

## MODELO DE ONDAS APLICADO AO CASO 5-8 DE MAIO DE 2001

VALDIR INNOCENTINI, FERNANDO ARANTES OLIVEIRA E  
SIMONE C. S. CUNHA PRADO

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos

### RESUMO

Um ciclone extratropical intenso que se desenvolveu ao largo do litoral de São Paulo, foi responsável pela formação de pistas sobre o oceano com ventos dirigidos para o litoral sul e sudeste do Brasil no período 5-8 de Maio de 2001. Ondas com altura de 4 m atingiram algumas localidades, causando prejuízos e deixando desabrigados. Neste artigo, o Sistema de Previsão de Ondas do CPTEC foi utilizado para recompor a agitação marítima gerada no período. Constatou-se que a pista associada a esse ciclone teve curta duração e os ventos intensidade moderada, não parecendo reunir propriedades suficientes para gerar ondas com a altura observada. Um exame mais cuidadoso do caso, revelou que um ciclone extratropical havia se desenvolvido ao sul do Uruguai em altas latitudes alguns dias antes, ocasionando propagação de swell para o litoral sul e sudeste do Brasil. Então, quando o ciclone se intensificou, encontrou um mar propenso a desenvolver rapidamente ondas de grande porte, pois o vento forte do ciclone e o swell deixado pelo ciclone anterior tinham aproximadamente a mesma direção.

**Palavras-chave:** modelo de ondas, ressacas, ciclones extratropicais.

**ABSTRACT:** WAVE MODEL APPLIED TO THE CASE STUDY OF 5-8 MAY 2001.

An intense extra-tropical cyclone developing offshore São Paulo State was responsible for a fetch with winds blowing to Southern and Southeastern Brazilian Coast on the period 5-8 May 2001. Waves height near 4 m reached some places, damaging properties. In this work the Wave Forecasting System of CPTEC was used to hindcast the sea state for this period. The results showed a short-lived fetch and weak winds associated with this system, so that the properties necessary to build the reported sea were not strong enough. A closer examination revealed that another extra-tropical cyclone developing earlier on the South of Uruguai was responsible for the propagation of swell to the Southern and Southeastern Brazilian Coast. Then, when the cyclone developed, it found a sea state suitable to capture energy quickly from the atmosphere, because the swell from the first cyclone and the new fetch had the same direction.

**Key words:** wave model, coastal flood, extra-tropical cyclone.

## 1. INTRODUÇÃO

A agitação marítima provocada por ondas de gravidade geradas pelo vento pode afetar vários segmentos das atividades humanas, desde esportivas ou de lazer praticadas em locais próximos à costa, até as mais distantes envolvendo navegação e exploração de petróleo. É comum ocorrerem enchentes em cidades costeiras quando há o acoplamento entre a maré de sizígia (ocorre na lua nova ou lua cheia, quando sol, terra e lua estão alinhados, criando marés mais elevadas) e as ondas provocadas pelo vento. O reconhecimento da importância de previsões de ondas pode ser constatado pelo fato dos grandes centros de previsão numérica incluírem modelos de geração e propagação de agitação marítima em sua rotina operacional.

A orla marítima brasileira abrange uma região com enorme extensão desde aproximadamente 35 graus de latitude sul a 5 graus norte, e por isto está sujeita à agitação marítima provocada por tipos de eventos meteorológicos bastante distintos.

As características das ondas em sua geração dependem de 3 propriedades do vento próximo à superfície que são:

- 1) intensidade ou velocidade do vento,
- 2) duração ou período de tempo em que o vento sopra, e
- 3) pista (fetch, em inglês) ou extensão da área de atuação do vento.

Estas propriedades estão associadas ao tipo do fenômeno meteorológico. Ciclones e anticiclones de escala

sinótica e planetária estão acompanhados por ventos cujos 3 fatores acima satisfazem os requisitos para formação de ondas.

Anticiclones em escala planetária estão sobre as grandes bacias oceânicas. Nos oceanos que abrangem os dois hemisférios (Atlântico e Pacífico), existem dois vórtices anticiclônicos sub-tropicais próximos à superfície, um com os ventos soprando no sentido anti-horário no hemisfério sul, e o outro horário no hemisfério norte. Próximo ao equador, na região de confluência entre os dois vórtices, forma-se uma enorme pista, onde os ventos são conhecidos por alísios. As vezes alguma parte da circulação anticiclônica se intensifica sobre o Atlântico Sul provocando a formação de ondas que atingem o litoral da região nordeste do Brasil.

O litoral norte do Brasil recebe ondas formadas ao longo dos alísios, e em algumas ocasiões, recebe ondas geradas por ciclones extratropicais no Hemisfério Norte. Innocentini et al. (2000) mostra o caso do furacão Irene, que foi absorvido por um ciclone extratropical e adquiriu intensidade com ventos capazes de gerarem ondas em latitudes acima de 40 graus próximo às Ilhas Britânicas, que se propagaram em direção sul, atingiram o Arquipélago de São Pedro e São Paulo e o litoral Norte do Brasil, chegando até o litoral da Namíbia na África.

