

MARÉS METEOROLÓGICAS NO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ: O EVENTO DE 18 DE AGOSTO DE 1993

Eduardo MARONE*
Ricardo de CAMARGO*

INTRODUÇÃO

Define-se maré meteorológica como sendo a diferença entre a maré realmente observada e a maré astronômica (Pugh, 1987). Duas causas provocam a maré meteorológica: as variações da pressão atmosférica e a troca de *momentum* entre a atmosfera e o mar. Em geral, os efeitos devidos unicamente à ação da pressão atmosférica são da ordem de 10% do efeito total observado, sendo o restante devido exclusivamente à tensão de cisalhamento do vento na superfície do mar.

O fator mais importante para a geração da maré meteorológica é a pista de vento ("fetch"), que é o tamanho da área oceânica onde efetivamente ocorre a troca de *momentum* entre o ar e o mar. É necessário que a atuação do vento se mantenha por certo tempo, de modo a transferir energia suficiente para que este efeito seja importante ou até predominante. Esta transferência de energia cinética se dá pela tensão de cisalhamento (atrito) causando efeitos em várias escalas de espaço e tempo, como as ondas capilares, as ondas de gravidade superficial e as variações do nível médio do mar. Trata-se, portanto, de um fenômeno não-linear pois a energia é transferida para diferentes bandas do espectro das alturas do mar (Marone, 1991).

A maré meteorológica é portanto, responsável pelo aumento ou diminuição do nível do mar em relação às marés astronômicas observadas num dado local. Este fenômeno é geralmente mais importante quando os registros são maiores do que aqueles previstos pela maré astronômica, o que implica em intrusão de água do mar em locais onde isso normalmente não acontece, causando grandes inundações. Nestas situações extremas, é comum ocorrer ondas de superfície com grande poder destrutivo, fenômeno conhecido por ressaca que, segundo Magliocca (1987), refere-se às ondas de perfil assimétrico que se quebram ao longo das praias formando extensos rolos brancos de espuma. A ressaca ("storm surge") é mais intensa dependendo da amplitude e período

*Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Av. Beira Mar s/n, Pontal do Sul - PR, 83255-000, Brasil

das ondas e também das condições do tempo e, geralmente, acompanha as marés meteorológicas significativas. No entanto, a inundação pode persistir por mais tempo do que as ondas.

A maioria dos estudos sobre a influência meteorológica na plataforma brasileira tem sido feita através da aplicação de modelos numéricos hidrodinâmicos. Harari (1985) estudou a composição da circulação astronômica dos principais componentes de maré com efeitos de campos de pressão atmosférica e vento em períodos caracterizados por elevações excepcionais do nível do mar, através da consideração de dados provenientes de estações meteorológicas situadas na costa. Castro Filho (1985) estudou a resposta da plataforma sudeste do Brasil, em frequências de submarés, forçada por condições típicas de inverno, considerando dados do "National Meteorological Center". Pereira (1987) estudou a influência de ciclones extratropicais com frentes frias associadas sobre frentes oceânicas no litoral do Sul do Brasil. Stech (1990) comparou a dinâmica da plataforma sudeste brasileira com a South Atlantic Bight nos EUA, simulando a atuação de campos de vento fornecidos por modelos conceituais de frentes frias, dados observados e informações de cartas sinóticas. Camargo (1991) utilizou uma metodologia baseada em cartas sinóticas para incluir os efeitos meteorológicos, que foram sobrepostos aos efeitos astronômicos em períodos também caracterizados por grandes elevações do nível do mar na plataforma sudeste do Brasil. Como se vê, os efeitos sobre o oceano de campos de vento associados à passagem de frentes frias são muito importantes, e nesses trabalhos pode-se observar a extensão do fenômeno em questão.

Este trabalho procura identificar os fatores que tiveram importância para o evento de 18 e 19 de agosto de 1993, quando ocorreu uma excepcional maré meteorológica no litoral sudeste do Brasil, afetando diversas cidades com inundações e com a atuação de fortes ondas. Será dada ênfase ao Estado do Paraná, onde as consequências foram sérias, causando perdas do patrimônio público e privado, principalmente em Matinhos.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizadas cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície para o período de 15 a 20 de agosto de 1993, elaboradas pelo Serviço Meteorológico Marinho, órgão do Ministério da Marinha (Fig. 1) e imagens do satélite METEOSAT-4, obtidas no Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (Fig. 2) correspondentes ao mesmo período.

