

Estudo de Caso: A Ressaca de Agosto de 2005 em Santa Catarina

Eloi Melo F^o, Guilherme R. Hammes & Davide Franco

Laboratório de Hidráulica Marítima – UFSC – Cx. Po. 5039, Florianópolis, SC 88040-970
emf@ens.ufsc.br, guihammes@gmail.com, franco@ens.ufsc.br

RESUMO

No mês de Agosto de 2005 observou-se o evento de agitação marítima mais intenso nos quase 4 anos de funcionamento (2002 a 2005) do *Programa de Informação Costeira* (PIC), um abrangente estudo de monitoramento das condições de mar realizado pelo Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC ao largo da ilha de SC por meio de um ondógrafo direcional Waverider [2]. Este trabalho apresenta um estudo detalhado sobre esse evento o qual inclui medições de campo, uma análise das condições meteorológicas que deram origem a ressaca, uma reconstituição das condições de mar feita com o modelo WW3, simulações com esse modelo para averiguar algumas questões peculiares que se acredita terem ocorrido e, ainda, uma apresentação da maior altura de onda individual medida.

PALAVRAS CHAVE: Ressaca; medições de onda, geração de ondas, ondas em Santa Catarina

1. MEDIÇÕES DE CAMPO

O monitoramento feito durante o funcionamento do PIC mostrou que a costa de SC está sujeita a vários eventos de agitação marítima energéticos (usualmente denominados “ressacas” pelo público) durante o ano. Os dados levantados pelo ondógrafo indicam que uma ressaca intensa nesse trecho da nossa costa apresenta, tipicamente, H_s na faixa entre 4.5 m a 5 m, T_p na faixa entre 12 a 15 s com *Direção* proveniente do quadrante Sul [2] e [3].

A Figura 1 mostra o histórico desses 3 parâmetros (H_s , T_p e Dir) medidos pelo ondógrafo para o evento em estudo. Observa-se que, como o aparelho estava regulado para monitorar *continuamente* o estado do mar, os parâmetros medidos referem-se a registros com cerca de 20 minutos de duração *perfeitamente justapostos* (i.e. sem a tradicional interrupção entre registros). Assim os dados apresentados na Figura 1 indicam a evolução da agitação marítima com detalhes raramente observados.

Pode-se verificar que a agitação do mar sofreu uma rápida intensificação a partir do início da tarde do dia 09/Ago com a altura significativa (para cada registro de 20 min.) passando de 3 m para 7.2 m em cerca de 6 horas. O período de pico ficou na faixa dos 12 s e a direção dominante do mar, curiosamente, situou-se em torno do setor ESE e não S como ocorre na maioria das ressacas mais fortes desse trecho de costa. A altura significativa manteve-se em torno de 6 m da noite do dia 09 até o final da manhã do dia 10 quando finalmente começou a diminuir. No que diz

respeito a H_s , esse evento foi o mais severo observado em todo o período de funcionamento do PIC (ver histórico de H_s coletado durante o PIC nas duas referências citadas acima).

Os ventos locais também foram monitorados pela estação meteorológica do LaHiMar instalada no Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC na Barra da Lagoa, costa Leste da Ilha de SC. Os dados observados pela estação estão mostrados na Figura 2. Como se pode-se verificar, os ventos locais também se intensificaram bastante no decorrer da tarde do dia 09 com a velocidade medida passando de 5 m/s para cerca de 12 m/s .

Comparando esse dado com a medição de H_s (figura anterior), pode-se constatar que essa intensificação dos ventos coincidiu exatamente com a subida do mar sugerindo que ventos “locais” devam estar relacionados com a ressaca. Entretanto, a direção desses ventos (do quadrante S), não correspondeu bem à direção dominante das ondas (*ESE*).

A direção *ESE* das ondas, direcionou-as diretamente para a costa da ilha e também do litoral norte de SC, principalmente a região de Itajaí que, pela orientação do litoral, fica parcialmente abrigada (pela ilha de SC) das grandes ondulações do quadrante S. De fato, a ressaca causou vários problemas e acidentes nesse trecho de costa tendo, inclusive, impossibilitado o tráfego de embarcações pela barra do Rio Itajaí afetando as atividades do porto. O Anexo a esse trabalho contém algumas fotos ilustrativas das condições do mar e dos estragos ocorridos.