Em torno da latitude 40 graus em ambos hemisférios, ciclones e anticiclones migratórios de escala sinótica deslocam-se para leste acompanhados por pistas com duração, extensão e intensidade suficientes para gerar ondas de grande porte.

No Atlântico Sul, o flanco direito do anticiclone subtropical se encarrega em muitas ocasiões de transportar para o litoral nordeste a agitação marítima gerada pelos ciclones extratropicais no extremo sul do continente africano. Em algumas vezes este fenômeno aliado a uma pista com ventos próximos a 12 m/s produz ondas que atingem o litoral nordestino.

Entretanto a agitação marítima mais intensa que ocorre no Atlântico Sul é ocasionada pelos ciclones e anticiclones migratórios. Estes vórtices existem em ambos hemisférios, e são responsáveis pelas frentes frias que invadem os continentes trazendo massas de ar frio dos pólos para o equador, e por frentes quentes, que levam massas de ar quente do equador para os pólos. Em sua marcha para leste, os ciclones quase sempre se intensificam sobre o mar logo após ultrapassarem algum continente. As ondas que chegam ao Havai, Califórnia, África do Sul, e Austrália levando emoção à prática do surf são geradas por este tipo de evento.

Casos de enchentes causados por ondas afetando o litoral sul e sudeste do Brasil, com naufrágios, mortes e prejuízos materiais são registrados todos anos. Um exemplo muito citado é o caso de agosto de 1988 (Innocentini et al., 1996), quando um ciclone extratropical gerou uma pista com

ventos acima de 20 m/s dirigidos para o litoral do Rio de Janeiro. Recentemente, em 05 maio de 2001, um ciclone extratropical intensificou-se sobre o mar, e afetou vários trechos dos litorais Sul e Sudeste. Ao nosso conhecimento, nenhum caso de morte ou naufrágio foi registrado durante este evento. Pela ausência de acidentes não se deve concluir que o evento foi fraco, pois foram grandes os prejuízos causados à propriedade. O objetivo deste artigo é documentar este caso, selecionando as principais notícias extraídas dos jornais, e ilustrando a formação e evolução do ciclone e das ondas, simulado por modelos numéricos de previsão. Conforme iremos demonstrar, a intensidade do evento se deve não apenas a um ciclone extratropical, mas a vários, e em especial a um ciclone que antecedeu o de 5 de maio.

## 2. DANOS MATERIAIS CAUSADOS PELO EVENTO

Os acontecimentos relatados nesta seção foram extraídos de alguns jornais. O objetivo é ilustrar o impacto do evento em algumas cidades costeiras, enaltecendo a importância das previsões de tais eventos para divulgação de alertas.

Os jornais do Estado do Rio de Janeiro de 08 de maio anunciaram que além da cidade do Rio de Janeiro, outras cidades, tais como Angra dos Reis, Búzios, Maricá, Macaé, Saquarema e Parati tiveram a orla marítima atingida por ressaca provocada por ondas a partir de 5 de maio de 2001. No Rio, as casas da Vila Residencial foram invadidas várias vezes durante 3 dias de ressaca. Na Colônia de Pesca de Copacabana, vários barcos e redes foram avariados e 4 barcos foram destruídos. Em São Conrado, o calçadão e a rampa de acesso à praia foram destruídos. Em Barra de Guaratiba uma muralha de pedras com 25 m de extensão foi derrubada. Em todo Estado do Rio, pelo menos 160 famílias ficaram desabrigadas. Os jornais reportaram ondas de 4 m na praia invadindo as ruas e deixando toneladas de areia, com enorme congestionamento de veículos. Embarcações a deriva, pescadores impedidos de retornarem e surfistas foram resgatados pelo Corpo de Bombeiros com o auxílio de helicópteros.

Ainda no Rio, o movimento orbital que acompanha as ondas revolveu o fundo dos lagos da Barra da Tijuca formado por lodo e resíduos de esgoto, e vários outros materiais de origem orgânica em estado de decomposição. Com isto, grande quantidade de gás sulfídrico foi liberada e reagiu com o oxigênio, matando toneladas de peixes por asfixia. Outra consequência da liberação de gás é o mau cheiro, ardor nos olhos e acelerada corrosão nos metais.

No litoral paulista o mar invadiu vários bairros das cidades de São Vicente e Santos, onde a maré atingiu 1,5 m, segundo a defesa civil. Avenidas, canais, e galerias pluviais

ficaram obstruídas por grandes quantidades de areia, e algumas muretas foram danificadas ou derrubadas.

Em São Sebastião as ondas alcançaram 3,5 m e a travessia da balsa para Ilhabela foi interrompida. Mais de 100 pessoas ficaram desabrigadas devido à enchente que atingiu suas casas.