Para complementação foram utilizados dados das alturas horárias do nível do mar obtidos no Porto de Paranaguá pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) durante o mês de agosto de 1993 (Fig. 3), observações visuais realizadas durante o evento na régua de maré instalada no Porto de Embarque do Centro de Estudos do Mar e dados meteorológicos de pressão atmosférica (Fig. 4) e vento (Fig. 5) amostrados a cada 30 minutos pela estação meteorológica automática do CEM em Pontal do Sul.

A influência meteorológica nas alturas do nível do mar foi avaliada através da comparação de observações com previsões para o Porto de Paranaguá, subtraindo os valores de marés previstos (Franco, 1981) dos dados observados, de modo a separar as componentes astronômica e meteorológica do registro de maré.

RESULTADOS

A sequência de cartas sinóticas da Figura 1 mostra a evolução de um sistema frontal, que se desloca desde o norte da Argentina até o Estado do Espírito Santo durante todo o período. Pode-se observar também o rápido deslocamento de um segundo sistema frontal que aparece no extremo sul do continente sul-americano no terceiro dia e que no quarto dia já se estende até a Baía do Prata. Este segundo sistema aparentemente afetou toda a situação sinótica a partir do dia 16, comprimindo a alta pressão sobre o continente até o dia 19 e provocando a oclusão total do primeiro sistema no dia 20. Além disso, nos dias 17, 18 e 19, pode-se observar a grande pista de vento sobre o oceano, gerada pela combinação das circulações destes centros de alta e baixa pressão.

Nas imagens de satélite (Fig. 2) é possível acompanhar a evolução à qual se referem as cartas sinóticas da Figura 1. Neste conjunto de fotos, observa-se a evolução de dois sistemas frontais: um sobre o Atlântico e o outro ainda sobre o Pacífico em 15 de agosto. Estas frentes apresentaram grande organização do primeiro para o terceiro dia. Neste período também pode se observar que há predominância de nuvens baixas entre as duas frentes citadas, caracterizando subsidência de massas de ar, o que evidencia a presença de um centro de alta pressão evoluindo sobre o continente. De 16 para 17 de agosto, observa-se que o sistema mais a oeste deslocou-se mais rapidamente e encostou no primeiro. Esta aproximação certamente foi importante para a oclusão ocorrida com o sistema mais a leste, entre 17 e 18 de agosto. A foto do dia 19 mostra com bastante clareza esta oclusão. Além dessas características, pode-se observar a progressiva interação do sistema frontal com a organização da convecção nas latitudes mais baixas, a partir do terceiro dia. Deve ser ainda destacada a presença nítida de um jato sub-tropical que se apresenta na direção zonal sobre o continente, nas imagens dos dias 18 a 20.

Pode-se notar que entre 15 e 20 de agosto de 1993, correspondente a um período de sizígia, houve um aumento anormal do nível do mar no Porto de Paranaguá (Fig. 3). Este grande aumento foi observado em 18 de agosto, quando a maré atingiu 3,5 metros, isto é, cerca de 80 cm acima da preamar prevista para este dia. Este fenômeno deve-se exclusivamente aos efeitos de origem meteorológica, referentes à combinação da passagem de uma frente fria sobre o oceano associada a um centro de alta pressão sobre o continente.

Na Figura 4 pode-se notar duas grandes quedas na série de pressão atmosférica em agosto de 1993 em Pontal do Sul: uma entre os dias 5 e 10 e outra por volta do dia 30, mas nada muito intenso ou brusco. Nota-se também que houve uma pequena queda na pressão atmosférica no dia 17. Estes abaixamentos na pressão se referem à passagem

de frentes frias na área. Além desses vales, notam-se dois períodos caracterizados por altas pressões, um antes do dia 5 e outro logo depois do dia 20.

No "stick-plot" dos dados de vento de agosto de 1993 em Pontal do Sul (Fig. 5) cabe esclarecer que ventos do quadrante sul estão representados por barras no lado positivo do eixo das ordenadas como, por exemplo, no entorno da hora 200. Os ventos não apresentam intensidades anormais, variando dentro da faixa usual para a época e região. Pode-se notar as viradas em alta frequência na direção do vento, as quais estão relacionadas com as circulações locais do tipo brisa marítima, e as viradas de direção com períodos mais duradouros, relativas à aproximação de centros de baixa pressão.

As diferenças entre observação e previsão para o Porto de Paranaguá foram maiores em 18 de agosto (Fig. 6). A previsão efetuada se baseia na análise harmônica do registro maregráfico do porto, referente ao ano de 1990, na qual só são consideradas as componentes aprovadas em testes estatísticos.

