

Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico

Joseph HARARI¹ & Ricardo de CAMARGO²

¹Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
(Caixa Postal 66149, 05389-970, São Paulo, SP, Brasil)

²Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná
(Av. Beira Mar s/n, 83255-000, Pontal do Sul, PR, Brasil)

- **Abstract:** This paper presents the simulation of the nine principal tidal constituents in the southeastern Brazilian shelf, through the processing of a hydrodynamical numerical model. The modeled area extends from Ponta do Vigia (SC) to Cabo Frio (RJ), from the coast up to approximately the 100 m isobath. The model used in the simulations is three-dimensional, linear, barotropic and of meso scale. Each principal tidal constituent was processed isolatedly, in order to define its characteristics in the area of interest, especificaly its cotidal lines and current ellipses at the surface. The considered tidal constituents were: Q₁, O₁, P₁, K₁, N₂, M₂, S₂, K₂ and M₃. The obtained amplitude and phase cotidal maps show the amplification and attenuation areas for the tidal waves, as well as their propagation directions. The surface currents ellipses, on the other hand, indicate the behavior of the tidal currents in the modeled area, especially in terms of gyres, predominant directions and typical intensities. With the simulations results, it is possible to predict tidal elevations and tidal currents, at any location in this area, and for whatever required period.
- **Resumo:** Este trabalho apresenta a simulação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira, através do processamento de um modelo numérico hidrodinâmico. A área modelada se estende da Ponta do Vigia (SC) a Cabo Frio (RJ), da costa até aproximadamente a isóbata de 100 m. O modelo usado nas simulações é tri-dimensional, linear, barotrópico e de meso escala. Cada componente principal de maré foi processada isoladamente, com o objetivo de determinar suas características na área de interesse, especificamente suas linhas cotidais e as elipses de correntes na superfície. As componentes de maré consideradas foram: Q₁, O₁, P₁, K₁, N₂, M₂, S₂, K₂ e M₃. Os mapas cotidais de amplitude e fase obtidos mostram as áreas de amplificação e de atenuação para as ondas de maré, bem como seus sentidos de propagação. Por outro lado, as elipses de correntes na superfície indicam o comportamento das correntes de maré na área modelada, especialmente em termos dos giros, direções predominantes e intensidades típicas. Com os resultados das simulações, é possível prever as elevações e as correntes de maré, em qualquer local desta área, e para qualquer período de interesse.
- **Descriptors:** Tides, Cotidal lines, Tidal current ellipses, Hydrodynamical numerical modelling, Southeastern Brazilian shelf.
- **Descritores:** Marés, Linhas cotidais, Elipses de correntes de maré, Modelagem numérica hidrodinâmica, plataforma sudeste do Brasil.

Introdução

A modelagem numérica de processos hidrodinâmicos no oceano tem como objetivo resolver as equações

hidrodinâmicas básicas por métodos numéricos, de modo a simular esses processos em computador. Tais processos podem ser classificados em função das forças externas que geram os respectivos movimentos no oceano, as quais podem ser consideradas como de natureza astronômica ou meteorológica.

A região estudada neste trabalho é apresentada na Figura 1, estendendo-se da Ponta do Vigia (SC) a Cabo Frio (RJ), desde a costa até aproximadamente a isóbata de 100 m. Pesquisas desenvolvidas nesta área, entre outras, são apresentadas em: Johannessen, Miranda & Miniussi (1967), com a identificação de variações sazonais do nível médio do mar; Mesquita (1983), onde vários aspectos da dinâmica da plataforma são abordados; Castro Filho (1985), com a modelagem da circulação devida a condições típicas de inverno; Castro Filho, Miranda & Miyao (1987), onde condições hidrográficas em períodos quase-sinóticos na região ao largo de Ubatuba são pesquisadas; e Stech & Lorenzetti (1992), com pesquisas sobre a resposta da plataforma sudeste brasileira à passagem de frentes frias. Especificamente quanto às marés, Mesquita & Harari (1983) desenvolvem um trabalho sobre as marés de Cananéia e Ubatuba, com a análise desses dados pelos métodos harmônico (Franco, 1988) e da resposta (Munk & Cartwright, 1966). Na modelagem das marés em meso escala na plataforma sudeste brasileira, Harari (1985) apresenta as linhas cotidais e as elipses das correntes da componente M_2 , além de outras situações de interesse, como por exemplo a sobreposição de marés com circulações devidas a condições meteorológicas extremas.

O modelo utilizado nas simulações que serão apresentadas neste trabalho foi desenvolvido por Harari (1985, 1987), com base em Heaps (1972), sendo tridimensional, linear, barotrópico e de meso escala. Este modelo resolve um sistema de equações básicas, formado pela equação da continuidade e por duas equações do

movimento na horizontal. Dessa forma se tem um sistema de três equações a três incógnitas, que são a elevação do nível do mar e as duas componentes horizontais de velocidade. Este sistema é resolvido pela aplicação do Método de Galerkin para a dependência vertical das componentes de corrente, de modo a representar essas variáveis como uma soma de funções que possuem uma determinada estrutura vertical, chamadas funções base, as quais são ponderadas por coeficientes que consideram as dependências horizontal e temporal. Tal procedimento leva a um conjunto de equações diferenciais para os coeficientes, o qual é resolvido por um esquema de diferenças finitas, no espaço horizontal e no tempo. Para o modelo em questão, foi utilizado o Método Espectral de Galerkin, com funções base ortogonais da forma cosseno. Todos os detalhes sobre as equações do modelo, métodos de discretização e de resolução, etc são descritos em Harari (1984, 1985).

Este modelo tem a capacidade de reproduzir, dentre outras simulações, a propagação de componentes de maré isoladamente. Os cálculos desenvolvidos pelo modelo permitem então determinar as correspondentes variações temporais de alturas de maré, correntes médias na profundidade, transportes de volume e campo tridimensional das correntes, em pontos de uma grade que cobre a área modelada. Para tanto, são consideradas condições iniciais de repouso, condições de contorno laterais correspondentes à especificação das elevações de maré nos contornos abertos e imposição de fluxos normais aos contornos fechados nulos.

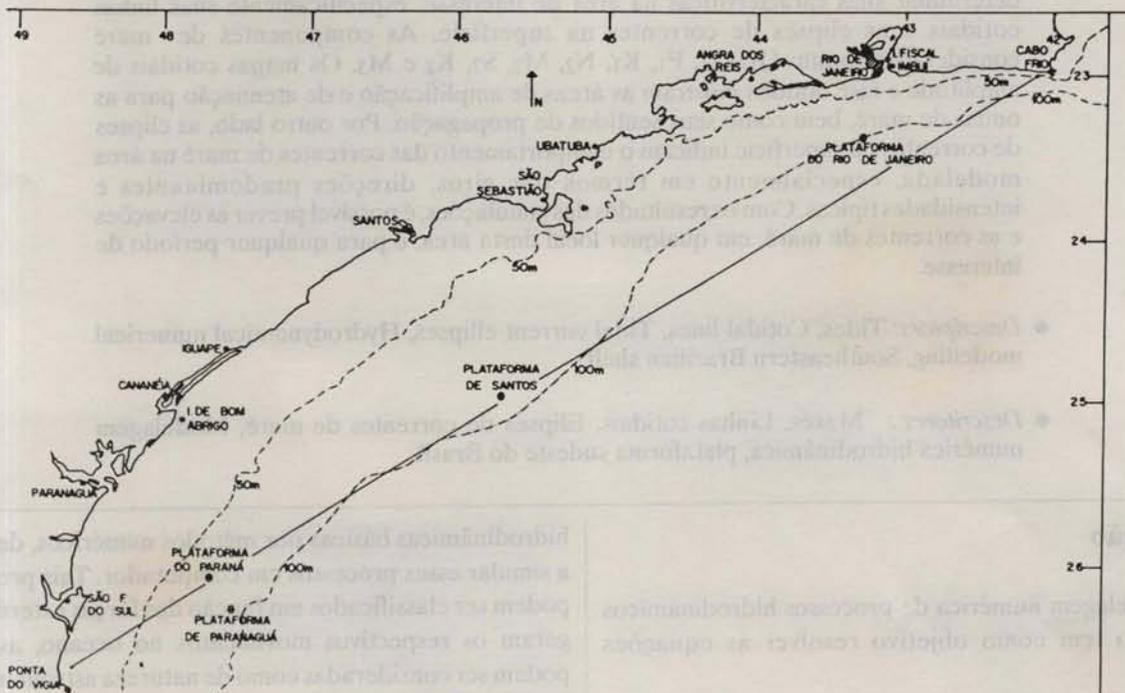


Fig. 1. Mapa geográfico da plataforma sudeste brasileira.

Condições de contorno laterais

Para os pontos do contorno aberto, onde são impostas condições de contorno laterais do modelo, foram utilizados os resultados de análises de séries temporais de alturas de maré obtidas em três pontos da plataforma pertencentes a este contorno. Estes pontos são: plataforma do Rio de Janeiro ($23^{\circ}23,0'S$ $43^{\circ}17,0'W$), plataforma de Santos ($25^{\circ}01,0'S$ $45^{\circ}42,0'W$) e plataforma de Paranaguá ($26^{\circ}18,1'S$ $47^{\circ}30,6'W$). Os registros existentes nessas estações consistem em séries temporais não simultâneas de alturas de maré, para cada um dos três pontos (Mesquita, 1983). As constantes harmônicas de amplitude (Hj) e de fase (Gj) das componentes astronômicas de maré Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 , K_2 e M_3 foram então obtidas através da aplicação dos métodos de análise de maré - harmônico e da resposta (Franco, 1988; Munk & Cartwright, 1966); os programas do método harmônico são relacionados em Franco & Harari (1987), sendo que os resultados finais das análises nos três pontos de amostragem citados são apresentados em Mesquita & Harari (1984). Devido à impossibilidade de se realizar medições de maré em todos os pontos do contorno aberto, os valores de Hj e Gj de cada uma das componentes, nos demais pontos da borda da grade além dos três acima citados, foram obtidos através de interpolação linear. Dessa maneira pôde-se especificar a altura da maré astronômica (η_A) em todos os pontos do contorno aberto, por meio de previsões harmônicas, a partir das correspondentes amplitudes e fases das ondas de maré. As correntes nos contornos abertos foram calculadas, com as equações completas do modelo, considerando as elevações de maré impostas.

