

## EFEITO DO DETALHAMENTO DOS VENTOS NA MODELAGEM DE AGITAÇÃO MARÍTIMA NO OESTE DO ATLÂNTICO SUL

ANA CRISTINA PINTO DE ALMEIDA PALMEIRA, RICARDO DE CAMARGO E RONALDO MAIA DE JESUS PALMEIRA

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

anactn@gmail.com, ricamarg@model.iag.usp.br, palmeira@gmail.com

Recebido Fevereiro de 2010 – Aceito Agosto de 2011

### RESUMO

Neste trabalho foram feitas simulações numéricas de ondas de gravidade da superfície do mar, utilizando o modelo WAVEWATCH-III versão 1.18 sobre o Atlântico, com a finalidade de avaliar a importância do detalhamento dos ventos para diferentes estados de mar. O domínio escolhido foi delimitado pelos paralelos 18°S e 45°S, e pelos meridianos 035°W e 070°W, de modo que o centro do domínio ficasse sobre o litoral do RS. Para cada evento, foram inseridos ventos oriundos do modelo de mesoescala RAMS (grade de 0,34° x 0,284° e saída temporal a cada hora) e oriundos do modelo global do NCEP (grade de 2,5° x 2,5° e saída temporal a cada 6 horas), no intuito de verificar a influência das escalas na geração de ondas de superfície do mar.

Notou-se que nos eventos extremos, as simulações superestimaram as alturas das ondas. Foi verificado também, que as integrações, alimentadas por dados da Reanálise do NCEP, foram as mais discrepantes dos valores observados *in situ*, se comparados com os valores resultantes da simulação com os ventos oriundos do modelo RAMS. O comportamento mais preciso dos casos RAMS evidenciou a importância dos fenômenos de mesoescala para a geração dos trens de ondas; ou seja, das ondas que se propagam em grupo. Na ocorrência de calmaria, as ondas foram subestimadas, sendo então levantadas duas linhas de ação: a primeira de ampliar o domínio escolhido, pois esse padrão parece estar associado a ondulações geradas em uma região ainda mais remota e a segunda, iniciar o WW3 com um campo de onda mais realístico.

**Palavras-chave:** Modelo de ondas, altura significativa de ondas, *downscaling*, Atlântico Sudoeste.

### ABSTRACT: EFFECT OF WIND DISCRETIZATION IN THE MODELING SEA WAVE OF WESTERN SOUTH ATLANTIC

This work carried out numerical simulations of gravity waves of the sea surface using the model WAVEWATCH-III version 1.18 over the Atlantic in order to evaluate the importance of detailing wind features for different sea conditions. The chosen area was delimited by parallels 18° S and 45° S and the meridian 35° W and 70° W, so that the center of the grid was over the RS coast. For each event, wind fields from the RAMS mesoscale model (grid of 0.34° x 0.284° and hourly output time) and from the NCEP global model (grid of 2.5° x 2.5° and temporal output every 6 hours) were inserted into the WW3 model in order to verify the influence of scales in the generation of sea surface waves. It was noted that in extreme events, the simulations overestimated the heights of the waves. Comparing to the observed *in situ* wind fields, it was also noticed that the integrations powered by NCEP reanalysis data showed more discrepant results than the integrations from the RAMS model. The more precise behavior when using RAMS data points out the importance of mesoscale phenomena for the generation of wave trains, which propagate in groups. During calm wind events, the wave heights were underestimated, raising two lines of action: the first is to extend the chosen domain, because this pattern seems to be associated with waves generated in a far remote region and the second is to start the WW3 with a more realistic wave field.

**Keywords:** Wave model, significant wave height, *downscaling*, Southwest Atlantic.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Atlântico Sul é afetada por inúmeros sistemas sinóticos, que proporcionam significativas trocas de energia na superfície do mar, alterando as circulações locais e modificando a circulação de grande escala (Campos *et al.*, 2010; Camargo e Harari, 1994; Castro e Lee, 1995), como por exemplo, o posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No Atlântico Sudoeste, combinam-se feições sinóticas semi-permanentes como a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e distúrbios baroclínicos de latitudes médias, como os ciclones extratropicais e as altas polares que caracterizaram os sistemas frontais. Cabe mencionar que a presença da barreira orográfica da Cordilheira dos Andes exerce papel importante nas características climáticas da região de estudo, seja na distribuição das massas de ar, na interação com as ondulações das correntes de jato e também na canalização do escoamento de baixos níveis responsável pelo transporte de calor e umidade da região tropical para as latitudes mais ao sul.

No contexto da geração de agitação marítima, a persistência da ASAS impõe a condição mais freqüente, porém menos energética; por sua vez, os ciclones extratropicais e as altas polares associadas estão ligados aos eventos extremos, sendo que os ciclones apresentam o gatilho para a formação das maiores ondulações, enquanto altas polares funcionam no sentido de manter a persistência e a extensão da pista de vento.