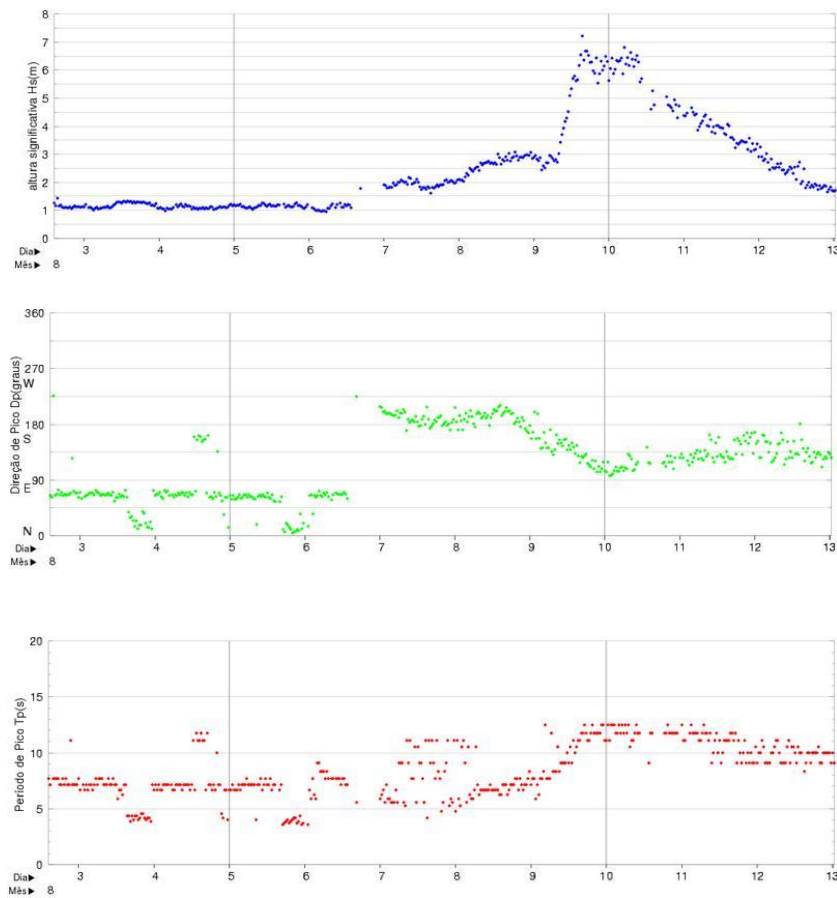


Figura 1 – Evolução temporal de H_s , T_p e Dir medido pelo ondógrafo da UFSC

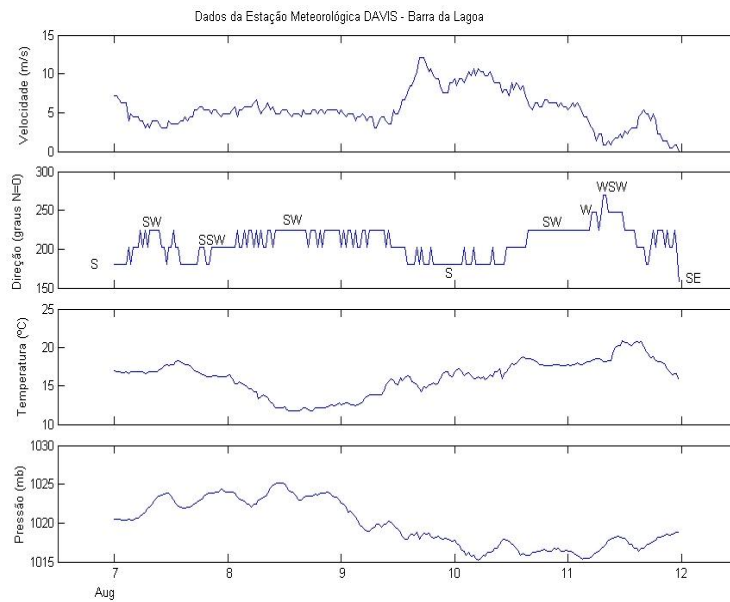
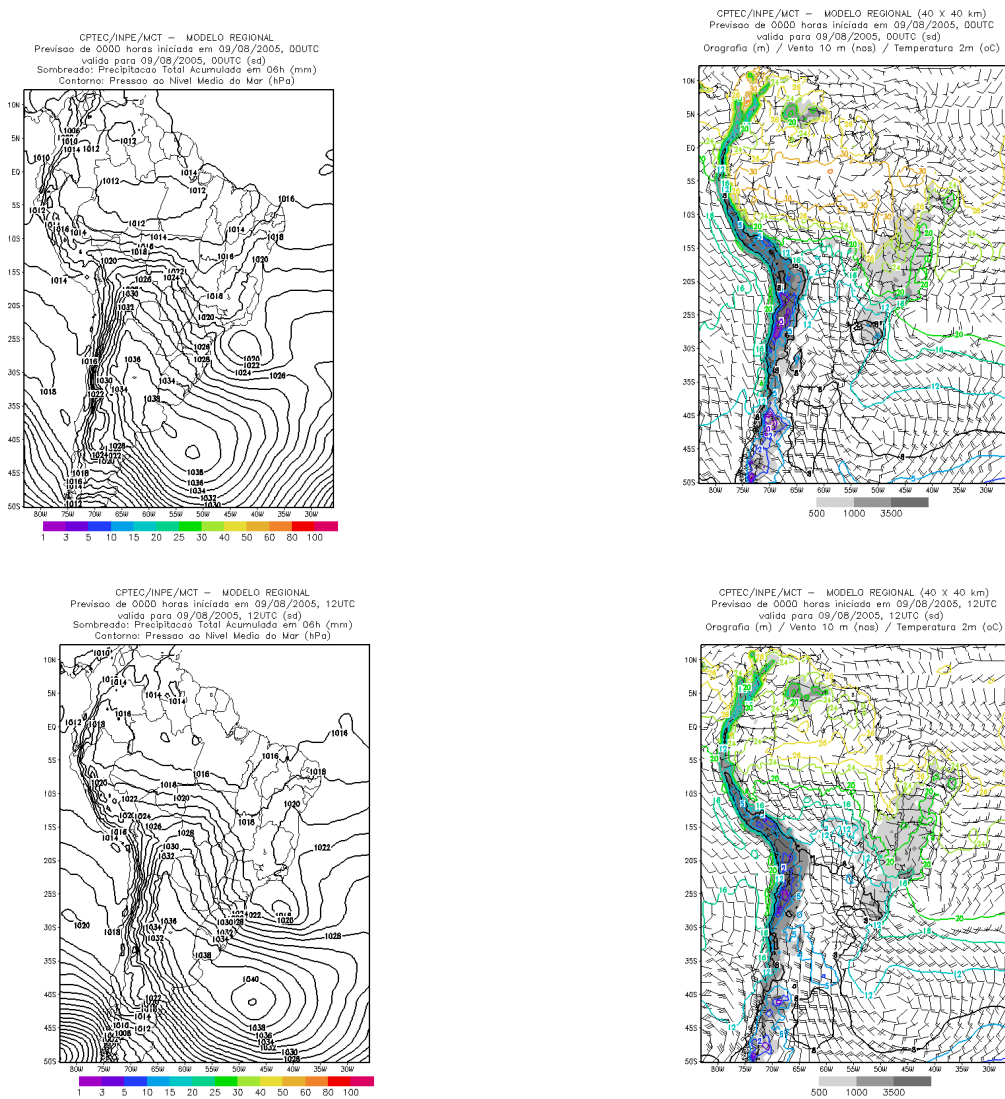


Figura 2 – Dados meteorológicos medidos na Barra da Lagoa (Leste da Ilha de SC)

