

Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia (25°S - 48°W)

Sadako Yadoya MIYAO & Joseph HARARI

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
(Caixa Postal 9075, 01051 São Paulo, SP)

- **Abstract:** A preliminary study of tidal height and tidal current data from Cananéia region made through harmonic and spectral analysis shows different amplifications and phase delays of the principal tidal components inwards the estuary. M₃ tidal component is particularly amplified in Mar de Cananéia - Mar Pequeno, probably because of near-resonance conditions in the channel. Tidal currents in Mar de Cubatão and Mar de Cananéia show, besides the semidiurnal components, significant presence of M₃ and M₄ constituents. Residual current spectra show two main peaks: one, of tidal frequency, attributed to tidal pumping; another, of subtidal frequency, attributed to a long-period cumulative effect, associated to the estuary mean level variation.
- **Descriptors:** Tides, Tidal currents, Harmonic analysis, Spectral analysis, Shallow water components, Residual currents, Cananéia, Brazil.
- **Descritores:** Marés, Correntes de maré, Análise harmônica, Análise espectral, Componentes de águas rasas, Correntes residuais, Cananéia: SP.

Introdução

Foram aplicadas técnicas de análise espectral e análise de maré pelo método harmônico a séries temporais de altura de maré e correntes da região estuarina de Cananéia, com o objetivo de se efetuar um estudo preliminar da maré e das correntes de maré associadas, e as modificações que ocorrem em sua propagação no interior do sistema estuarino. É feita também uma avaliação da corrente residual e sua relação com a variação do nível médio do mar no estuário.

O sistema estuarino estudado apresenta duas ligações principais com o oceano; é constituído, na sua parte norte, de um único canal (Mar Pequeno) o qual, na parte sul, se divide em dois ramos (Mar de Cananéia e Mar de Cubatão - Baía de Trapandé) os quais circundam a Ilha de Cananéia (Fig. 1).

A maré oceânica observada na Ilha de Bom Abrigo, a cerca de 4 km da costa, apresenta características espectrais semelhantes à da maré registrada na Base de Cananéia, localizada no interior do sistema estuarino, havendo um adiantamento de fase de cerca de 60 minutos para as principais componentes em Bom Abrigo

(Lorenzetti, 1976). O espectro de energia da maré apresenta um nível de energia do ruído de fundo maior em Bom Abrigo do que em Cananéia, mas os picos principais dos dois espectros, centrados nas frequências diurna, semidiurna, terdiurna e quarterdiurna da maré, apresentam níveis de energia muito semelhantes, e a única diferença notável é o pico das quarterdiurnas maior do que o das terdiurnas em Bom Abrigo (Lorenzetti, *op.cit.*).

As ondas de maré que entram no sistema através da Barra de Icapara e da Barra de Cananéia se encontram no Mar Pequeno, nas cercanias da região denominada "Pedra do Tombo" (Miniussi, 1959). Subaúna, um dos locais para os quais foram efetuadas análises da altura de maré neste trabalho, se situa muito próximo à Pedra do Tombo (Fig. 1).

Miniussi (*op.cit.*), estudando a propagação da maré em torno da Ilha de Cananéia, identificou no Mar de Cubatão uma região de encontro das ondas de maré que penetram pela Barra de Cananéia; as que avançam pelo Mar de Cananéia se encontram com as que se propagam pelo Mar de Cubatão nas proximidades do Rio Guapara, num local caracterizado por amplitudes de maré maiores e maior atraso de fase em relação ao restante da região estudada.

O conhecimento do comportamento da maré e das correntes de maré associadas no sistema estuarino é de

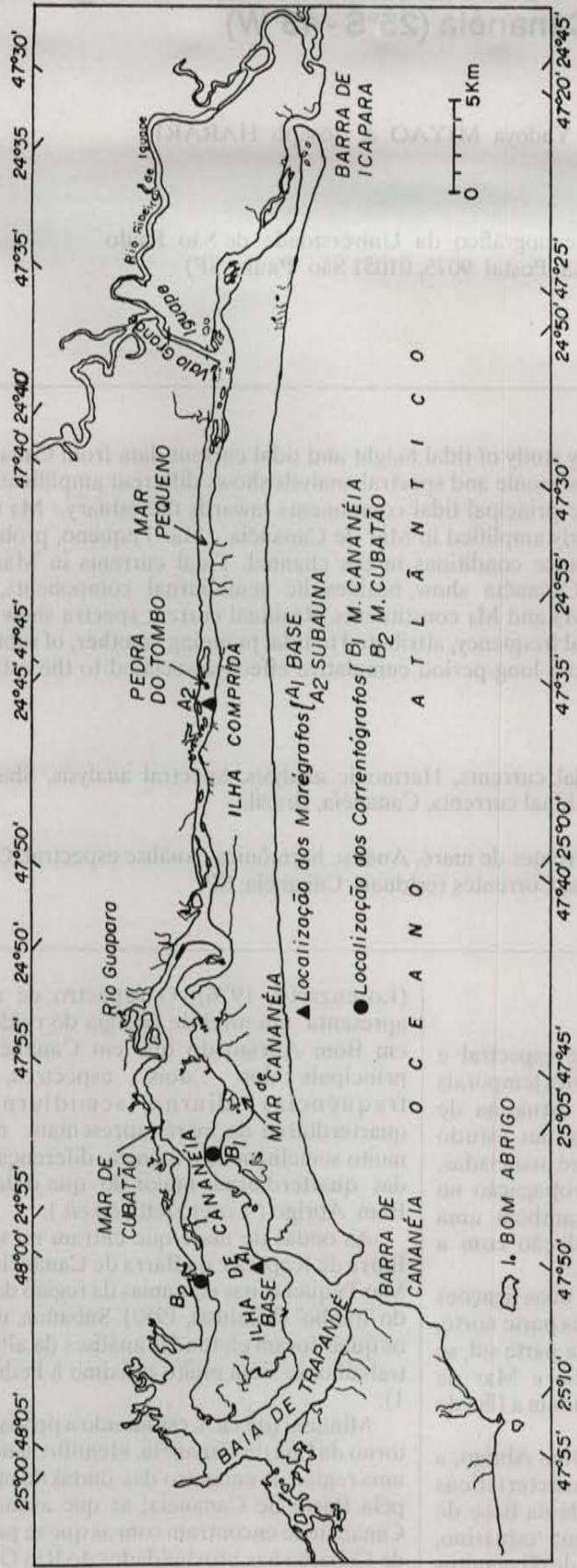


Fig. 1. O sistema estuarino de Cananéia-Iguape e a localização das estações.

importância fundamental, uma vez que a ação da maré nesse sistema é o principal responsável pelos processos de mistura e pelas trocas que se efetuam entre o oceano e o estuário, constituindo-se num agente efetivo no processo de transporte de sedimentos e na renovação das águas estuarinas.