Vários estudos observacionais e numéricos de ondulações sobre o Atlântico têm sido realizados. Candella (1997) avaliou, através de um modelo de segunda geração, as ondulações típicas do litoral Atlântico, baseando-se nos dados do ondógrafo da Petrobrás (Marlim). Parente (1999) apresentou uma técnica de análise direcional das ondas, evidenciando as diferentes componentes que contribuem para o estado do mar e sob diferentes configurações atmosféricas. Innocentini *et al.* (2001) avaliaram as vagas próximas ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo e Innocentini *et al.* (2002) simularam a ressaca marítima de maio de 2001 na região sudoeste do Atlântico Sul. Pinho (2003) propôs uma classificação para o estado do mar de acordo com diferentes sistemas meteorológicos atuantes no Atlântico Sul. Silva (2008) avaliando a região da Bacia de Campos, onde predomina o ASAS, conclui que as ondulações dispersivas demoram cerca de dois dias e permanecem pelo menos por 24 horas, sendo que menos de 10% das alturas são superiores a 2,0 m. Campos (2009), através de modelagem usando modelagem de ondas, avaliou diferentes posicionamentos e intensidades dos sistemas meteorológicos que pudessem contribuir na altura das ondas na Bacia de Campos.

No intuito de caracterizar um campo atmosférico persistente capaz de provocar ondulações significativas na superfície do mar, foi feito um levantamento de alguns dos

muitos fenômenos de ressacas marítimas no litoral Sul/Sudeste do Brasil nos últimos anos, disponíveis na imprensa, como indicado na Tabela 1.

## 2. DADOS E METODOLOGIA

Foi usado o modelo de onda WAVEWATCH-III (WW3) versão 1.18 (Tolman, 1990), que é um modelo de terceira geração desenvolvido pelo NOAA/NCEP com os mesmos princípios do WAM - *Wave Model* (WAMDIG, 1988, Komen *et al.* 1994). Ele resolve numericamente a equação de balanço Euleriano, que pode ser escrita, tanto na forma de equação de transporte, como na forma de conservação. Ele calcula a quantidade de energia em cada ponto de grade (misto de modelo espectral com ponto de grade), utilizando quatro índices: dois para áreas, um para período e um para direção. Entretanto, a física do modelo não é válida para pequenas profundidades (menores do que 40-50 m), implicando na não aplicabilidade nas regiões adjacentes à linha de costa.

As equações governantes incluem refração e difração devido às variações espaciais e temporais da profundidade média da água e das correntes médias, aumento da onda devido à ação do vento, interações de ressonância não-linear onda-onda, dissipação e fricção com o fundo marinho, etc. É interessante ressaltar que a propagação da onda é considerada linear e que os efeitos não-lineares, como interações onda-onda, são incluídas direto nos termos fontes. Os elementos da modelagem envolvem condições iniciais, vento, corrente (pista e dissipação de energia), as interações não lineares, propagação, relaxação direcional e interação vaga/marulho, profundidade, efeitos de bordas, costas e ilhas.

Desta forma, a equação válida para águas profundas sem refração e correntes significativas é:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + c_g \cdot \nabla S = F_{nl} + F_{in} + F_{diss} \quad (1)$$

onde:  $S = S(\omega, \theta, t, x)$  = é o espectro de variância 2-D, dependente da freqüência  $\omega$ ; da direção de propagação  $\theta$ ; do tempo  $t$  e da posição  $x$ ;  $c_g$  = velocidade de grupo em águas profundas;  $F_{nl}$  = transferência de energia não-linear por interações onda a onda;  $F_{in}$  = entrada do vento;  $F_{diss}$  = dissipação.

### 2.1 Dados dos ondógrafos

No intuito de avaliar alguns eventos específicos de agitação marítima, foi necessário buscar campanhas antigas em diversas instituições do Brasil. O primeiro evento a ser estudado foi a ressaca em abril de 1997 no litoral do Rio Grande do Sul e o segundo evento foi escolhido durante um período de relativa calma, a fim de testar a resposta do modelo nessa situação.