Nos contornos fechados, foram especificados fluxos normais nulos.

Resultados

O modelo inicia seus cálculos partindo de uma condição de repouso do oceano em toda a área. Devido a este fato, deve ser considerado um certo intervalo de tempo para que seja alcançada uma situação de equilíbrio hidrodinâmico.

Para os processamentos que simularam a propagação das principais componentes de maré isoladamente, observou-se que o equilíbrio hidrodinâmico foi atingido em aproximadamente 72 horas. Isto significa que foram necessários no máximo três ciclos das componentes (diurnas) para a obtenção do equilíbrio hidrodinâmico.

Estes períodos necessários ao equilíbrio foram definidos a partir de comparações de séries temporais

de alturas de maré de pontos na costa, obtidas com previsão harmônica, com as correspondentes séries temporais fornecidas pelo modelo. Uma vez atingido o equilíbrio hidrodinâmico, os resultados do modelo passavam a apresentar magnitudes de preamares e de baixamares praticamente coincidentes, em periodicidades iguais aos períodos das respectivas componentes de maré.

Após atingir o equilíbrio, cada uma das componentes foi processada por mais dois dias, ou seja, foram feitos os cálculos por mais 48 horas, adotando saídas de resultados a cada meia hora, visando determinar as elipses de correntes na superfície para cada uma delas.

A seguir, começando em cerca de uma hora antes da ocorrência das preamares e da passagem da maré pelo nível zero, foram realizados processamentos com saídas de resultados a cada minuto, por períodos de 24 horas, visando determinar as linhas cotidais de amplitude e de fase de cada uma das componentes citadas, na área de estudo.

Os mapas cotidais e as elipses de correntes de superfície das componentes processadas são apresentados nas Figuras 3 a 11. Nestas figuras é preciso notar que: as amplitudes são expressas em cm; as fases são representadas pelo atraso no tempo, em minutos; tabelas nos gráficos indicam a correspondência entre esses atrasos em minutos e as respectivas fases das componentes, relativas a Greenwich, em graus; as elipses de correntes correspondem a um ciclo completo de cada componente; e a velocidade das correntes é dada em cm/s.

A seguir são descritas as características das componentes de maré na área modelada, em função dos resultados do modelo, com base nos mapas cotidais e de elipses de correntes.

- **Componente Q_1** (Figs 3a a 3c): o período é de 26,87 h, correspondendo a uma frequência angular de $13,3986611$ °/h. A amplitude dessa onda de maré varia entre 2,3 cm (no extremo Norte, próximo a Cabo Frio e Rio de Janeiro) e 2,8 cm (no extremo Sul, próximo à Ponta do Vigia). O mapa cotidal de fases indica que esta onda atinge a referida plataforma aproximadamente na posição $26^{\circ}S$ $47^{\circ}W$, em frente à região entre Cananéia e Iguape. O modelo indica que duas frentes de onda passam a caminhar na área: uma em direção a Oeste-Noroeste, que leva 18 minutos para atingir a Ilha Comprida e mais 10 minutos (28 minutos ao todo) para alcançar a Ponta do Vigia; e outra em direção a Nordeste, girando para Norte em frente à Ilha de São Sebastião, e demorando cerca de 66 minutos, desde a "entrada", para atingir Cabo Frio. As correntes de maré desta componente na superfície atingem, no máximo, 1 cm/s, e as elipses não têm uma direção preferencial. As maiores correntes ocorrem na região em frente a Iguape-Cananéia.

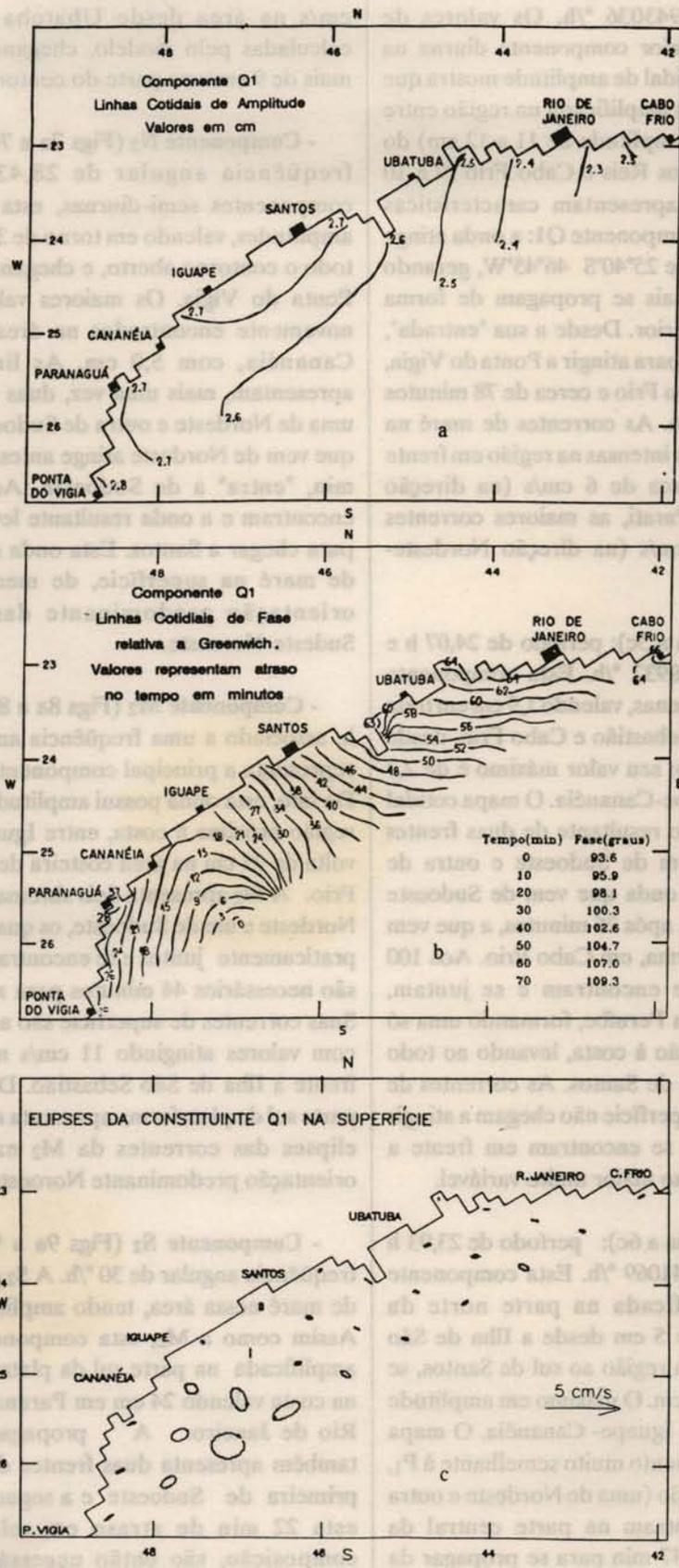


Fig. 3a-c. Mapas cotidiais de amplitude e de fase e elipses de correntes de Q1.

- **Componente O₁** (Figs 4a a 4c): período de 25,82 h e frequência angular de 13,943036 °/h. Os valores de amplitude representam a maior componente diurna na área de interesse. O mapa cotidal de amplitude mostra que esta onda é ligeiramente mais amplificada na região entre Cananéia e Ponta do Vigia (amplitude de 11 a 12 cm) do que na região entre Angra dos Reis e Cabo Frio (9 a 10 cm). As isolinhas de fase apresentam características bastante semelhantes às da componente Q₁: a onda atinge a região em aproximadamente 25°40'S 46°45'W, gerando duas frentes de onda, as quais se propagam de forma similar à da componente anterior. Desde a sua "entrada", a onda O₁ demora 39 minutos para atingir a Ponta do Vigia, 66 minutos para chegar a Cabo Frio e cerca de 78 minutos para atingir o Rio de Janeiro. As correntes de maré na superfície novamente são mais intensas na região em frente a Iguape, onde atingem cerca de 6 cm/s (na direção Leste-Oeste); em frente a Parati, as maiores correntes valem aproximadamente 4 cm/s (na direção Nordeste-Sudoeste).

- **Componente P₁** (Figs 5a a 5c): período de 24,07 h e frequência angular de 14,958932 °/h. Esta componente possui amplitudes muito pequenas, valendo 1,9 cm em toda a região entre a Ilha de São Sebastião e Cabo Frio, desde a costa até o contorno aberto; seu valor máximo é de 2,7 cm na região costeira de Iguape-Cananéia. O mapa cotidal de fases apresenta um padrão resultante de duas frentes de propagação: uma que vem de Sudoeste e outra de Nordeste. A frente de onda que vem de Sudoeste adentra inicialmente a área e, após 25 minutos, a que vem de Nordeste atinge a plataforma, em Cabo Frio. Aos 100 min, as frentes de onda se encontram e se juntam, aproximadamente em frente a Peruíbe, formando uma só frente que caminha em direção à costa, levando ao todo 122 min para atingir a região de Santos. As correntes de maré dessa componente na superfície não chegam a atingir 2 cm/s e as maiores elipses se encontram em frente a Iguape, com orientação do eixo maior muito variável.

- **Componente K₁** (Figs 6a a 6c): período de 23,93 h e frequência angular de 15,041069 °/h. Esta componente apresenta-se menos amplificada na parte norte da plataforma, valendo cerca de 5 cm desde a Ilha de São Sebastião até Cabo Frio; na região ao sul de Santos, se tem amplitudes ao redor de 7 cm. O máximo em amplitude é de 8 cm na área costeira de Iguape-Cananéia. O mapa de fases indica um comportamento muito semelhante à P₁, com duas frentes de propagação (uma de Nordeste e outra de Sudoeste) que se encontram na parte central da plataforma. Esta onda leva 147 min para se propagar da Ponta do Vigia até Bertioga, aproximadamente. As elipses mostram que as correntes de K₁ na superfície são as mais importantes dentre as componentes diurnas estudadas.