A maré que adentra o estuário sofre modificações durante sua propagação, resultando em distorções que são discutidas neste trabalho.

Embora o objetivo principal deste trabalho seja o estudo das variações do nível do mar e das correntes nas freqüências de maré, são também discutidas as variações de freqüências abaixo das de maré, uma vez que essas oscilações contribuem com uma parcela significativa no espectro da elevação da superfície e parecem ter importância acentuada na circulação residual do estuário.

Material e métodos

Os dados de altura de maré foram obtidos de marégrafos de marca A.O.T.T., instalados na Base de Cananéia (A1) e em Subaúna (A2) (localização na Fig. 1), com escala de 1:10 na altura e escala de tempo de 2 cm/h. As leituras foram efetuadas com intervalos de 30 minutos.

Os dados de velocidade e direção de corrente foram obtidos com correntógrafos INTEROCEAN, modelo 135 A, fundeados a 2 m do fundo, na estação B1 no Mar de Cananéia e na estação B2 no Mar de Cubatão (Fig. 1), tendo esses locais profundidades médias de cerca de 10 m. As leituras foram efetuadas também com intervalos de 30 minutos.

As séries de dados analisados abrangem os seguintes períodos:

Alturas de maré da Base de Cananéia: medições permanentes

Alturas de maré de Subaúna: 19/12/79 a 02/01/80

Correntes no Mar de Cananéia: 22/11/79 a 09/12/79

Correntes no Mar de Cubatão: 15/12/81 a 06/01/82.

Os dados de alturas de maré e de correntes foram submetidos a análise espectral através da Fast Fourier Transform - FFT (IEEE, 1967) e da análise harmônica de maré com análise cruzada (Franco, 1981; Franco & Harari, 1987).

Este último tipo de análise fornece melhores resultados do que a análise de maré harmônica direta, para séries curtas de dados, como é o caso em questão (Franco & Harari, 1983).

Na análise harmônica da maré com análise cruzada, inicialmente se tem as características da maré num ponto de referência, dadas pela análise direta de um registro longo deste local, e se procura determinar as características da maré num ponto próximo ao de referência, o qual possui um registro de comprimento curto.

Na análise cruzada citada são, então, determinados os espectros da série de referência $S_{zz}(p)$, da série a analisar $S_{\eta\eta}(p)$ e o espectro cruzado $S_{z\eta}(p)$, onde p representa as freqüências. A seguir são calculadas:

a função de transferência $W(p) = S^*_{z\eta}(p) / S_{zz}(p)$

a coerência $\delta^2_{zp}(p) = |S_{z\eta}(p)|^2 / S_{zz}(p) S_{\eta\eta}(p)$

e a energia residual $S_w(p) = [1 - \delta^2_{zp}(p)] S_{\eta\eta}(p)$

Nestas expressões, o símbolo * representa o complexo conjugado e os espectros calculados, assim como a função de transferência, são alisados normalmente com um filtro de Hanning. Uma vez determinada a função de transferência $W(p)$, ela passa a ser interpolada para as freqüências de maré determinadas pela análise da série de referência, de modo a se obter as amplitudes e fases das ondas de maré da série a analisar.

Para esse estudo foram consideradas 24 componentes astronômicas e de pequeno fundo, determinadas pela análise da série de dados de um ano (1978) da maré da Base de Cananéia (Mesquita & Harari, 1983) que, dessa forma, foi considerada como a série de referência para todas as análises cruzadas efetuadas.

A partir das constantes harmônicas calculadas, foi determinado o número de forma F , que caracteriza o tipo de maré, definido como a razão entre a soma das amplitudes das principais constituintes diurnas e semidiurnas (Defant, 1961). Sendo O_1 , K_1 , M_2 e S_2 as respectivas amplitudes dessas componentes, se define $F = (O_1 + K_1) / (M_2 + S_2)$. Se $0 < F < 0,25$, a maré é definida como semidiurna; se $0,25 < F < 1,5$, ela é do tipo semidiurna com desigualdade diurna; se $1,5 < F < 3,0$ é do tipo mista, e se $F > 3,0$ é definida como diurna.

A amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna, na sizígia, é estimada por $(M_2 + S_2) + (O_1 + K_1)$ onde se assume que as quatro principais componentes estejam em fase. A correspondente amplitude máxima, na quadratura, é estimada por $(M_2 - S_2) + (O_1 - K_1)$, quando as principais componentes estão em oposição de fase.

As séries de corrente são também analisadas em relação às componentes de maré, de forma similar às alturas de maré, sendo usada a mesma série de referência. Além do cálculo de F para estas séries, uma vez conhecida a amplitude de corrente de qualquer componente, pode-se determinar a excursão da maré associada durante 1/2 ciclo de maré, através da expressão $S_{(T/2)} = U \cdot T/\pi$ onde U é a amplitude da componente de corrente, em km/h, e T é o período da mesma, em horas.

A fim de se analisar a relação entre a variação do nível médio do mar e a corrente residual, os dados de alturas horárias da maré foram submetidos a filtros $S_{24}^* S_{25}^* S_{25}$ (Godin, 1972). A aplicação deste filtro a uma série

x_i corresponde ao cálculo do tipo $SN = 1/N \sum_{i=1}^N x_i$, sendo

que sua utilização na forma $S_{24}^* S_{25}^* S_{25}$ numa série horária permite eliminar oscilações diurnas, semidiurnas, terdiurnas, etc. Assim, para as alturas horárias de maré, o filtro permitiu a determinação dos valores do nível médio diário do mar. Dessa forma, foram eliminadas as oscilações com freqüências maiores que 1 ciclo por dia.

Resultados e discussão

Os espectros da maré de Cananéia e Subaúna são apresentados nas Figuras 2 e 3, sendo que o respectivo espectro cruzado se encontra na Figura 4. As constantes harmônicas das componentes de maré dessas séries são fornecidas na Tabela 1.