**Tabela 1** - Alguns eventos severos de ressacas no litoral Atlântico. (Fonte: Imprensa)

Data	Local	Características
02/01/1980	RS	Ventos intensos sobre o litoral sul do Brasil.
09/06/1985	RS	Ondas de até 3,0 m e 288 pessoas desabrigadas.
02/06/1987	RJ	Ondas de até 2,5 m e cerca de 4 barcos naufragados.
12/08/1988	RJ	Ventos de 23,3 ms <sup>-1</sup> e ondas de 2,0 m.
29/11/1990	RS	Ondas de 3,0 m de altura significativa.
25/08/1992	RJ	Ciclone no oceano acoplado a uma alta continental gerando H <sub>s</sub> de 6,5 m.
09/03/1994	RS	Ondas maiores que 3,0 m no litoral gaúcho.
09/04/1994	RJ	Duas massas polares consecutivas, com formação de ciclones extratropicais.
07/09/1996	RJ	Frente fria persistente.
26/04/1997	RS	Ciclone extratropical e alta polar persistente.
19/04/1998	RS	Ciclone extratropical com rápido deslocamento.
22/05/1999	RS ao RJ	Ondas acima de 5 m com 55 pescadores resgatados.
01/06/1999	RS ao RJ	Ventos acima de 18 ms <sup>-1</sup> .
28/05/2000	RJ	Ondas acima de 3 m de altura.
22/06/2000	RJ (Leblon)	Cerca de 58 pescadores resgatados e ondas de 2,5 m.
19/05/2001	RJ	Ciclone no oceano acoplado a uma alta continental em maré de sizígia.
09/05/2007	RJ (Copacabana)	Ondas de SW/S com 2,5 a 3,0 m .
29/05/2007	RJ (Niterói)	Ondas de SW/S com 2,5 a 3,0 m .
04/05/2008	RS ao RJ	Ondas de SE e SW com 3,0/4,0 m associados a um ciclone extratropical.
09/05/2009	SP (Ubatuba)	Ondas de SE com 2,5/3,0 m.
12/05/2010	PR (Matinhos)	Ondas de 2,5 m.
01/06/2010	ES e BA	Ondas de 2,5 m.
08/05/2011	RJ	Ondas de 3,0 m de Copacabana à Itacoatiara.
29/05/2011	RJ (Niterói)	Ondas de 3.0/4.5 m com pista de SW.

Como o ondógrafo em abril de 1997 encontrava-se na posição 32°10'S051°58'W sobre lâmina d'água inferior a 50 m, foi escolhido um ponto próximo a ele (32°10'S050°30'W) para as comparações, indicados por regiões não hachuradas (círculo cheio e quadrado cheio, respectivamente) na Figura 1. A cruz na Figura 1 refere-se ao ondógrafo da Marinha do Brasil, o qual localizava-se em 32°52'S050°50'W na profundidade superior a 50 m, de modo que sua própria coordenada supre a condição básica para a física do modelo.

## 2.2 Configuração do modelo

O modelo foi configurado utilizando o esquema de propagação *Ultimate Quickest* (Leonard, 1991), usando para entrada e dissipação o pacote de termo fonte de Tolman e Chalikov (1996), fricção no fundo no modo *Jonswap* (Hasselmann *et al.*, 1973) e interação não-linear onda a onda. O domínio escolhido foi delimitado pelos paralelos 18°S e 45°S e pelos meridianos 035°W e 070°W, de modo que o centro do domínio ficou sobre o litoral do RS (Figura 1). A resolução espacial adotada foi de 0,25°, o passo de tempo global utilizado foi de 2700 segundos e as saídas foram a cada 1 h, durante 10 dias. Cada simulação teve em média, 8 h de duração.

Os ventos utilizados como forçantes para o WW3 tem basicamente duas origens. A primeira refere-se aos

campos analisados de grande escala fornecidos pelo *Climate Diagnostics Center* (CDC/NOAA), comumente conhecidos como Reanálise do NCEP, cuja resolução espacial é de 2,5° em latitude e longitude e a resolução no tempo é de 6 horas. A segunda fonte de campos de vento se baseia na utilização de um modelo meteorológico de mesoescala que permite aumentar a resolução no espaço e no tempo, procedimento conhecido como *downscaling*, fornecendo, portanto ventos com maior detalhamento.

O modelo de mesoescala empregado é o *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS), versão 4.3, e sua descrição básica pode ser encontrada em Trípoli e Cotton (1982), Cotton *et al.* (1982), Tremback (1990) e Pielk *et al.* (1992). A escolha desse modelo residuiu em sua vasta utilização no Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, tanto em propósitos científicos, como em finalidades operacionais. Cabe ainda esclarecer que o RAMS realiza assimilação tetra-dimensional (ou seja, no espaço e no tempo) dos campos de grande escala da Reanálise do NCEP, dado seu caráter de modelo regional e, portanto, dependente de condições de contorno. O procedimento envolve a assimilação das condições de grande escala em todo o domínio do RAMS (topo, bordas e interior) apenas no instante inicial, enquanto que no decorrer da integração, somente as bordas (a cada 6 h) recebem informações de grande escala, permitindo que a física de mesoescala

**Tabela 2** - Principais diferenças entre os ventos assimilados.

	NCEP	RAMS
Pontos de grade	12 x 16	101 x 94
Domínio espacial	070,00°W a 032,50°W 45,00°S a 17,50°S	065,89°W a 033,90°W 46,83°S a 18,39°S
Grade	2,5° x 2,5°	0,344° x 0,284°
Intervalo de assimilação	6 h	1 h

seja predominante no interior do domínio, promovendo o detalhamento desejado para o vento à superfície do mar. É interessante ressaltar que o RAMS foi executado acionando a parametrização de cúmulos, bem como, a microfísica de nuvens (nível 3), devido ao melhor resultado nas simulações de ciclones (Saraiva, 1996). Na Tabela 2 é mostrada uma síntese dos ventos utilizados.