Correntes relativamente fortes, com valores entre 3,5 e 4,0 cm/s na área desde Ubatuba até Cananéia, foram calculadas pelo modelo, chegando-se a um máximo de mais de 9 cm/s na parte do contorno em frente a Iguape.

- **Componente N₂** (Figs 7a a 7c): período de 12,66 h e frequência angular de 28,439730 °/h. Dentre as componentes semi-diurnas, esta apresenta as menores amplitudes, valendo em torno de 3,5 cm ao longo de quase todo o contorno aberto, e chegando a cerca de 4,0 cm na Ponta do Vigia. Os maiores valores de amplitude são novamente encontrados na área costeira de Iguape e Cananéia, com 5,0 cm. As linhas cotidais de fase apresentam, mais uma vez, duas frentes de propagação: uma de Nordeste e outra de Sudoeste. Para a N₂, a frente que vem de Nordeste atinge antes a plataforma e, após 24 min, "entra" a de Sudoeste. Aos 60 minutos elas se encontram e a onda resultante leva, ao todo, 67 minutos para chegar a Santos. Esta onda mostra fracas correntes de maré na superfície, de menos de um cm/s, com orientação predominante das elipses na direção Sudeste-Noroeste.

- **Componente M₂** (Figs 8a a 8c): o período de 12,42 h, associado a uma frequência angular de 28,984105 °/h, representa a principal componente de maré nesta região. De fato, esta onda possui amplitudes de cerca de 35 cm na região próxima à costa, entre Iguape e Paranaguá, e por volta de 25 cm na área costeira de Rio de Janeiro a Cabo Frio. A M₂ apresenta dois sistemas de propagação: um de Nordeste e um de Sudoeste, os quais atingem a plataforma praticamente juntos e se encontram após 34 min; ao todo, são necessários 44 minutos para a onda chegar a Santos. Suas correntes de superfície são as mais intensas da área, com valores atingindo 11 cm/s no contorno aberto em frente à Ilha de São Sebastião. De uma forma geral, a parte sul da plataforma apresenta as maiores correntes. As elipses das correntes da M₂ na plataforma possuem orientação predominante Noroeste-Sudeste.

- **Componente S₂** (Figs 9a a 9c): período de 12 h e frequência angular de 30 °/h. A S₂ é a segunda maior onda de maré nessa área, tendo amplitudes entre 15 e 24 cm. Assim como a M₂, esta componente apresenta-se mais amplificada na parte sul da plataforma, com amplitudes na costa valendo 24 cm em Paranaguá e apenas 16 cm no Rio de Janeiro. A propagação desta componente também apresenta duas frentes de propagação, sendo a primeira de Sudoeste e a segunda de Nordeste, tendo esta 22 min de atraso em relação à outra; com a composição, são então necessários 50 minutos para alcançar Santos. As correntes de maré da onda S₂ na superfície são relativamente intensas, com um mínimo de aproximadamente 1,5 cm/s em frente ao Rio de Janeiro e

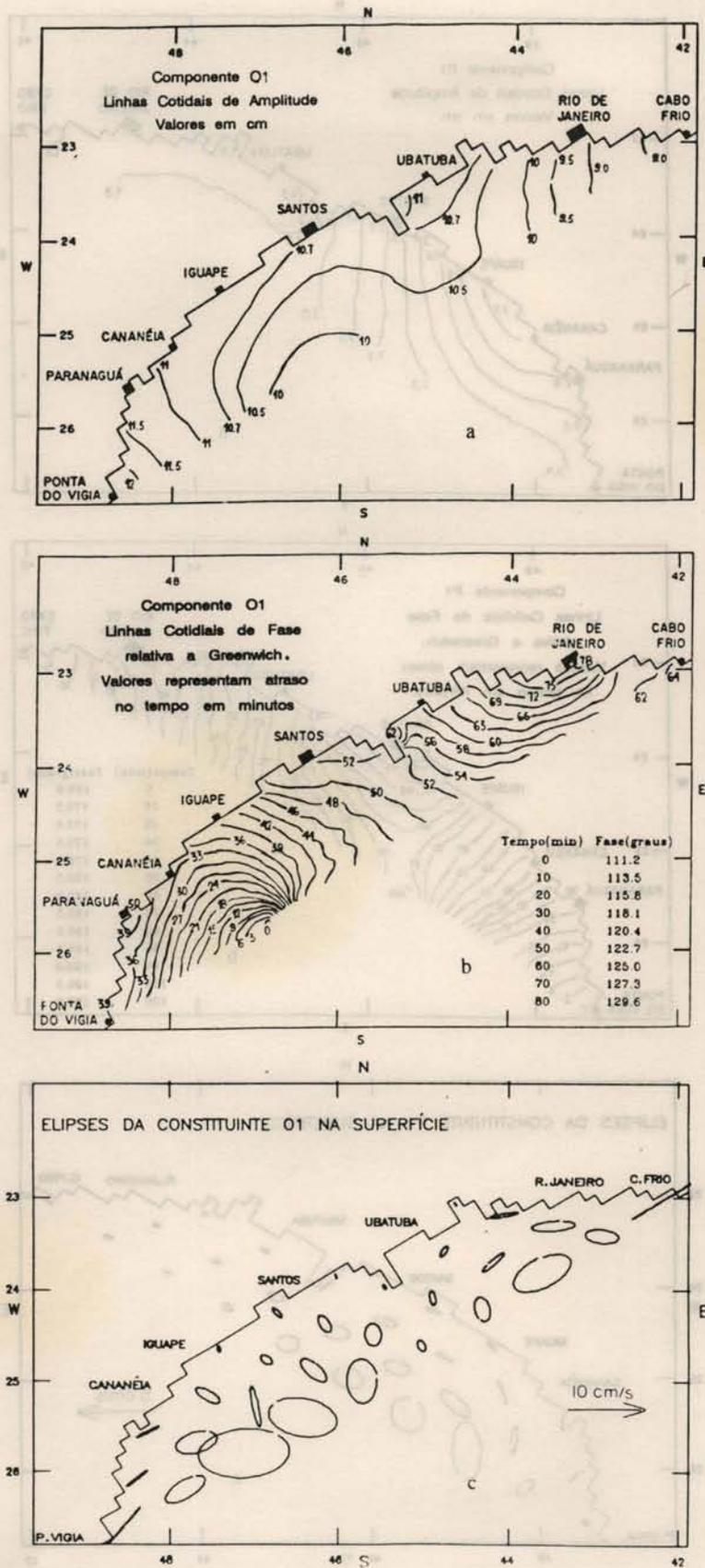


Fig. 4a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de O1.

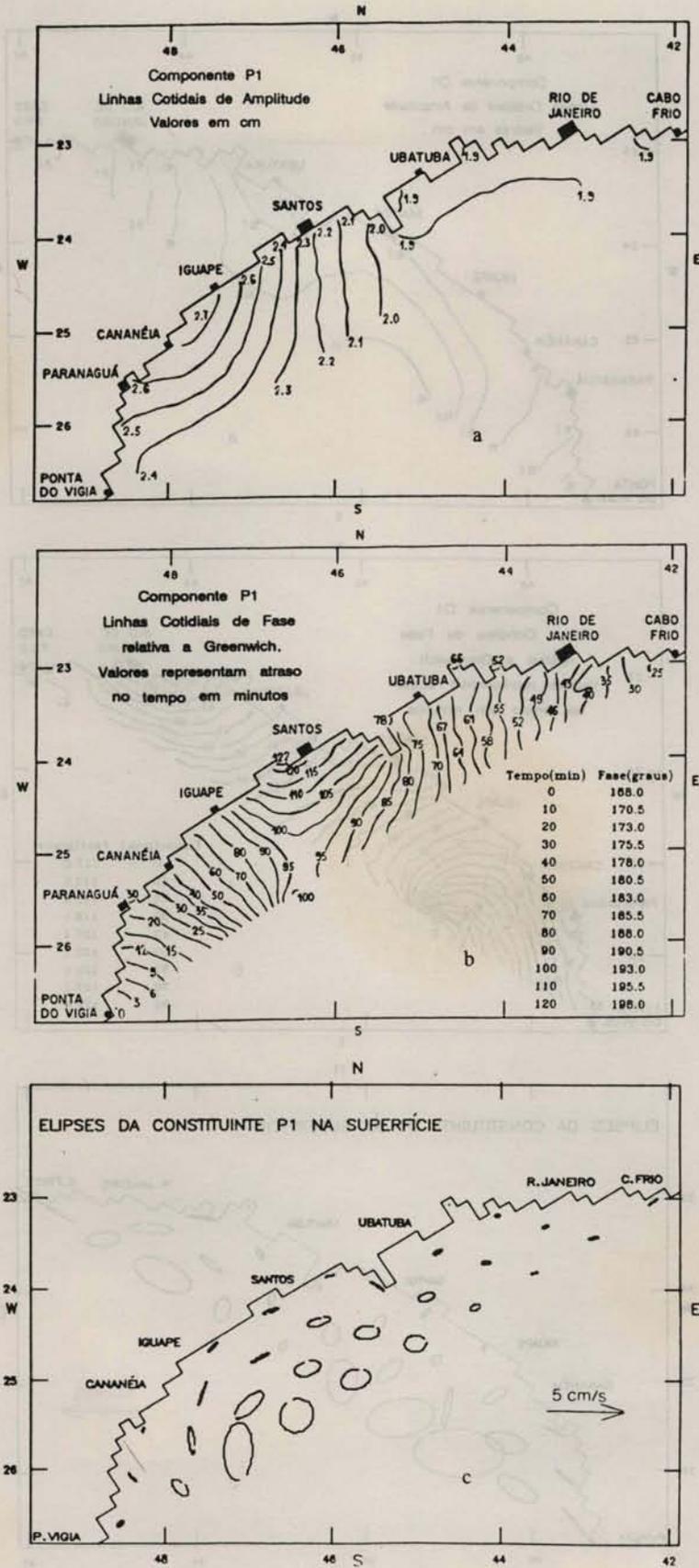


Fig. 5a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de P1.