DISCUSSÃO

As cartas sinóticas produzidas pelo Serviço Meteorológico Marinho mostram que os sistemas não apresentaram forte ciclogênese com grande queda na pressão atmosférica de superfície e que houve um deslocamento bastante rápido do segundo sistema frontal em direção ao oceano. Os ventos observados nas estações costeiras foram de moderados a fortes na retaguarda da frente, nos três primeiros dias. Nestes dias, os ventos foram formados pela combinação de uma circulação anti-ciclônica sobre o continente com a circulação ciclônica do sistema frontal. Infelizmente, dados de pressão e vento sobre o oceano nesta área são escassos, o que não permite uma avaliação dos valores. Sendo assim, deve-se enfatizar que a confecção destas cartas sinóticas sobre o mar, onde não se dispõe de dados, inclui muita subjetividade por parte dos técnicos. Desta forma, é preciso tomar cuidado na utilização destas cartas quando se pretende realizar um estudo mais aprofundado.

De qualquer maneira, as cartas sinóticas evidenciam a pista de vento formada nos dias 17 a 19 de agosto. Pode-se dizer que a extensão da pista de vento de quadrante sul no dia 17, véspera do evento, foi de aproximadamente 15° de latitude por 10° de longitude, e por volta desse valor nos dias 18 e 19. Nada se pode afirmar sobre os valores de intensidade do vento sobre a superfície do oceano devido à escassez de dados. No entanto, devido ao rápido avanço do segundo sistema citado anteriormente e as alturas do nível do mar na costa, o vento deve ter sido forte.

Observa-se portanto, que o distúrbio no mar ocorreu na retaguarda da frente, a qual se apresentava pouco intensa sobre o continente, com abaixamentos de pressão e ventos não excepcionais, como observado em Pontal do Sul (Figs. 4 e 5).

Os registros de maré foram computados visando separar a influência meteorológica (Fig. 6). Observa-se uma oscilação em baixa frequência ao redor de zero e acima desta uma oscilação em alta frequência. As variações em alta frequência estão associadas a efeitos não-lineares presentes nas séries de maré da Baía de Paranaguá (Camargo, 1991; Marone & Camargo, 1993; Marone & Camargo, no prelo) enquanto que as de

baixa frequência são relacionadas aos efeitos meteorológicos (Castro Filho, 1985; Stech & Lorenzzetti, 1992; Camargo & Harari, no prelo). Em 18 de agosto esta diferença foi de cerca de 80 cm, perdurando por quase um dia, como evidência da maré meteorológica ocorrida na ocasião. Na régua de maré do CEM foi visualmente observada uma diferença de 80 cm acima do nível da preamar astronômica correspondente a tarde do dia 18 de agosto. A previsão de maré para o porto de embarque do CEM se baseia na análise harmônica (Franco, *op. cit.*) do registro obtido em julho e agosto de 1992.

Considerando-se o aumento de 80 cm do nível do mar em 18 de agosto, acima da previsão para pontos da Baía de Paranaguá, e os 600 km² de área de drenagem, chega-se a um volume excedente de 4.8×10^8 m³ de água, represados somente na Baía de Paranaguá.

Num caso extremo como este, o aumento significativo do nível do mar e das ondas de superfície produz consequências duplamente destrutivas nas regiões costeiras, tais como enchentes com água salgada, que danificam materiais com mais facilidade do que a enchente de água doce. Além disso, ondas fortes que acompanham o fenômeno podem destruir estruturas costeiras e praias. Soma-se também o fato de que o aumento considerável do nível do mar permite que a ação das ondas seja sentida numa área não atingida pela água nem nas maiores preamares de sizígia. No entanto, a ação de ondas destrutivas fica mais restrita a locais expostos a mar aberto, nos quais os estragos podem ser bem maiores, como em Matinhos, no litoral sul do estado. De qualquer forma, nestas "ressacas" existe sempre uma grande erosão causada pelo aumento do nível do mar e pelas fortes correntes. Relata-se que em vários locais da Baía de Paranaguá ocorreram desbarrancamentos e que na Ilha do Mel, a ação das ondas fazia com que água passasse de um lado para o outro do istmo.

Quando um evento desses acontece, toda a plataforma continental sente a presença de um acúmulo de água na costa, ou seja, a extensão do fenômeno é de centenas de quilômetros com duração de dezenas de horas. Por outro lado, a ação de grandes ondas é um efeito localizado, determinado principalmente pela inclinação e forma do fundo do mar, ou seja, uma mesma onda ao atingir diferentes locais, pode ou não ser amplificada. É importante saber que ondas grandes são formadas longe da costa, em mar profundo, e modificadas distintamente de local para local. Neste evento de agosto de 1993, a maré meteorológica também foi observada em São Paulo e Rio de Janeiro, mas com menor amplitude, uma vez que a perturbação atmosférica estava em decaimento.