Antes de passar para os resultados, cabe enfatizar que as simulações apresentadas visaram identificar as eventuais diferenças na agitação marítima devido à especificação do campo de vento. O conhecimento da variação no desempenho do WW3 permitiu obter um indicativo prático para a utilização dos resultados nas simulações operacionais para o estado do mar.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caso Abril 1997

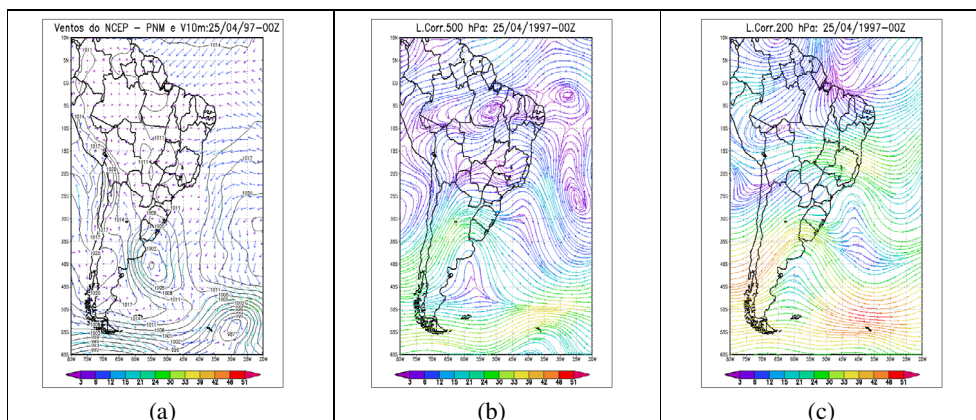
Este evento foi simulado durante o período de 20 e 30 de abril de 1997 e caracterizou-se por uma grande ressaca no litoral gaúcho, devido à passagem de uma frente fria com uma alta polar na retaguarda (ventos persistentes de SW). Desta forma, foi feita uma breve análise sinótica dos campos meteorológicos oriundos do NCEP e do RAMS, para subsidiar os padrões de vento à 10 metros que alimentarão o modelo de ondas. Em níveis médios e altos um cavado marcou a região,

indicando um suporte dinâmico a leste dele, necessário para essa persistência (Figura 2).

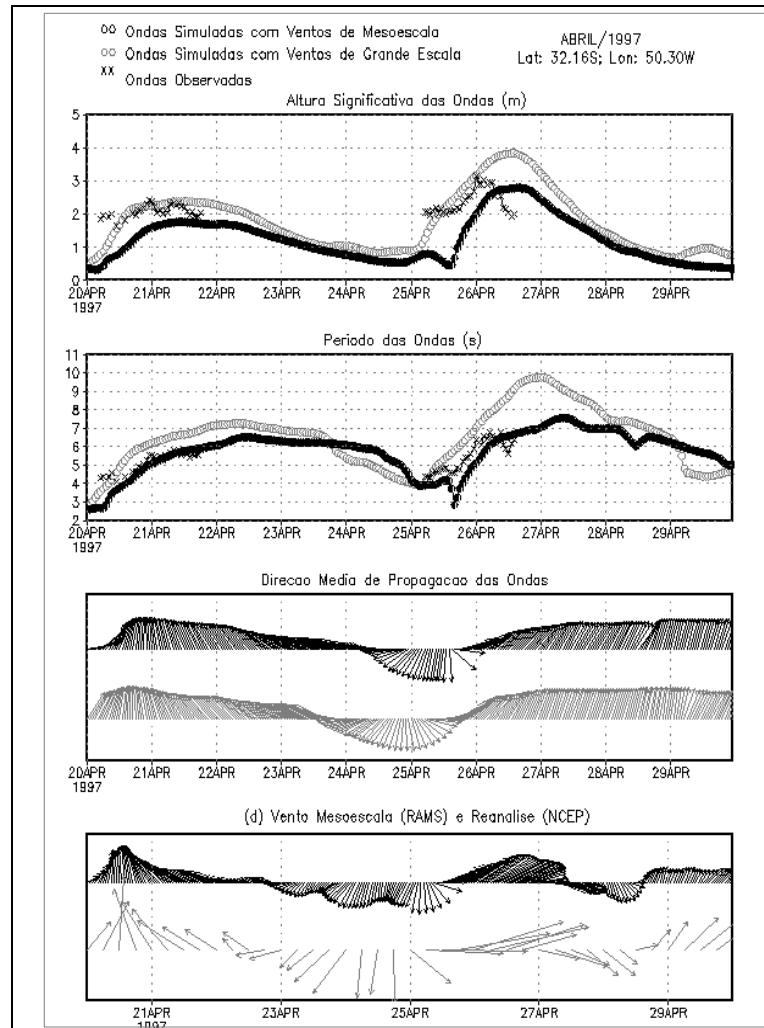
No dia 24, dois núcleos de baixa pressão: um (I) sobre o oceano (48°S049°W), associado a um cavado em níveis médios, e outro (II) sobre a Argentina (40°S066°W). Os ventos no litoral sul estão de nordeste, devido à influência da ASAS. Já no dia seguinte, o vórtice ciclônico (I) deslocou-se rapidamente para leste (55°S030°W), não interferindo na região de estudo, enquanto que o vórtice II deslocou-se zonalmente (40°S054°W) e intensificou-se. Neste momento, ocorreu uma intensificação dos ventos de nordeste no litoral do Uruguai. Em altos níveis, surgiu um cavado de onda curta deslocando-se para leste (45°W) e outro cavado no sul da Argentina (060°W) também presente em níveis médios.