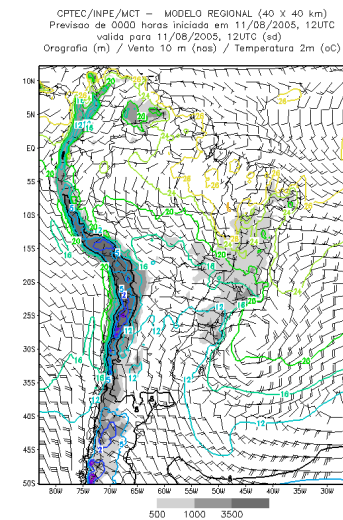
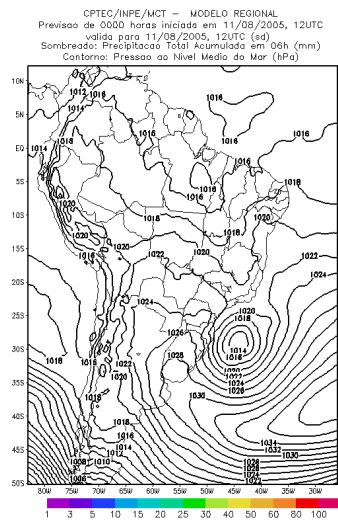
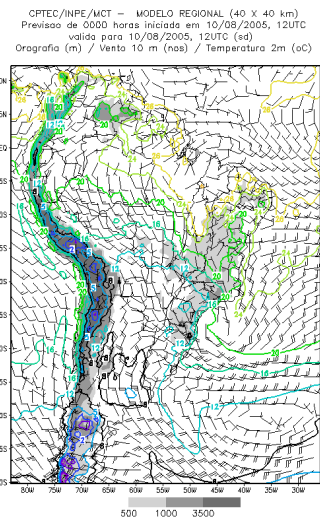
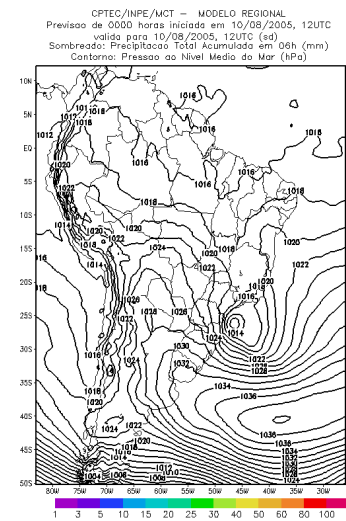
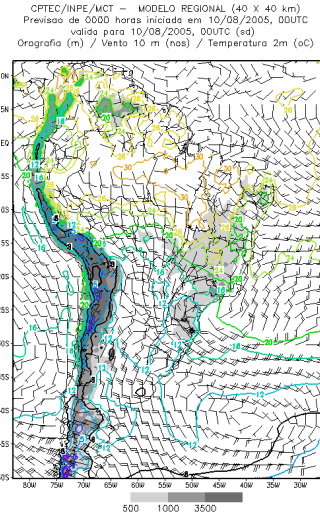
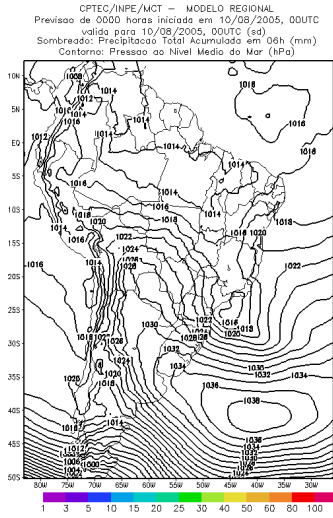
2. CENÁRIO METEOROLÓGICO

O que causou essa ressaca ? A Figura 3 mostra uma sequência de cartas sinóticas (pressão ao nível do mar e ventos a 10 m) que descreve o cenário meteorológico existente no período do evento. As cartas são resultado do modelo atmosférico do CPTEC/INPE, disponibilizadas regularmente via internet. O cenário mostram a presença sobre o Atlântico Sul de um anti-ciclone com centro em torno de $40^{\circ}S$ e $45^{\circ}W$ e de um centro de baixa pressão mais a norte, posicionado aproximadamente em $30^{\circ}S$, $40^{\circ}W$. Esses sistemas atmosféricos mantiveram sua identidade por cerca de 48 horas (de 08 a 10 de Agosto, ver Figura 3) ocasionando um gradiente de pressão que deu origem a uma região de ventos de *ESE* sobre o oceano a partir da costa de SC. A sequência também mostra que, a partir do dia 10 de Agosto, o centro de baixa pressão intensificou-se evoluindo para um bem formado ciclone bem ao largo da costa de SC.

Figura 3 – Sequência de Cartas Sinóticas do CPTEC/INPE



2º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, Novembro / 2006



O cenário apresentado acima sugere que a ressaca de Agosto de 2005 pode ter resultado de uma *combinação* um tanto incomum de fatores. O primeiro fator foi o gradiente de pressão formado entre o anti-ciclone a Sul e o ciclone a Norte o qual originou um “corredor” de cerca de 2000 km com ventos da ordem de 20 a 25 nós e direção ESE, portanto, direcionados rumo à costa sul brasileira. Além disso, houve a formação e a intensificação dum ciclone bem em frente à costa de SC, fato este que propiciou a ocorrência de ventos fortes mais próximos à costa.

É interessante observar que, como o ciclone ficou posicionado bem ao final da pista, é *possível* que as ondas geradas nesse “corredor” de ventos tenham, por coincidência, encontrado uma região oceânica com ventos fortes ao final do seu percurso a qual propiciou um “input” extra de energia às ondas que ali chegavam. Essa *combinação*, portanto, *talvez* explique o nível de agitação incomum alcançado nesse evento. Essa hipótese será investigada mais adiante.

A disponibilidade de medições e a peculiaridade desse evento motivou os autores a fazer uma reconstituição das condições de mar ocorridas usando um modelo de geração de ondas pelo vento conforme mostrado na próxima seção.

3. RECONSTITUIÇÃO DAS CONDIÇÕES DO MAR

O modelo de geração de ondas usado no presente estudo foi o modelo “*Wave Watch III*” (WW3) utilizado pela NCEP/NOAA americana cujo código, de domínio público, encontra-se acessível via internet.

Os modelos de geração calculam o chamado *Espectro Direcional* do campo de ondas, a maneira mais completa de se descrever um certo estado de mar e que mostra como a energia presente se distribui em termos de frequência e direção das componentes. Entretanto, para a comparação feita nesse trabalho as condições de mar foram caracterizadas pelos 3 parâmetros básicos usados anteriormente (Altura Significativa, Período de Pico e Direção Dominante).

Os campos de vento utilizados foram também obtidos diretamente do banco de dados de domínio público da NOAA via internet. Em lugar do vento previsto, utilizou-se o chamado vento “reanalizado” o qual pode ser entendido como uma “previsão aperfeiçoada”, corrigida a partir de dados medidos em campo. O vento reanalizado é mais preciso e confiável que o vento prognosticado.

O modelo WW3 foi executado em duas grades numéricas aninhadas, como é de praxe nesse tipo de estudo:

- a) Grade “global” que usa o campo de ventos global para fazer previsões de onda igualmente globais, isto é em *todos* os oceanos da Terra com resolução de $1^\circ \times 1.25^\circ$ (ver Figura 4).
- b) Grade “local” focalizando o Oceano Atlantico Sul com resolução de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Ver Figura 5)

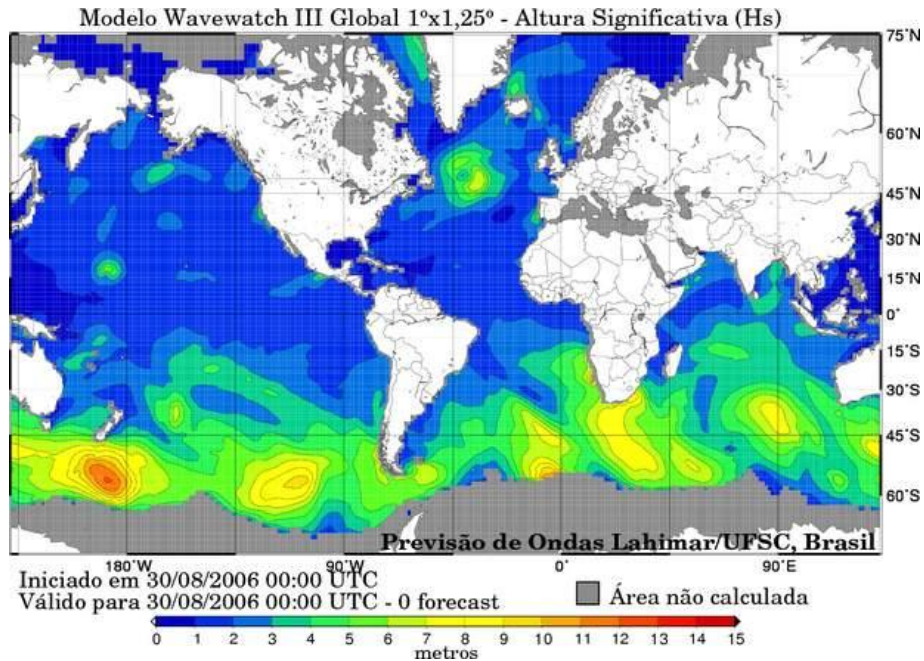


Figura 4 – Exemplo de saída para Altura Significativa de Ondas (Hs) do modelo WW3 para a grade “global”. (Obs.: Figura não corresponde ao evento em estudo)