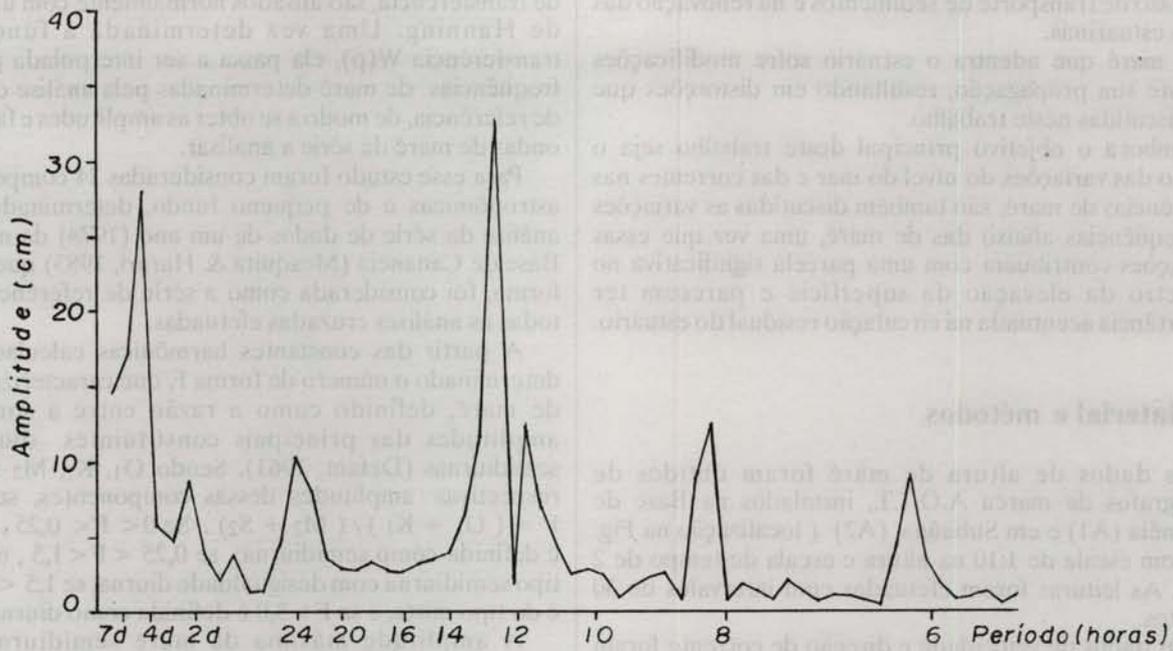


Fig. 2. Espectro da maré de Cananéia.

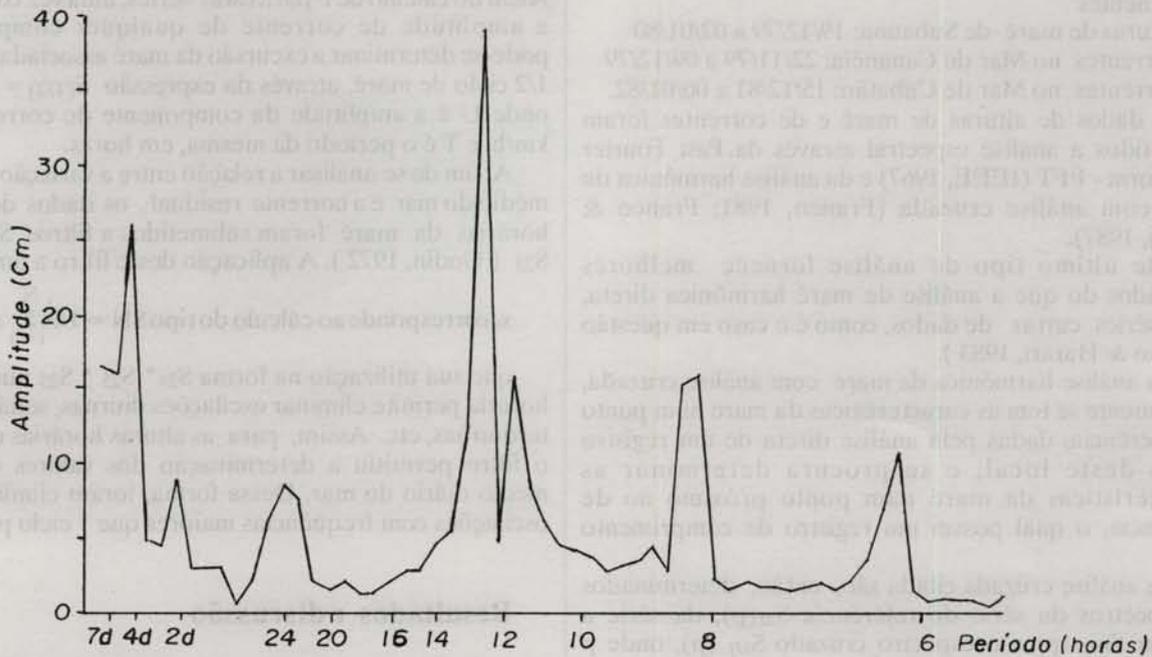


Fig. 3. Espectro da maré de Subaúna.

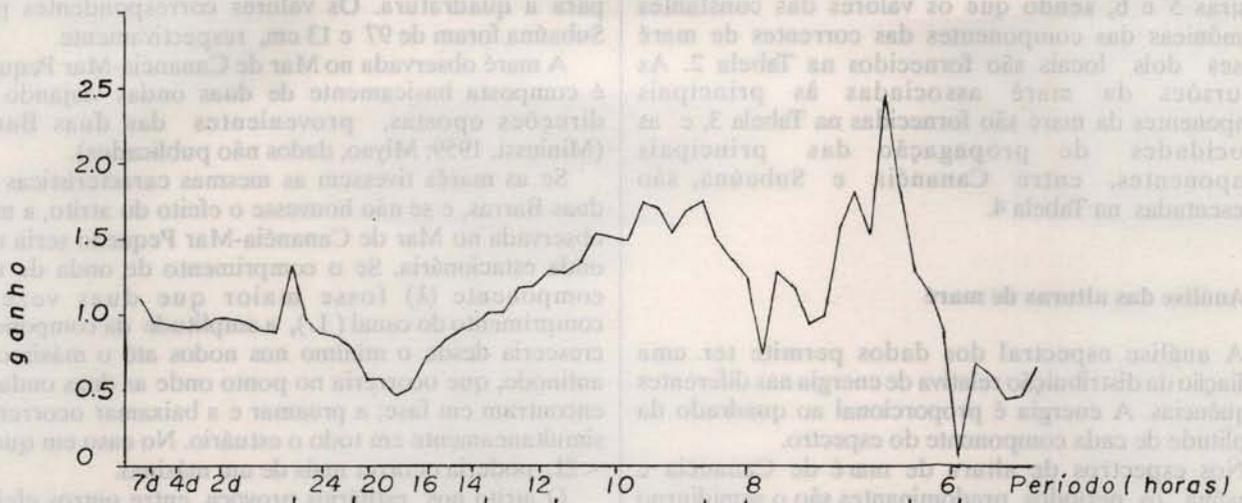


Fig. 4. Espectro cruzado da maré de Cananéia x Subaúna.