Vários municípios foram atingidos no Estado de Santa Catarina. Foi decretado estado de emergência em Balneário de Camboriú, e de calamidade pública em Barra Velha devido a ondas de até 4 m e a maré que destruíram casas, derrubaram postes e danificaram ruas.

No Paraná, as ondas destruíram 19 residências na cidade de Matinhos e desabrigou cerca de 35 famílias. Outras 16 casas foram condenadas pela prefeitura e foram desocupadas. Cerca de 4,5 km da orla marítima foram fortemente atingidos pela ressaca, e em alguns trechos as ondas chegaram a 4-5 m de altura e o mar avançou 150 m.

### 3. O SISTEMA DE PREVISÃO DE ONDAS

Os relatos extraídos dos jornais evidenciam que a maré de sizígia causada pela lua cheia foi um fator importante nas enchentes aliada às ondas que atingiram grande amplitude. Entretanto neste trabalho apenas a agitação marítima será examinada.

O Sistema de Previsão de Ondas atualmente é formado pelos modelos WWATCH (Tolman, 1991) e SWAN (Booij et al., 1996), ambos considerados variantes do modelo WAM (WAMDI, 1988).

O modelo WAM (Wave Modelling) é o resultado de um esforço de um grupo formado por pesquisadores convidados pelo Prof. Klaus Hasselmann. O principal objetivo foi construir um modelo numérico de terceira geração aliando o mais completo conhecimento científico com o desenvolvimento computacional disponível para tornar o modelo operacional. Atualmente alguns centros internacionais ainda mantêm o WAM operacional e atualizado, como por exemplo, o ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting).

O WWATCH possui toda física do modelo WAM, mas tem uma concepção computacional diferente, talvez mais amigável para o usuário. O SWAN é o resultado de um trabalho de vários pesquisadores para construir um modelo de terceira geração com uma descrição física apropriada para águas rasas. A distinção mais marcante é que SWAN inclui as interações não lineares de 3 ondas, negligenciada nos modelos WAM e WWATCH, que consideram apenas as interações não lineares entre 4 ondas.

O Sistema de Previsão de Ondas atualmente operacional no CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) é formado por uma simulação utilizando o modelo

WWATCH que faz previsão de até 72 horas para todo Atlântico com resolução de 1 grau utilizando os ventos produzidos pela versão AVN do modelo global do NCEP (National Center for Environmental Prediction dos Estados Unidos). Este modelo fornece condições de fronteiras para o modelo SWAN que roda com uma resolução de 0.1 grau para o litoral da região sudeste do Brasil. Este, por sua vez, fornece condições de fronteiras para uma simulação do modelo com resolução 0.01 grau. Uma descrição mais completa da rotina operacional pode ser encontrada em Innocentini (2001).

Neste artigo utilizaremos os resultados do WWATCH em simulações para todo Atlântico. Uma descrição completa da física incorporada no WWATCH está documentada em Tolman (1999).

### 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Apresentaremos inicialmente a pressão ao nível médio do mar fornecida pelo NCEP com a finalidade de mostrar a evolução dos ciclones. Como veremos, a agitação marítima resultante do caso apresentado foi causada por dois ciclones extratropicais quase simultâneos, pois cada um deles isoladamente não teria duração e pista suficientes para causar ondas com a intensidade ocorrida. A seguir apresentaremos os ventos, e finalmente os resultados das simulações do modelo WWATCH.

#### *a) Evolução dos ciclones extratropicais*

A pressão ao nível médio do mar (doravante, PNM) determina a formação do ciclone e indica regiões com ventos fortes através do acentuado gradiente de suas isóbaras. A Figura 1 apresenta a PNM a cada 24 horas de 02 de maio 00 UTC a 07 de maio 00 UTC. No dia 02 (Figura 1a) um pequeno centro de baixa pressão de 1010 hPa aparece sobre o oceano ao sul do Uruguai, e continua a aprofundar-se deslocando-se rapidamente para sudeste nos dois próximos dias (Figuras 1b e 1c) chegando a atingir 992 hPa. O gradiente de pressão é bastante intenso no dia 03, e favorável à formação de ventos soprando de sul.

No dia 04, conforme Figura 1c, nota-se um pequeno centro de baixa pressão em formação próximo ao litoral de São Paulo (24S-45W). As próximas 72 horas (Figuras 1d, 1e, e 1f) apresentam PNM e gradiente de pressão se intensificando principalmente no flanco inferior esquerdo do ciclone, favorecendo a formação de pistas dirigidas para o litoral brasileiro.

Uma inspeção nas figuras revela que o gradiente de pressão tornou-se mais intenso nos dias 03 (Figura 1b) e 07 (Figura 1f). A altura geopotencial em 200 hPa (não apresenta-

da) do NCEP mostra um cavado bem pronunciado acompanhando os dois ciclones, o que demonstra a grande profundidade vertical do sistema baroclínico.

