma crista sobre o centro-leste da Argentina e sul do Uruguai como Figura 8 (B).

Sobre a área costeira de interesse observou-se ventos de leste a sudeste entre 8.0-10.7m/s, superiores na costa do Rio Grande do Sul onde alcançaram valores entre 20.8-24.4m/s ao final do dia. Estes valores máximos de vento acontecem devido ao forte gradiente de pressão existente entre o centro de baixa pressão sobre o Rio Grande do Sul e o anticiclone sobre o Atlântico (Figura 11).

Sabe-se que os fortes ventos do leste que impoem os anticiclone geram ressacas na costa de Rio Grande do Sul (CANDELLA, 1997).

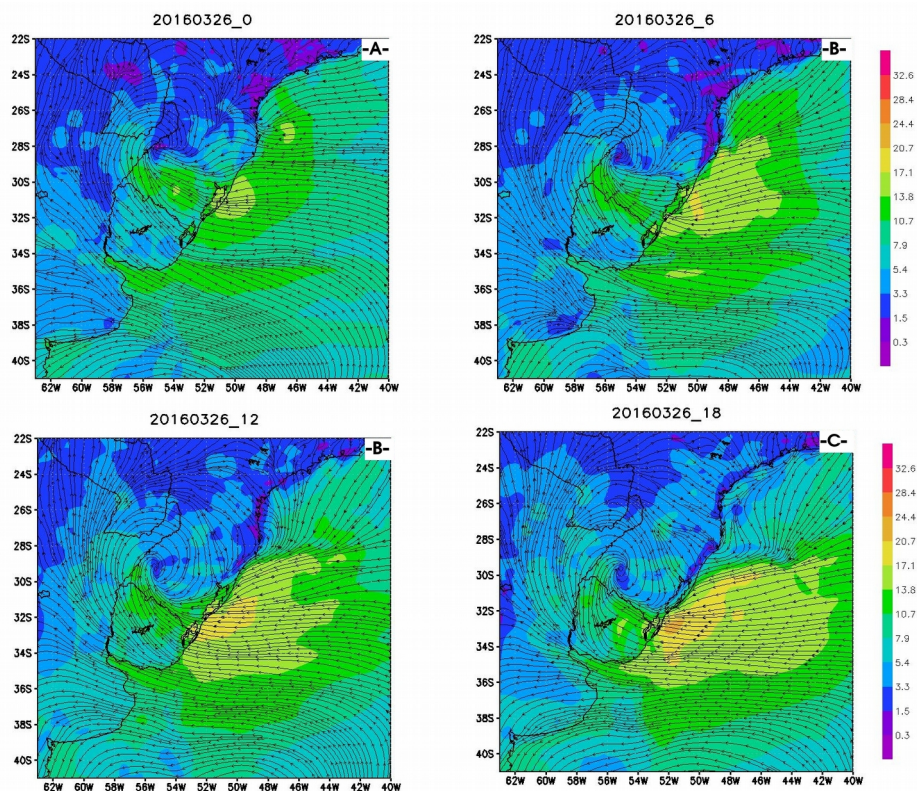


Figura 11 - Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 26 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18 UTC (A, B, C e D) respectivamente.

No dia 27 se tem o centro de baixa pressão de 1008hPa centrado sobre o sul do Rio Grande do Sul e nordeste do Uruguai. Na Figura 13 (A), se observa uma área de instabilidade associada ao centro de baixa sobre o mar. Um anticiclone amplo de 1032hPa em torno de 44°S/43°W estendendo uma crista sobre centro-leste da Argentina. Cavados são observados sobre o centro-sul da Argentina às 12 UTC como observa-se na Figura 12 (A).



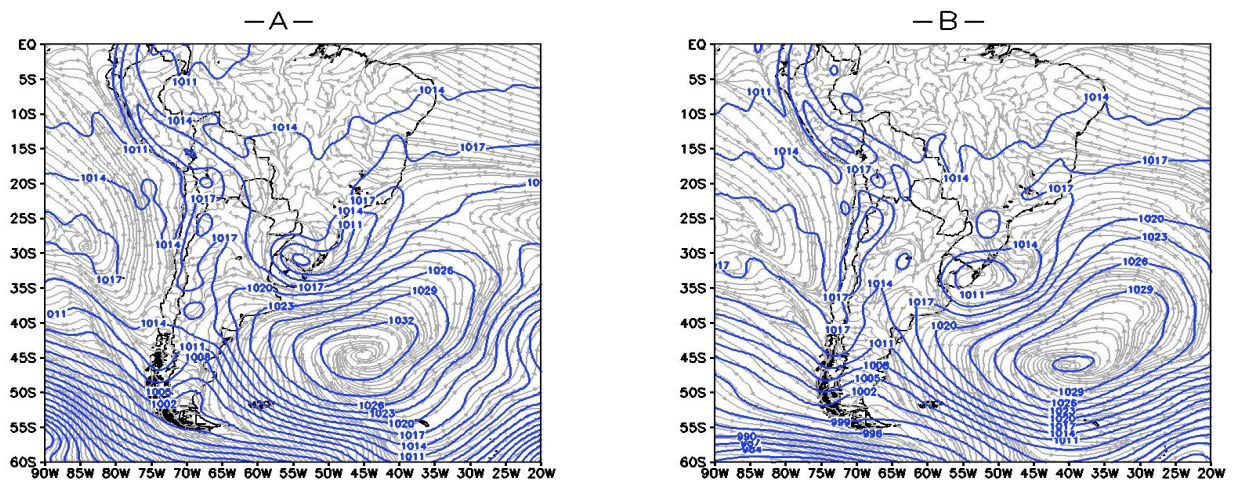


Figura 12 - PNMM (hPa) em linhas de azul, linhas de corrente em 1000hPa em cinza, correspondentes aos dias 27 (A) e 28 (B) de março do 2016 às 00 UTC.

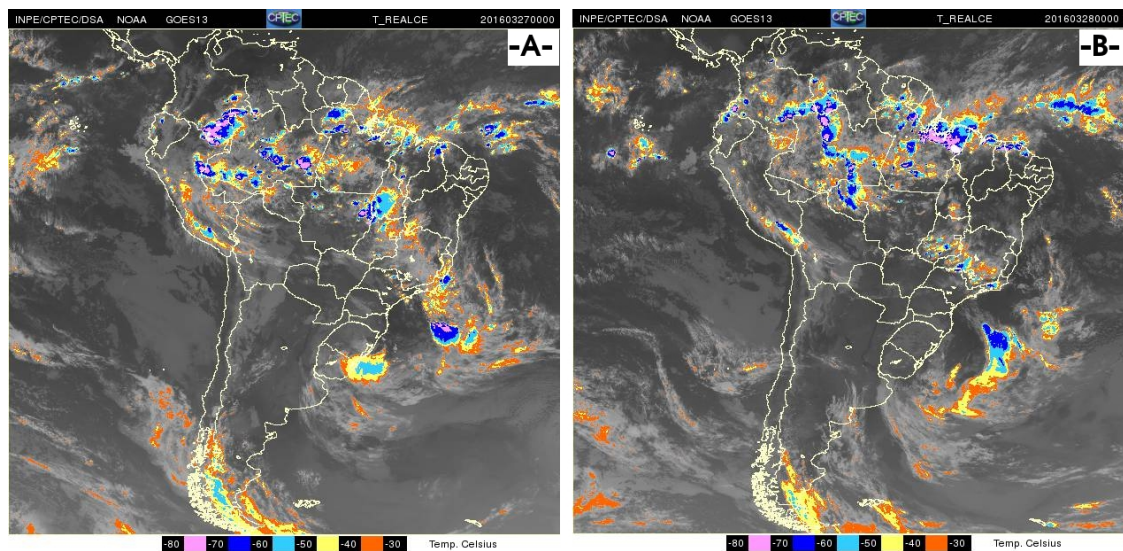


Figura 13 - Imagens de satélites correspondentes aos dias 27 (A) e 28 (B) de março do 2016 às 00UTC.

Fonte: Site do CPTEC, INPE

Sobre a área oceânica de interesse, continuam os ventos do leste ao sudeste entre 8.0-10.7m/s, na costa do Rio Grande do Sul alcançaram valores entre 20.8-24.4m/s. A área de fortes ventos sobre a costa do Rio Grande do Sul durante o dia se vai afastar da costa devido ao movimento do centro de alta pressão, impondo-se assim ventos noroeste entre 5.5-7.9m/s e no final do dia entre 8.0-10.7 m/s (Figura 14).

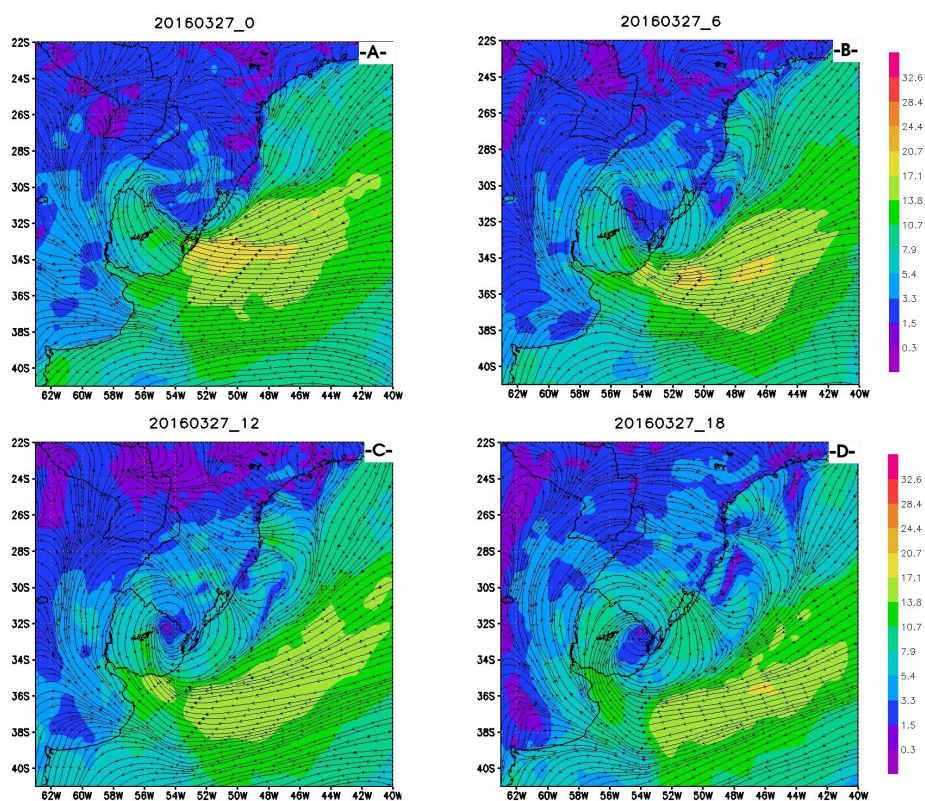


Figura 14 - Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10 m para o dia 27 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC (A, B, C e D) respectivamente.