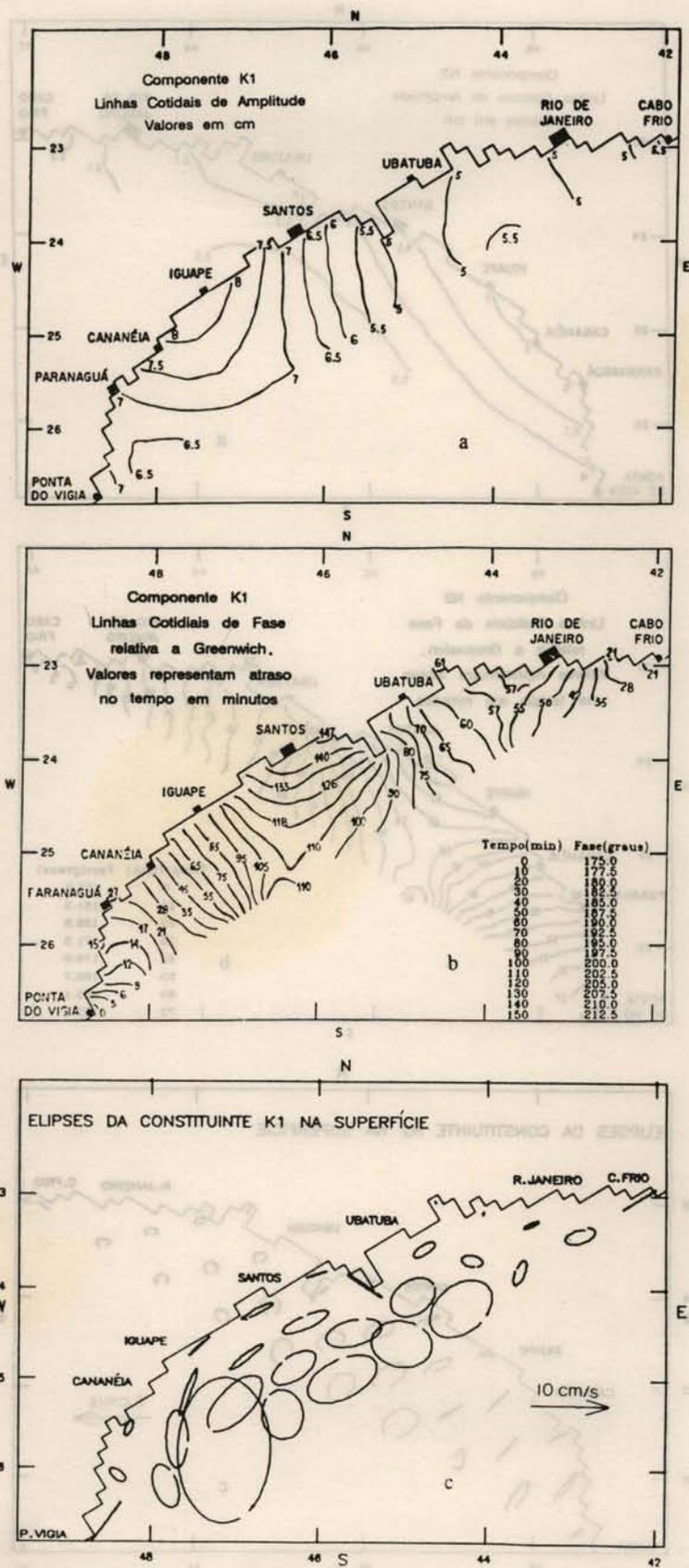


Fig. 6a-c. Mapas cotidiais de amplitude e de fase e elipses de correntes de K1.

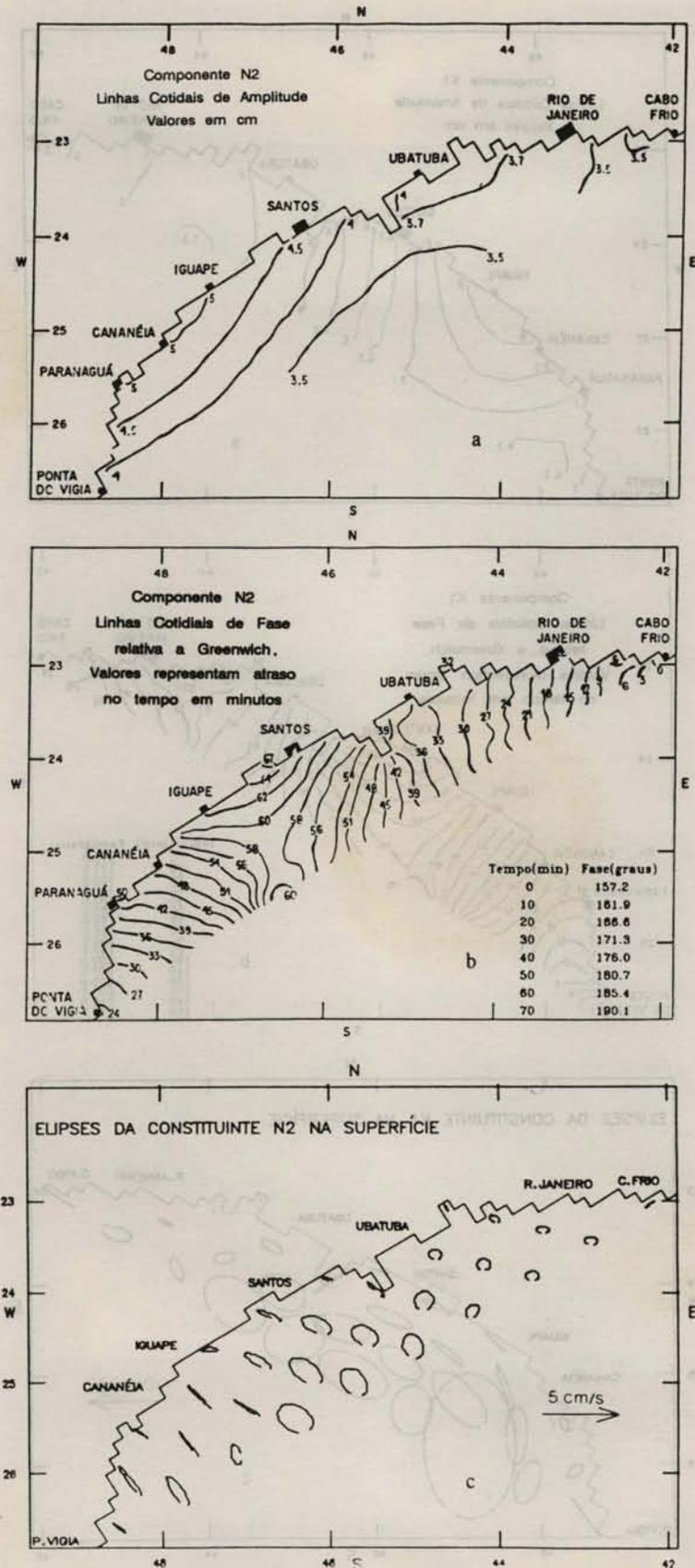


Fig. 7a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de N₂.

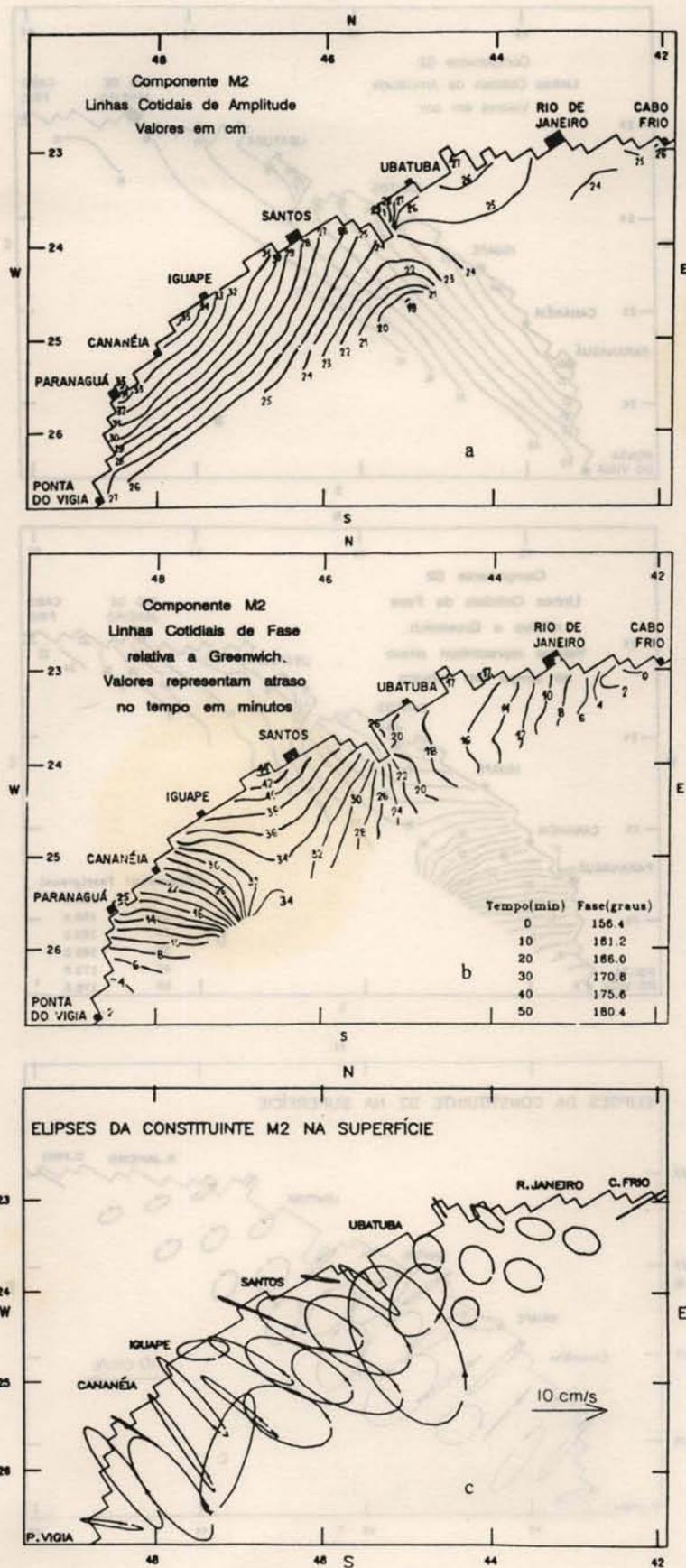


Fig. 8a-c. Mapas cotidiais de amplitude e de fase e elipses de correntes de M2.