A ocorrência de frentes frias nesta região, independente da estação do ano, é relativamente alta (Girardi, 1972; Kousky, 1978), mas nem todos os sistemas frontais chegam a causar importantes marés meteorológicas, como se pôde observar em agosto de 1993. É necessário que haja uma conjunção de fatores que propicie o fenômeno, tais como (i) a rápida intensificação de uma frente ao alcançar o oceano, experimentando forte ciclogênese devido ao maior suprimento de umidade, cujos ventos associados podem causar empilhamento de água na costa, ou então (ii) a combinação dos efeitos de um centro de baixa pressão sobre o mar e um centro de alta pressão sobre o continente, criando uma verdadeira pista de ventos de quadrante sul sobre o oceano, os

quais tendem a acumular água contra a costa pelo transporte de Ekman. Esta segunda situação foi a responsável pelo evento em discussão e de alguns outros eventos de marés meteorológicas significativas já observados. Desde o evento de 18 de agosto, já ocorreram outras ressacas, como as de dezembro de 1993 e de março e abril de 1994. O acontecimento de 8 de abril foi desastroso para diversas cidades litorâneas e para a operação dos portos da região sul, com um grande aumento do nível do mar associado à presença de fortes ondas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do número de frentes frias ser maior durante o inverno, não se pode afirmar que ressacas não ocorram em outras épocas do ano. Os fatores que propiciam este fenômeno não estão diretamente relacionados com as estações do ano. Infelizmente, para este trabalho não se dispõe de um conjunto de observações mais abrangente, como por exemplo, dados de maré e meteorológicos de outros locais do Paraná. Na Baía de Guaratuba não existem medições de maré nem de vento. Com dados de vários lugares da costa brasileira, é possível estudar a propagação das ondas de maré meteorológica na plataforma. É necessário, portanto, monitorar estas grandezas em toda a costa brasileira de modo a acompanhar e estudar estes eventos com mais detalhe.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina pela cessão dos maregramas observados no porto, a Luis Eduardo Bondesan Paulino pelo fornecimento dos arquivos das imagens de satélite e a José Claro da Fonseca pelos desenhos.

ABSTRACT

This paper presents a case study related with the storm surge which occurred in 18 August 1993, in the southeastern Brazilian coast, with emphasis on Paraná State. The causes of this storm surge, characterized by large mean sea level elevations and, in some regions (e.g. Matinhos) by the action of high surface waves, were studied through synoptic charts of the atmospheric pressure at surface and METEOSAT-4 satellite images. Sea level data obtained at Paranaguá Harbour and meteorological observations from the Centro de Estudos do Mar of the Universidade Federal do Paraná, at Pontal do Sul were used to illustrate the situation at the continent. The main cause of this wind-induced sea level rise was the passage of a cold front over the ocean in association with a high pressure center over the continent, increasing the ocean area under the action of southern winds. Off southeastern Brazil, these winds transport water towards the coast due to Ekman transport. In addition, the atmosphere-ocean momentum transfer in deep-waters areas generated high waves shoreward with stronger harmful effects to the coastal zone. Although most cold fronts occur during winter, one could not say that storm surges do not happen in other seasons. The main causes of this phenomenon are not directly related with the seasons.

Key-words: tides, currents, cold fronts, storm surges, southeastern Brazilian coast

RESUMO

Este trabalho é um estudo de caso relativo ao fenômeno da maré meteorológica ocorrida em 18 de agosto de 1993 na costa sudeste brasileira, com ênfase no Estado do Paraná. As causas deste evento, caracterizado por grandes elevações do nível médio do mar e, em algumas regiões pela ação de grandes ondas de superfície, como em Matinhos, foram estudadas através de cartas sinóticas de pressão atmosférica à superfície e de imagens do satélite METEOSAT-4. Foram usados dados de alturas do nível do mar obtidas no Porto de Paranaguá e observações meteorológicas do Centro de Estudos do Mar (CEM) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Pontal do Sul, para ilustrar a situação no continente. A principal causa deste aumento do nível do mar foi o vento associado à combinação da passagem de uma frente fria pelo oceano e de um centro de alta pressão pelo continente, aumentando a área oceânica sob a ação de ventos do quadrante sul. No sudeste do Brasil estes ventos acumulam água na costa devido ao transporte de Ekman. Além disso, a transferência de momento da atmosfera para o oceano em locais de grande profundidade gerou grandes ondas que tiveram fortes efeitos destrutivos na zona costeira. Apesar do número de frentes frias ser maior durante o inverno, não se pode afirmar que ressacas não ocorram em outras épocas do ano. Os fatores que propiciam este fenômeno não estão diretamente relacionados com as estações do ano.