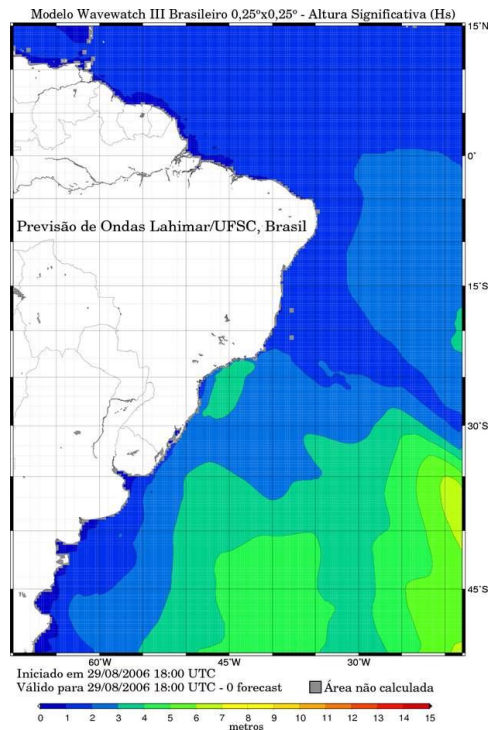
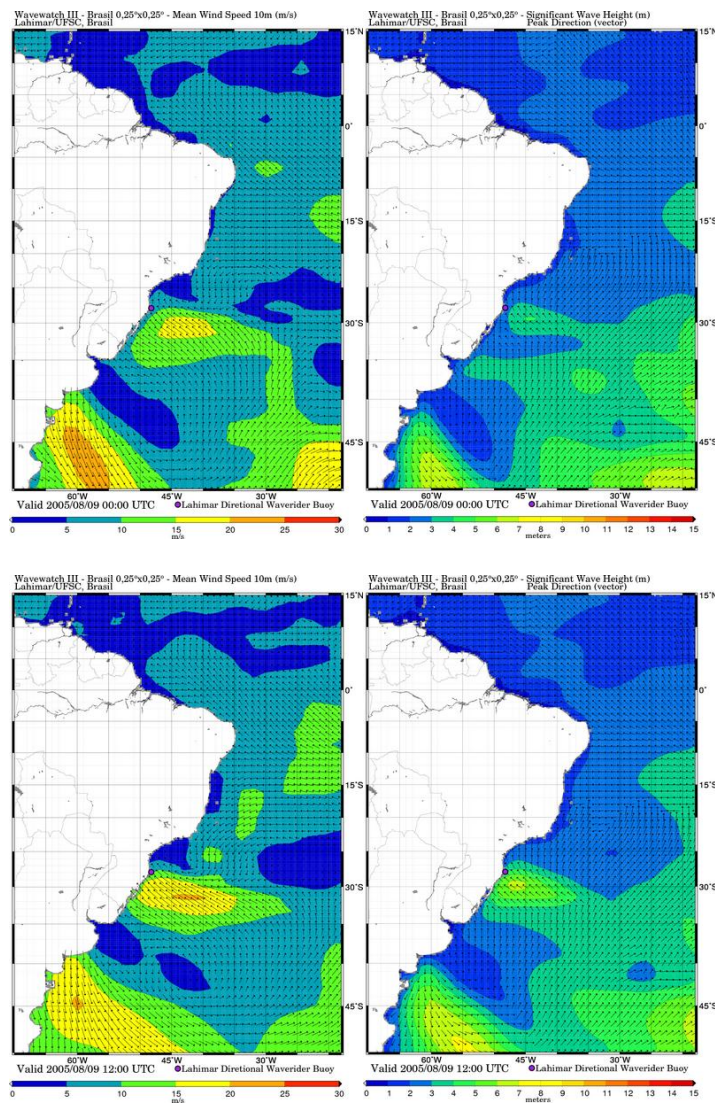


Figura 5 – Exemplo de saída para Altura Significativa de Ondas (Hs) do modelo WW3 para a grade “local” do Atlantico Sul. (obs Figura não corresponde ao evento em estudo).

O uso da grade global advem da necessidade de se garantir que ondas geradas *fora* da região coberta pela grade local possam ser incluídas na previsão. Dessa forma, a rodada do modelo na grade “global” fornece as condições de mar no contorno da grade “local” do Atlântico Sul que são, portanto, incorporadas por esta nos cálculos.

Os cálculos foram iniciados com 4 dias de antecedência em relação ao período desejado de forma a garantir um “aquecimento” adequado do modelo. Esse procedimento se faz necessário uma vez que no momento da “partida” (isto é, quando o vento é fornecido para o modelo) não há onda nenhuma no oceano. Uma vez inicializado, o modelo tem o campo de vento atualizada a cada 3 horas. O modelo WW3 foi rodado com todos os seus parâmetros no modo padrão (“default”).

Com essa metodologia foi possível reconstituir, para o período desejado as condições de agitação marítima ao largo de toda a costa brasileira e, em particular da costa sul brasileira. A Figura 6 mostra os campos de ventos reanalizados e os respectivos campos de H_s calculados pelo modelo WW3 para o período de interesse. O círculo na figura indica a posição do ondógrafo da UFSC.