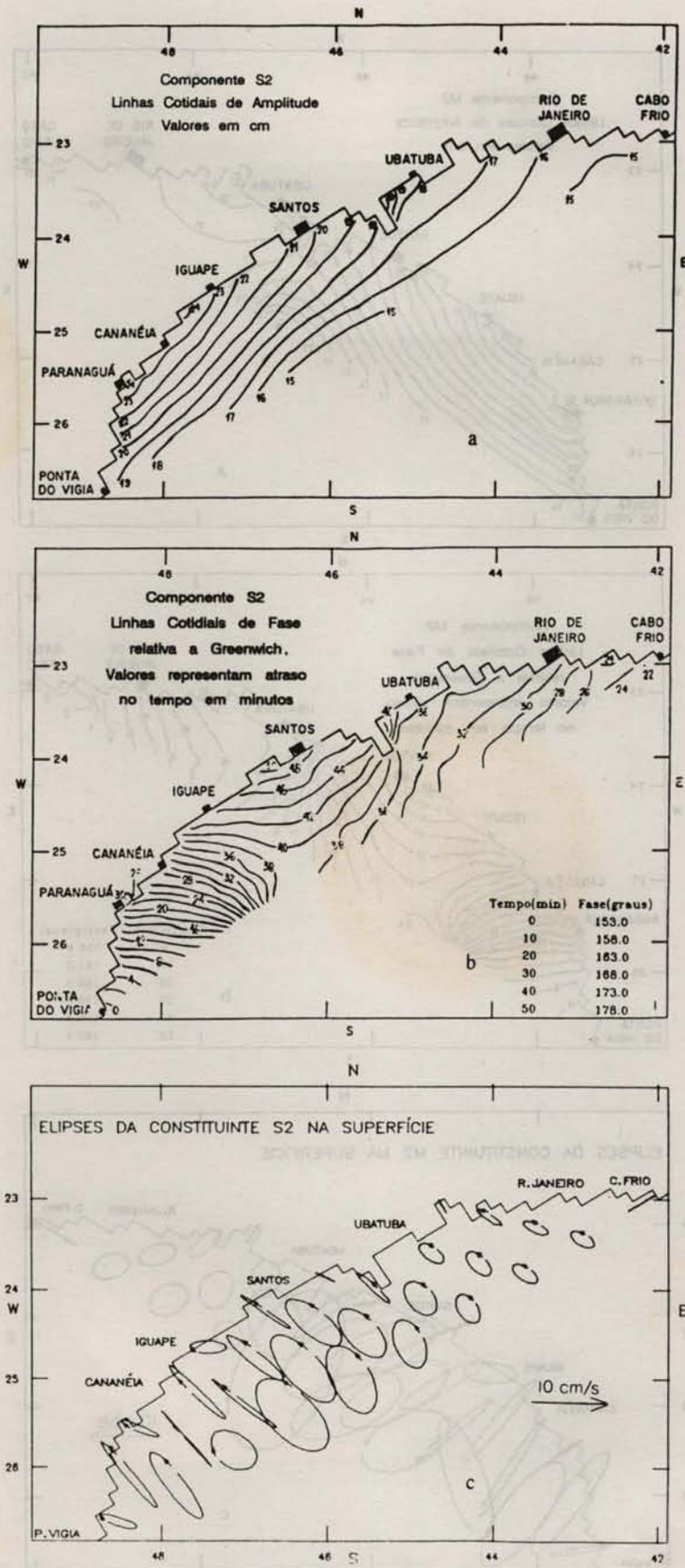


Fig. 9a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de S2.

um máximo de quase 6 cm/s em frente a Peruíbe, sendo ambos os valores na região do contorno aberto. A orientação predominante das elipses é Noroeste-Sudeste.

- **Componente K_2** (Figs 10a a 10c): período de 11,97 h e frequência angular de 30,082138 °/h. Esta constituinte tem amplitudes variando entre 4,2 e 7 cm, em Cabo Frio e Paranaguá, respectivamente. Portanto, ela também se apresenta amplificada na parte sul da região em estudo. A propagação da K_2 é muito semelhante à da S_2 , com o encontro de dois sistemas, sendo necessários 54 min para atingir Santos. As correntes de superfície são relativamente fracas, chegando a um valor máximo de cerca de 1,5 cm/s na região do contorno em frente a Peruíbe. As elipses apresentam uma orientação predominantemente Noroeste-Sudeste.

- **Componente M_3** (Figs 11a a 11c): período de 8,28 h e frequência angular de 43,476157 °/h. Esta constituinte é a que se apresenta mais fortemente amplificada na parte sul da plataforma, chegando a ter 9 cm em Paranaguá, em contraste com apenas 1,0 cm (ou menos) em toda a região entre Ubatuba e Cabo Frio. As isolinhas de fase apresentam dois sistemas de propagação, em que o de Nordeste atinge a área 15 minutos antes do de Sudoeste, sendo necessários 122 minutos para a onda se propagar de Cabo Frio até Santos. Com essa diferença nas amplitudes, é de se esperar que as correntes de superfície sejam muito mais fortes na parte sul do que na parte norte da plataforma e é exatamente isto o que mostram as elipses. Os valores passam de 2,0 cm/s em quase toda a parte sul da plataforma modelada, sendo praticamente desprezíveis na parte norte.

Na área do presente estudo, para as componentes diurnas e semi-diurnas, o sentido predominante de giro dos vetores de correntes na superfície é anti-horário, com poucas exceções. Já para a componente ter-diurna M_3 , predomina o sentido horário na rotação das elipses de correntes.

Foi observada uma grande concordância dos resultados do modelo com previsões harmônicas das componentes para as estações de Cananéia, Santos e Ubatuba, conforme apresentado nas Figuras 12 a 14. Para as previsões nesses pontos costeiros, foram usadas as constantes harmônicas fornecidas em Mesquita & Harari (1984), as quais também se baseiam nos métodos de análise de maré acima citados; esses valores, juntamente com os correspondentes resultados do presente trabalho, se encontram na Tabela 1.

Discussão

O fato de todas as componentes estudadas serem mais amplificadas na parte sul da área em questão provavelmente se deve à geometria e declividade do fundo da plataforma. Como se pode observar na Figura 1, as isolinhas de batimetria para a parte norte são muito mais próximas entre si do que as da parte sul, de modo que na porção sul a plataforma é muito menos inclinada e, portanto, mais extensa. Certamente este é um fator muito importante na definição das características de propagação de maré na região.

É importante salientar que as características de propagação das ondas de maré apresentadas neste trabalho, para a plataforma sudeste brasileira, são fortemente influenciadas pelos valores de amplitude e de fase de cada uma das componentes no contorno aberto. Uma possível imprecisão na determinação dos valores das constantes harmônicas no contorno pode levar a erros nas conclusões, o que aparentemente ocorreu com a onda N_2 , que, devido à sua pequena amplitude, provavelmente não foi bem determinada na borda, nas análises dos registros que forneceram as constantes harmônicas utilizadas. A N_2 é a única, dentre as componentes estudadas, cujos resultados do modelo não concordam satisfatoriamente com resultados de análises de registros na costa (Figs 12 a 14 e Tab. 1).

Outras discrepâncias entre resultados do modelo e de análises de registros de maré costeiros são devidas a efeitos não-lineares de pequena escala, não representados no presente modelo, e também à não coincidência exata das posições dos marégrafos com os pontos da grade oceanográfica.

Um ponto essencial a ser destacado é a predominância do sentido anti-horário de rotação das elipses de correntes de maré na superfície nesta plataforma. Com exceção da M_3 , todas as demais componentes estudadas apresentam predomínio deste sentido de giro. Isto também deve estar relacionado com os valores das amplitudes e fases das componentes no contorno aberto.

Neste trabalho foram apresentadas somente as elipses das correntes de maré relativas à superfície. Entretanto, dado o caráter essencialmente barotrópico das marés, o que de fato permitiu o uso de um modelo barotrópico para as simulações numéricas, as correntes de maré em profundidade apresentam comportamento bastante similar à correspondente corrente na superfície. Apenas correntes de maré muito próximas ao fundo diferem das de superfície, devido ao efeito atenuador da fricção no fundo (Schwiderski, 1980).