O ciclone extratropical (40°S046°W) intensificou-se (987 hPa) no dia 26 e sua borda oeste favorece a pista de aproximadamente 1200 km no litoral sul do Brasil. Houve uma intensificação do cavado de onda curta que se deslocou para leste (050°W) em níveis médios e altos. Este padrão modifica a partir do dia 27, quando o escoamento no litoral do RS passou a ser de oeste, associado à presença de uma crista, após o deslocamento do ciclone extratropical seguir para sudeste. Nos níveis médios o escoamento foi zonal e em altos níveis e dominado por um cavado de onda longa, bem suave.

Comparativamente, os campos de mesoescala mostraram a rápida passagem de um ciclone formado na Argentina, deslocando-se para sudeste pelo oceano. Sua borda noroeste



**Figura 2** - Dados do NCEP em 25ABR97 às 00:00 Z para (a) Vento a 10 m e pressão ao nível médio do mar, (b) linha de corrente em 500 hPa e (c) linha de corrente em 200 hPa



**Figura 3** - Ondograma comparativo do RAMS (círculos em preto), NCEP (círculos em cinza) e dados do ondógrafo (x) para ABR/1997.

provocou uma pista de sudoeste intensa (maior que  $15 \text{ ms}^{-1}$ ), associada a uma alta polar da retaguarda. No dia 28, os ventos predominantes já apresentaram-se fracos e de oeste. Notou-se ainda, que a pista de ventos de sudoeste esteve ligeiramente mais ao norte neste caso, se comparado à grande escala (NCEP).

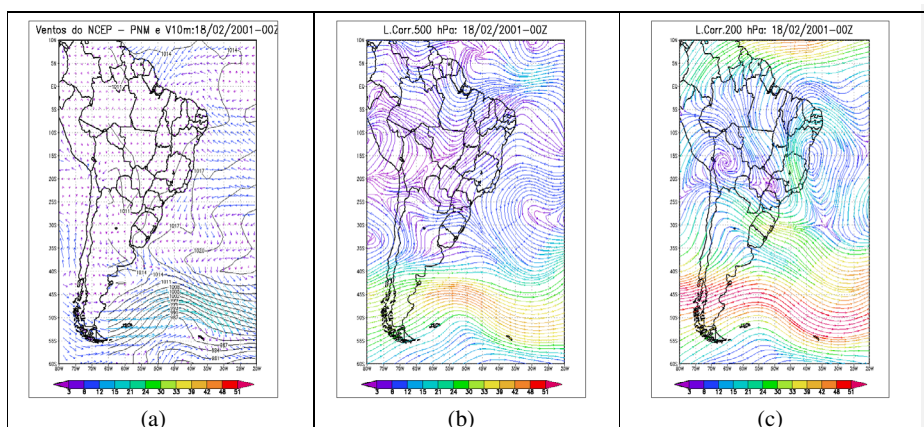
Toda esta análise torna-se pertinente ao observar a Figura 3, onde se contrapõem os resultados do modelo com os dados medidos *in situ*. A série de medidas do ondógrafo (Figura 3) indicou direções de pico persistentes de SSW, com alturas acima de 3 m e energia mais intensa no dia 26 por volta das 11:00 Z. Esta característica coincide com os campos sinóticos anteriormente apresentados. Cabe comentar, que os valores dos períodos de pico (12 s a 15 s) referiram-se a trens de onda gerados remotamente e propagando-se para a área de medição.

Ainda na Figura 3, nota-se que as ondas forçadas pelo NCEP foram superiores àquelas forçadas pelo RAMS em toda a integração. A grande escala superestimou a maior  $H_s$  em até

0,8 m, enquanto que a mesoescala subestimou a observação em aproximadamente 0,4 m. Apesar disto, os valores *in situ* se aproximaram mais da grande escala. O período das ondas no caso da mesoescala apresentou menores valores e maiores variações, se aproximando das medições do ondógrafo e indicando a predominância de vagas além dos marulhos.

É interessante destacar que ocorreu uma defasagem de 12 horas entre os dados observados e os dados simulados. O modelo apresentou maiores alturas significativas ( $H_s$ ) no dia 26 às 12:00 Z, enquanto que a máxima elevação da onda é medida pelo ondógrafo no dia 26 às 00:00 Z.