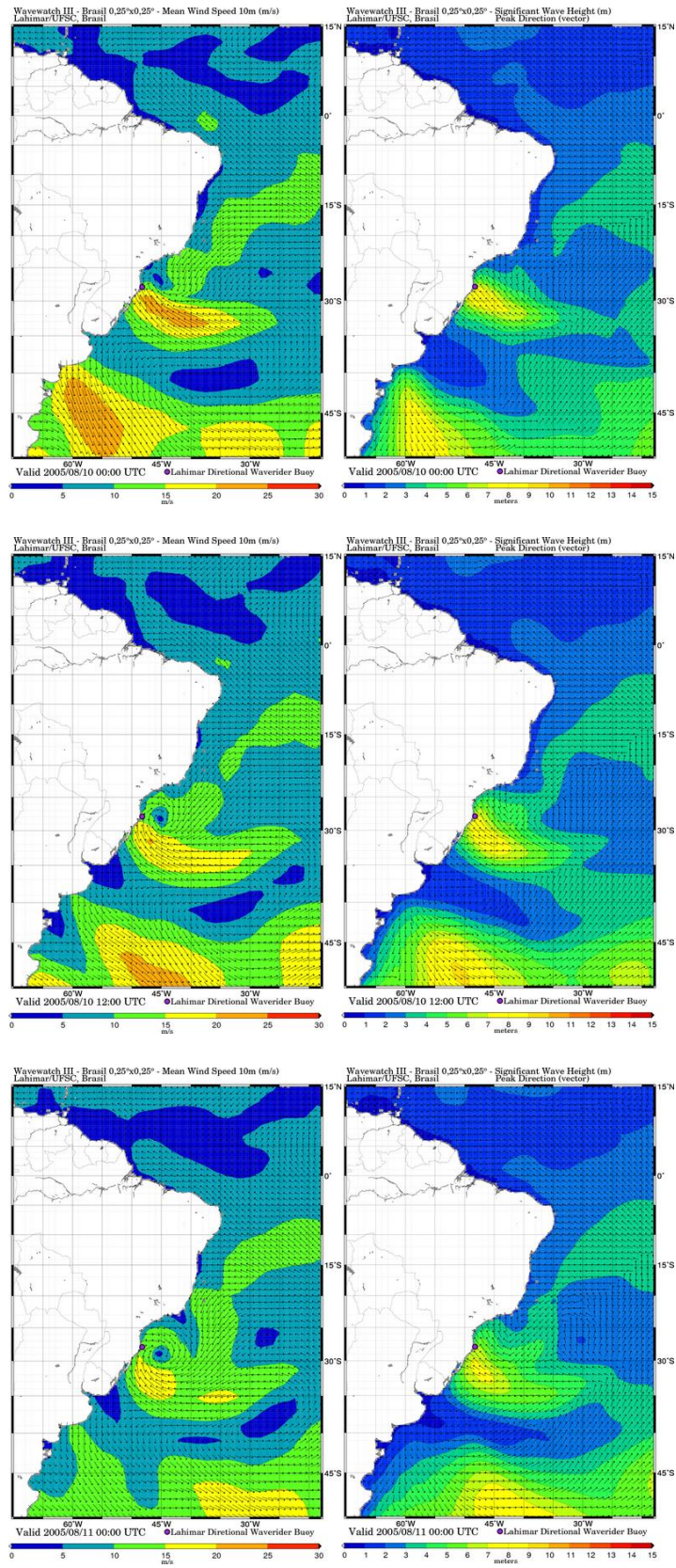


Figura 6 - Campos de vento a 10 m e respectivos campos de H_s calculado pelo modelo WW3

Uma comparação dos campos de vento mostra que a previsão feita pelo modelo do CPTEC/INPE e a reanálise da NOAA são bastante similares. Ambos indicam a presença do anti-ciclone e do ciclone sobre o oceano com a formação do corredor de ventos acima mencionado. Notam-se apenas pequenas diferenças, mormente no que se refere a intensidade do vento (ventos reanalisados são um pouco mais intensos). O desenvolvimento do ciclone mais próximo a costa também pode ser observado na reanálise.

A Figura 7 mostra a evolução temporal dos 3 parâmetros calculados pelo modelo para o ponto onde se situa o ondógrafo.

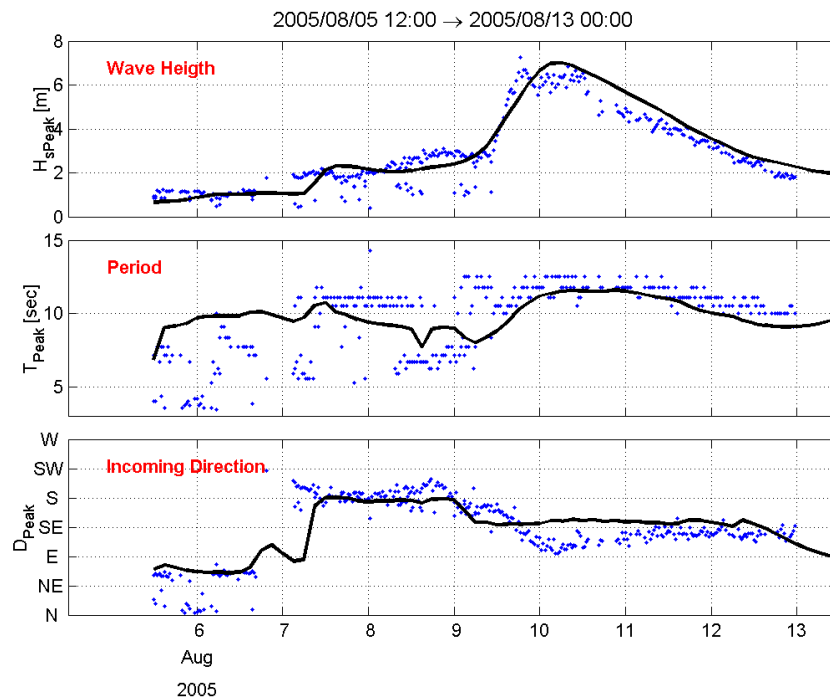
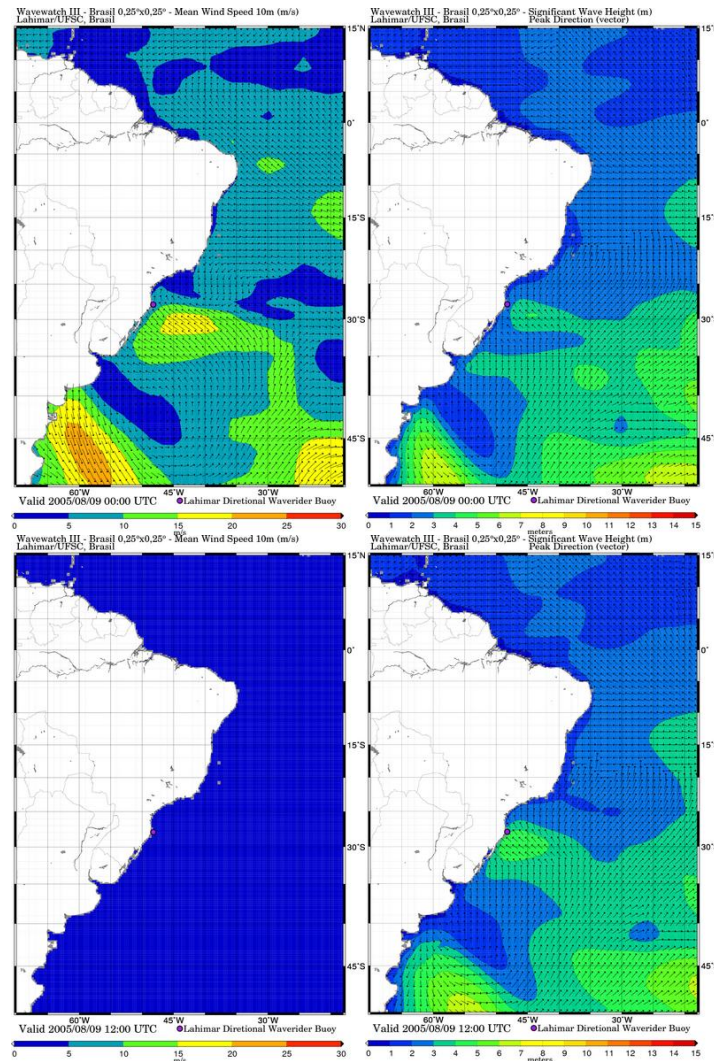