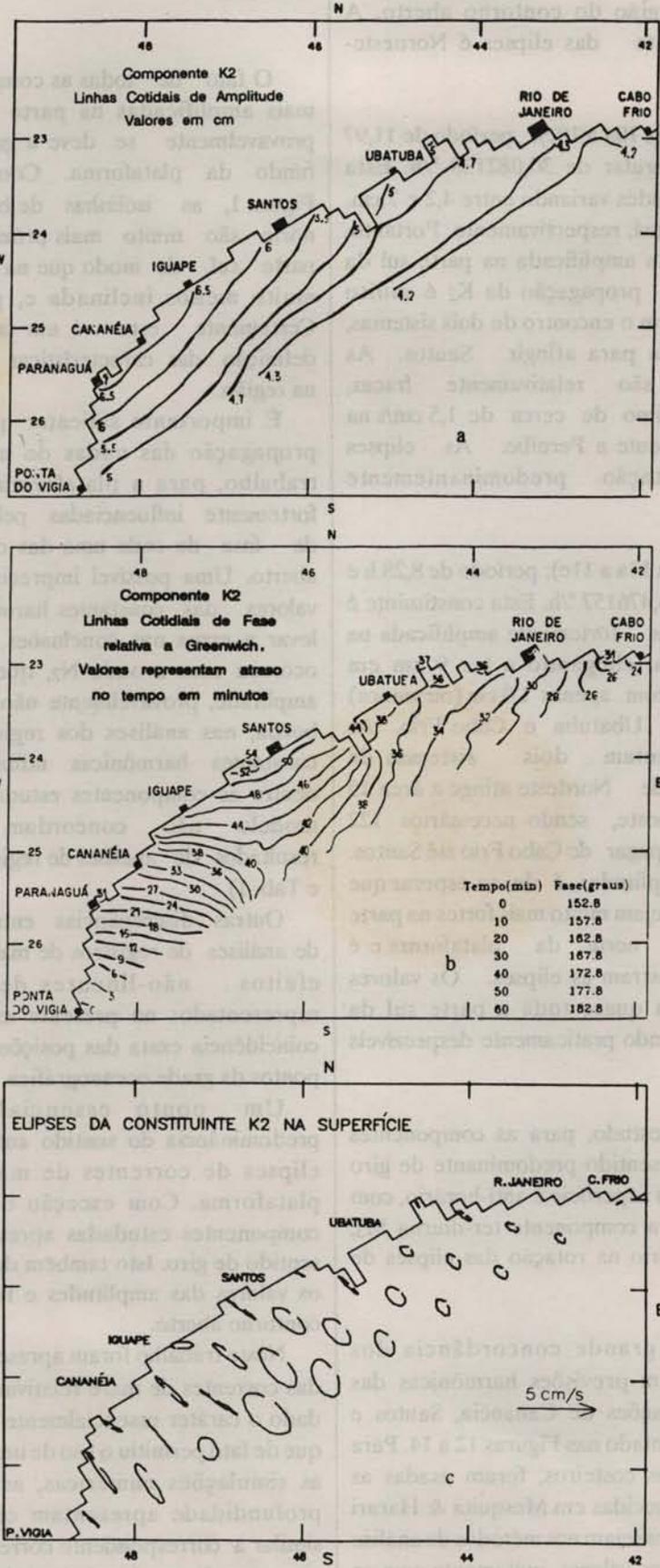


Fig. 10a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de K₂.

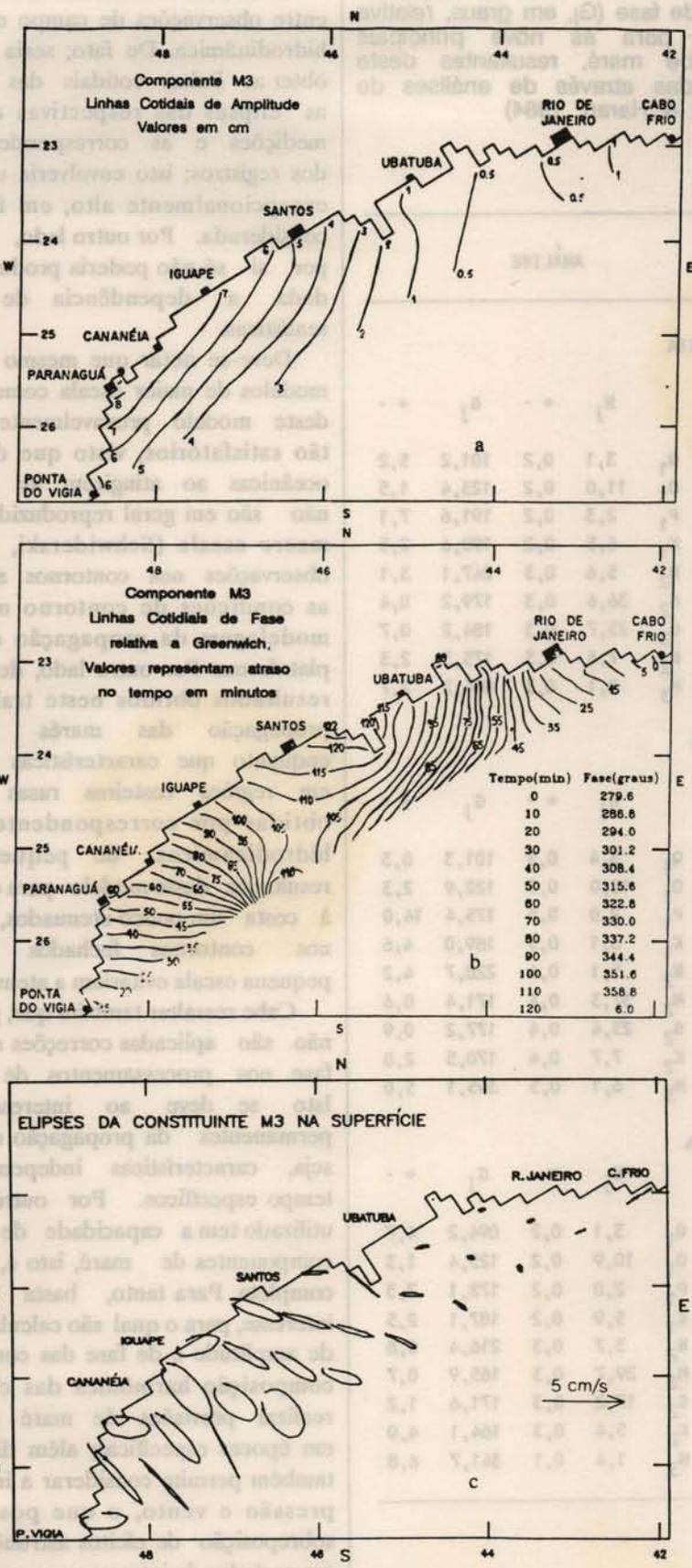


Fig. 11a-c. Mapas cotidianos de amplitude e de fase e elipses de correntes de M3.

Tabela 1. Constantes harmônicas de amplitude (H_j , em cm) e de fase (G_j , em graus, relativa a Greenwich) para as nove principais componentes de maré, resultantes deste modelo e obtidas através de análises de maré (Mesquita & Harari, 1984)

MODELO		ANÁLISE					
CANANÉIA							
	H_j	G_j	H_j	+ -	G_j	+ -	
Q_1	2,7	098,3	Q_1	3,1	0,2	101,2	5,2
O_1	10,9	118,6	O_1	11,0	0,2	123,4	1,5
P_1	2,7	179,3	P_1	2,3	0,2	191,6	7,1
K_1	7,7	183,8	K_1	6,5	0,2	190,6	2,5
N_2	5,0	181,2	N_2	5,6	0,3	247,1	3,1
M_2	34,0	168,1	M_2	36,6	0,3	179,2	0,4
S_2	23,5	168,0	S_2	23,7	0,3	184,2	0,7
K_2	6,7	169,3	K_2	7,6	0,3	175,3	2,3
M_3	7,5	330,0	M_3	8,1	0,3	004,2	2,7
SANTOS							
	H_j	G_j	H_j	+ -	G_j	+ -	
Q_1	2,7	103,2	Q_1	3,4	0,5	101,3	8,3
O_1	10,7	123,2	O_1	12,0	0,5	122,9	2,3
P_1	2,2	198,0	P_1	2,0	0,5	175,4	14,0
K_1	6,6	210,0	K_1	6,1	0,5	189,0	4,6
N_2	4,5	187,4	N_2	5,1	0,4	228,7	4,2
M_2	29,0	176,5	M_2	37,3	0,4	171,4	0,6
S_2	20,5	177,5	S_2	23,4	0,4	177,2	0,9
K_2	5,9	178,3	K_2	7,7	0,4	170,5	2,8
M_3	5,0	004,5	M_3	6,1	0,5	355,1	5,0
UBATUBA							
	H_j	G_j	H_j	+ -	G_j	+ -	
Q_1	2,6	106,8	Q_1	3,1	0,2	094,2	4,7
O_1	10,9	125,0	O_1	10,9	0,2	125,4	1,3
P_1	1,9	186,0	P_1	2,0	0,2	178,1	7,3
K_1	5,0	192,5	K_1	5,9	0,2	187,1	2,5
N_2	4,0	174,1	N_2	3,7	0,3	216,4	5,8
M_2	27,0	166,0	M_2	29,7	0,3	165,9	0,7
S_2	18,5	171,5	S_2	17,2	0,3	171,6	1,2
K_2	5,0	172,8	K_2	5,4	0,3	164,1	4,0
M_3	1,0	358,8	M_3	1,4	0,1	341,7	6,8

Este trabalho demonstra a importância da interação entre observações de campo e a modelagem numérica hidrodinâmica. De fato, seria praticamente impossível obter as linhas cotidais das componentes de maré e as elipses das respectivas correntes somente com medições e as correspondentes análises harmônicas dos registros; isto envolveria um custo de amostragem excepcionalmente alto, em função da extensa área considerada. Por outro lado, a modelagem numérica por si só não poderia produzir os resultados obtidos, dada a dependência de condições de contorno realísticas.

Deve-se notar que mesmo o uso de resultados de modelos de maior escala como condições de contorno deste modelo provavelmente não levaria a resultados tão satisfatórios, visto que deformações das marés oceânicas ao atingirem as plataformas continentais não são em geral reproduzidas por estes modelos de macro escala (Schwiderski, 1980); desse modo, as observações nos contornos abertos são efetivamente as condições de contorno mais adequadas para a modelagem da propagação das ondas de maré na plataforma. Por outro lado, deve-se reconhecer que os resultados obtidos neste trabalho são referentes à propagação das marés somente na plataforma, enquanto que características específicas dessas ondas em regiões costeiras rasas e estuários devem ser obtidas por correspondentes modelos numéricos hidrodinâmicos de pequena escala. Isto explica resultados deste modelo para correntes muito próximas à costa um pouco atenuados, por causa das condições nos contornos fechados utilizadas; modelos de pequena escala evitariam a atenuação nesses resultados.