### b) Os ventos do modelo do NCEP

Os ventos de superfície responderam ao gradiente de pressão do primeiro ciclone, formando uma região muito extensa com velocidades acima de 12 m/s e com áreas aninhadas com velocidade entre 16 e 18 m/s, conforme Figura 2a, para 03 de maio 00UTC. Nesta mesma figura, uma região com ventos acima de 12 m/s indica uma formação ciclônica a leste do litoral norte da Argentina. No dia 04 a região com ventos fortes se deslocou rapidamente em direção sudeste (Figura 2b). No dia 05 surgia outra pista associada ao

segundo ciclone, ao largo do litoral sul do Brasil, fortalecida no dia 06, e com área mais abrangente no dia 07 (Figuras 2c, 2d, e 2e). Os ventos mais intensos e as maiores pistas foram formadas nos dias 03 e 06, devido ao primeiro e segundo ciclone, respectivamente, com velocidades próximas a 18 m/s.

### c) As ondas simuladas pelo modelo WWATCH

A Figura 3 mostra a evolução da altura significativa (HSIG) e direção média de ondas no período do dia 03 até dia 07 de maio. Em 02 00UTC (não apresentado) o campo de ondas já mostrava sinais da influência dos ventos do ciclone que se formava ao sul do Uruguai, mas apenas no dia 03 a direção das ondas apresentava uma configuração ciclônica acompanhando a direção dos ventos do ciclone, e com HSIG

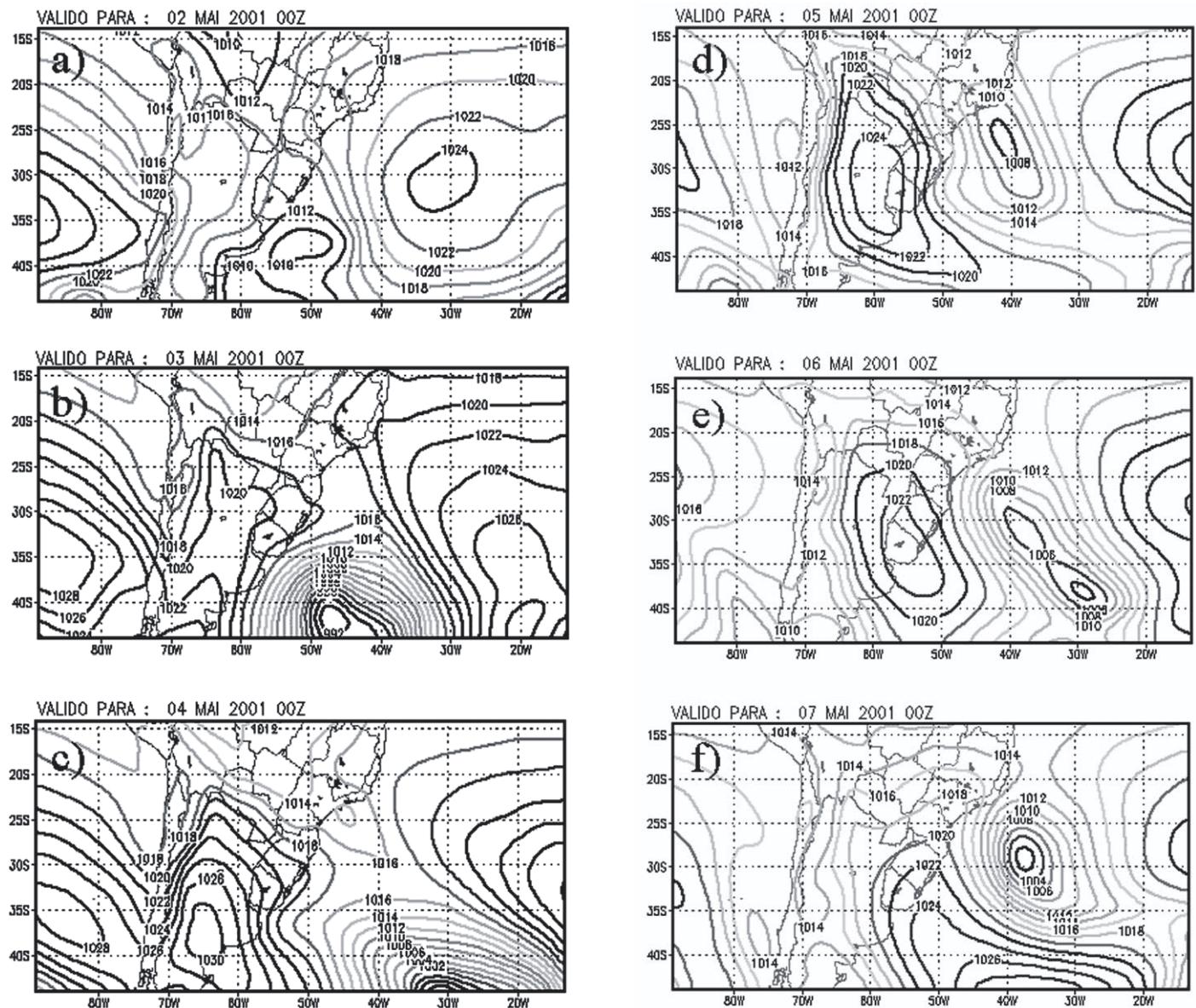


Figura 1 – Campo de pressão ao nível médio do mar em hPa gerado pelo modelo global do NCEP para o período 02 a 07 de maio de 2001.