Figura 7 - Evolução temporal dos parâmetros H_s , T_p e Dir calculados pelo modelo para o ponto onde estava situado o ondógrafo da UFSC (linha cheia) e medições de campo (pontos)

Como se pode verificar inspecionando a figura, a modelação feita como o WW3 forçado com ventos reanalisados da NOAA foi capaz de reconstituir de forma bastante satisfatória o comportamento da altura significativa, período de pico e direção dominante das ondas durante o evento. Em particular, observa-se que o valor máximo de H_s calculado pelo modelo foi praticamente idêntico ao observado pelo ondógrafo. Entretanto, a rapidez da subida de H_s observada pelo ondógrafo não foi completamente capturada pelo modelo que demorou um pouco para fazer o mar “subir”.

4. SIMULAÇÕES HIPOTÉTICAS

Animados com os bons resultados da reconstituição do estado de mar, o modelo WW3 foi usado para investigar a viabilidade da hipótese do “efeito combinado” apontada na seção anterior. Para tanto, foram feitas 2 simulações. A primeira simulação foi análoga a reconstituição anterior, porém com a seguinte modificação: a partir de 12 hs UTC do dia 09 de Agosto o campo de ventos foi completamente “anulado” ! A motivação para essa simulação hipotética foi exatamente avaliar qual teria sido a contribuição das ondas geradas no “corredor” de ventos. A Figura 8 mostra o resultado dessa simulação.



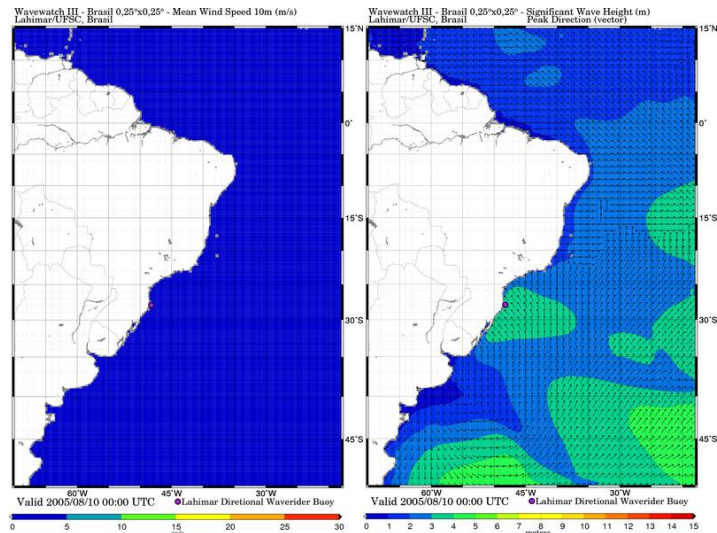
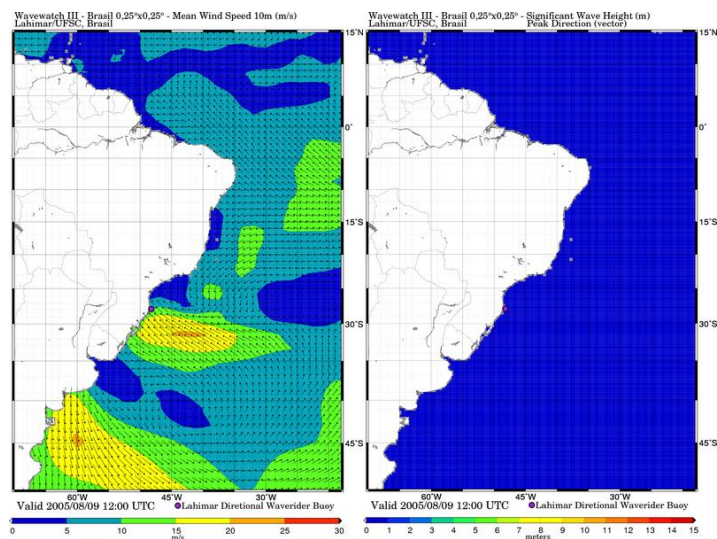


Figura 8 – Simulação Hipotética #1 – Vento cessando as 12 hs do dia 09/Ago

A seguir, para tentar avaliar qual teria sido o efeito dos ventos “locais”, fez-se uma outra simulação hipotética na qual o campo de vento foi “ligado” a partir do dia 09/Ago as 12 hs começando a atuar sobre um mar completamente *sem ondas* ! Os resultados estão mostrados na Figura 9.