No dia 28 o centro de baixa pressão com valor de 1008hPa saí do continente sobre o Oceano Atlântico adjacente, centrado aproximadamente em 35°S/55°W como observa-se na Figura 12 (B). A alta pressão se afasta para o centro do Oceano Atlântico Sul em torno de 45°S/40°W às 18UTC, imagem não mostrada.



No análise do vento na Figura 15, observa-se como a área de forte gradiente de pressão com ventos do nordeste entre 13.8-17.1m/s, se afasta do litoral. Sobre a costa de Rio Grande do Sul passa a impõe-se uma circulação ciclônica com máximo de vento em seu centro de 10.7-13.8m/s.

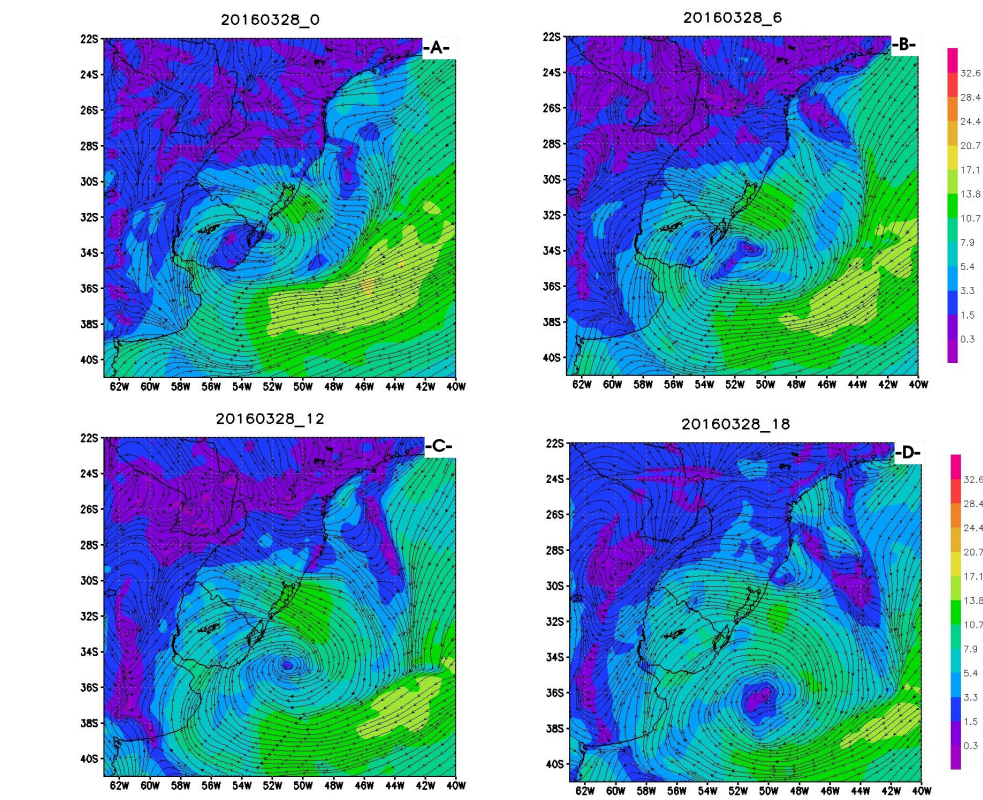


Figura 15 - Linhas de fluxo do vento (m/s) a 10m para o dia 28 de março do 2016 às 00, 06, 12, 18UTC (A, B, C e D) respectivamente.

## 4.2 Análise dos erros introduzidos aos modelos de ondas pelo campo de vento

### 4.2.1 Bóia Rio Grande

Fazendo uma comparação entre o vento simulado pelo GFS e o registro da bóia de Rio Grande vemos como ambos seguem uma mesma tendência (Figura 16). O primeiro máximo foi registrado bem ao final do dia 22, o segundo durante o dia 26 devido aos fortes gradientes de pressão na área entre um centro de alta pressão no

Atlântico e outro centro de baixa pressão sobre Rio Grande do Sul. O terceiro máximo menos intenso foi registrado no dia 28 devido aos forte ventos de um ciclone saindo ao mar.

Observa-se que o resultado da comparação entre o vento do GFS com os registros de vento da bóia de Rio Grande é muito bom, praticamente não deu erros de fase durante todo o período de avaliação. No dia 27 por volta das 00UTC, tem-se um máximo anômalo de Hs, esta situação corresponde a uma tempestade sobre a área como observa-se na Figura 13 (A). A diminuição na magnitude do vento registrada no dia 27 de março, é causada por uma transição de fortes gradientes com o avanço de um ciclone sobre a área. Já no dia 28, têm-se o centro do ciclone avançando sobre a área impondo novamente ventos fortes.

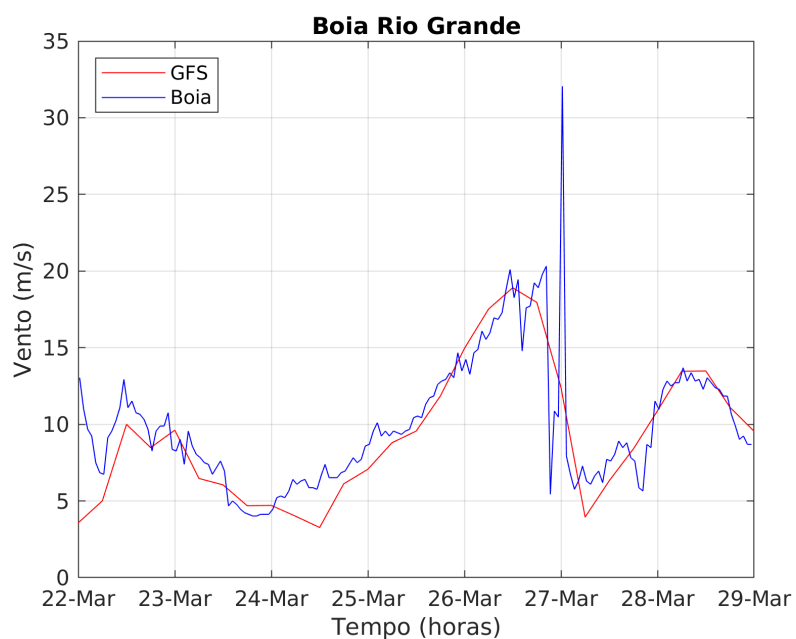


Figura 16 - Velocidade do vento do GFS (vermelho) e o registros (azul) na bóia de Rio Grande.

#### 4.2.2 Bóia Santos

No análise da bóia de Santos também se observa que os dados de vento do GFS e do registro da bóia seguem uma mesma tendência como mostra a Figura 17. Tem-se valores máximos de vento nos dias 25 e 26 de março devido a uma zona de convergência de umidade sobre a área que vai gerar instabilidade e tempo tormentoso.

Já nos dias 27 e 28 a magnitude do vento começa a diminuir e mantem-se a subestimativa pelo GFS. Para o dia 27, o GFS mostra máximo de 5.0m/s enquanto a bóia 9.0m/s. No dia 28 o GFS prognostica uma diminuição da magnitude com um máximo de 3.05m/s, enquanto o bóia mostra uma grande variabilidade na magnitude do vento com dois máximos de 5.75m/s e 4.88m/s. De maneira geral se pode dizer que os resultados da comparação do vento entre o GFS e os registros na bóia de Santos foram muito bons, com erros de fase muito pequeno durante todo o período de avaliação.

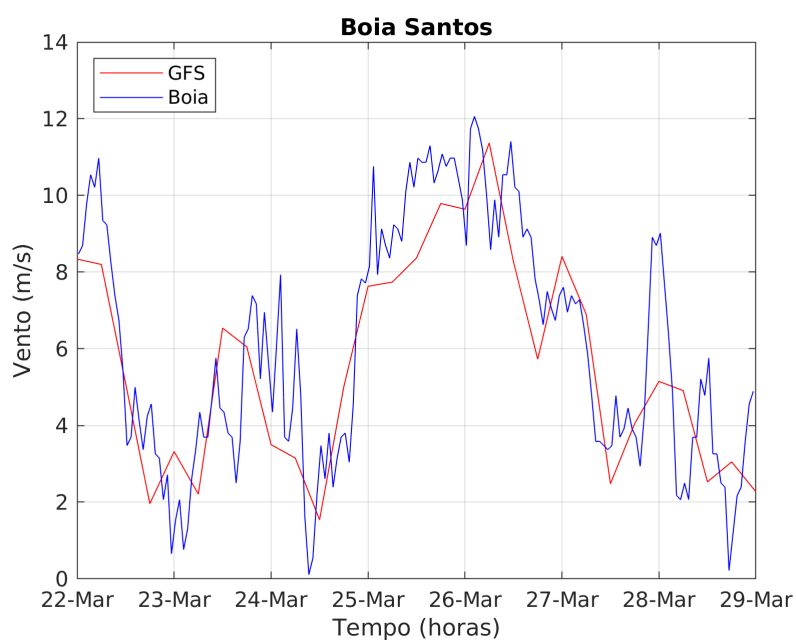


Figura 17 - Velocidade do vento do GFS (vermelho) e o registros (azul) na bóia de Santos.

### 4.3 Experimento numérico da configuração do domínio WW3

Foram comparadas as variabilidades temporais de Hs e Tp simuladas nos três domínios do WW3 (Dom1\_ww3, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3) para águas profundas com os dados das bóias e ondógrafos. Da comparação entre os Dom1\_ww3 e Dom2\_ww3, não se observa diferença entre os elementos simulados e por isso as simulações feitas com o Dom1\_ww3 não serão mostradas. As diferenças existentes entre as simulações das configurações do Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 e serão mostradas adiante.

As Figuras 18 e 19 representam a distribuição espacial da Hs simulada nos domínios Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 respetivamente. Foi escolhido o dia 28 de março para comparar os Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 porque é onde a onda que se aproxima à costa deixa de propagar-se como onda vaga para virar em marulhos. Percebe-se claramente uma diferença na Hs entre os dois domínios, tendo o Dom2\_ww3 maiores Hs do que Dom3\_ww3. Como mostram as imagens, em ambos domínios há um núcleo com Hs entre os 4.0-4.5 m no entorno de 37°S e 43°W, mas somente no Dom2\_ww3 simulou-se uma formação de um núcleo com Hs até 5.0m a partir do dia 28 à 22UTC.