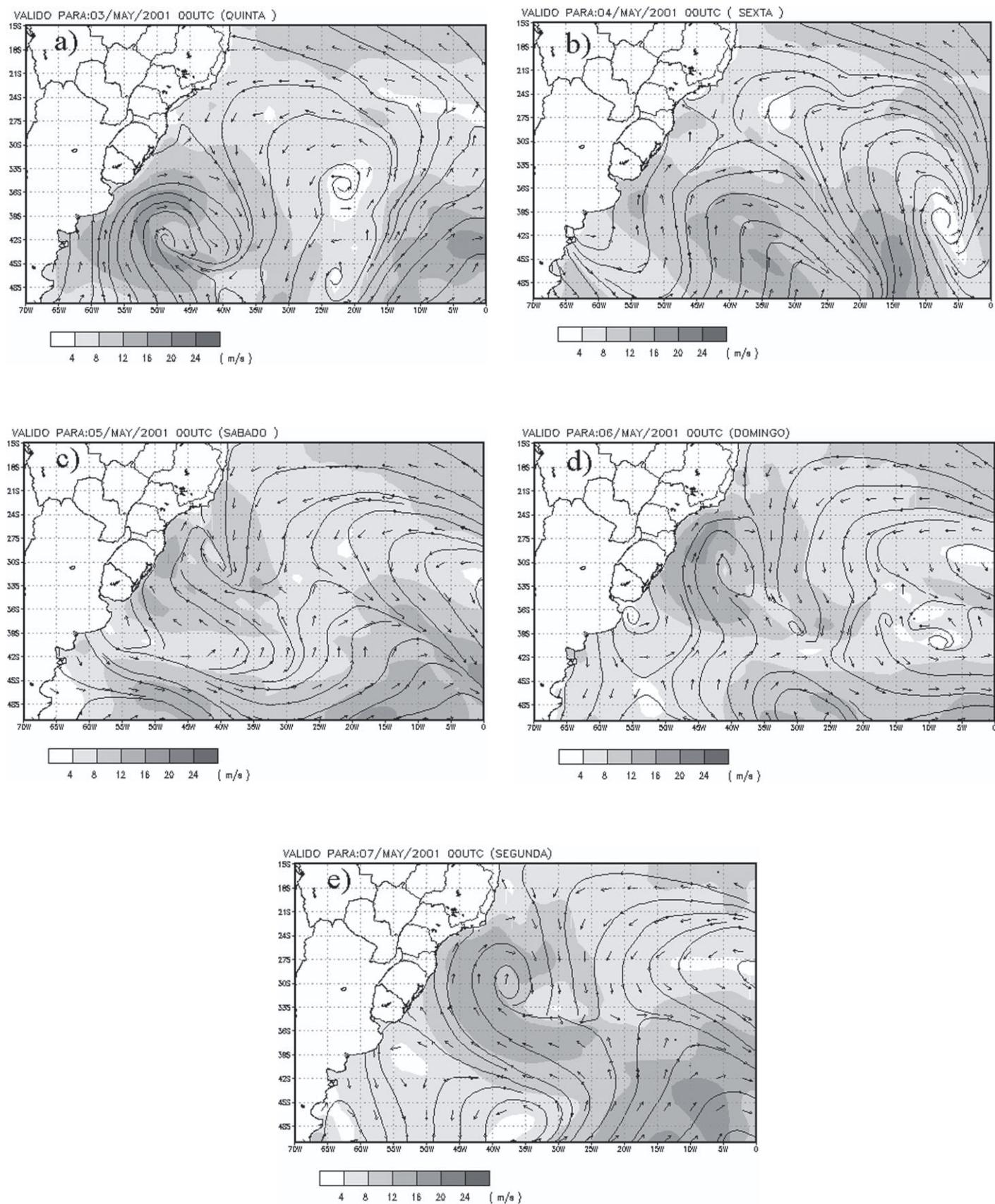


Figura 2 – Campo de vento a 10 m acima da superfície em m/s gerado pelo modelo global do NCEP para o período 03 a 07 de maio de 2001.

acima de 5 m sobre uma vasta região ao sul do Uruguai, conforme Figura 3a. Nota-se que ao largo do litoral sul e sudeste as ondas estavam abaixo de 2 m. No dia 04 as ondas atingiram altura acima de 6 m, em uma região muito distante da costa, conforme Figura 3b, e com direção de propagação para leste. Observa-se também na figura que um campo de ondas com altura acima de 2 m começou a invadir a região sul e sudeste do Brasil. No dia 05 praticamente quase todo litoral sul e sudeste apresentava altura acima de 2 m, conforme Figura 3c. Nesta figura, uma pequena influência do ciclone em formação ao largo do litoral de São Paulo aparece próximo a 30S-40W. Nas próximas 48 horas, as ondas atingiram H<sub>SIG</sub> acima de 7 m em regiões distantes da costa com propagação para o litoral, e altura acima de 3 m no litoral de quase toda região sul e sudeste (Figuras 3d e 3e).