As afirmações acima indicam que as ondas no ponto estudado forma predominantemente marulhos, gerados em regiões mais remotas ao local de observação; por isso, existe a semelhança com a simulação utilizando os ventos da grande escala. Entretanto, quando o sistema frontal passa, todos os resultados do modelo de ondas, utilizando os ventos da mesoescala, se aproximam dos



**Figura 4** - Dados do NCEP em 18FEV01 às 00:00 Z para (a) Vento a 10 m e pressão ao nível médio do mar, (b) linha de corrente em 500 hPa e (c) linha de corrente em 200 hPa.

valores observados, indicando que um melhor detalhamento do vento em eventos de sistemas transientes favorece a previsão das ondas de gravidade da superfície do mar.

### 3.2 Caso Fevereiro 2001

Os sistemas frontais que atuaram neste mês foram de fraca intensidade, segundo Climanálise de Fevereiro/2001. Para este estudo, foi acompanhado o antipenúltimo (quinto) sistema frontal do mês, que se restringiu à Região Sul do País, influenciando muito pouco o litoral de Florianópolis-SC e Paranaguá-PR em termos de agitação marítima, entre os dias 17 e 20 de fevereiro.

Seguindo o mesmo padrão do item anterior, será apresentada uma discussão deste caso. No dia 18, o Atlântico Sudoeste sofreu influência da ASAS com ventos fracos em superfície. No extremo sul do continente, o escoamento quase zonal de oeste dominou a latitude  $50^{\circ}\text{S}$ , sem interferir na região de estudo. Um cavado de onda longa sobre o Uruguai e o oceano foi observado no nível de 500 hPa e de 200 hPa.

No dia seguinte um núcleo de alta pressão (1020 hPa) em  $43^{\circ}\text{S}050^{\circ}\text{W}$ , proporcionou estabilidade, e os ventos sobre o Atlântico Sudoeste permaneceram extremamente fracos. Em níveis médios, notou-se um cavado de onda longa sobre o oceano; enquanto que nos altos níveis, o escoamento continuou aproximadamente zonal sobre a região de estudo.

No dia 20, ainda predominam ventos fracos. No extremo sul da América do Sul (Patagônia) começou a entrar um centro de baixa pressão. Em 500 hPa observou-se um cavado de onda longa sobre o oceano e um cavado de onda curta sobre o Paraguai, enquanto que em 200 hPa, notou-se um cavado de onda curta sobre o Atlântico, instabilizando em  $43^{\circ}\text{S}038^{\circ}\text{W}$ .

Através do campo de ventos do RAMS notou-se no dia 17 a circulação anticiclônica no litoral do RS e uma circulação

ciclônica sobre a Argentina. Esse ciclone passou rapidamente pela latitude  $45^{\circ}\text{S}$ , não atingindo a região de estudo nos dias posteriores. No dia 19 e 20, o escoamento continuou fraco, sem pistas favoráveis para o crescimento do mar para a região de estudo.

Com os dados do RAMS, os ventos mantiveram-se fracos e de leste durante o período devido à borda norte das altas pressões polares. Com os dados do NCEP, os ventos apresentam uma forçante de nordeste no dia 19 e posteriormente giraram para sul, também muito fracos. Isso indicou a maior influência da ASAS que apresentou-se mais forte e englobou as altas pressões polares.

O WW3 foi integrado entre 14 e 24 de fevereiro (Figura 4) e de uma maneira geral, subestimou tanto as  $H_s$ , quanto o período das ondas em toda a integração. Esta característica indicou ondas geradas em regiões mais remotas que as do domínio do modelo. A princípio, a saída poderia estar no aumento do domínio do modelo, necessitando de mais tempo e qualidade de máquina para as simulações; entretanto uma outra discussão torna-se necessária. Isto significa que sob ventos calmos ou condições de bloqueio atmosférico, a modelagem de ondas precisa ser inicializada por algum campo de ondas pré estabelecido (maduro).

Entretanto, cabe ressaltar a diferença entre as direções de propagação das ondas no ponto de observação. As direções das ondas geradas por ventos de mesoescala giraram para nordeste antes da grande escala e mantiveram-se com este padrão por toda a integração. O período entre 18 e 21 de fevereiro coincidiu com os valores mínimos de  $H_s$  registrados, tanto no ondógrafo, quanto nas simulações. Qualitativamente, o caso com ventos de mesoescala forneceu melhor semelhança com as variações de  $H_s$  e período, seja nos cavados ou nas cristas da Figura 5, apesar dos valores simulados, mostraram-se subestimados em ambas as integrações.