Tabela 1. Constantes harmônicas das principais componentes de maré de Cananéia e Subaúna - Período analisado: 19-12-79 a 02-01-80

Componente	Frequência angular (graus/hora)	Cananéia			Subaúna	
		Amplitude H (cm)	Fase local (graus)	Amplitude H (cm)	Fase local (graus)	
Q ₁	13,39	2,35	88,00	2,73	105,02	
O ₁	13,94	9,82	80,36	7,79	99,12	
K ₁	15,04	8,03	157,08	8,06	174,87	
MU ₂	27,94	2,07	152,26	2,59	197,07	
N ₂	28,44	4,93	159,23	6,23	195,86	
M ₂	28,98	38,60	92,02	47,11	134,56	
L ₂	29,53	2,98	105,09	4,11	148,35	
S ₂	20,00	26,73	96,66	33,89	138,52	
NO ₃	42,38	1,37	338,80	1,44	352,89	
MO ₃	42,93	5,09	16,99	8,65	79,30	
MP ₃	43,47	8,36	224,76	12,48	303,04	
SO ₃	43,94	2,66	139,60	3,60	220,75	
MK ₃	44,02	3,25	126,70	4,42	207,00	
SK ₃	45,04	1,25	179,77	11,96	308,05	
MN ₄	57,42	3,08	154,35	5,45	279,83	
M ₄	57,97	7,29	206,17	7,16	322,62	
MS ₄	58,98	4,38	310,44	8,03	122,78	

Os resultados da análise espectral das correntes nos mares de Cananéia e Cubatão são apresentados nas Figuras 5 e 6, sendo que os valores das constantes harmônicas das componentes das correntes de maré desses dois locais são fornecidos na Tabela 2. As excursões da maré associadas às principais componentes da maré são fornecidas na Tabela 3, e as velocidades de propagação das principais componentes, entre Cananéia e Subaúna, são apresentadas na Tabela 4.

Análise das alturas de maré

A análise espectral dos dados permite ter uma avaliação da distribuição relativa de energia nas diferentes frequências. A energia é proporcional ao quadrado da amplitude de cada componente do espectro.

Nos espectros de altura de maré de Cananéia e Subaúna, os períodos predominantes são o semidiurno (SD), o terdiurno (3D), o quarterdiurno (4D) e o diurno (D), em ordem decrescente de importância (Figs 2 e 3).

O espectro da maré de Subaúna apresenta energias maiores do que o de Cananéia. O espectro cruzado da maré dessas duas localidades (Fig. 4) mostra uma amplificação diferenciada das componentes de Subaúna em relação a Cananéia: as componentes D praticamente não se alteram, mas são amplificadas as SD, 3D e 4D, observando-se grandes oscilações de ganho para períodos entre 6 e 8 h.

A análise harmônica da maré permite extrair as amplitudes e fases das componentes harmônicas primárias e suas marés compostas. Na Tabela 1 são apresentadas as constantes harmônicas das principais componentes da maré de Cananéia e de Subaúna. Convém observar que, das componentes listadas, muitas estão abaixo do nível de ruído apresentado pela análise direta da maré, ruído esse que é alto, uma vez que as séries são muito curtas. O nível de ruído é definido em cada banda de maré segundo a metodologia da análise harmônica de maré desenvolvida por Franco & Rock (1971). No entanto, algumas destas componentes tornam-se significativas, tanto no espectro da altura no interior do estuário, como no espectro da corrente. Por esse motivo, são listadas na tabela, tomando-se cuidado ao interpretar os seus valores, pois algumas componentes podem apresentar valores altos por efeito de contaminação pelas frequências vizinhas, ou outros efeitos não identificados, decorrentes da exiguidade da extensão do registro. É o que parece acontecer, por exemplo, com a componente SK3 que, embora pequena na maré de Cananéia, apresenta um valor extremamente grande na maré de Subaúna, sem, no entanto, apresentar um correspondente aumento na corrente do Mar de Cananéia.

As componentes de maré de longo período não constam da Tabela 1, por falta de precisão na sua determinação, em virtude da limitação do período analisado.

O número de forma F calculado para a maré de Cananéia tem o valor de 0,27 e o de Subaúna 0,20, o que indica que a maré em ambos os locais é predominantemente semidiurna.

Quanto aos valores extremos da maré de Cananéia, se tem 83 cm para a amplitude da maré de sizígia e 13 cm para a quadratura. Os valores correspondentes para Subaúna foram de 97 e 13 cm, respectivamente.

A maré observada no Mar de Cananéia-Mar Pequeno é composta basicamente de duas ondas viajando em direções opostas, provenientes das duas Barras (Miniussi, 1959; Miyao, dados não publicados).

Se as marés tivessem as mesmas características nas duas Barras, e se não houvesse o efeito do atrito, a maré observada no Mar de Cananéia-Mar Pequeno seria uma onda estacionária. Se o comprimento de onda de uma componente (λ) fosse maior que duas vezes o comprimento do canal (L), a amplitude da componente crescerá desde o mínimo nos nodos até o máximo no antinodo, que ocorreria no ponto onde as duas ondas se encontram em fase; a preamar e a baixamar ocorreriam simultaneamente em todo o estuário. No caso em que $L < 2L$, poderia ocorrer mais de um máximo.

O atrito nos estuários provoca, entre outros efeitos, uma mudança de fase e um decaimento das componentes. Portanto, se o efeito do atrito for suficientemente grande, de forma que as ondas sejam completamente atenuadas antes de chegar ao ponto de encontro, a onda resultante será progressiva; sua amplitude irá decrescendo da entrada ao interior do sistema, e as preamares e baixamares ocorrerão progressivamente mais tarde no mesmo sentido.

A maré real no sistema em estudo é resultante de duas ondas amortecidas com características bastante semelhantes, (com pequena defasagem nas preamares das duas Barras, conforme GEOBRÁS, 1966); essas ondas, progredindo em direções opostas, têm um comportamento intermediário entre os extremos de estacionária e progressiva.

A comparação das amplitudes e fases das principais componentes de maré (Tab. 1) mostra que há uma defasagem e uma amplificação das mesmas em Subaúna em relação a Cananéia.

A amplificação diferenciada das componentes entre os dois locais pode ser atribuída aos diferentes graus de interferência das diversas componentes, em função de suas características (amplitude e fase) nas duas Barras, e das modificações que sofrem na sua propagação. O efeito do atrito no estuário, além de amortecer diferentemente as componentes de maré da onda progressiva, cria novas componentes, os harmônicos compostos. Essas componentes, conhecidas como componentes de águas rasas, são geradas por interações devido ao atrito e outros efeitos não lineares, e resultam em distorções das componentes fundamentais.