#### **d) espectro em pontos selecionados**

O modelo WWATCH tem como variável prognóstica o espectro de ondas, sendo as variáveis H<sub>SIG</sub> e direção de propagação, campos derivados ilustrando condições médias. O espectro de ondas na zona de geração (conhecido como wind-sea ou sea) apresenta a máxima energia na direção dos ventos, e em um amplo domínio de períodos, sendo o período de pico (período com maior quantidade de energia) dependente da velocidade do vento e do estágio de desenvolvimento do espectro. Um campo de vento com intensidade acima de 12 m/s, necessita de vários dias para gerar um espectro totalmente desenvolvido. Da zona de geração escapam as ondas com maiores alturas e períodos, conhecidas como swell, que sofrem pouca dissipação e conseguem se deslocar por muitos quilômetros sem praticamente sofrer influência do vento local. Se esta energia atingir uma região com ventos fortes e com direção próxima a da propagação do swell, as ondas podem ganhar energia e experimentar um crescimento maior, conforme será mostrado a seguir.

A Figura 4 apresenta o espectro de ondas no ponto referente a localização 28S-45W. Junto à figura, no canto inferior direito, estão plotados a velocidade do vento e H<sub>SIG</sub>. O espectro está representado em coordenadas polares, sendo o período indicado pelos círculos.

Em 03 de maio 00UTC, conforme Figura 4a, a maior parte da energia estava se propagando da direção SSW com período de pico próximo aos 12 s. Um pouco de energia propagava-se de NE com período de 7 s. No dia 04, conforme Figura 4b, nota-se uma acentuada propagação de energia de SW com período acima de 10 s. Alguma propagação de S com período em torno de 15 s também é observada. O vento local de 9 m/s parece estar colocando alguma energia próximo ao período de 5 s. No dia seguinte, segundo Figura 4c, o vento local construiu

ondas de SSE com período de 6 s, enquanto a energia do primeiro ciclone alcançava o ponto, propagando-se das direções entre S e SW. Em 06 de maio, conforme Figura 4d, a maior quantidade de energia concentrava-se no período de 10 s, com propagação de S.

Em 07 de maio, conforme Figura 4e, H<sub>SIG</sub> atingiu 5,6 m, e o espectro apresentava propagação de SE com período de 12 s. O vento local estava em torno de 13,7 m/s e a direção de SSW indicava a presença do flanco superior esquerdo do ciclone (conforme Figura 2e). No dia 08, conforme Figura 4f, a energia atingia o ponto propagando-se predominante de SSE, proveniente da enorme pista que se formou ao Sul deste local.

## **5. RESUMO E CONCLUSÕES**

O litoral brasileiro, devido a sua extensão, é atingido por diversos tipos de fenômenos meteorológicos acompanhados de pistas de ventos geradoras de agitação marítima intensa. As maiores ondas de superfície, frequentemente causadoras de naufrágios e ressacas, estão relacionadas aos ciclones extratropicais. No período de 05 a 08 de maio de 2001, uma intensa agitação marítima acoplada a maré de sizígia alagou várias cidades litorâneas ao longo da costa sul e sudeste do Brasil, com muita destruição. Durante o período, um ciclone extratropical se desenvolveu e se intensificou sobre o oceano, originando as condições necessárias para formação e propagação de ondas. Neste artigo o modelo de ondas WWATCH é utilizado para simular a agitação marítima gerada por este evento meteorológico.

A simulação foi efetuada com os dados de vento providos pelo NCEP. A data inicial escolhida foi 25 de abril de 2001, 10 dias antes do desenvolvimento do ciclone extratropical de 5 de maio, para que houvesse tempo suficiente para construir um mar com agitação marítima inicial causada por eventos anteriores.

Os resultados das simulações revelaram uma intensa agitação marítima sendo gerada entre os dias 1 e 3 de maio sobre o Atlântico Sul ao largo do litoral argentino, por um ciclone extratropical bem distante do litoral brasileiro. Estas ondas chegaram ao largo do litoral brasileiro com período de 10 a 15 s, justamente quando outro ciclone extratropical se desenvolvia ao largo do Estado de São Paulo. Os ventos gerados pelo segundo ciclone não ultrapassaram 18 m/s, mas como a energia que chegava tinha direção muito próxima dos ventos do segundo ciclone, foram incorporadas no desenvolvimento do espectro e maiores ondas foram construídas rapidamente.