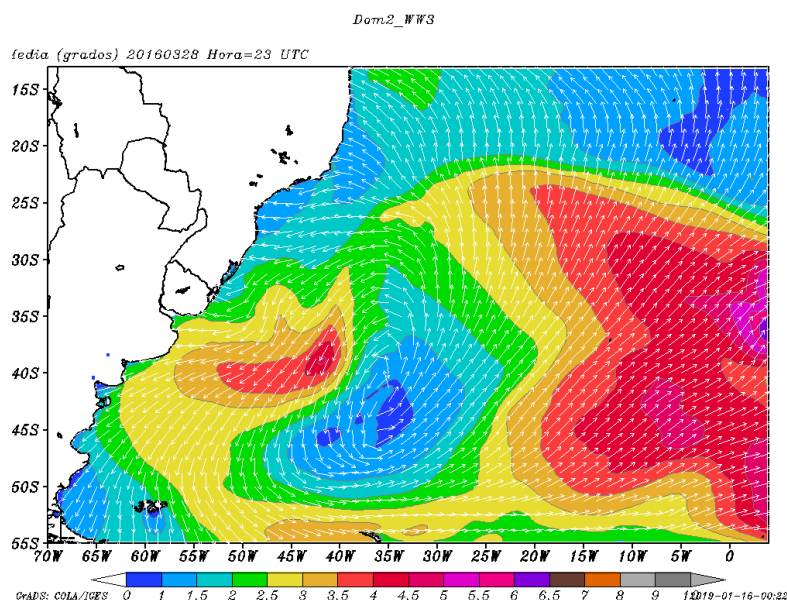


Figura 18 - Distribuição espacial da Hs em m e direção da onda (vetores) no dia 28 de março do 2016 às 23 UTC para o Dom2\_ww3.

Para a costa norte do Rio Grande do Sul e na costa Sul de Santa Catarina também observa-se diferença no campo de Hs. O Dom2\_ww3 simula Hs de 1.5-2.0m, enquanto o Dom3\_ww3 simula Hs entre 1.0-1.5m. Observe-se uma diferença significativa na costa do Rio de Janeiro no entorno de 27°S e 47°W: o Dom2\_ww3 simula Hs entre 1.0-1.5m, com máximos em Cabo Frio (entre 1.5-2.0m), enquanto no Dom3\_ww3 observa-se Hs inferiores a 1.0m. Essas diferenças na Hs simuladas entre os domínios Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 tendem a aumentar nos dias posteriores da simulação quando os marulhos gerados no mar aberto, que se vem propagando desde longas distâncias, começam a impactar a costa sul do Brasil.

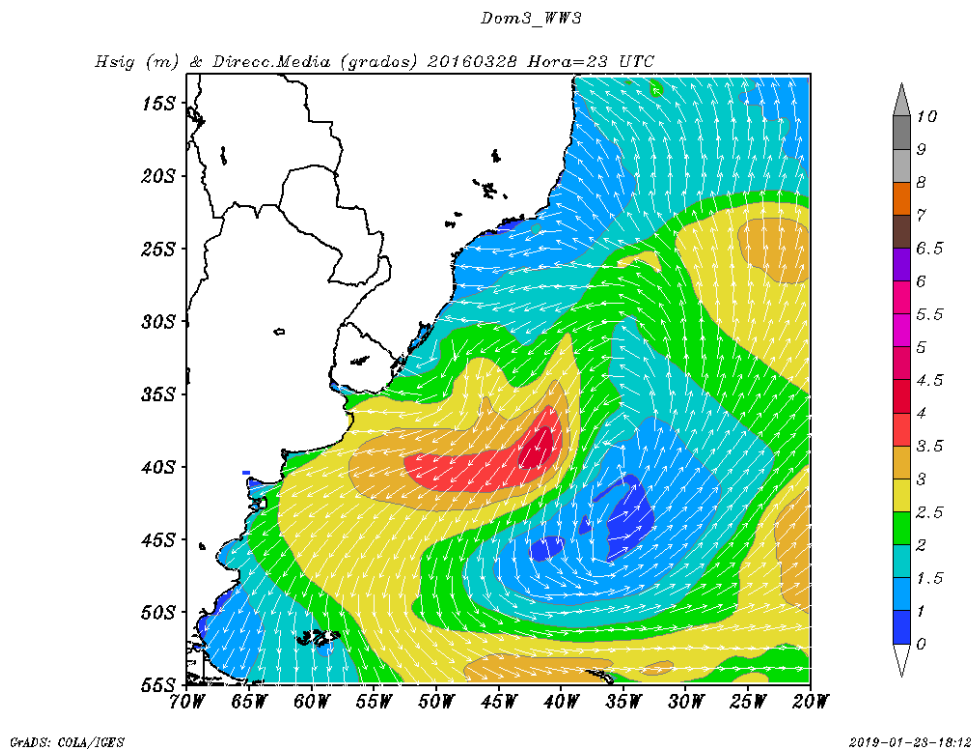


Figura 19 - Distribuição espacial da Hs em m e direção da onda (vetores) no dia 28 de março do 2016 às 23UTC para o Dom3\_ww3.

#### 4.4 Análise temporal das simulações com o modelo WW3 nos domínios Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 para as bóias

##### 4.4.1 Bóia Rio Grande

As evoluções da  $H_s$  nos Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 durante o período de simulação foram muito parecidas durante a grande maioria do tempo. Nos primeiros momentos da simulação o modelo não representou os dados registrados pela bóia em ambas configurações de grade, isto se atribui ao período de estabilização do modelo (*spin-up*) como observa-se na Figura 20. Os modelos de ondas precisam de tempo para desenvolver e dissipar o campo de ondas, isto introduz erros no começo da modelação (LIZANO, 2006; WANDI GROUP, 1988).

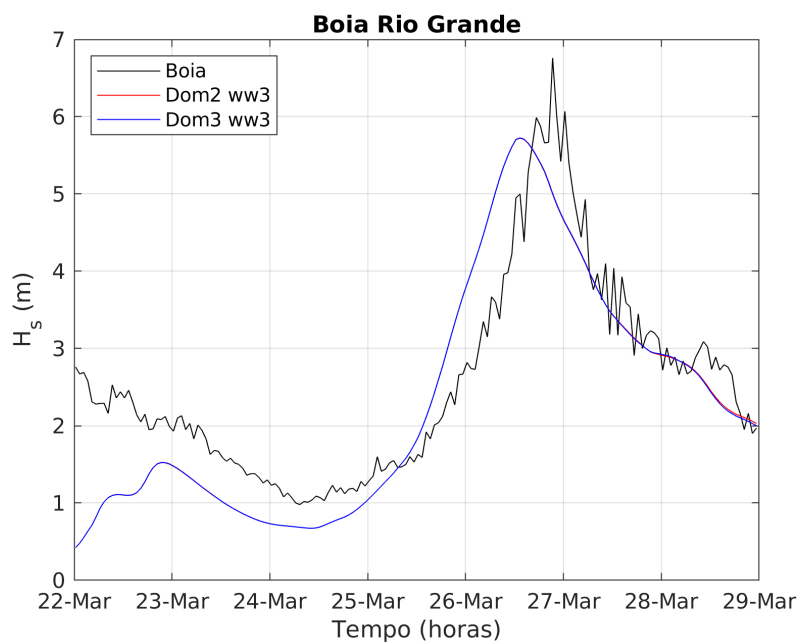


Figura 20 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (m) na bóia de Rio Grande, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

Registra-se uma mínima diferença na simulação de  $H_s$  entre os domínios Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 a partir do quinto dia. Nesta etapa da simulação as vagas

começam a diminuir por conta do enfraquecimento dos ventos gerados pelo gradiente de pressão entre o ciclone e alta pressão, e as ondas passam a propagar-se como ondas de marulho (livres das forças que as geraram). Como se abordou anteriormente, o crescimento das ondas de marulho vão depender do alcance geográfico do *fetch*, onde o maior *fetch* geográfico está associado com o maior crescimento da onda (SPM, 1984; CEM, 2006).

Outro aspecto a destacar é que essa diferença entre o Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 é mínima, (muito pequena) devido a bóia de Rio Grande estar muito perto da área de geração de ondas como observa-se na Figura 18. Na medida que aumenta a distância entre a área de geração de onda e a localização da bóia ou diminui a força do vento, irão aumentar as diferenças entre o Hs simulado, pelas duas configurações de domínios de Hs analisados.

Observa-se também, na Figura 20, como o modelo adianta levemente o tempo de Hs máximo nas duas configurações de Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 com respeito à bóia. Este momento no máximo da Hs simulado pelo WW3, está em correspondência com o momento de máximo do vento no GFS. Observe-se como o modelo WW3 subestimou o valor máximo de Hs em comparação com o máximo registrado pela bóia. Encontrou-se resultados similares em Infante (2015), onde ele simula o campo de ondas para uma frente fria no Golfo de México com o WW3.

O comportamento de Tp é similar ao Hs (Figura 21). Observa-se como o modelo consegue se estabilizar a partir do terceiro dia de simulação. Segundo Pérez (2011), utilizando um sistema de previsão de ondas com acoplagem entre os modelos WW3 e SWAN para o mar do Caribe e Golfo de México, conseguiram uma forçante de vento horária e uma estabilização dos modelos a partir das primeiras 12h. O sistema proposto neste trabalho utiliza dados de GFS a cada 6h.

Durante a maior parte do tempo de simulação Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 se comportam de um jeito similar, é só ao final do período que se vai ter uma pequena diferença entre as duas configurações como observa-se na Figura 21. Durante o dia



28, os dados da bóia mostram dois momentos de queda repentina no  $T_p$ , não simulado pelo modelo.

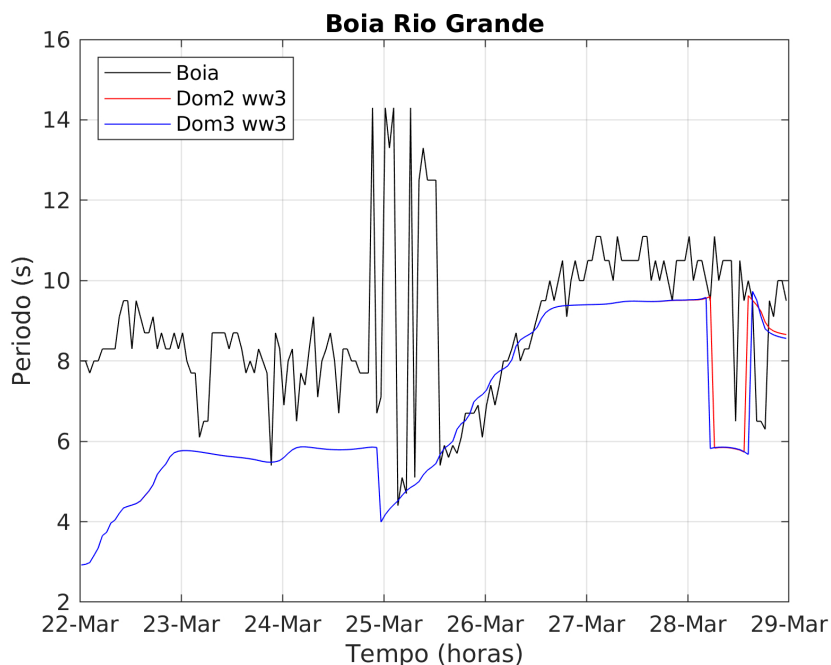


Figura 21 - Evolução temporária dos registros de  $T_p$  (s) na bóia de Rio Grande, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

#### 4.4.2 Bóia Santos

As evoluções da  $H_s$  nos Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 durante o período de simulação foram muito parecidas durante a grande maioria do tempo como observa-se na Figura 22. Destaca-se que nos últimos dias de simulação, o campo de ondas simulado subestima muito o dado registrado na bóia. Isso pode-se atribuir à presença do Elevado de Rio Grande (ERG) na frente da bóia, no entorno de  $31^\circ\text{S}$  e  $35^\circ\text{W}$ , que influencia na geração e propagação da onda assim como na chegada de marulhos do sudeste na área.