Palavras-chave: marés, correntes, frentes frias, ressacas, costa sudeste do Brasil

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMARGO, R. 1991. *Modelagem das ondas de maré astronômica e meteorológica na plataforma sudeste brasileira*, Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 90 p.
- CAMARGO, R. & HARARI, J. (no prelo) Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste brasileira através de cartas sinóticas de pressão na superfície. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo
- CASTRO FILHO, B.M. 1985. *Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter*, Ph.D. Dissertation, RSMAS, University of Miami, 211 p.
- FRANCO, A.S. 1981. *Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 232 p.
- GIRARDI, L.C. 1972. *Análises sinóticas de ciclones extratropicais*. Instituto de Atividades Espaciais, IAE-001, 126 p.
- HARARI, J., 1985. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear, para a simulação e a previsão da circulação na plataforma brasileira entre 23° e 26° S. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 33(2):159-191.
- KOUSKY, V.E. 1978. *Frontal influences on Northeast Brazil*, Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE-1269-PE/137, São José dos Campos.
- MAGLIOCA, A. 1987. *Glossário de Oceanografia*, Editora da Universidade de São Paulo, 355 p.
- MARONE, E. 1991. *Processamento e análise de dados de maré: Discurso dos métodos*. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 264 p.
- MARONE, E. & CAMARGO, R. 1993. *A Maré no Rio Perequê: Características e Tempos de Inundação*. In: III Simpósio de Ecossistemas da Costa Brasileira, ACIESP, Resumos, p.34-36.
- MARONE, E. & CAMARGO, R. no prelo. *Efeitos não lineares na maré do Rio Perequê*. Trabalho submetido a publicação nos anais da V Escola de Séries Temporais e Econometria, Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, C.S. 1987. *Simulação numérica da resposta de uma frente oceânica a uma forçante atmosférica de mesoescala*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisa Espaciais, 149 p.
- PUGH, D.T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea Level*. John Wiley & Sons. Chichester, U.K. 472 p.

STECH, J.L. 1990. *Um estudo comparativo da dinâmica da circulação de inverno entre as plataformas continentais das costas sudeste do Brasil e dos Estados Unidos utilizando um modelo numérico*. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 224 p.

STECH, J.L. & LORENZZETTI, J.A. 1992. *The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime coldfronts*. J.Geoph. Res., 97 (C6), p. 9507-9520.