O mecanismo pode ser melhor entendido ao ilustrarmos a forma com que as ondas são geradas ao longo de uma pista. No início da pista, as ondas são pequenas e

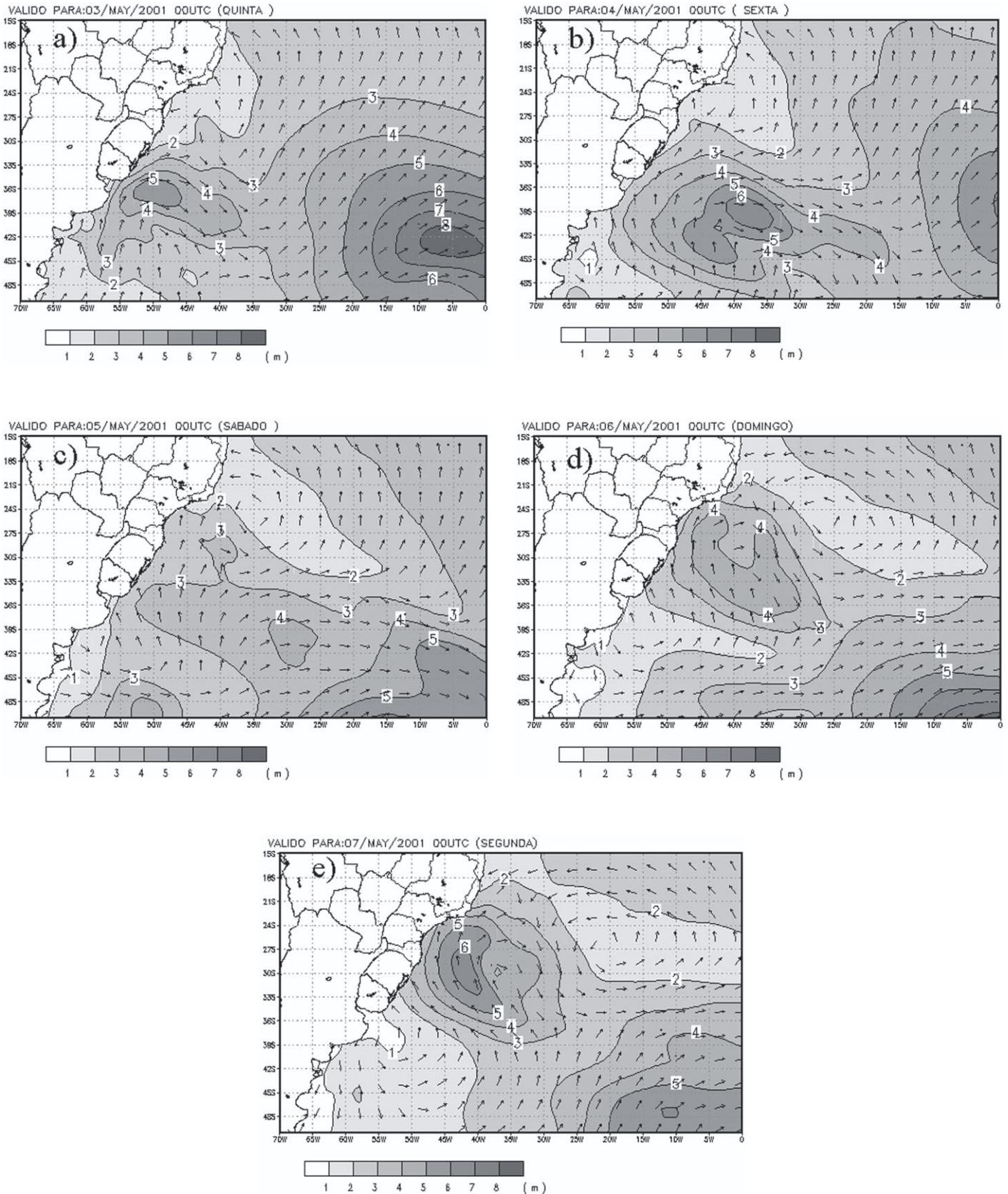


Figura 3 – Altura significativa em metros e direção média de propagação de ondas obtidas pela integração do modelo WWATCH no período 03 a 07 de maio de 2001.