A diferença entre o Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 é mais significativa em comparação com a simulada para a bóia de Rio Grande. Isto ocorre pelo fato da bóia de Santos encontra-se afastada da área de geração de ondas e é muito maior a incidência de marulho na área como percebe-se nas Figuras 18 e 19. Uma vez mais mostra-se que o Dom2\_ww3 é a configuração mais adequada.

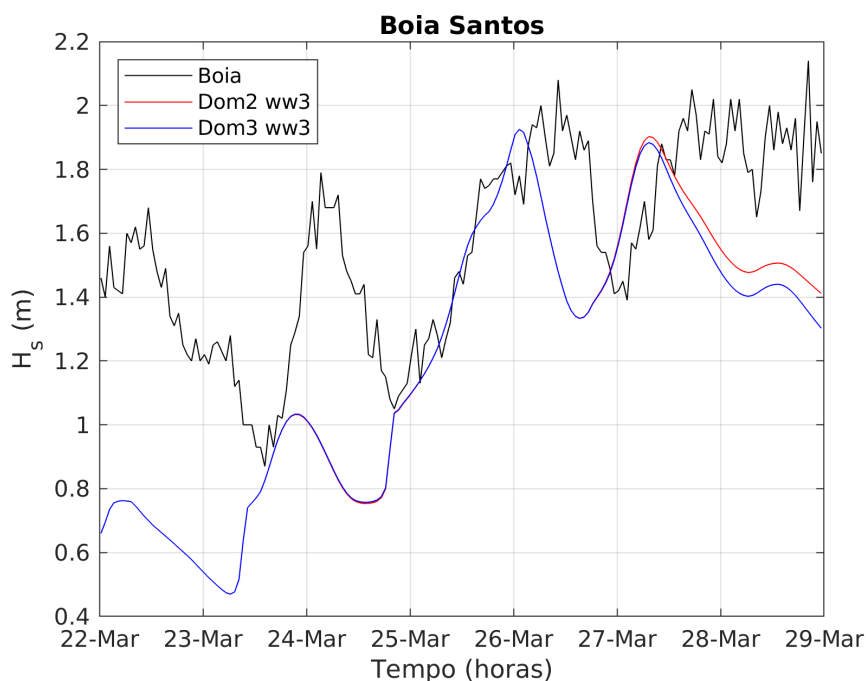


Figura 22 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (m) na bóia de Santos, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

Na Figura 23, observe-se que o comportamento do  $T_p$  é similar ao encontrado na bóia de Rio Grande, isto é, estabilização do modelo a partir do terceiro dia. No final do período analisado se observa maior diferença entre os dois domínios. Conclui-se mais uma vez mais que o Dom2\_ww3 representa melhor o campo de  $T_p$ . Para o dia 26 às 1:21 AM se tem um registro inesperado da bóia de  $T_p$  com um valor de 13.3s que o modelo não representou, isto situação corresponde a uma

tempestade sobre a área como se observar na Figura 9 (B) onde pode-se atribuir a um registro errado da bóia.

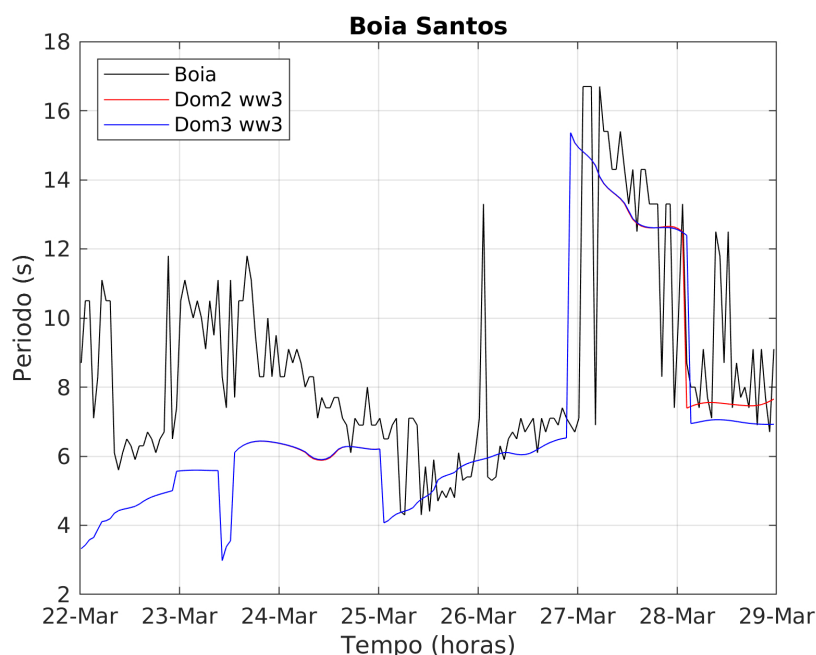


Figura 23 - Evolução temporária dos registros de  $T_p$  (s) na bóia de Santos, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

#### 4.5 Análises estatísticas das simulações com o WW3 (Dom2\_ww3) nas bóias

O análise dos índices foram realizadas a partir do dia 25, onde o modelo consegue representar bem o campo de ondas, nas bóias de Rio Grande e Santos. Primeiro se fez as análises para o período completo do 25-28 de março do 2016 para ter uma visão da simulação em geral, e depois dividiu-se em períodos de 24, 48 e 72h.

Para a estação de Rio Grande, como observado na Tabela 6, percebe-se que os valores de  $H_s$  simulados pelo WW3, se comportam de maneira muito parecida aos registro das bóias, fato que mostra-se pelos altos valores de correlação de 86% (se tem uma correlação linear) e os baixos valores de erros. Mostra-se que as séries simulada e registrada apresentam uma tendência central muito parecidas, com

apenas 0.09m de diferença na média. O erro médio positivo denota que o modelo teve uma pequena tendência a superestimar a magnitude da Hs ao longo do período.

Na bóia Santos, tem-se uma tendência central parecida com apenas 0,17m de diferença na média. A diferença negativa indica uma subestimação da Hs no modelo ao longo do período. A partir da análise do erro, observa-se que o desempenho do modelo foi bom para a bóia, mas apresenta um baixo valor de correlação de 37% e não apresenta uma correlação linear estatisticamente significativa.

Tabela 6 - Índices estatístico das saídas do WW3 nas bóias de Rio Grande (RG) e Santos no período de 25-28 de março do 2016.

<b>Índices estatísticos</b>	<b>RG</b>	<b>Santos</b>
Média aritmética da simulação (m)	3.29	1.56
Média aritmética da registrada (m)	3.2	1.73
Erro médio (m)	0.09	-0.17
Média do erro absoluto (m)	0.51	0.24
Erro quadrático médio	0.69	0.3
Desvio Padrão da simulação (m)	1.3	0.2
Desvio Padrão dos registros (m)	1.3	0.23
Proporção de Desvio Padrão (Dispersão relativa)	1.0	0.86
Coefficiente de correlação	0.86	0.37
Média do erro relativo (%)	16.1	13.3

Da análise estatística por período de prognóstico para a bóia de Rio Grande mostrado na Tabela 7 observa-se que o melhor período de simulação foi a partir das 72h com um MEA de 0.24, seguidos pelos períodos de 24 e 72h, todos coincidem com um EQM baixo de 0.09, 0.23 e 0.25 respectivamente. Este índice de EQM são muito mais sensíveis aos grandes erros, como mostra-se no pior período de prognóstico (48h) com um valor de 1.31. Esse comportamento é justificado observando-se a Figura 20, no dia 26, com a defasagem e subestimação do Hs. Também se tem em todos os períodos valores baixos de DR. No geral os índices indicam comportamentos muito parecidos entre as duas séries.

Tabela 7 - Índices estatísticos da simulação da Hs para a bóia de Rio Grande nos períodos de 24, 48 e 72h.

<b>Períodos (h)</b>	<b>MEA</b>	<b>EQM</b>	<b>DR</b>
0-24	0.38	0.23	1.01
24-48	1.04	1.31	1.05
48-72	0.38	0.25	0.58
>72	0.24	0.09	1.31

No caso da bóia de Santos o melhor período de prognóstico foi o de 24h, seguido pelos períodos de 72h e 48h como mostra-se na Tabela 8. O pior período de prognóstico foi o de 72h. Conforme já observado na Figura 22 os modelos não conseguem representar a tendência a partir do dia 28. Mas no geral os erros são baixos e tem-se valores de DR baixos também.

Tabela 8 - Índices estatísticos da simulação da Hs para a bóia de Santos nos período de 24, 48 e 72h.

<b>Períodos (h)</b>	<b>MEA</b>	<b>EQM</b>	<b>DR</b>
0-24	0.06	0.01	0.79
24-48	0.29	0.12	1.11
48-72	0.21	0.06	1.09
>72	0.4	0.17	0.44

#### **4.6 Análise temporal das simulações com o modelo WW3 nos domínios Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3 para os ondógrafos**

##### **4.6.1 Ondógrafo de Cassino**

No caso do ondógrafo de Cassino, como se mostra na Figura 24, não obteve-se bons resultados nas simulações com o modelo WW3 devido principalmente à localização do ondógrafo em águas rasas, na linha de costa onde se sabe que não é bom o modelo WW3. O mais adequado para estes ondógrafos é simular neste nível de profundidade o campo de ondas com o modelo costeiro SWAN. Em toda a série temporal o modelo WW3 superestimou o valor de Hs, tendo uma diferença máxima de 1.2m no tempo maior Hs. Embora de não representar muito bem a Hs das ondas na costa, o WW3 consegue representar a tendência da variabilidade no tempo da Hs com erro de fase muito pequeno. A Figura 25 mostra o Tp, como uma variável mais de saída do modelo WW3, onde observa-se novamente a estabilização do WW3 a partir das 72h.