O principal harmônico da frequência fundamental M_2 que foi observado, corresponde à componente M_4 . A razão entre as amplitudes de M_4 e M_2 , usada como uma medida da distorção da componente principal semidiurna, reflete os efeitos dissipativos, bem como a transferência de energia espectral da M_2 para a M_4 . A razão M_4/M_2 é 0,19 em Cananéia e 0,15 em Subaúna.

Como as componentes M_2 e M_4 têm a frequência exatamente uma o dobro da outra, a defasagem que se observa entre as mesmas é repetida ao longo dos ciclos, resultando em assimetrias fixas. A comparação das fases entre essas componentes, utilizadas por vários autores (Pingree & Griffiths, 1979), fornece o tipo de distorção da

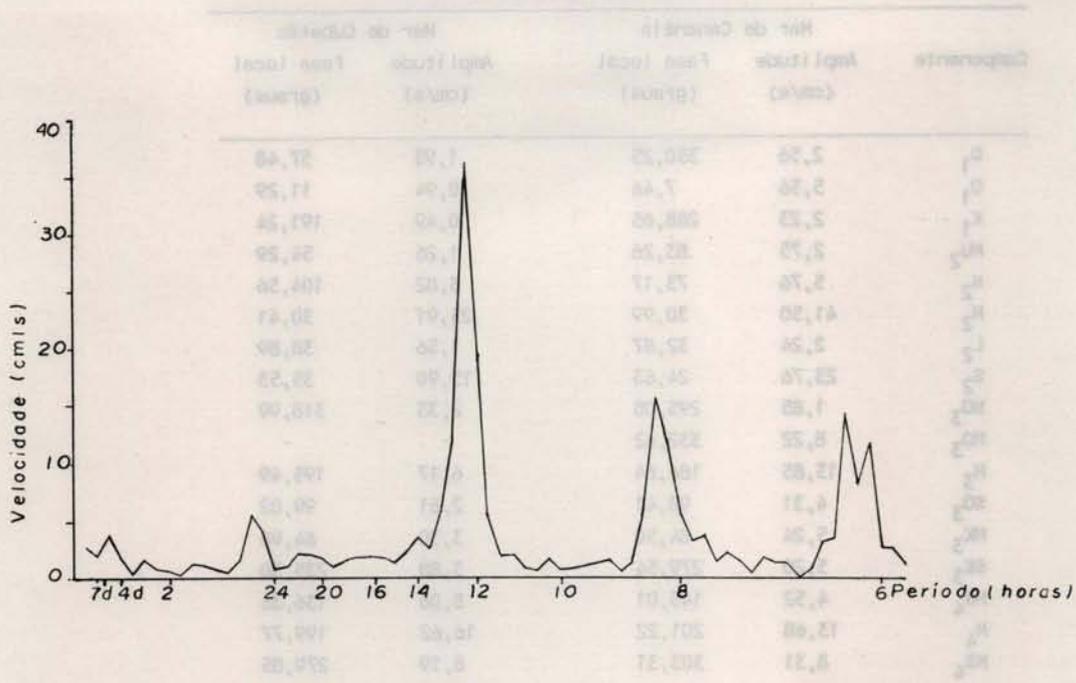


Fig. 5. Espéctro da corrente no Mar de Cananéia.

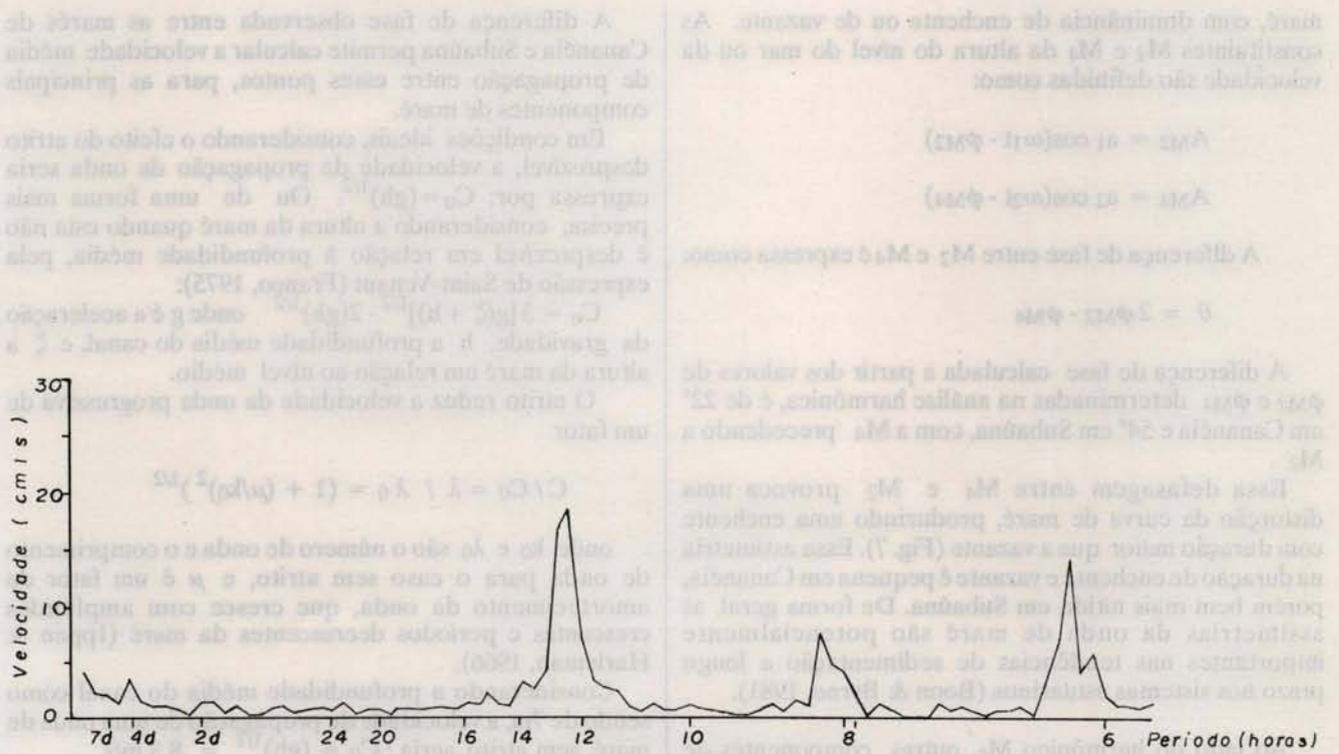


Fig. 6. Espéctro da corrente no Mar de Cubatão.