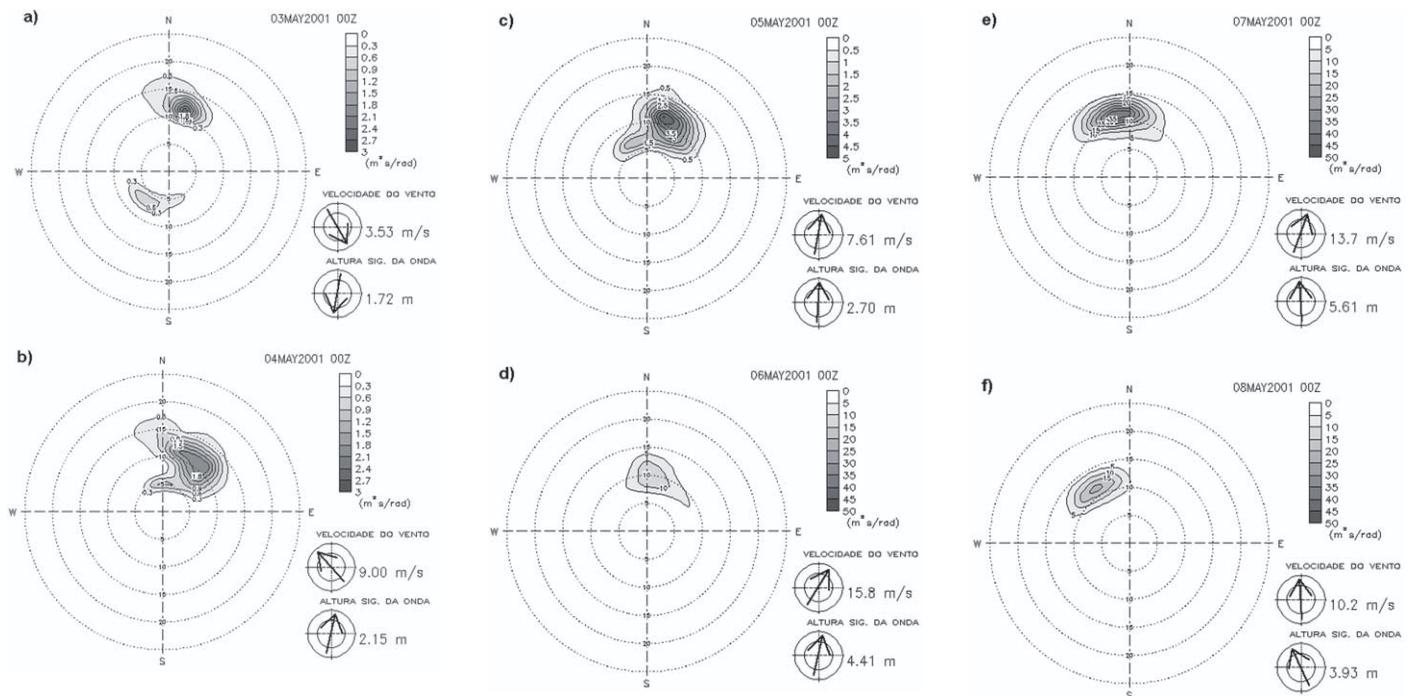


Figura 4 – Espectro de ondas para o ponto 28S-45W para o período 03 a 08 de maio de 2001 obtido através da integração do modelo WWATCH.

geradas pelo vento local. As ondas escapam de cada ponto ao longo da pista por onde são transportadas, sempre recebendo energia, pois em cada ponto o vento tem a mesma direção da ondas que chegam, contribuindo para aumentar a altura delas.

No caso estudado, as ondas geradas ao longo da pista do ciclone ao sul do Uruguai se propagaram na direção da costa brasileira, e atingiram a região próxima ao litoral de São Paulo, onde uma nova pista estava se desenvolvendo. Como as direções de propagação das ondas e dos ventos eram muito próximas, o espectro continuou sendo construído.

## 6. REFERÊNCIAS

- BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L.H.; RIS, R.C. The SWAN wave model for shallow water. *In: INT. CONF. COASTAL ENG. Proceedings...* Orlando : ASCE, 1996. p.668-676.
- INNOCENTINI, V.; CAETANO NETO, E.S. A case study of the 9 August 1988 South Atlantic storm: numerical simulations of the wave activity. **Weather and Forecasting**, v.11, p.78-88, 1996.
- INNOCENTINI, V.; CUNHA PRADO, S.C.S.; PEREIRA, C.S.; ARANTES OLIVEIRA, F.; BRANDÃO, I.N. Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: caso de 24 de outubro de 1999. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 128 p.
- INNOCENTINI, V. Sistema de previsão de ondas: projeto para estudar a geração, propagação e dissipação da agitação marítima no litoral brasileiro. **Boletim da Soc. Bras. de Met.**, v.25, p.15-19, 2001.
- TOLMAN, H.L. A third-generation model for wind on slowly varying unsteady and inhomogeneous depths and currents. **J. Phys. Oceanogr.**, v.21, p.782-797, 1991.
- TOLMAN, H.L. **User manual and system documentation of WAVEWATCH-iii VERSION 1.18. OMB.** Contribution no. 166. Technical Note. NCEP, NOAA, 1999. 110 p.
- THE WAMDI GROUP. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. **J. Phys. Oceanogr.**, v.18, p.1775-1810, 1988.