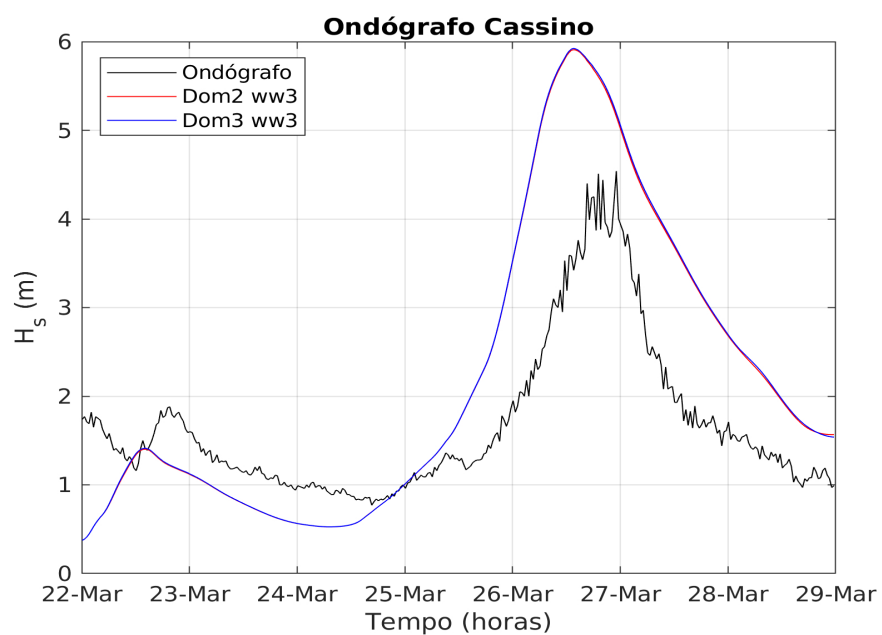


Figura 24 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (m), simulado e registrado, no ondógrafo de Cassino.

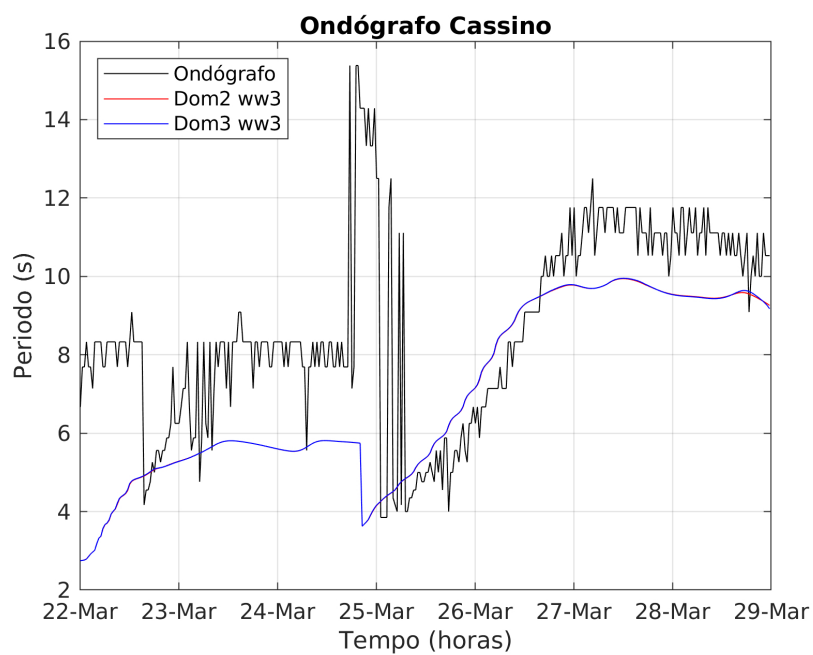


Figura 25. Evolução temporária dos registros de  $T_p$  (s) no ondógrafo de Cassino, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

#### 4.6.2 Ondógrafo de Tramandaí

No caso do ondógrafo de Tramandaí, como se mostra na Figura 26, tampouco obteve-se bons resultados nas simulações com o modelo WW3 devido também a sua localização em águas rasas. Em toda a série temporal o modelo WW3 superestimou o valor de  $H_s$ , tendo uma diferença máxima de 0.9 m aproximadamente no tempo maior  $H_s$ . Embora de não representar muito bem a  $H_s$  das ondas na costa, o WW3 consegue representar também a tendência da variabilidade no tempo da  $H_s$  com erro de fase muito pequeno. A Figura 27 mostra o  $T_p$ , como uma variável mais de saída do modelo WW3, onde observa-se novamente a estabilização do WW3 a partir das 72h.

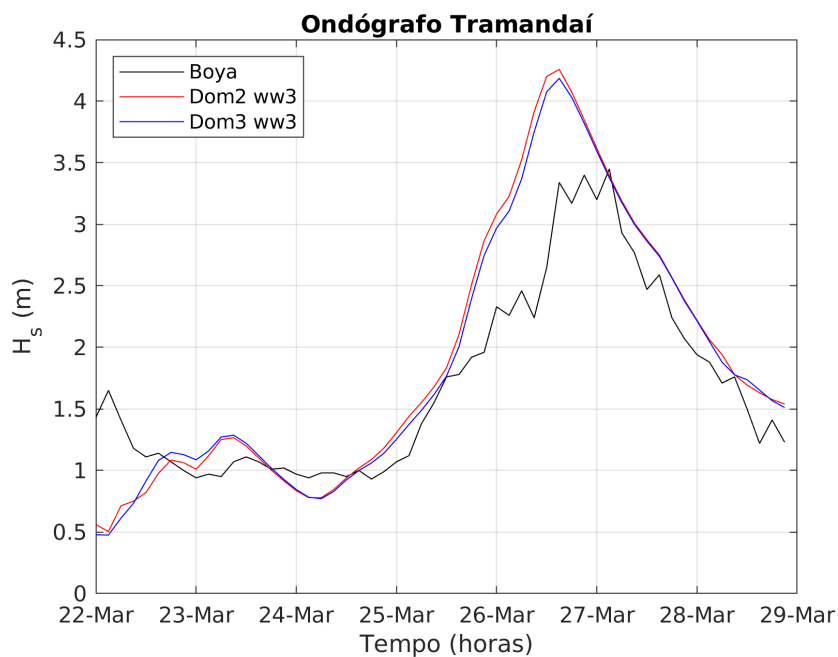


Figura 26 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (m) no ondógrafo de Tramandaí, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

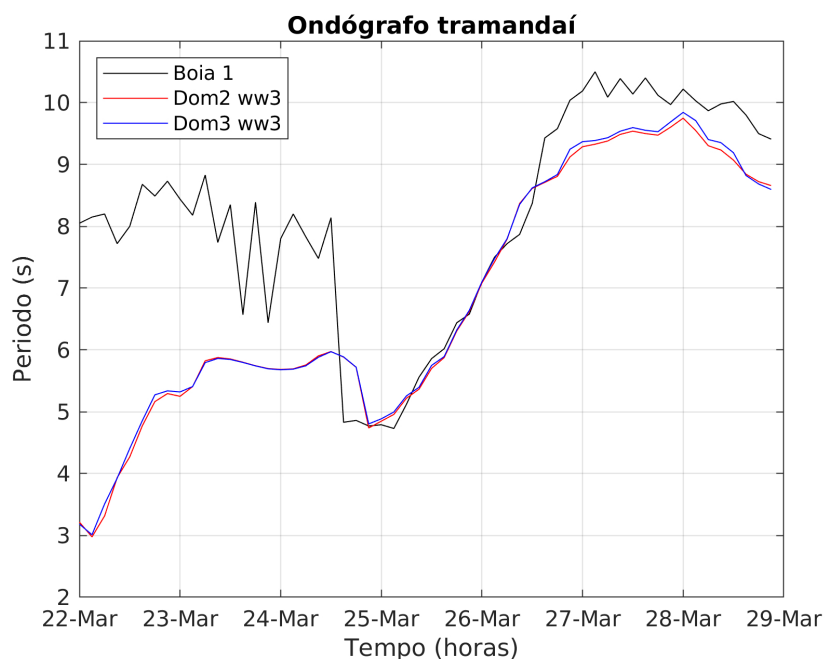


Figura 27 - Evolução temporária dos registros de  $T_p$  (s) no ondógrafo de Tramandaí, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

#### 4.7 Análises estatísticas das simulações com o WW3 nos ondógrafos

Fazendo a análise estatística das simulações dos ondógrafos como mostra-se na Tabela 9, observa-se que para o caso de Cassino as séries simulada e registrada tem-se tendências centrais próximas, com 1.19m de diferença na média. O erro médio positivo denota que o modelo teve uma tendência a superestimar a magnitude da  $H_s$  ao longo do período. Os valores de  $H_s$  simulados se comportam de maneira muito parecida ao registro da bóia, fato que mostra-se pelo alto valor de correlação de 93% (se tem uma correlação linear), mas para este caso vamos a ter altos valores de erros.

Para o caso de Tramandaí, tem-se tendências centrais próximas, baixos valores de erros e um alto CC de 90%, pelo que se tem duas séries que se comportam de maneira muito parecida. Concluindo-se que na avaliação das saídas do WW3, o modelo teve melhores resultados em situação de forte ressaca e cerca



da área de geração como é o caso da bóia de Rio Grande com ondas até 6.6m. Situação contrária no caso de Santos com ondas pequenas de até 2.1m, subestimando a Hs.

Tabela 9 - Índices estatísticos das saídas do WW3 nos ondógrafos de Cassino (Cs) e Tramandaí (Tm) no período de 25-28 de março do 2016.

<b>Índices estatísticos</b>	<b>Cs</b>	<b>Tm</b>
Média aritmética da simulação (m)	3.21	2.61
Média aritmética da registrada (m)	2.02	2.15
Erro médio (m)	1.19	0.46
Média do erro absoluto (m)	1.2	0.47
Erro quadrático médio	1.39	0.62
Desvio Padrão da simulação (m)	1.51	0.9
Desvio Padrão dos registros (m)	0.98	0.69
Proporção de Desvio Padrão (Dispersão relativa)	1.5	1.3
Coeficiente de correlação	0.93	0.9
Média do erro relativo (%)	59.37	21.84

#### 4.8 Saídas gráficas das simulações com o WW3

Foi gerado o campo de onda com o modelo a cada 1h partindo das 00UTC e posteriormente gera-se mapas também a cada 1h da Hs. O tempo de rodagem foi de 2h30min para 7 dias num I5 com 8G de RAM. Algumas saídas gráficas do modelo são mostradas na Figura 28, onde se observa a evolução espacial da Hs no domínio de WW3. Se escolhe os dias 25, 26, 27 e 28 de março na Figura 28 (A, B, C

e D) respectivamente, por ser os dias em que o WW3 se estabiliza, e a hora 00UTC é escolhida arbitrariamente.