Tabela 2. Constantes harmônicas das principais componentes da corrente de maré na estação B₁ (Mar de Cananéia) e estação B₂ (Mar de Cubatão)

Componente	Mar de Cananéia		Mar de Cubatão	
	Amplitude (cm/s)	Fase local (graus)	Amplitude (cm/s)	Fase local (graus)
Q ₁	2,56	350,25	1,93	57,48
O ₁	5,56	7,46	0,94	11,29
K ₁	2,23	288,65	0,49	191,24
MU ₂	2,75	83,26	1,26	54,29
N ₂	5,76	73,17	3,82	104,56
M ₂	41,50	30,99	25,91	30,41
L ₂	2,24	32,87	1,56	38,89
S ₂	23,76	24,63	15,90	35,53
NO ₃	1,85	295,08	2,33	318,99
MO ₃	8,22	332,62	-	-
M ₃	13,85	184,64	6,17	195,49
SO ₃	4,31	98,41	2,61	99,02
MK ₃	5,24	84,50	3,30	84,90
SK ₃	5,20	279,54	3,88	235,30
MN ₄	4,52	145,01	8,06	136,36
M ₄	13,68	201,22	16,62	199,77
MS ₄	8,31	303,31	8,19	279,85

maré, com dominância de enchente ou de vazante. As constituintes M₂ e M₄ da altura do nível do mar ou da velocidade são definidas como:

$$A_{M2} = a_1 \cos(\omega_1 t - \phi_{M2})$$

$$A_{M4} = a_2 \cos(\omega_2 t - \phi_{M4})$$

A diferença de fase entre M₂ e M₄ é expressa como:

$$\theta = 2\phi_{M2} - \phi_{M4}$$

A diferença de fase calculada a partir dos valores de ϕ_{M2} e ϕ_{M4} determinadas na análise harmônica, é de 22° em Cananéia e 54° em Subaúna, com a M₄ precedendo a M₂.

Essa defasagem entre M₄ e M₂ provoca uma distorção da curva de maré, produzindo uma enchente com duração maior que a vazante (Fig. 7). Essa assimetria na duração de enchente e vazante é pequena em Cananéia, porém bem mais nítida em Subaúna. De forma geral, as assimetrias da onda de maré são potencialmente importantes nas tendências de sedimentação a longo prazo nos sistemas estuarinos (Boon & Byrne, 1981).

Ao lado do harmônico M₄, outras componentes de pequeno fundo estão presentes no espectro, constituídas por marés compostas terdiurnas e quarterdiurnas (Tab. 1). Além dessas componentes de pequeno fundo de primeira ordem, são teoricamente previstas outras de ordens superiores (Franco, 1975), mas que não puderam ser discriminadas e identificadas nessa análise, devido à limitação do comprimento do período analisado.

A diferença de fase observada entre as marés de Cananéia e Subaúna permite calcular a velocidade média de propagação entre esses pontos, para as principais componentes de maré.

Em condições ideais, considerando o efeito do atrito desprezível, a velocidade de propagação da onda seria expressa por: $C_0 = (gh)^{1/2}$. Ou de uma forma mais precisa, considerando a altura da maré quando esta não é desprezível em relação à profundidade média, pela expressão de Saint-Venant (Franco, 1975):

$C_0 = 3 [g(\zeta + h)]^{1/2} - 2(gh)^{1/2}$ onde g é a aceleração da gravidade, h a profundidade média do canal, e ζ a altura da maré em relação ao nível médio.

O atrito reduz a velocidade da onda progressiva de um fator

$$C / C_0 = \lambda / \lambda_0 = (1 + (\mu/k_0)^2)^{1/2}$$

onde k_0 e λ_0 são o número de onda e o comprimento de onda para o caso sem atrito, e μ é um fator de amortecimento da onda, que cresce com amplitudes crescentes e períodos decrescentes da maré (Ippen & Harleman, 1966).

Considerando a profundidade média do canal como sendo de 7m, a velocidade de propagação de uma onda de maré, sem atrito, seria: $C_0 = (gh)^{1/2} = 8,3$ m/s.

As velocidades de propagação das principais componentes, calculadas a partir das diferenças de fase das mesmas entre Cananéia e Subaúna, distantes entre si cerca de 37 km, são apresentadas na Tabela 4.

Embora a velocidade calculada a partir da diferença das fases de uma componente represente apenas um valor da velocidade média entre os dois pontos, uma vez que as