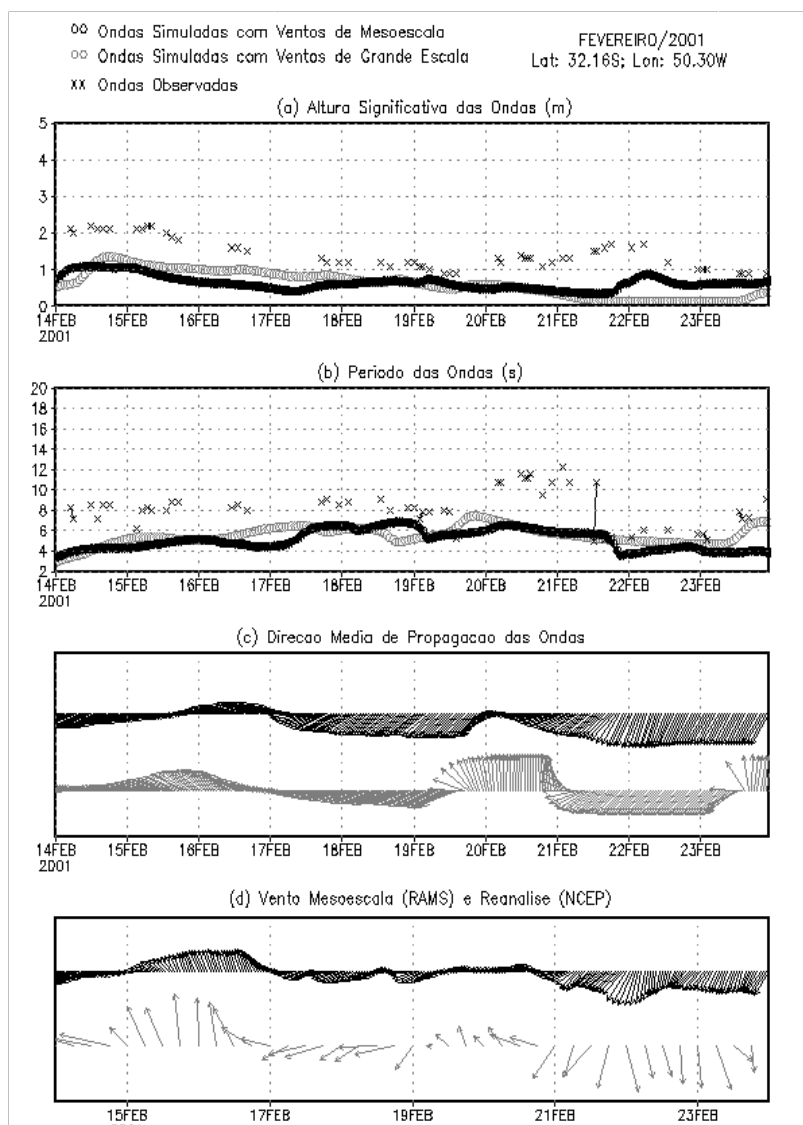


Figura 5 - Ondograma comparativo do RAMS (círculos em preto), NCEP (círculos em cinza) e dados do ondógrafo (x) para FEV/2001.

#### 4. CONCLUSÕES

Os modelos numéricos de previsão de ondas costumam superestimar os eventos extremos de alturas de ondas significativas em todo o mundo. Desta forma, este trabalho baseou-se na tentativa de melhor caracterizar as agitações marítimas no oceano Atlântico Sudoeste, fazendo um *downscaling* dos ventos com o modelo de mesoescala RAMS.

No primeiro experimento (1997), quando passou um sistema frontal na região, verificou-se uma superestimativa dos campos com assimilação dos ventos do NCEP com relação aos campos do RAMS, além das direções de grande escala terem girado para quadrante norte cerca de 12 h antes da mesoescala, embora tenham coincidido a partir do sexto dia de integração. Esse fato chama a atenção para a importância da frequência de

entrada do vento, pois o WW3 considera a última informação do vento com constante em direção, sentido e intensidade, até que um novo dado modifique a sua energia. Ao usar as informações a cada 6 h (ventos provenientes do NCEP), ocorreu uma superestimativa da altura da onda por ela ser função da intensidade, pista e persistência dos ventos. Cabe ressaltar que apesar de superestimadas, as ondas com NCEP assemelham-se aos dados observados, indicando que sob atuação dos marulhos, é bem representado. Entretanto, quando o sistema frontal passa, o giro do vento com as variações de velocidade e direção são melhores representadas pela mesoescala.

No segundo experimento (2001), quando os ventos estiveram com predominância de calma, notou-se que o modelo subestimou as alturas das ondas em toda a integração, atingindo discrepâncias de até 1,2 m, como no caso do dia