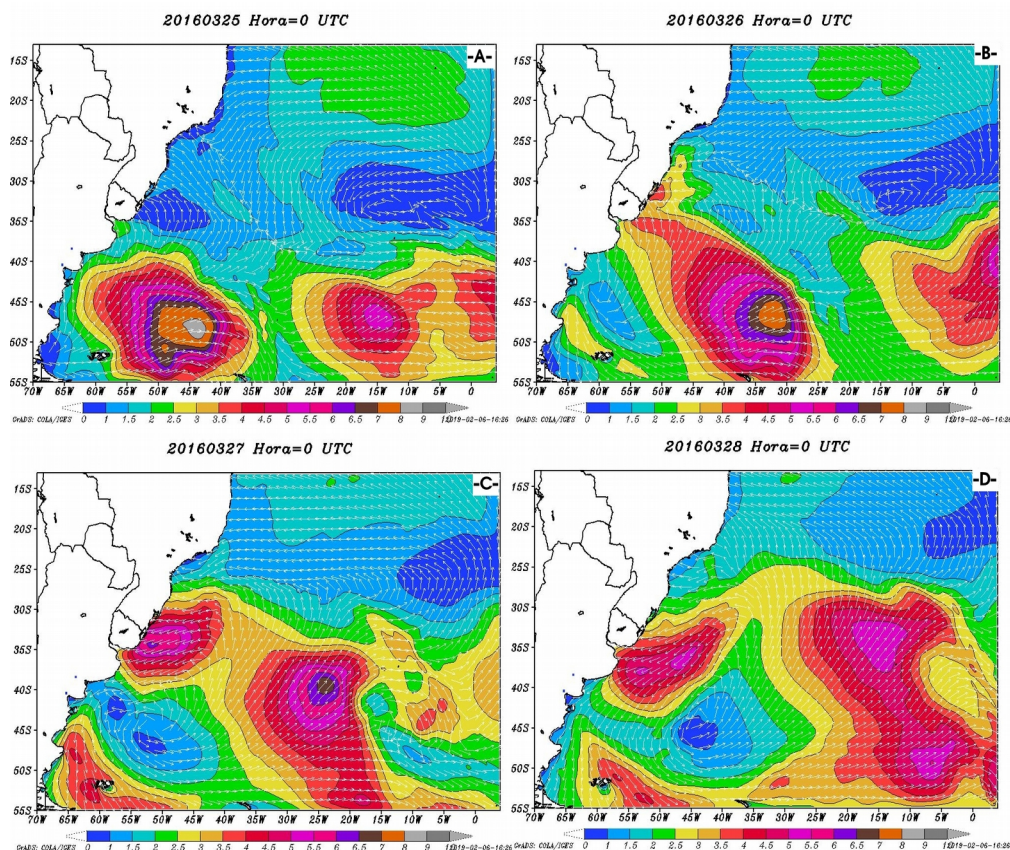


Figura 28 - Distribuição espacial do campo de Hs (m) e a direção média (grau) simulado pelo modelo WW3 nos dias 25 (A), 26 (B), 27 (C) e 28 (D) de março do 2016 às 00 UTC.

Durante o dia 25 o WW3 simulou um núcleo de ondas com Hs de até 9.0m em torno dos 47°S e 46°W. Outro núcleo com ondas entre 5.0-5.5m é observado em torno dos 46°S e 15°W como observa-se na Figura 28 (A). Ambos núcleos com grandes Hs, e com movimentos para o leste e nordeste, diminuem a partir de horas da tarde como se mostra na Figura 28 (B). Sobre a costa de Rio Grande do Sul se observam ondas entre 1.0-1.5m que aumentam a partir das 05UTC entre 2.0-2.5m, superior no entornos dos 32°S e 52°W entre 3.5-4.0 m, de acordo a imagens não mostradas.

No dia 26 o núcleo mais ao leste saí do domínio de WW3, enquanto o outro se movimenta para o nordeste diminuindo em Hs até 7.0m como se observa na Figura 28 (C). Sobre a costa de Rio Grande do Sul se tem ondas entre 2.5-3.0m, que aumentam durante o período simulado de norte ao sul, tendo-se um núcleo máximo de Hs entre 6.0-6.5m movimentando-se para o sul de acordo a imagens não mostradas.

Para o dia 27 o núcleo entorno dos 38°S e 24°W às 00UTC, continua movimentando-se para o nordeste com Hs inferiores entre 5.0-5.5m no final do período como se mostra na figura 28 (D). Sobre a costa de Rio Grande do Sul diminui gradualmente a Hs de sul a norte até onda entre 2.0-2.5m ao final do período. Enquanto o dia 28 o núcleo com grande Hs no Oceano Atlântico Sul continua diminuindo até ondas entre 4.0-4.5m, e sobre a costa de Rio Grande do Sul se tem ondas inferiores entre 1.5-2.0m ao final do período de acordo a imagens não mostradas.

#### **4.9 Simulação com o modelo de ondas SWAN**

Dado a que os melhores resultados na modelagem de ondas para águas profundas do Oceano Atlântico Sul com o modelo WW3 foram obtidas na configuração Dom2\_ww3, se simulam condições de fronteiras para ser acopladas com o modelo de ondas costeiro SWAN nesta configuração. As condições de fronteiras foram geradas com uma resolução de 9km a cada 1h para ser propagada até a costa. Na Figura 29 observa-se a evolução temporal do campo de ondas simulados com WW3 e SWAN junto aos registros da bóia para o ondógrafo do Cassino. O modelo SWAN consegue representar a tendência da evolução do campo de Hs, ficando em todo momento abaixo do valor registrado. A diferença máxima entre os dados simulado e registrado é de 2m aproximadamente. O mesmo fenômeno de subestimação do campo Hs simulado é observado no ondógrafo de Tramandaí na Figura 30. Também em Tramandaí o modelo SWAN consegue representar a tendência da evolução do campo de Hs.

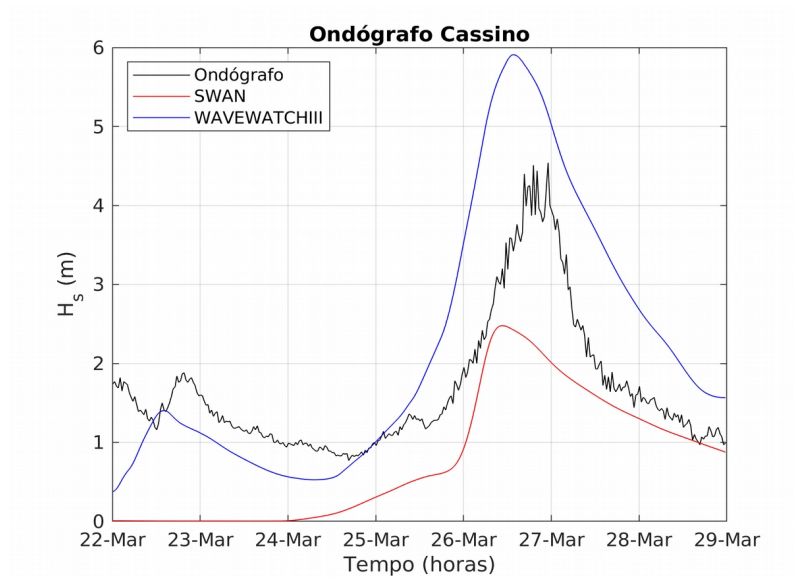


Figura 29 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (m) no ondógrafo de Cassino, Dom2\_ww3 e SWAN.

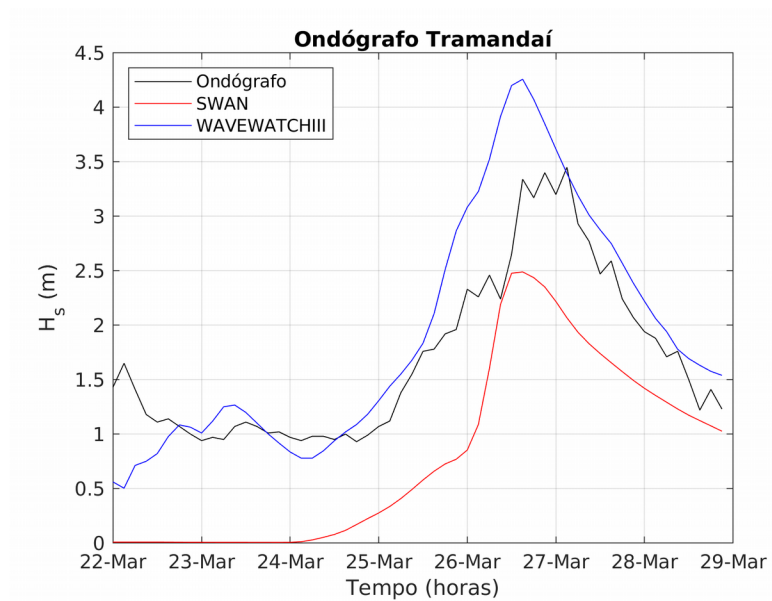


Figura 30 - Evolução temporária dos registros de  $H_s$  (s) no ondógrafo de Tramandaí, Dom2\_ww3 e Dom3\_ww3.

#### 4.10 Análises estatísticas das simulações com o SWAN

Na análise estatística para o caso de Cassino (Cs) e Tramandaí (Tm), de forma geral, mostra-se como as séries simulada e registrada vão ter uma tendência central muito parecida, com apenas 0.69m e 0.78m de diferença na média respectivamente. Ambas têm erros médios negativos que denotam que o modelo teve uma tendência a subestimar a magnitude da Hs ao longo do período, como mostra-se na Figura 25 e 27. Observa-se um alto valor de correlação de 87% e de 85% respectivamente (se tem uma correlação linear), mas também altos valores de erros como mostra-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Índices estatísticos das saídas do SWAN nos ondógrafos de Cassino e Tramandaí no período de 25-28 de março do 2016.

<b>Índices estatísticos</b>	<b>Cs</b>	<b>Tm</b>
Média aritmética da simulação (m)	1.33	1.37
Média aritmética da registrada (m)	2.02	2.15
Erro médio (m)	-0.69	-0.78
Média do erro absoluto (m)	0.69	0.78
Erro quadrático médio	0.87	0.86
Desvio Padrão da simulação (m)	0.64	0.66
Desvio Padrão dos registros (m)	0.98	0.69
Proporção de Desvio Padrão (Dispersão relativa)	0.65	0.95
Coeficiente de correlação	0.87	0.85
Média do erro relativo (%)	33.3	37.99

Comparando-se os erros nas simulações dos dois ondógrafos para WW3 e SWAN aprecia-se que eles diminuem no caso da simulação do Cassino, como se mostra na Tabela 11. Não é o caso para o ondógrafo de Tramandaí onde os erros aumentam no caso da simulação com SWAN como mostra-se na Tabela 12.

Tabela 11 - Resumo dos erros das simulações com os modelos WW3 e SWAN no ondógrafo de Cassino.

<b>Erros\Modelo</b>	<b>WW3</b>	<b>SWAN</b>
<b>MEA</b>	1.2	0.69
<b>EQM</b>	1.39	0.87
<b>MER</b>	59.37	33.3

Tabela 12 - Resumo dos erros das simulações com os modelos WW3 e SWAN no ondógrafo de Tramandaí.

<b>Erros\Modelo</b>	<b>WW3</b>	<b>SWAN</b>
<b>MEA</b>	0.47	0.78
<b>EQM</b>	0.62	0.86
<b>MER</b>	21.84	37.99

#### **4.11 Saídas gráficas do modelo de ondas SWAN**

O campo de ondas com o modelo SWAN foi gerado a cada uma hora partindo das 00UTC e posteriormente gera-se mapas também a cada 1h da Hs. O tempo de rodagem foi de 30min para 7 dias. Algumas saídas gráficas do modelo SWAN são mostradas nas Figuras 31 e 32, onde se observa a evolução espacial da Hs. Se escolhe os dias 25, 26, 27 e 28 de março, por ser os dias em que o WW3 se estabiliza e as horas 00 e 12UTC são escolhidas arbitrariamente.