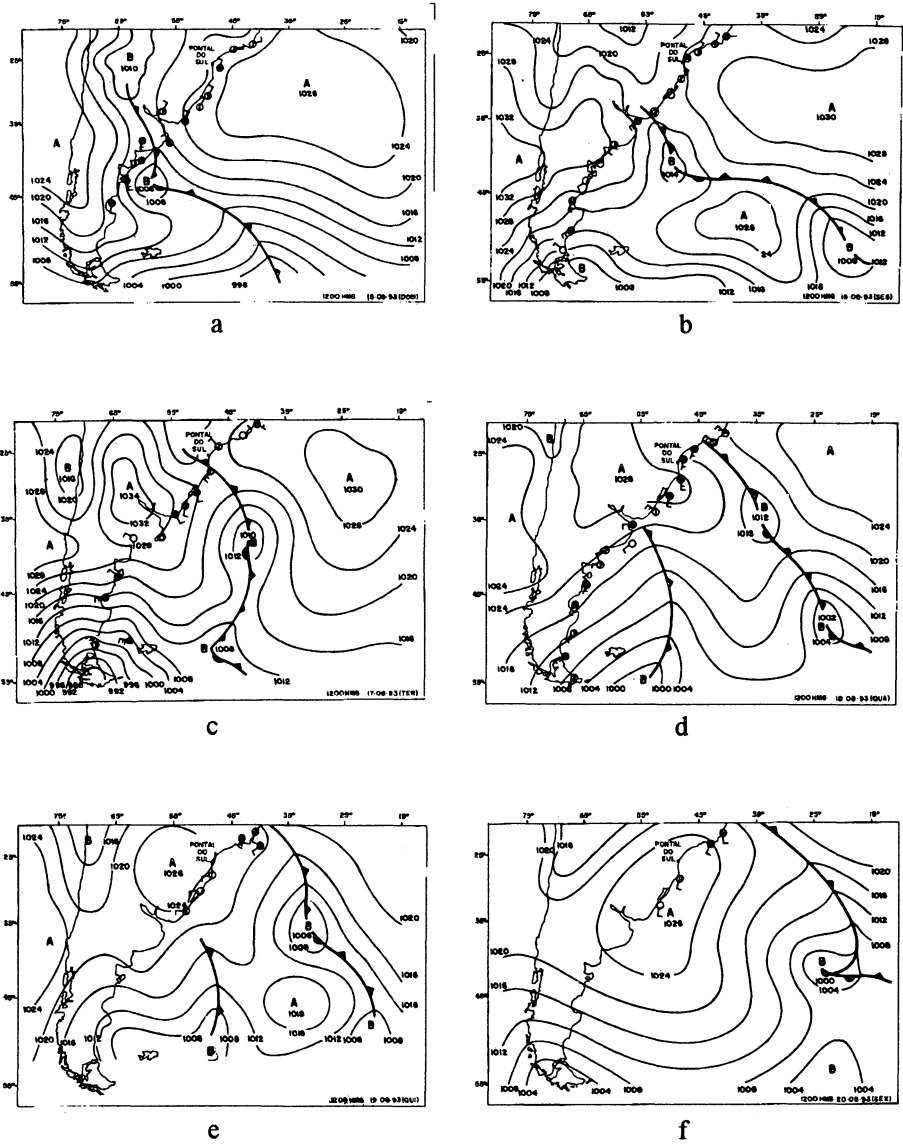
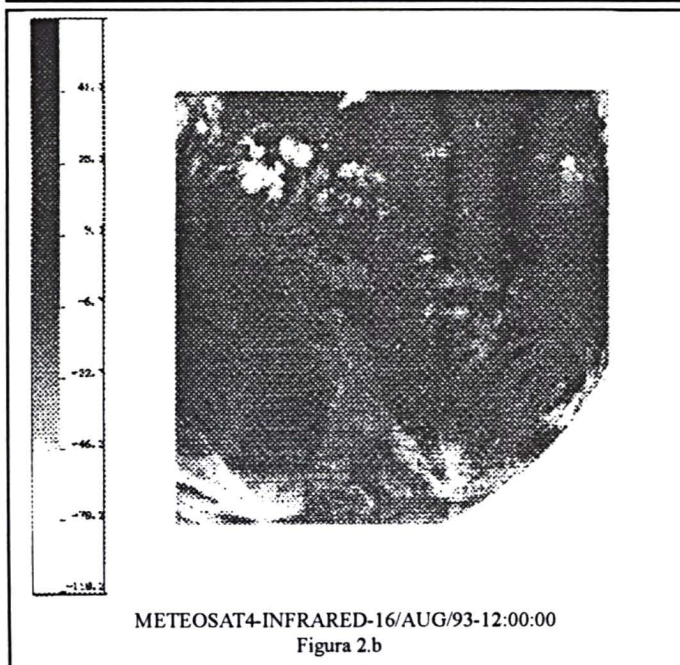
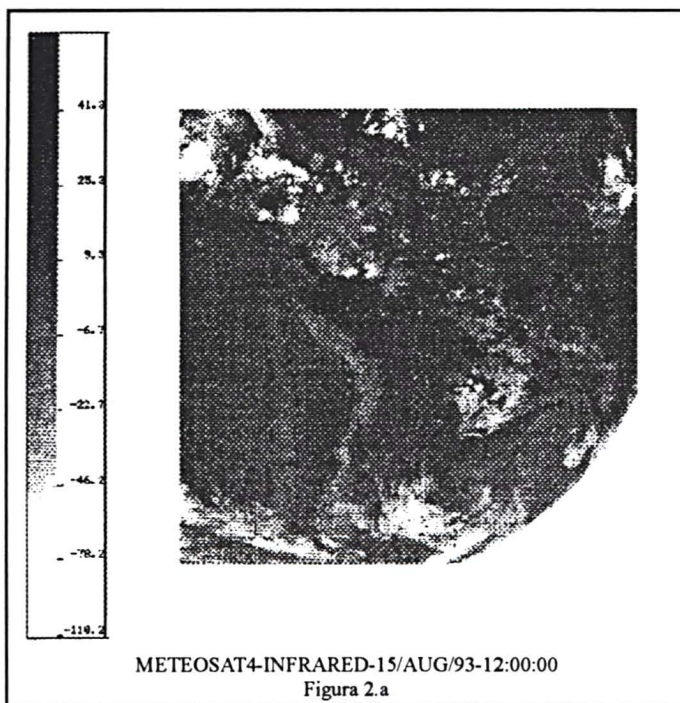
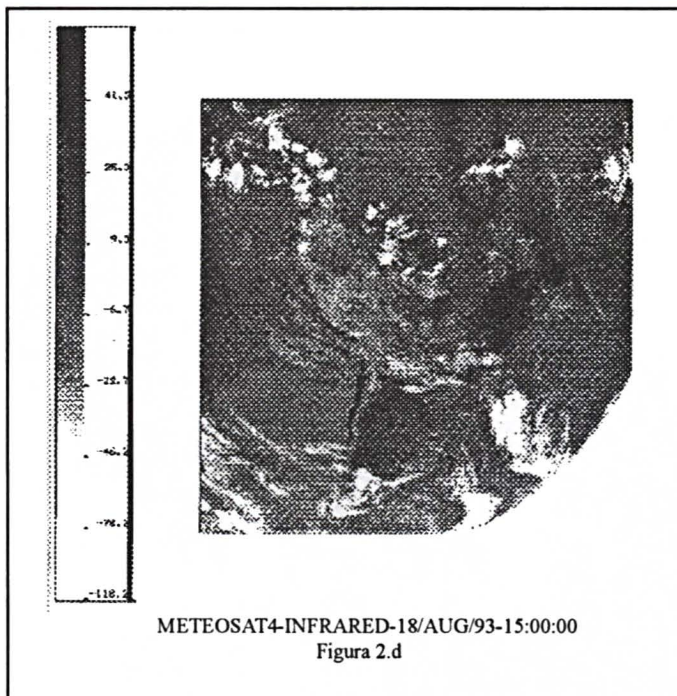