21 às 13:00 Z. Este fato levou ao questionamento da escolha do domínio do modelo; pois as ondas com maiores alturas e maiores períodos são marulhos gerados em locais mais remotos. Surge então a evidente necessidade de iniciar o modelo com um campo de onda mais realístico para contornar o problema e não precisar aumentar o domínio. Outro fato que chamou a atenção foi a diferença entre as direções de propagação das ondas, devidamente justificadas pelas diferenças direcionais dos respectivos ventos. Desde o primeiro dia, as ondas simuladas divergiram entre si de quadrante. O caso com ventos do NCEP mantiveram-se de quadrante sul nos três primeiros dias, enquanto na mesoescala predominou quadrante norte, convergindo entre os dias 17 e 18, voltando a divergir entre os dias 19 e 20, para novamente estabelecer concordância a partir do dia 21 em diante. Verificou-se que essas divergências estão associadas ao posicionamento dos sistemas sinóticos ligeiramente deslocados nas simulações atmosféricas do RAMS e dos ventos oriundos das reanálises do NCEP. Qualitativamente, o caso com ventos de mesoescala forneceu maior semelhança com as variações de  $H_s$  e período, seja nos cavados ou nas cristas, pois ao reorganizar os ventos a cada hora, conseguiu simular cada uma das pequenas variações em intensidade e direção dos ventos e conseqüentemente, o estado do mar.

De uma maneira geral, notou-se a necessidade de obter dados reais dos ventos sobre os pontos de observação e sobre as regiões adjacentes, para melhor avaliar a destreza dos modelos atmosféricos, bem como, sua utilização como entrada no modelo de ondas, além de uma base climatológica de ondas (altura significativa, direção e período) que cubra o Atlântico Sudoeste.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais a J. C. Strauch (FURG) e Flávia Rodrigues (DHN-RJ) por gentilmente cederem os dados dos ondógrafos usados nas simulações. Bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro à pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMARGO, R.; HARARI, J. Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste do Brasil a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, Brasil, São Paulo (SP), v. 42, n. 1, p. 19-34, 1994.
- CAMPOS, R. M. **Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2009.
- CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as Reanálises do NCEP no Sudoeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 25, n 2, 175-184, 2010.
- CANDELLA, R. N. **Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul através de Modelagem Numérica**. Dissertação de Mestrado. Depto. de Engenharia Oceânica, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 93 p, 1997.
- CASTRO, B. M; LEE, T. N. Wind sea level variability on the Southeast Brazilian shelf. **Journal of Geophysical Research**, V. 100, n C8. P 16, 045-16, 056, August 15, 1995.
- CLIMANÁLISE, Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos, INPE. Fevereiro, 2001.
- COTTON, W. R.; STEPHENS, M. A.; NEHRKORN, T.; TRIPOLI, G. J. The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model. Part II: An ice parameterization. **J. Rech. Atmos.**, v.16, p.295-320, 1982.
- HASSELMANN, K.; BARNETT, T.P., BOUWS, E.; CARLSON, H., CARTWRIGHT, D.E., ENKE, K.; EWING, J.A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D.E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MULLER, P.; OLBERS, D.J.; RICHTER, K.; SNELL, W.; WALDEN, H. **Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**. Report to the German Hydrographic Institute, Hamburg, Germany, 95pp. 1973.
- INNOCENTINI, V.; CUNHA PRADO, S. C. S.; PEREIRA, C. S.; ARANTES, F. O.; BRANDÃO, E I. N. Ocorrência de Vagas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: Caso de 24 de Outubro de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.16, n.2, p.177-186, 2001.
- INNOCENTINI, V.; OLIVEIRA, F. A.; E S.; CUNHA PRADO, S. C. Modelo de Ondas Aplicado ao Caso 5-8 de Maio de 2001. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, p.97-104, 2002.
- KOMEN, G.J., CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HANSELNANN, K.; HANSELNANN, S.; JANSSEN, P.A.E.M. **Dynamics and modelling of ocean waves**. Cambridge University Press, 532 p. 1994.
- LEONARD, B. P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. **Comput. Methods Appl. Mech. Engng.**, v.88, p.17-74. 1991.
- PARENTE, C. E. **Uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas**. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 1999.
- PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A



- comprehensive meteorological modeling system - RAMS. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v.49, p.61-91, 1992.
- PINHO, U. F. **Caracterização do estado do mar na Baía de Campos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2003.
- SARAIVA, J. M. B. **Previsão de tempo na região sul: Efeitos locais e influência da liberação de calor latente**. 205 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo. São Paulo-SP. 1996.
- SILVA, F. L. C. **Investigações sobre a chegada de ondulações (swell) em situações de bom tempo na Baía de Campos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março 2008.
- TOLMAN, H. L. The influence of unsteady depths and currents of tides on wind-wave propagation in shelf seas. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 20, p. 1166-1174. 1990.
- TOLMAN, H. L.; CHALIKOV, D.V. Source terms in a third-generation wind wave model. **J. Phys. Oceanogr.**, v.26, p.2497-2518, 1996.
- TREMBACK, C. J. **Numerical simulation of a mesoscale convective complex: Model development and numerical results**. Ph.D. dissertation, Atmos. Sci. Paper No. 465, Colorado State University, Dept. of Atmos. Sci. 274 p. 1990.
- TRIPOLI, G.J.; COTTON, W.R. The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model - Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments, **J. Res. Atmos.**, v. 16, p. 185-219. 1982.
- WAMDIG. The WAM model- a third generation ocean wave prediction model. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 18, p. 1775-1810, 1988.