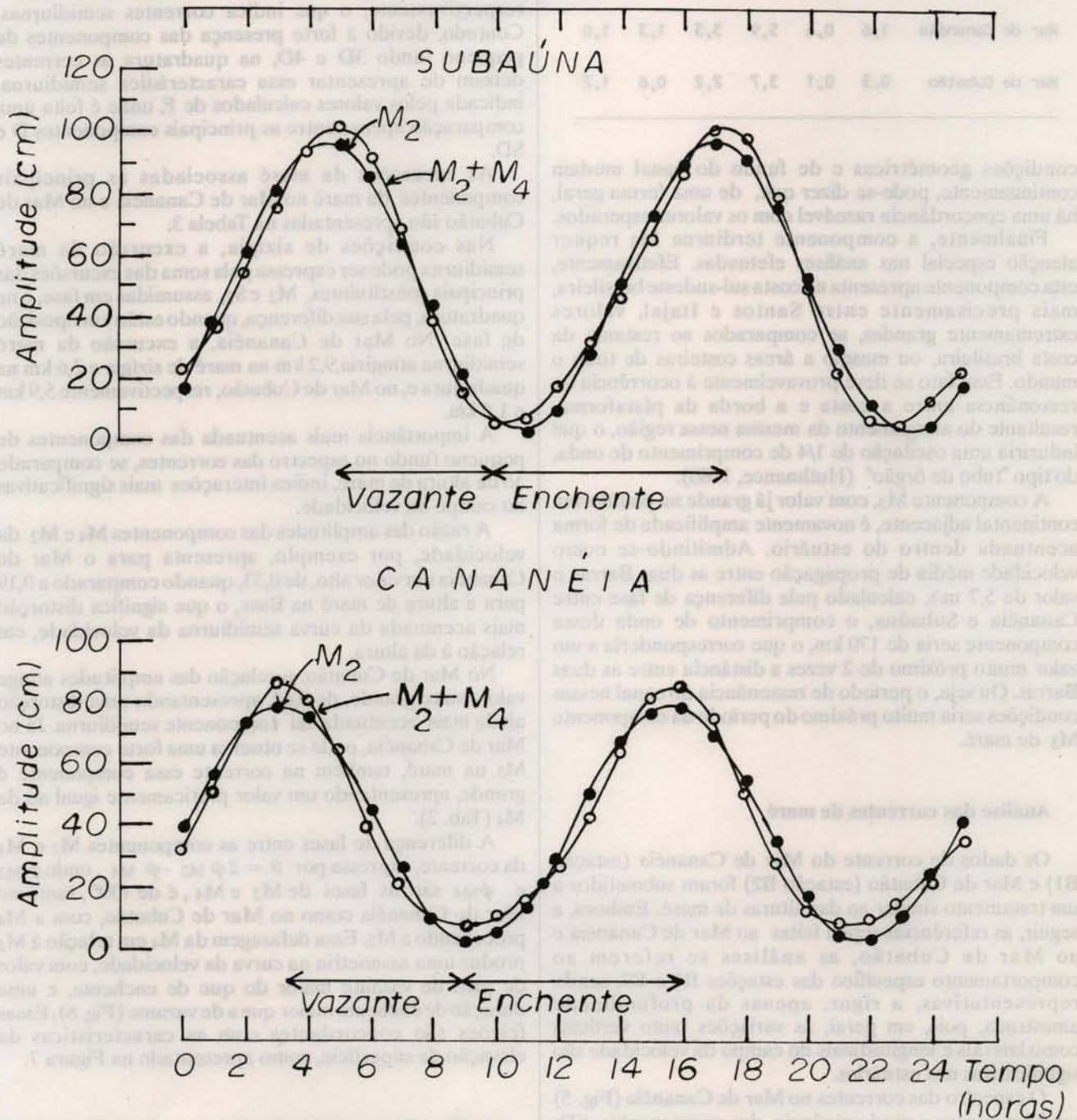


Fig. 7. Componentes $M_2 + M_4$ da maré de Cananéia e Subaúna.

Tabela 3. Valores da excursão da maré associados às principais componentes da corrente de maré (em km)

Componente	O_1	K_1	M_2	S_2	M_3	M_4
Mar de Cananéia	1,6	0,6	5,9	3,3	1,3	1,0
Mar de Cubatão	0,3	0,1	3,7	2,2	0,6	1,2

condições geométricas e de fundo do canal mudam continuamente, pode-se dizer que, de uma forma geral, há uma concordância razoável com os valores esperados.

Finalmente, a componente terdiurna M_3 requer atenção especial nas análises efetuadas. Efetivamente, esta componente apresenta na costa sul-sudeste brasileira, mais precisamente entre Santos e Itajaí, valores extremamente grandes, se comparados ao restante da costa brasileira, ou mesmo a áreas costeiras de todo o mundo. Esse fato se deve provavelmente à ocorrência de ressonância entre a costa e a borda da plataforma, resultante do alargamento da mesma nessa região, o que induziria uma oscilação de 1/4 de comprimento de onda, do tipo "tubo de órgão" (Huthnance, 1980).

A componente M_3 , com valor já grande na plataforma continental adjacente, é novamente amplificada de forma acentuada dentro do estuário. Admitindo-se como velocidade média de propagação entre as duas Barras o valor de 5,7 m/s, calculado pela diferença de fase entre Cananéia e Subaúna, o comprimento de onda dessa componente seria de 170 km, o que corresponderia a um valor muito próximo de 2 vezes a distância entre as duas Barras. Ou seja, o período de ressonância do canal nessas condições seria muito próximo do período da componente M_3 de maré.

Análise das correntes de maré

Os dados de corrente do Mar de Cananéia (estação B1) e Mar de Cubatão (estação B2) foram submetidos a um tratamento similar ao das alturas de maré. Embora, a seguir, as referências sejam feitas ao Mar de Cananéia e ao Mar de Cubatão, as análises se referem ao comportamento específico das estações B1 e B2, sendo representativas, a rigor, apenas da profundidade amostrada, pois, em geral, as variações tanto verticais como laterais e longitudinais do campo da velocidade são significativas nos estuários.

O espectro das correntes no Mar de Cananéia (Fig. 5) também mostra a predominância das componentes SD; as componentes 3D e 4D são importantes, mas as componentes diurnas são pequenas. No Mar de Cubatão, a predominância das semidiurnas é menor; a importância relativa das componentes 4D da corrente é maior do que as 3D e as diurnas são efetivamente desprezíveis (Fig. 6). Medições de correntes realizadas ao largo da costa sul paulista também demonstram a forte predominância das

componentes semidiurnas da corrente, e a quase ausência das componentes diurnas próximo ao fundo (Mesquita & Harari, 1987).

As constantes harmônicas calculadas para as correntes no Mar de Cananéia e no Mar de Cubatão constam da Tabela 2.

O número de forma F , utilizado também para caracterizar o tipo de corrente de maré, fornece valores para o Mar de Cananéia e Mar de Cubatão de 0,12 e 0,03, respectivamente, o que indica correntes semidiurnas. Contudo, devido à forte presença das componentes de pequeno fundo 3D e 4D, na quadratura as correntes deixam de apresentar essa característica semidiurna, indicada pelos valores calculados de F , onde é feita uma comparação apenas entre as principais componentes D e SD.

As excursões da maré associadas às principais componentes da maré no Mar de Cananéia e no Mar de Cubatão são apresentadas na Tabela 3.

Nas condições de sizígia, a excursão da maré semidiurna pode ser expressa pela soma das excursões das principais constituintes, M_2 e S_2 , assumidas em fase, e na quadratura, pela sua diferença, quando estão em oposição de fase. No Mar de Cananéia, a excursão da maré semidiurna atingiria 9,2 km na maré de sizígia e 2,6 km na quadratura e, no Mar de Cubatão, respectivamente 5,9 km e 1,5 km.

A importância mais acentuada das componentes de pequeno fundo no espectro das correntes, se comparado ao da altura de maré, indica interações mais significativas no campo da velocidade.

A razão das amplitudes das componentes M_4 e M_2 da velocidade, por exemplo, apresenta para o Mar de Cananéia um valor alto, de 0,33, quando comparado a 0,19 para a altura de maré na Base, o que significa distorção mais acentuada da curva semidiurna da velocidade, em relação à da altura.

No Mar de Cubatão, a relação das amplitudes atinge valor muito grande, de 0,64, apresentando uma distorção ainda mais acentuada da componente semidiurna. Já no Mar de Cananéia, onde se observa uma forte componente M_3 na maré, também na corrente essa componente é grande, apresentando um valor praticamente igual ao da M_4 (Tab. 2).

A diferença de fases entre as componentes M_2 e M_4 da corrente, expressa por $\theta = 2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$, onde ϕ_{M_2} e ϕ_{M_4} são as fases de M_2 e M_4 , é de 139° , tanto no Mar de Cananéia como no Mar de Cubatão, com a M_4 precedendo a M_2 . Essa defasagem da M_4 em relação à M_2 produz uma assimetria na curva da velocidade, com valor de pico de vazante maior do que de enchente, e uma duração de enchente maior que a de vazante (Fig. 8). Essas feições são concordantes com as características da elevação da superfície, como apresentado na Figura 7.