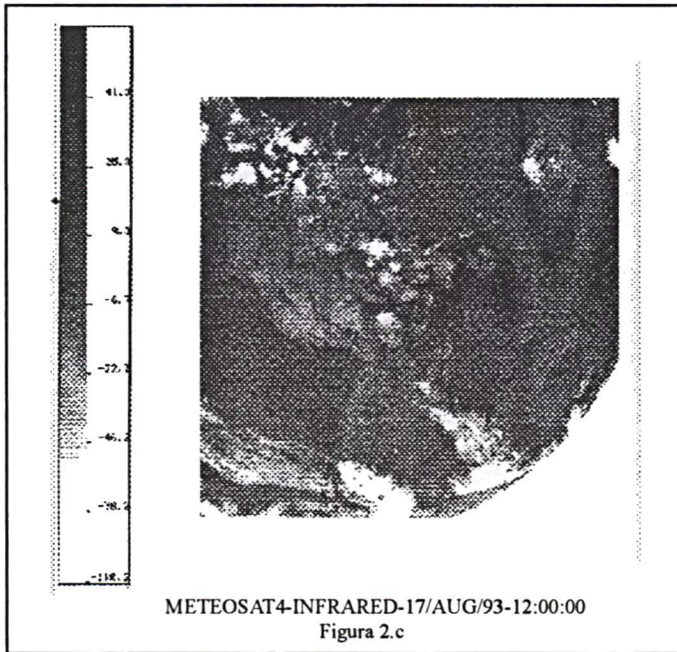
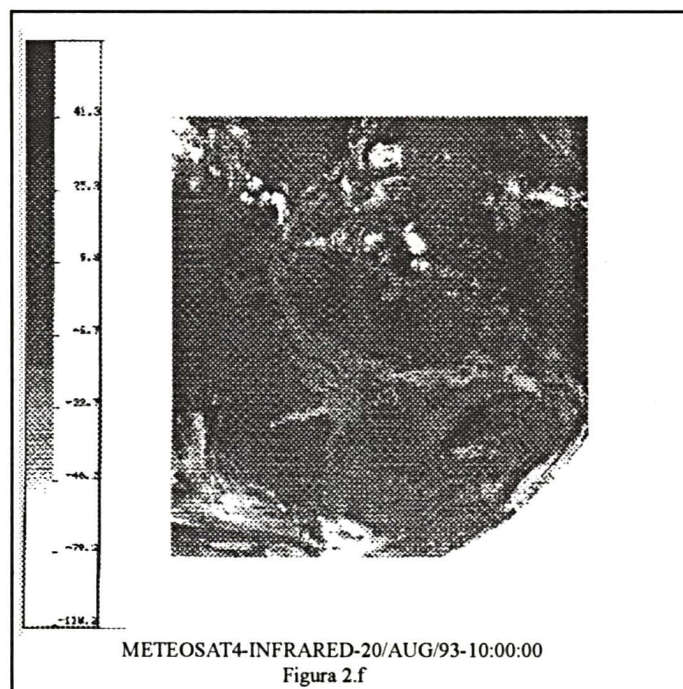
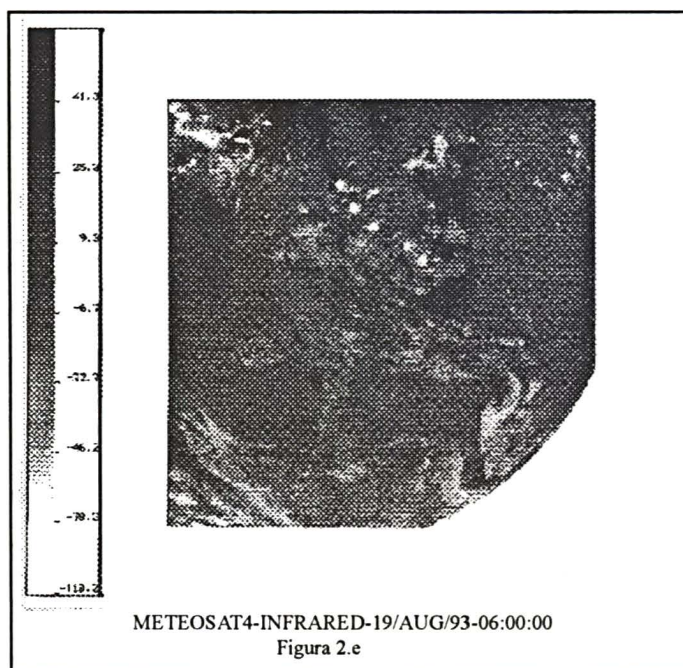