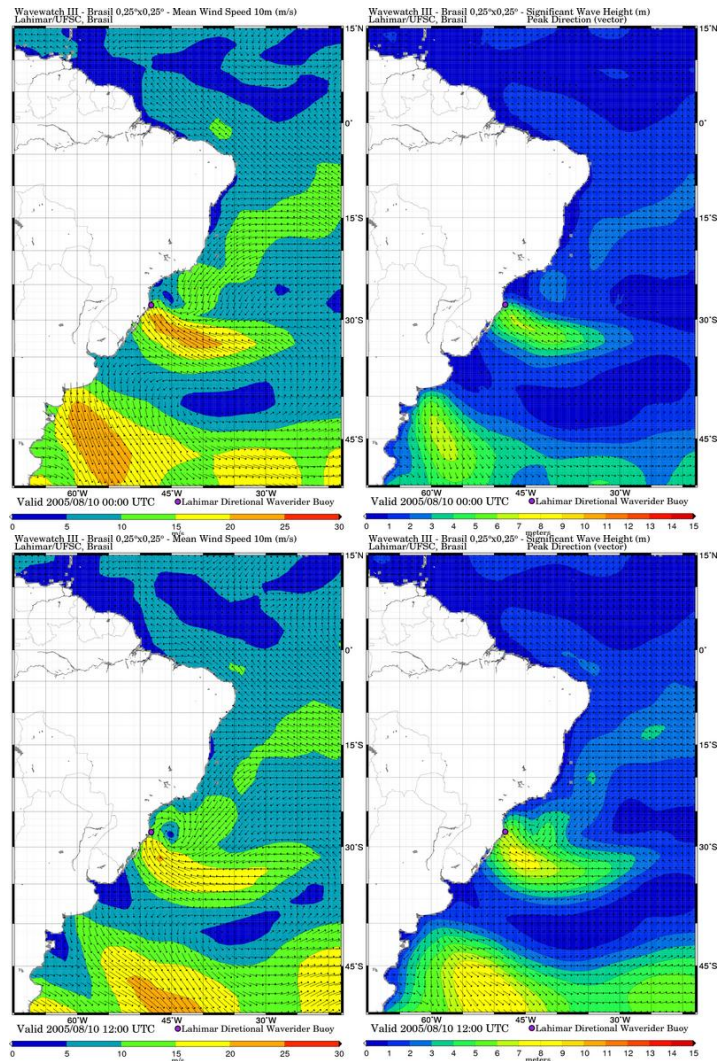


Figura 9 – Simulação hipotética#2 – Vento inciando as 12 hs do dia 09/Ago

A avaliação dos efeitos está apresentada na Figura 10 que mostra como a agitação marítima evoluiu na reconstituição “completa”, em cada uma das simulações hipotéticas separadamente e, ainda, no caso em que os efeitos das simulações são simplesmente superpostos. A figura mostra o resultado em termos de H_s e da energia total m_o . [Lembrando que $H_s = 4\sqrt{m_o}$].

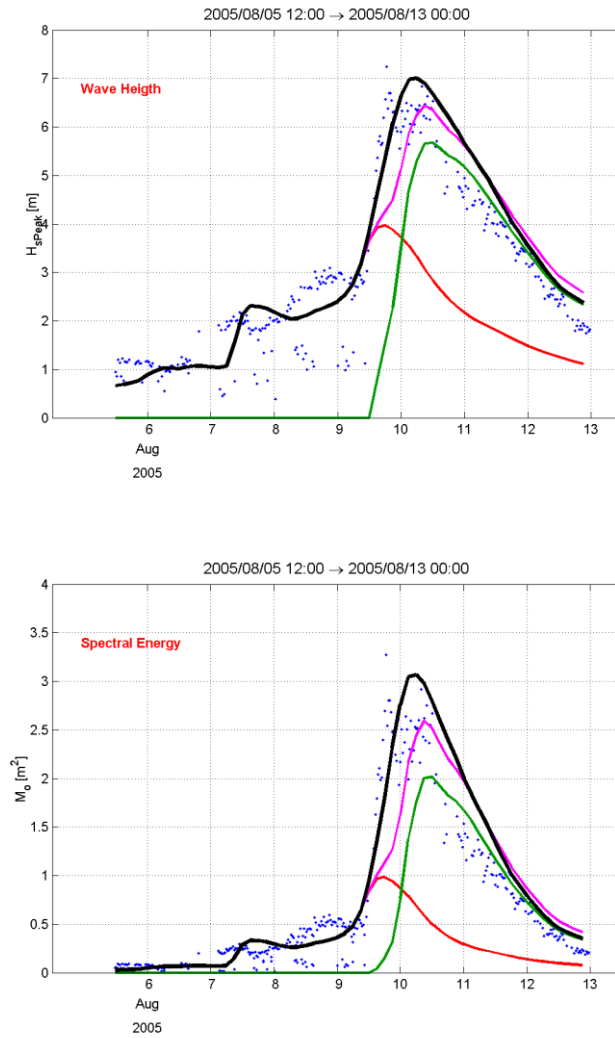


Figura 10 – Evolução da Agitação Marítima para: Reconstituição “completa” - linha preta; Simulação hipotética#1 (ventos cessando as 12 hs de 09/Ago) – linha vermelha; Simulação hipotética#2 (ventos iniciando as 12 hs de 09/Ago) – linha verde e a soma das simulações (atuando isoladamente) – linha púrpura.

Os resultados apontam alguns aspectos interessantes. Primeiramente, a Simulação #1 indica que o “corredor” de ventos de ESE teria sido capaz de gerar ondas com $H_s = 4\text{ m}$ as 12 hs do dia 09/Ago no ponto onde o ondógrafo situava-se. A Simulação #2, por sua vez, indica que os ventos que sopraram a partir da tarde de 09/Ago, atuando isoladamente (i.e. iniciando numa condição de mar sem onda nenhuma), teriam conseguido gerar um mar cujo H_s atingiria o valor máximo de cerca de 5.5 m aproximadamente as 12 hs do dia 10/Ago.

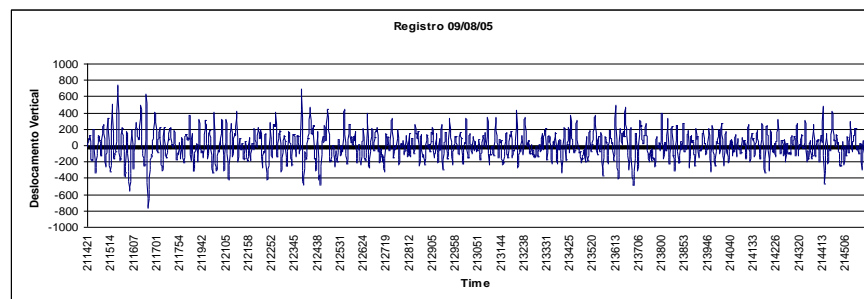
A tentativa de separar os dois “agentes” simplesmente interrompendo e “ligando” os ventos as 12 hs do dia 09/Ago é bastante artificial pois o “corredor” de ventos, na verdade, se manteve ativo

depois desse momento. Mesmo assim, os resultados sugerem que nenhum dos dois “agentes” teriam sido capazes de produzir as condições observadas se tivessem atuado isoladamente. Nessa ótica, é razoável admitir que a hipótese do “efeito combinado” encontra suporte na simulação realizada.

É interessante observar também que a soma dos mares que resultaram das duas simulações hipotéticas (com ventos parando e iniciando as 12 hs de 09/Ago) não foi equivalente ao caso “completo” (com ventos atuando continuamente). Uma parte da explicação pode estar no fato de que o vento na Simulação#2 em lugar de ter sido interrompido *abruptamente* na hora indicada, foi diminuindo até zerar ao longo dum período de 6 horas (i.e. de 06 as 12 hs do dia 09/Ago). Como esse procedimento diminuiu o “input” total de energia do vento em relação ao caso “completo” é de se esperar que a energia total repassada para o mar seja um pouco menor no caso da superposição de efeitos. A outra parcela da explicação pode residir em aspectos físicos do processo de geração de ondas pelo vento, os quais estão incorporados no modelo WW3. De fato, na Simulação#2, há ventos fortes atuando sobre um mar inicialmente *sem* ondas enquanto que no caso “completo” o mesmo vento atua sobre uma mar *já* com *Hs* de 4 m. Ora, é sabido que o processo de transferência de energia do vento para o mar é sensível a “idade” das ondas, tornando-se mais eficiente a medida que as ondas ultrapassam um certo estágio inicial. Isso talvez explique a maior energia da agitação encontrada no caso “completo”. Um terceiro aspecto seria o fato de que alguns dos mecanismos de geração incluídos no WW3 não respondem linearmente e, portanto, não se prestam a superposições de efeito. Essas conjecturas merecem uma investigação mais aprofundada para sua confirmação (ou não...).