Cabe ressaltar também que, para o presente trabalho, não são aplicadas correções nodais de amplitude e de fase nos processamentos de componentes isoladas. Isto se deve ao interesse em obter feições permanentes da propagação de cada componente, ou seja, características independentes de períodos de tempo específicos. Por outro lado, o modelo aqui utilizado tem a capacidade de simular a composição de componentes de maré, isto é, a maré astronômica completa. Para tanto, basta escolher um período de interesse, para o qual são calculadas as correções nodais de amplitude e de fase das componentes; e a seguir, a composição harmônica das componentes possibilita realizar previsões de maré (e de correntes de maré) em épocas específicas; além disso, o modelo utilizado também permite considerar a influência dos campos de pressão e vento, o que possibilitou o estudo da sobreposição de efeitos astronômicos e meteorológicos em períodos de interesse, como realizado em Camargo & Harari (1994).

Componentes de Maré em Cananéia - Modelo (-) Análise (-)

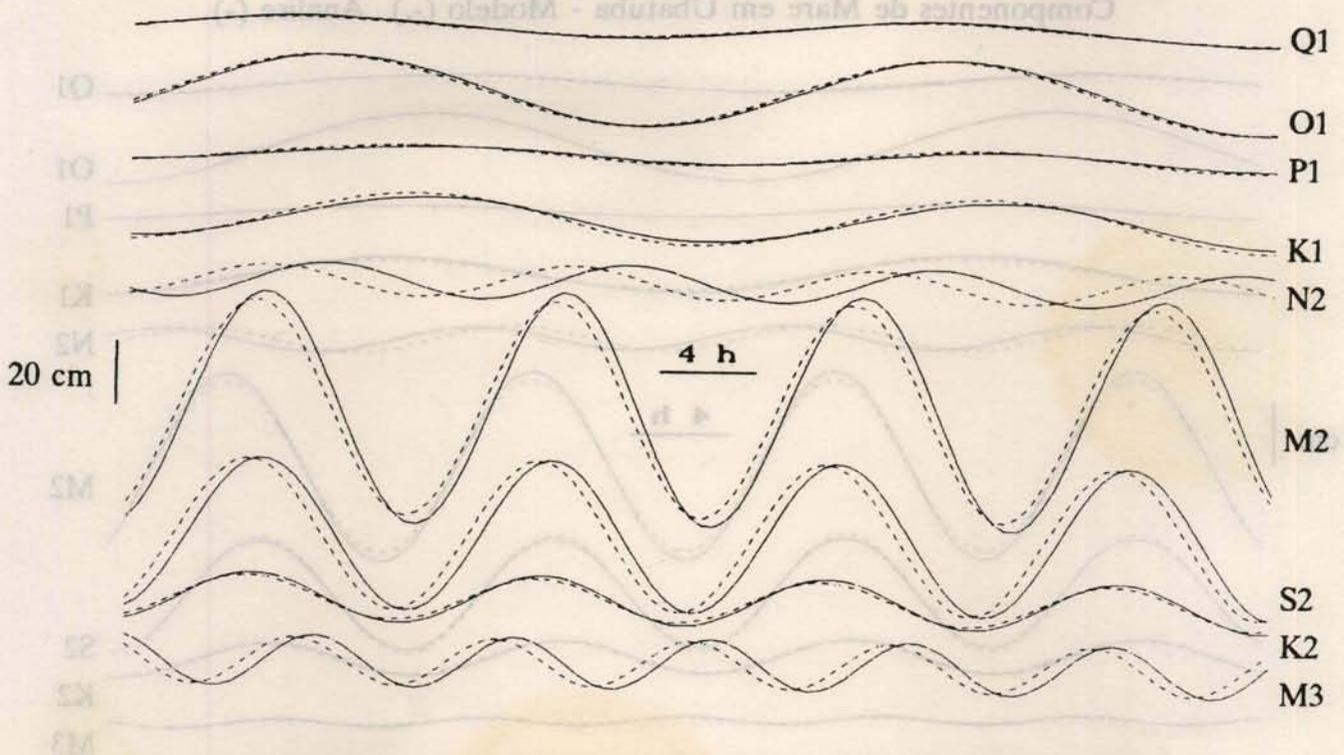


Fig. 12. Comparação de valores fornecidos pelo modelo e provenientes de previsões de maré, considerando as amplitudes e fases das componentes analisadas, para Cananéia.

Componentes de Maré em Santos - Modelo (-) Análise (-)

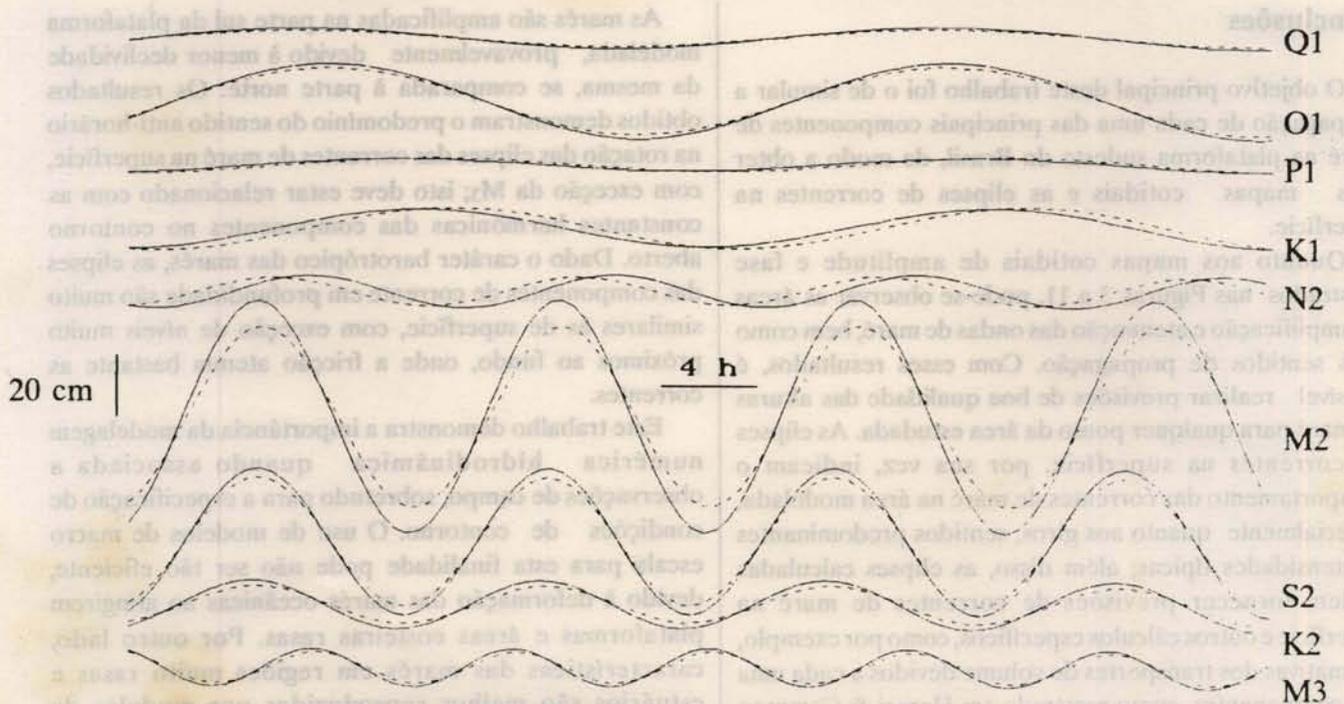


Fig. 13. Comparação de valores fornecidos pelo modelo e provenientes de previsões de maré, considerando as amplitudes e fases das componentes analisadas, para Santos.