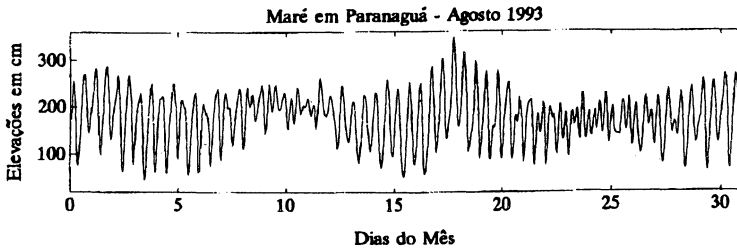
Fig. 1

Cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície entre 15 e 20 de agosto de 1993
(Fonte: Serviço Meteorológico da Marinha)

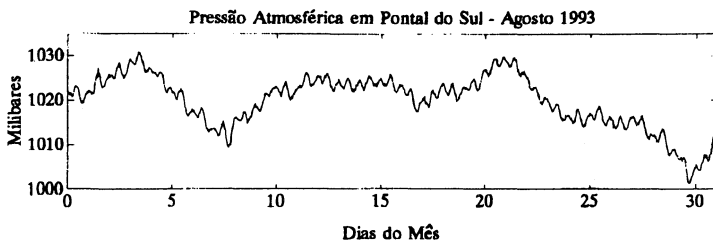




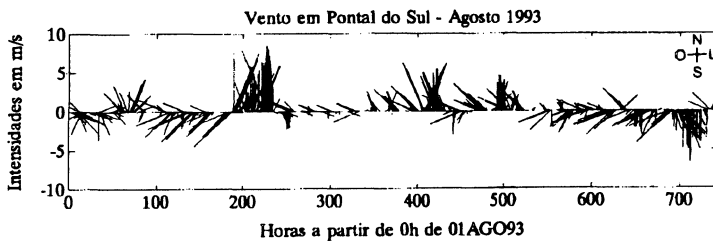


**Fig. 3**

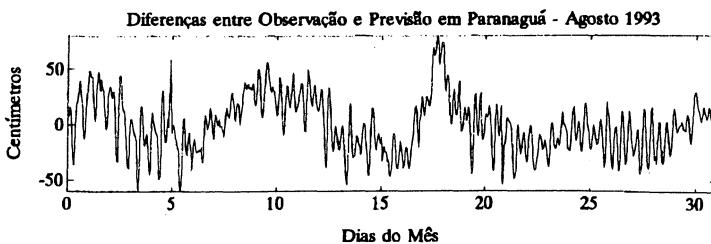
Alturas de maré no Porto de Paranaguá em agosto de 1993
(Fonte: Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina)

**Fig. 4**

Variação da pressão atmosférica em Pontal do Sul em agosto de 1993

**Fig. 5**

Regime de ventos em Pontal do Sul em agosto de 1993

**Fig. 6**

Diferenças entre observações e previsões de alturas de maré no Porto de Paranaguá em agosto de 1993