5. A “RAINHA” DA RESSACA

Tirando proveito do fato de que o ondógrafo monitorou as condições do mar continuamente durante o evento, verificou-se qual foi a maior *onda individual* registrada pelo aparelho (a “rainha”!). O registro no qual a maior onda individual de zero-crossing foi observada ocorreu na noite do dia 09 de Agosto e está mostrado na Figura 11.



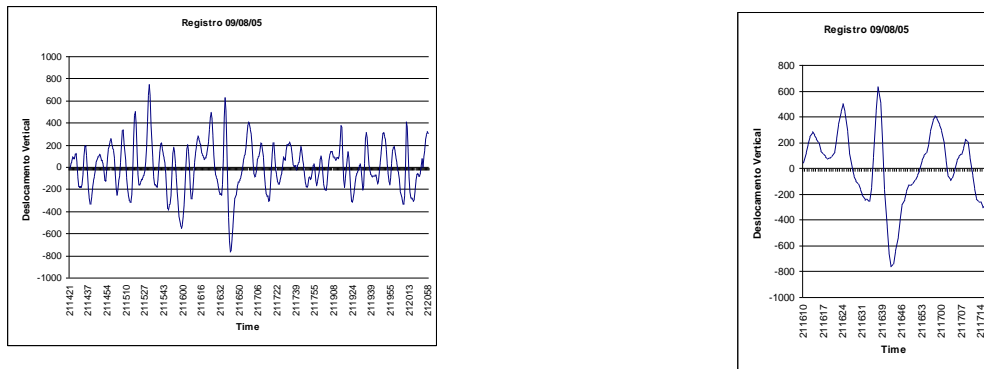


Figura 11 – Registro onde se encontrou a maior onda individual registrada durante a ressaca (painel superior) e detalhes da onda (painéis inferiores)

A “rainha” da ressaca teve altura de zero-ascendente com 13.8 m num registro com H_s da ordem de 6.5 m , portanto, no limite da classe de onda “extrema” para essa condição de mar (ver [4]).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um relato detalhado sobre o evento de agitação marítima mais energético observado durante o funcionamento do *Programa de Informação Costeira* (PIC) do Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC. Medições feitas pelo ondógrafo Waverider da UFSC a 35 km da costa da ilha de SC (numa profundidade de 80 m) indicaram uma altura significativa máxima de 7.2 m nesse evento, um valor bem acima dos valores máximos tipicamente observados pelo ondógrafo – com H_s na faixa de 4.5 a 5 m . Além do tamanho das ondas, esse episódio apresentou também uma característica peculiar: a direção dominante foi do setor ESE o que direcionou as ondas diretamente para a costa, causando vários problemas e acidentes.

Uma análise do cenário meteorológico que deu origem a essa “ressaca” mostrou a existência de um extenso “corredor” de vento de ESE sobre o oceano direcionado para a costa sul do Brasil. Esse “corredor” foi causado pelo gradiente de pressão que se desenvolveu entre um intenso anticiclone mais a sul e um centro de baixa pressão a norte. Posteriormente, o centro de baixa evoluiu para um bem formado ciclone nas proximidades da costa com ventos “locais” bastante intensos.

O evento em questão foi usado para testar uma metodologia de reconstituição (“hindcast”) das condições do mar baseada no uso do modelo WW3 forçado por ventos reanalisados da NOAA. Os resultados da modelação mostraram boa concordância com os dados medidos em campo.

Os autores apresentam como possível explicação para as características incomuns desse evento a ocorrência de uma combinação de fatores. Segundo essa hipótese, as ondas dessa ressaca tiveram origem dentro do “corredor” de ventos descrito acima. Entretanto, o que, em condições normais seria apenas um potente *Mar de Leste* (ver [1]), tornou-se uma violenta ressaca graças ao “input” extra de energia que as ondas receberam no trecho final do seu percurso ao encontrarem uma região oceânica com ventos fortes causados pela intensificação do ciclone próximo a costa.

Essa hipótese foi testada através de duas simulações hipotéticas com o modelo WW3. Na primeira os ventos foram interrompidos as 12 hs do dia 09/Ago (momento da subida do mar de acordo com as medições) e na segunda os ventos foram “ligados” a partir dessa mesma hora sobre um mar completamente sem ondas. Os resultados indicaram que o “corredor” de ventos, apesar de extenso, não teve ventos intensos o suficiente para gerar um mar com H_s maior do que 4 m. Por outro lado, os ventos “locais” associados ao ciclone, apesar de mais intensos, também não conseguiram, isoladamente gerar ondas com H_s maior que 5.5 m. A hipótese de efeito combinado, portanto, mostrou-se consistente com os resultados das simulações.

Finalmente, a maior altura de onda individual de zero-ascendente medida pelo ondógrafo durante o evento atingiu o valor recorde de 13.8 m que foi a maior onda individual observada em todo o período coberto pelo PIC.

7. REFERÊNCIAS

1. ARAÚJO, C.E.; FRANCO, D.; MELO F^o, E. & PIMENTA, F.M.; *Wave regime characteristics of the Southern Brazilian Coast*, Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 097; pp 15, 2003 (publicado em CD, sem paginação).
Disponível em: http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003_1.pdf
2. MELO F^o, E.; *Programa de Informação Costeira on line: Um balanço dos primeiros dois anos de funcionamento*, Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, pp 25, 2004.
3. MELO, E. et al. *A real time, on-line coastal information program in Brazil*, Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper No. 104; pp 14, 2003 (publicado em CD, sem paginação)
Disponível em: http://www.lahimar.ufsc.br/downloads/anais/copedec2003_2.pdf
4. MELO F^o, E.; STRAIOTTO, K.M.G.T., FRANCO, D. & ROMEU M.A.R. *Distribuição estatística de alturas de ondas individuais em Santa Catarina: resultados preliminares*, Publicado no presente Seminário

APÊNDICE - Fotos ilustrativas da ressaca na costa de Santa Catarina



Praia Mole, Florianópolis – 10/Ago/2005 a tarde



(idem)



Barra da Lagoa, Fpolis – 10/Ago/2005 de manhã



Praia da Armação, Florianópolis



Praia da Armação, Florianópolis



Praia do Campeche, Florianópolis



Praia Brava de Itajaí
(Esta foto e a foto ao lado)



Balneário Foto Koldeway A.C/Agência RBS

Balneário Camboriu



Pântan Foto Flávio Neves/Agência RBS

Pantano do Sul, Florianópolis



Barra do Rio Foto Marcos Porto/Agência RBS

Barra do Rio Itajaí



Bombinhas Foto Marcos Porto/Agência RBS

Bombinhas