Durante o dia 25 o SWAN simulou para a costa de Rio Grande do Sul ondas inferiores a 1.0m durante todo o período, Figura 31 (A e B). O dia 26 observa-se um aumento da Hs para o sul da costa entre 1.0-1.5m de acordo á Figura 31 (C), superior a partir das 12UTC com ondas entre 2.0-2.5m como se observa na Figura 31 (D). No extremo norte da costa tem-se ondas entre 1.5-2.0m. Para o dia 27 observa-se na costa ondas entre 2.0-2.5m como se observa na Figura 32 (A), inferiores ao final do período com ondas entre 1.5-2.0m como mostra a Figura 32 (B). Por ultimo no dia 27 se tem ondas entre 1.0-1.5 m durante todo o período, Figura 32 (C e D).

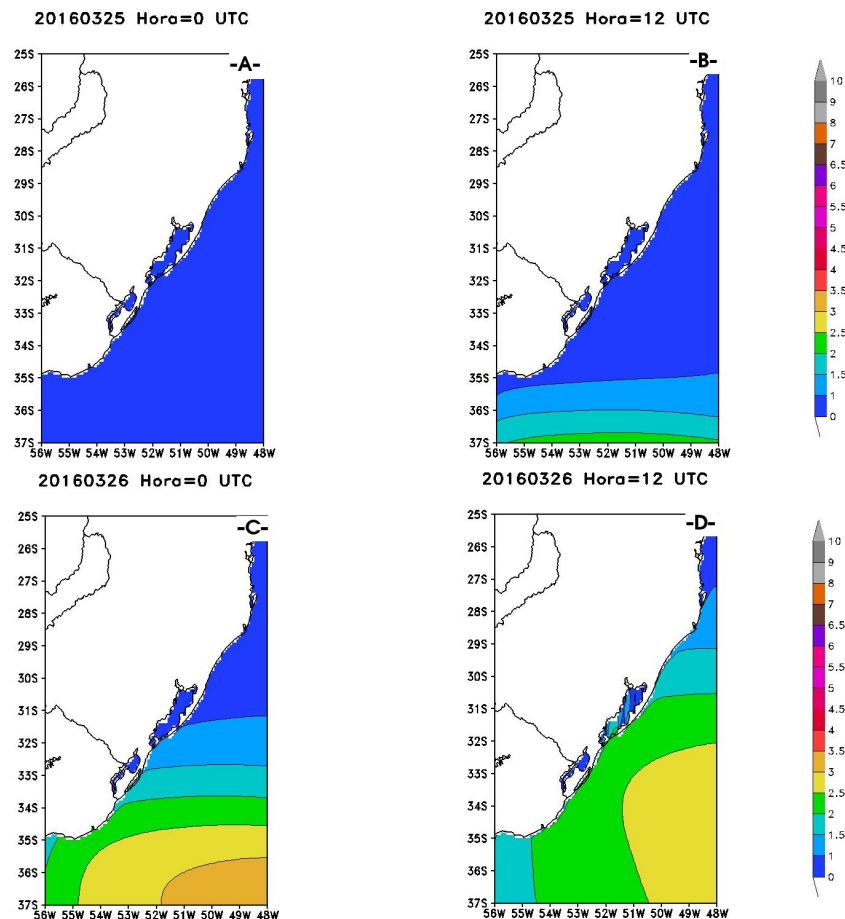


Figura 31 - Distribuição espacial do campo de Hs (m) simulado pelo modelo SWAN nos dias 25 e 26 às 00 e 12UTC de março do 2016 respectivamente (A, B, C e D).



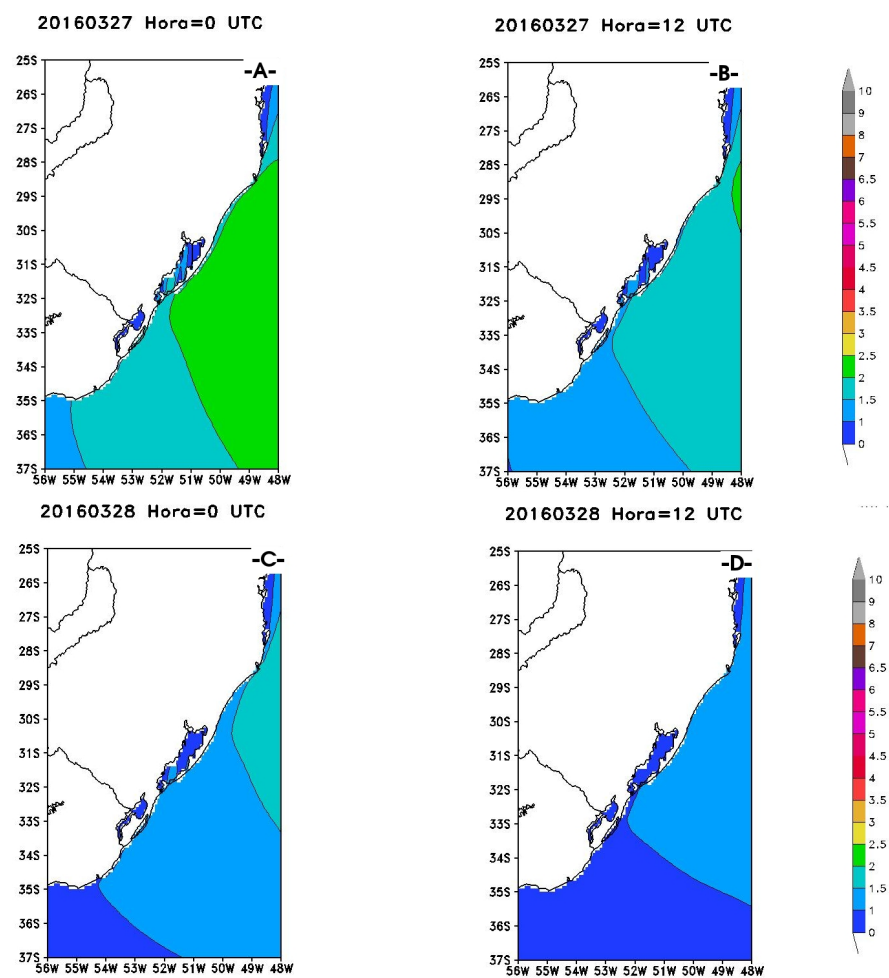


Figura 32 - Distribuição espacial do campo de  $H_s$  (m) simulado pelo modelo SWAN nos dias 27 e 28 às 00 e 12UTC de março do 2016 respectivamente (A, B, C e D).



## 5 Conclusões e recomendações

Na presente investigação foi proposto uma metodologia para o prognóstico de ondas oceânicas na costa sul do Brasil e águas oceânicas adjacentes do Oceano Atlântico Sul.

Da análise sinótica feita inicialmente das condições de vento sobre o mar, se identifica a costa do Rio Grande do Sul e seus arredores como área de geração de fortes ressacas no período da simulação. Os grandes valores na magnitude do vento o dia 26 de março do 2016 sobre a costa do Rio Grande do Sul entre 17.1-20.7m/s, estão associados a um forte gradiente de pressão entre um centro de alta pressão ao sul do oceano Atlântico e um centro de baixa pressão sobre o estado do Rio Grande do Sul.

No análise dos erros introduzidos aos modelos de ondas pelo campo de vento na escala local, se tem que o modelo GFS nos dois casos de avaliação (bóia de Rio Grande e Cassino) consegue representar muito bem as tendências da evolução do campo no tempo. Se teve resultados muito bons com erro de fase muito pequeno para a bóia de Rio Grande e praticamente não deu erro de fase na bóia de Santos.

A configuração do WW3 selecionada no trabalho para o prognóstico de ondas em águas profundas é o Dom2\_ww3, porque ele consegue representar os marulhos gerado mar afora que se propaga desde largas distâncias. O modelo WW3 consegue estabilizar-se a partir do terceiro dia do prognóstico, portanto, o modelo SWAN também estabiliza-se a partir do terceiro dia. Portanto, recomenda-se um *spin-up* de 3 dias.

Com relação às avaliações feitas com as simulações do WW3 e os registros, no caso da bóia de Rio Grande, se consegue uma boa representatividade da Hs, pelos baixos índices de erros e correlação linear. A leve defasagem adiantada da Hs do modelo WW3 com respeito à bóia de Rio Grande, esta em correspondência com o momento de máximo de vento no GFS. Para o caso Santos, apesar dos baixos valores de erros não se teve uma correlação linear. As saídas para os ondógrafos do Cassino e Tramandaí não foram boas devido a sua localização em águas rasas. O adequado é simular este nível de profundidade com o modelo SWAN. Apesar disto se teve resultados aceitáveis em Tramandaí. No entanto, o SWAN não consegue uma boa representatividade do campo de ondas. Se recomenda testar a configuração do domínio SWAN, como se fez no domínio WW3, além de introduzir o campo de vento nas simulações.

No análise da distribuição espacial da Hs, o modelo WW3 gerou núcleos de grandes ondas em águas profundas do Oceano Atlântico Sul destacando-se o dia 25 com Hs de até 9.0m no sul do domínio. Para costa de Rio Grande do Sul, WW3 gerou ondas entre 2.5-3.0m com um núcleo máximo ao sul da costa com ondas entre 6.0-6.5m. SWAN gerou sobre a costa ondas de até 2.5m o dia 27.

Por fim, a metodologia proposta para o sistema de prognóstico de ondas no litoral sul de Brasil e águas oceânicas adjacentes é adequada. Ela não é um produto completamente acabado. Para trabalhos futuros sugere-se acoplar o modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF) aos modelos de ondas WW3 e SWAN com o objetivo de melhorar a resolução temporal de entrada do campo de vento aos modelos de ondas oceânicas, e consequente diminuir os altos valores dos erros.

Sugere-se também continuar testando as diferentes parametrizações para uma maior quantidade de casos com o objetivo de analisar de uma melhor forma o comportamento dos modelos de ondas WW3 e SWAN. Além disso, salienta-se que é aconselhável agregar às simulações dos modelos de ondas campos de correntes marinhas, nível médio do mar entre outros campos mais de entrada. Sugere-se usar

uma batimetria com melhor resolução espacial, como é a *General Bathymetric Charts of the Oceans* (GEBCO) com 30 s de resolução espacial. E na avaliação da Hs simulada, usar dados históricos de ondas registrados por satélites (ASCAT, WINDSAT, etc).

## Referências

AIRY, G. B. Tide and Waves. **Encyc. Metrop.** Article 192, p. 241-396, 1845.

ARRIAGA, A. M.; RUIZ, J. F. **Verificación del modelo Global NWW3 y del modelo regional NAH.** INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA BOGOTÁ, D.C. 2014.

BARLETTA, R. C. **Efeitos da iteração oceano atmosfera sobre a morfodinâmica das praias do litoral central do Rio Grande do Sul, Brasil.** Rio Grande, 2000. Dissertação (Mestrado) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. **Coastal Engineering** **1978**, p. 569–587, 1978.

BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; RIS, R. C. The "SWAN" wave model for shallow water. **In the Proc. of the 25, h Int. Conf. Coastal Eng.**, Orlando, Florida, p. 668-676, 1996.

BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. *A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation*, **J. Geoph. Research**, 104, C4, p.7649-7666, 1999.

BRETSCHNEIDER, C. L. A Theory for Waves of Finite Height. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 7, p. 146-183, 1960.

CANDELLA, R. N. **Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica.** Rio de Janeiro, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro.

CANDELLA, R. N.; SOUZA, S. M. L. Ondas Oceânicas Extremas na Costa Sul-Sudeste Brasileira Geradas por Ciclone com Trajetória Anormal em Maio de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 257-266, 2013.

CAVALERI, L.; RIZZOLI, P. M. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 86, n. C11, p. 10961-10973, 1981.

CEM (Coastal Engineering Manual). ARMY, U. S. Coastal Engineering Manual. Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate, Engineer Manual 1110-2-1100. **US Army Corps of Engineers, Washington, DC**, 2006.

COLI, A. B. **Análise das alturas de onda ao longo do Rio Grande do Sul: dados históricos e altimétricos**. RS, 1994. Dissertação (graduação em oceanografia) - Curso de Oceanologia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, RS.

COLI, A. B. **Estudo do Clima Ondulatório em Rio Grande**. Rio Grande do Sul, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal de Rio Grande.

CUCHIARA, D. C. **Modelagem numérica do comportamento das ondas no sul do Brasil e suas interações com os depósitos lamíticos na praia do Cassino**. Rio Grande do sul, 2008. Dissertação (Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Curso de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal de Rio Grande.

DIAS DA SILVA, P. E. **Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica**. São José dos Campos, 2013. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de pesquisas esaciais (INPE).

DONELAN, M. A.; HAMILTON, J.; HUI, W. H. *Directional spectra of windgenerated waves*. **Phil. Trans. Roy. Soc.** London, v. 315, p.509-562, 1985.

FENTON, J. D. A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves. **ASCE Jour. Waterw, Port, Coastal and Ocean Engr**, v. 111, p. 216-234, 1985.

FENTON, J. D. The Numerical solution of Steady Water Wave Problem. **Jour. Comp. and Geo.** v. 14, p. 357-368, 1988.

FIRPO, M. A. F.; SANSIGOLO, C. A.; ASSIS, S. V. Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 95-106, 2012.

Manual de referencia del modelo de ayuda a la gestión del litoral español (GIOC). Modelo de propagación de oleaje espectral (OLUCA-SP 2.0). Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente). **Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas** (Universidad de Cantabria), 2002.

GRIMM, A. M. Clima da região sul do Brasil. **Tempo e clima no Brasil**, v.1, p. 259-275, 2009.

HASSELMANN, K. *On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum*. Part 1. **J. Fluid Mech.**, v. 12, p. 481-500, 1962.

HASSELMANN, K. *On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum*. Part 2. **J. Fluid Mech.**, 15, 273281; Part 3. 15, p. 385-398, 1963.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H. *Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, **Dtsch. Hydrog. Z. Suppl.** Artigo 8, n. 12, p. 95, 1973.

HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. **Journal of Physical Oceanography**, v. 15, n. 11, p. 1369-1377, 1985.

INFANTE, J. C. Simulación de inundaciones costeras en el litoral habanero provocadas por sistemas frontales mediante la combinación de modelos (WRF-WW3-SWAN). La Habana, 2015. Dissertação (Graduação em Meteorologia)-Curso de graduação em meteorologia, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC).

INNOCENTINI, V.; DOS SANTOS CAETANO NETO, E. A case study of the 9 August 1988 South Atlantic storm: Numerical simulations of the wave activity. **Weather and Forecasting**, v. 11, n. 1, p. 78-88, 1996.

KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, K.; HASSELMANN, S.; JANSSEN, P. A. E. M. **Dynamics and Modelling of Ocean Waves**. Cambridge University Press, p. 532, 1994.

KORTEWEG, D. J.; DE VRIES, G. On the Change of Form of Long Waves Advancing in a Rectangular Canal, and on a New Type of Stationary Waves. **Phil. Mag.**, 5th Série, v. 39, p. 422-443, 1895.

LAITONE, E. V. The Second Approximation to Cnoidal and Solitary Waves. **Jour. Fluid Mech.**, v. 9, p. 430-444, 1960.

LAITONE, E. V. Limiting Conditions for Cnoidal and Stokes Waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 1555-1564, 1962.

LAITONE, E. V. Séries Solutions for Shallow Water Waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, p. 995-998, 1965.

LIZANO, O. G. Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México. **Top. Meteor. Oceanog.**, v. 8(1), p. 40-29, 2001.

LIZANO, O. G. Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica. **Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI)** Universidad de Costa Rica, 2003.

LIZANO, O. G. Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación. **Boletín científico CIOH**, v. 24, p. 36-47, 2006.

MACHADO, D. M. **Previsão de Eventos Extremos de Ondas para a Praia do Cassino, Rio Grande.** RS, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

MEIRELLES, S.; VIOLANTE-CARVALHO, N. Modelagem computacional da propagação de ondas superficiais no oceano: um subsídio para a compreensão dos fenômenos ópticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 555-563, 2007.

MILES, J. W. The Korteweg de Vries Equation: A Historical Essay. **Jour. Fluid Mech.**, v. 106, p. 131-147, 1981.

MITSUYASU, H. *A note on the nonlinear energy transfer in the spectrum of windgenerated waves.* **Rept. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.**, 16, p. 251-264, 1968.

MITSUYASU, H. A Historical Note on the Study of Ocean Surface Waves. **Journal of Oceanography**, v. 58, p. 109-120, 2002.

ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL (OMM). **Guía para el Análisis y pronóstico de las olas.** n. 702, Ginebra, Suiza, p. 250, 1998.

PALHA, A.; FORTES, C. J.; TEIXEIRA, P. R. de F. Análise comparativa da aplicação dos modelos REFDIF e REFDIF\_S à zona Torres-Mostardas. In: **Semengo - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.** Rio Grande, 2006.

PEREGRINE, D. H. Interaction of Water Waves and Currents. **Advances in Applied Mechanics**, Academic Press, New York, v. 16, p. 9-117, 1976.

PÉREZ, A. B. **Pronóstico del oleaje en las costas cubanas y mares Interamericanos, mediante el uso de los modelos numéricos MM5, WW3 y SWAN.** La Habana, 2011. Dissertação (Graduação em Meteorologia)-Curso de graduação em meteorologia, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC).

PIERSON, W.J.; MARKS W. *The power spectrum analysis of ocean wave records*. **Trans. Amer. Geophys. Union**. 33, p. 834-844, 1952.

PIERSON, W.J.; MOSKOWITZ, L. *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii*. **J. Geophys. Res.**, 69(24), p. 5,181-5,190, 1964.

PIERSON, W., TICK, L.; BAER, L. *Computerbased rocedures for predicting global wave forecasts and wind field analyses capable of using wave data obtained by space craft*. **Proc. Nav. Hydrodyn.Symp**, 6th, p. 499-529, 1966.

PEZZI, L. P.; DE SOUZA, R. B.; QUADRO, M. F. L. Uma revisão dos processos de interação oceano-atmosfera em regiões de intenso gradiente termal do Oceano Atlântico Sul baseada em dados observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 428-453, 2016.

RAMÍREZ, R. D. M.; ARIAS, A. O. Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. **Avances en Recursos Hidráulicos**, n. 15, 2007.

RIS, R. C. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. **Oceanographic Literature Review**, v. 11, n. 44, p. 1234, 1997.

ROMEU, M. A. R. **Refração-difração de ondas: inclusão de ilhas por meio de áreas de dissipação de energia**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis.

RUSSELL, J. S. Report on Waves. **14th Meeting Brit. Assoc. Adv. Sci.**, p. 311-390, 1844.

SCHWARTZ, L. W. Computer Extension and Analytic Continuation of Stokes' Expansion for Gravity Waves. **Jour. Fluid Mech**, v. 62, p. 553-578, 1974.

SLOMP, L. E. **Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul**. RS, 2004. Dissertação (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

SHORE PROTECTION MANUAL (SPM). **Army Coastal Engineering Research Center**, Vol. 1, U.S., 1984.

SKJELBREIA, L.; HENDRICKSON, J. Fifth Order Gravity Wave Theory. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 7, p. 184-196, 1961.

STOKES, G. G. On the Theory of Oscillatory Waves. **Trans. Camb. Phil. Soc.**, v. 8, p. 441-455, 1847.



STOKES, G. G. *Math. Phys. Papers*, V 1, Camb. Univ. Press, 1880.

TOLMAN, H. L. *The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas*. **Technical Report 892**, Faculty of Civil engineering, Delft University of Technology, ISSN 01696548, 1989.

TOLMAN, H. L. *A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents*. **J. Phys. Oceanogr.**, n. 21, p. 782-797, 1991.

TOLMAN, H. L.; CHALIKOV, D. V. Development of a third-generation ocean wavemodel at NOAA-NMC. Proc. Waves - **Physical and numerical modelling**, M. Isaacson and M.C.Quick Eds., Vancouver, p. 724-733, 1994.

TOLMAN, H. L.; CHALIKOV, D. V. Source terms in a third-generation wind-wave model. **J. Phys. Oceanogr.**, n. 26, p. 2497-2518, 1996.

TOLMAN, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB **Technical Note 151**, p. 97, 1997.

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

TOLMAN, H. L. User Manual and System documentation of WAVEWATCH-III versão 2.22. **Technical Note**, U.S. Department of Commerce, NOAA, NWS, NCEP, Washington, DC, 2002.

TOLMAN, H. L. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. **Parallel Computing**, v. 28, n. 1, p. 35-52, 2002a.

TOLMAN, H. L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA / NWS / NCEP / MMAB **Technical Note 276**, p. 194 + Appendices, 2009.

TOLMAN, H. L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16*. NOAA / NWS / NCEP / MMAB **Technical Note 329**, p. 326 + Appendices, 2016.

TOMAZELLI, LUIZ. O regime dos ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 20, n. 1, p. 18-26, 1993.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), War Department. A summary of the Theory of oscillatory wave. **Technical Report**. n. 2, p.43. Washington, 1942.

VEGA FUENTES, M. J. **Comparación de metodologías de refinamiento de escala de reanálisis de oleaje**. 2017. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada)- Universidad del Norte, Colombia.

VILLWOCK, J. A. **Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil**. A Synthesis. Pesquisas, p. 5-49, 1984.

WANDI GROUP. The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. ***Journal of Physical Oceanography***, v. **18**, p. 1775-1810, 1988.

WHITHAM, G. B. *Linear and Nonlinear Waves*. **Wiley Interscience**, New York, 1974.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2006.

WILLIAMS, J. M. Limiting Gravity Waves in Water of Finite Depth. ***Phil. Trans. Roy. Soc. London, Séries A***, v. 302, p. 139-188, 1981.