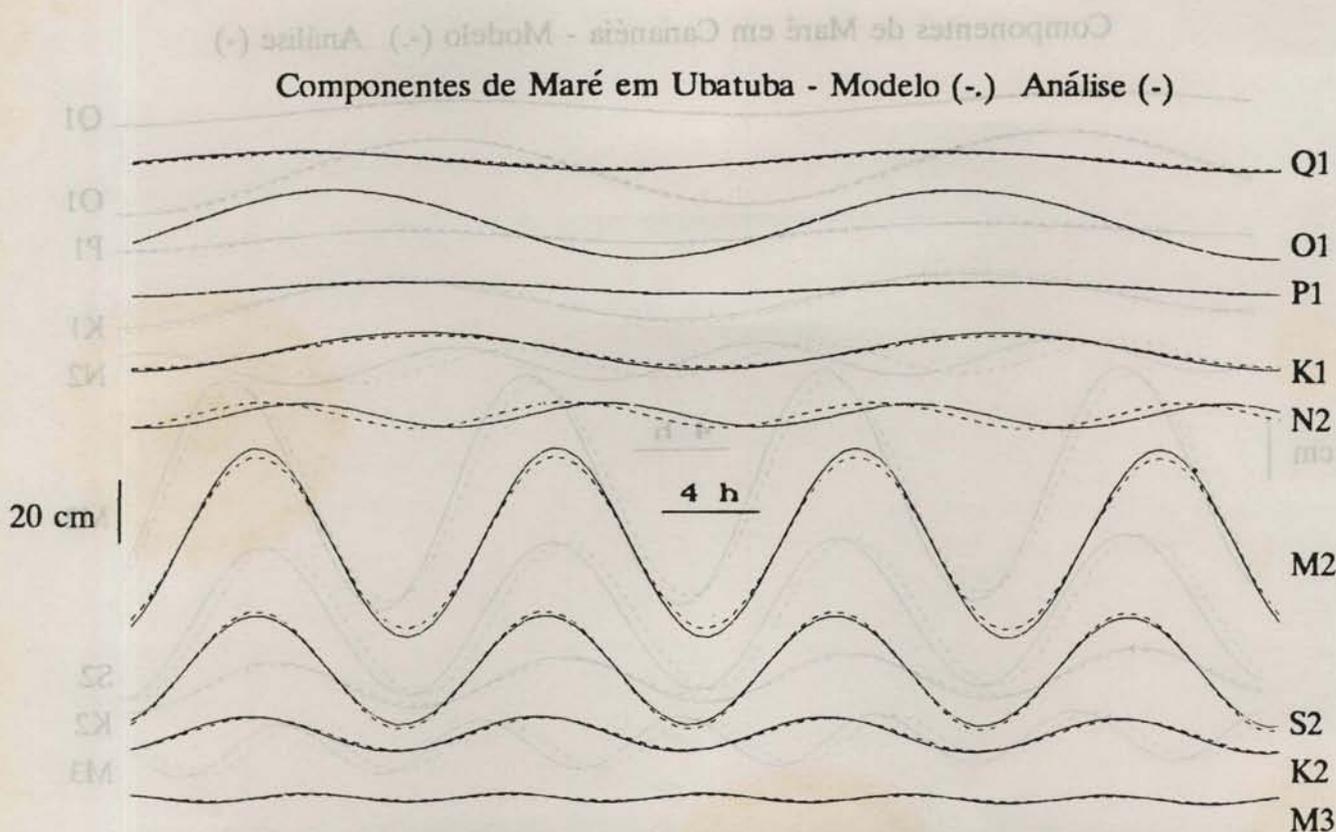


Fig. 14. Comparação de valores fornecidos pelo modelo e provenientes de previsões de maré, considerando as amplitudes e fases das componentes analisadas, para Ubatuba.

Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi o de simular a propagação de cada uma das principais componentes de maré na plataforma sudeste do Brasil, de modo a obter seus mapas cotidianos e as elipses de correntes na superfície.

Quanto aos mapas cotidianos de amplitude e fase mostrados nas Figuras 3 a 11, pode-se observar as áreas de amplificação e atenuação das ondas de maré, bem como seus sentidos de propagação. Com esses resultados, é possível realizar previsões de boa qualidade das alturas de maré para qualquer ponto da área estudada. As elipses de correntes na superfície, por sua vez, indicam o comportamento das correntes de maré na área modelada, especialmente quanto aos giros, sentidos predominantes e intensidades típicas; além disso, as elipses calculadas podem fornecer previsões de correntes de maré na superfície e outros cálculos específicos, como por exemplo, estimativas dos transportes de volume devidos a cada uma das componentes, como mostrado em Harari & Camargo (1990).

As marés são amplificadas na parte sul da plataforma modelada, provavelmente devido à menor declividade da mesma, se comparada à parte norte. Os resultados obtidos demonstram o predomínio do sentido anti-horário na rotação das elipses das correntes de maré na superfície, com exceção da M₃; isto deve estar relacionado com as constantes harmônicas das componentes no contorno aberto. Dado o caráter barotrópico das marés, as elipses das componentes de corrente em profundidade são muito similares às de superfície, com exceção de níveis muito próximos ao fundo, onde a fricção atenua bastante as correntes.

Este trabalho demonstra a importância da modelagem numérica hidrodinâmica quando associada a observações de campo, sobretudo para a especificação de condições de contorno. O uso de modelos de macro escala para esta finalidade pode não ser tão eficiente, devido à deformação das marés oceânicas ao atingirem plataformas e áreas costeiras rasas. Por outro lado, características das marés em regiões muito rasas e estuários são melhor reproduzidas por modelos de

pequena escala, se comparados aos resultados do modelo de meso escala utilizado.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr Alberto dos Santos Franco e ao Dr Afrânio Rubens de Mesquita, pela colaboração na elaboração deste trabalho, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da Bolsa de Mestrado ao segundo autor. Agradecemos também ao Instituto Oceanográfico da USP e ao Centro de Computação Eletrônica da USP, pelo apoio nos trabalhos realizados.

Referências bibliográficas

CAMARGO, R. 1991. Modelagem numérica das ondas de maré astronômica e meteorológica na plataforma sudeste brasileira. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 90p.

_____ & HARARI, J. 1994. Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste brasileira a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 42(1/2):

CASTRO FILHO, B. M. 1985. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. Ph.D. dissertation. University of Miami. RSMAS. 211p.

_____ ; MIRANDA, L. B. de & MIYAO, S. Y. 1987. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 35(2):135-151.

FRANCO, A. S. 1988. Tides: fundamentals, analysis and prediction. 2a. ed. São Paulo, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 249p.

_____ & HARARI, J. 1987. Computer programs for tidal data checking, correction, analysis and prediction by the harmonic method. *Relat. int. Inst. oceanogr. Univ. S Paulo*, (16):1-65.

HARARI, J. 1984. Modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear da plataforma continental sudeste do Brasil. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. 203 p.

_____ 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.

_____ 1987. Programa de computador de modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear em meso-escala. *Relat. int. Inst. oceanogr. Univ. S Paulo*, (15):1-25.

_____ & CAMARGO, R. 1990. Estimation of the volume transport by the tides in the southeastern brazilian platform through a hydrodynamical model. *In: II SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA: ESTRUTURA, FUNÇÃO E MANEJO*, 2., Águas de Lindóia, v.1, p. 75-83.

HEAPS, N. S. 1972. On the numerical solution of the three dimensional hydrodynamical equations, for tides and storm surges. *Mém. Soc. r. Sci Liège*, ser 6, 2:143-180.

JOHANNESSEN, O. M.; MIRANDA, L. B. & MINIUSI, I. C. 1967. Preliminary study of seasonal sea level variations along the southern part of the Brazilian coast. *Contrções Inst. oceanogr.*, Univ. S Paulo, sér. Ocean. Fís. (9):17-29.

MESQUITA, A. R. de 1983. Contribuição à oceanografia da região costeira sudeste do Brasil (Lat. 24°S) - Sub-projeto Hidrodinâmica Costeira: execução e resultados. Tese de livre-docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 187p.

_____ & HARARI, J. 1983. Tides and tide gauges of Cananéia and Ubatuba. Brazil (Lat. 24°S). *Relat. int. Inst. oceanogr. Univ. S Paulo*, (11):1-14.

_____ & HARARI, J. 1984. Harmonic constants of tides and currents of the southern Brazilian shelf. *In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA: SÍNTESE DOS CONHECIMENTOS*, Cananéia, 1982. São Paulo, ACIESP. v.2, p.415-422.

MUNK, W. H. & CARTWRIGHT, D. E. 1966. Tidal spectroscopy and prediction. *Phil. Trans. R. Soc.*, 259(1105):533-581.

SCHWIDERSKI, E. W. 1980. On charting global ocean tides. *Revs Geophys. Space Phys.* 18(1):243-268.

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

(Manuscrito recebido 4 março 1993; revista 5 maio 1994; aceito 30 junho 1994)

CAMARÃO, R. 1991. Estimation of the volume transport by the tidal in the southeastern Brazilian platform through a hydrodynamical model. In: II SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA. ESTRIUTURA, FUNÇÃO E MANEJO, 2. Água de Lidada, v.1, p. 73-83.

HEAR, N. S. 1972. On the analytical solution of the three dimensional hydrodynamical equations for tides and storm surges. *Mem. Soc. Sci. Liby.* ser. 6: 2:143-180.

JOHANNESSEN, O. M.; MIRANDA, L. B. & MINUSTI, L. C. 1997. Preliminary study of seasonal sea level variations along the southern part of the Brazilian coast. *Contrib. Inst. Oceanogr., Univ. S Paulo, ser. Ocean. Fis.* (9):17-29.

MESQUITA, A. R. de. 1983. Contribuição à oceanografia da região costeira sul do Brasil (1:24.2) - Sub-projeto Hidrodinâmica Costeira. execução e resultados. Tese de pós-graduação. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 187p.

HARARI, J. 1983. Tides and tide ranges of Canada and Gibraltar. *Brazil J. Mar. Sci.* Relat. Int. Inst. Oceanogr. Univ. S Paulo. (11):1-14.

HARARI, J. 1984. Harmonic constants of tides and currents of the southern Brazilian shelf. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA. SÍNTESE DOS CONHECIMENTOS. Ciancília, 1982. São Paulo, ACESS, v.2, p.415-422.

MUNK, W. H. & CARTWRIGHT, D. E. 1966. Tidal spectroscopy and prediction. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* (A) 276:281-346.

população escalar, se comparados aos resultados do modelo de meio escala utilizada.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr. Alberto dos Santos Franco e ao Dr. Afrânio Ribeiro de Menezes, pelas colaborações na elaboração deste trabalho, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de Bolsas de Mestrado ao segundo autor. Agradecemos também ao Instituto Oceanográfico da USP e ao Centro de Computação Eletrônica da USP, pelo apoio nos trabalhos realizados.

Referências bibliográficas

CAMARÃO, R. 1991. Modelagem numérica das ondas de maré astronômica e meteorológica na plataforma suldeste brasileira. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 90p.

HARARI, J. 1994. Modelagem numérica de resacas na plataforma suldeste brasileira a partir de curvas sintéticas de pressão atmosférica no superfície. *Bolm Inst. Oceanogr.* 2, Paulo, 43(1/2).

CASTRO FILHO, B. M. 1983. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. *Ph.D. dissertation. University of Miami. RMAS 211p.*

MIRANDA, L. B. de & MIYAO, S. Y. 1997. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo do Ubatuba: variação sazonal e em média escala. *Bolm Inst. Oceanogr.* 2, Paulo: 35(2):132-151.

FRANCO, A. Z. 1988. Tides: fundamental analysis and prediction. 2a. ed. São Paulo, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 249p.

HARARI, J. 1987. Computer program for tidal data checking, correction, analysis and prediction by the harmonic method. *Relat. Int. Inst. Oceanogr. Univ. S Paulo*, (10):1-62.