Análise das correntes residuais e das oscilações de frequências abaixo das de maré

Além das principais frequências de maré analisadas, os espectros da altura de maré mostram contribuições significativas nas frequências abaixo das de maré (Figs 2 e 3). É interessante também notar que, ao contrário do que ocorre com as oscilações SD, 3D e 4D, o espectro cruzado

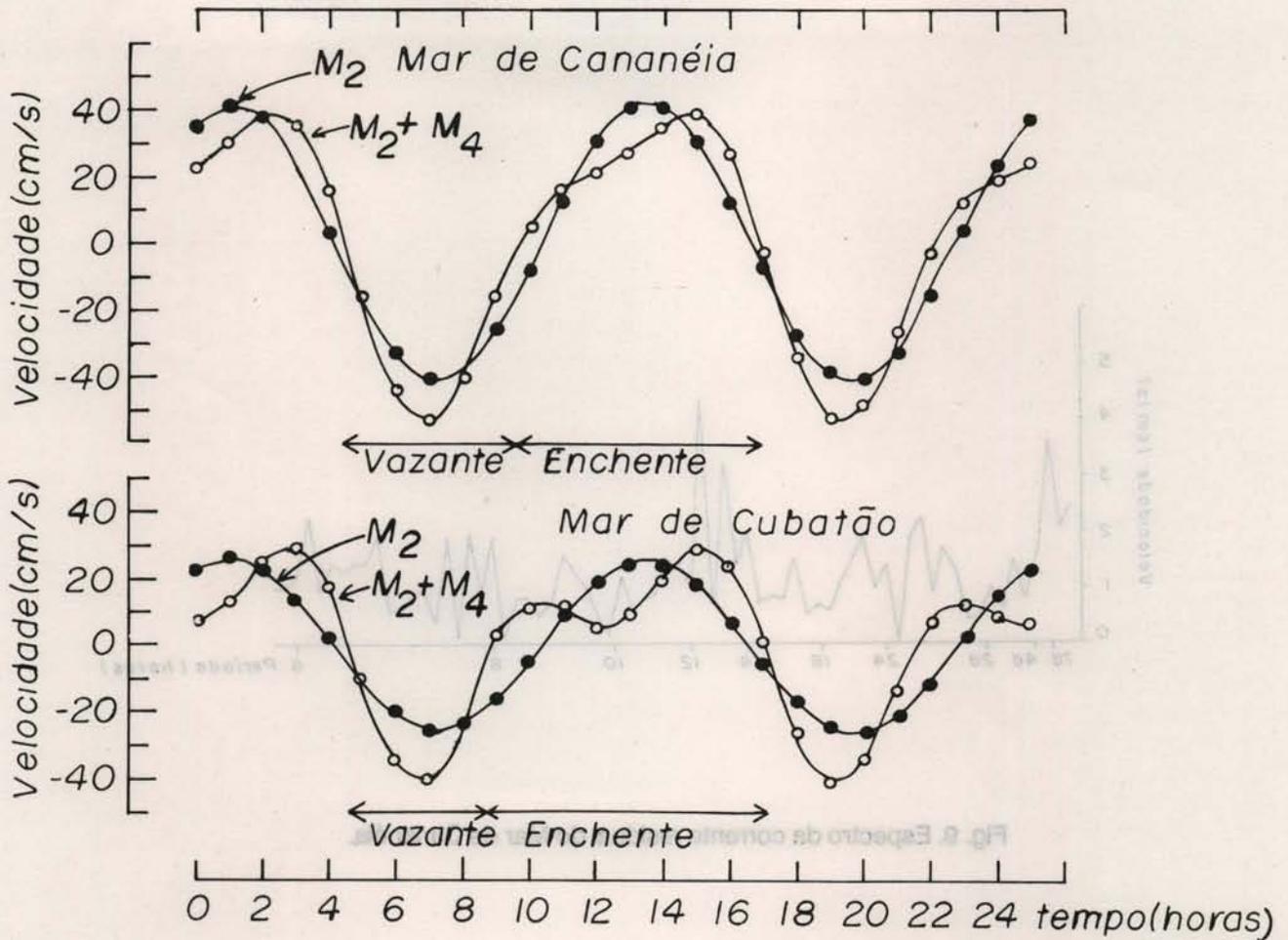


Fig.8. Componentes M2 + M4 da corrente no Mar de Cananéia e no Mar de Cubatão.

da maré de Cananéia x Subaúna (Fig. 4) é muito próximo a 1 nas baixas freqüências, o que indica uma oscilação com pequena variação em todo o estuário, nessas freqüências.

Comparando-se o espectro da corrente com o da altura de maré de Cananéia, observa-se uma diferença significativa nas baixas freqüências: as altas energias presentes no espectro da altura praticamente não existem no espectro da corrente (Figs 2-3, 5-6). Smith (1979), que observou comportamento semelhante em Aransas Pass, no Texas, considera que, embora o espectro das correntes apresente pequenas energias nas freqüências baixas, o efeito no nível da água é cumulativo, de forma que variações significativas no nível da água interior podem resultar de longos períodos de lentas enchentes ou vazantes. A análise da corrente residual no estuário de Cananéia permitirá verificar esta relação.

O espectro residual das correntes, obtido pela eliminação das principais componentes astronômicas e de pequeno fundo, pode também ser interpretado como o espectro da corrente residual.

Nos espectros da corrente residual nas estações B1 e B2 (Figs 9 e 10), alguns picos presentes em freqüências

mais altas podem ser atribuídos a eventuais componentes de pequeno fundo não computadas na análise, e portanto não eliminadas junto com as demais componentes calculadas.

A partir das diferenças entre os valores horários observados, e a correspondente composição harmônica das componentes de correntes de maré consideradas, foi calculada a velocidade residual horária. Deve-se ressaltar, mais uma vez, que se trata da velocidade da corrente residual de uma profundidade, que não representa necessariamente o comportamento da corrente residual da secção, nem do canal.

A partir desses dados de velocidade, pode-se calcular o deslocamento residual cumulativo, através do produto dos valores de velocidade pelo intervalo de tempo que representam. Na estação B1, no Mar de Cananéia, o deslocamento residual é predominantemente de saída, alternando períodos de intensidade maior ou menor, seguindo de perto a descida e subida do nível médio do mar em Cananéia (Fig. 11). Entretanto, aparentemente, quando o aumento do nível médio é muito grande, a corrente residual chega a inverter de sentido, embora com

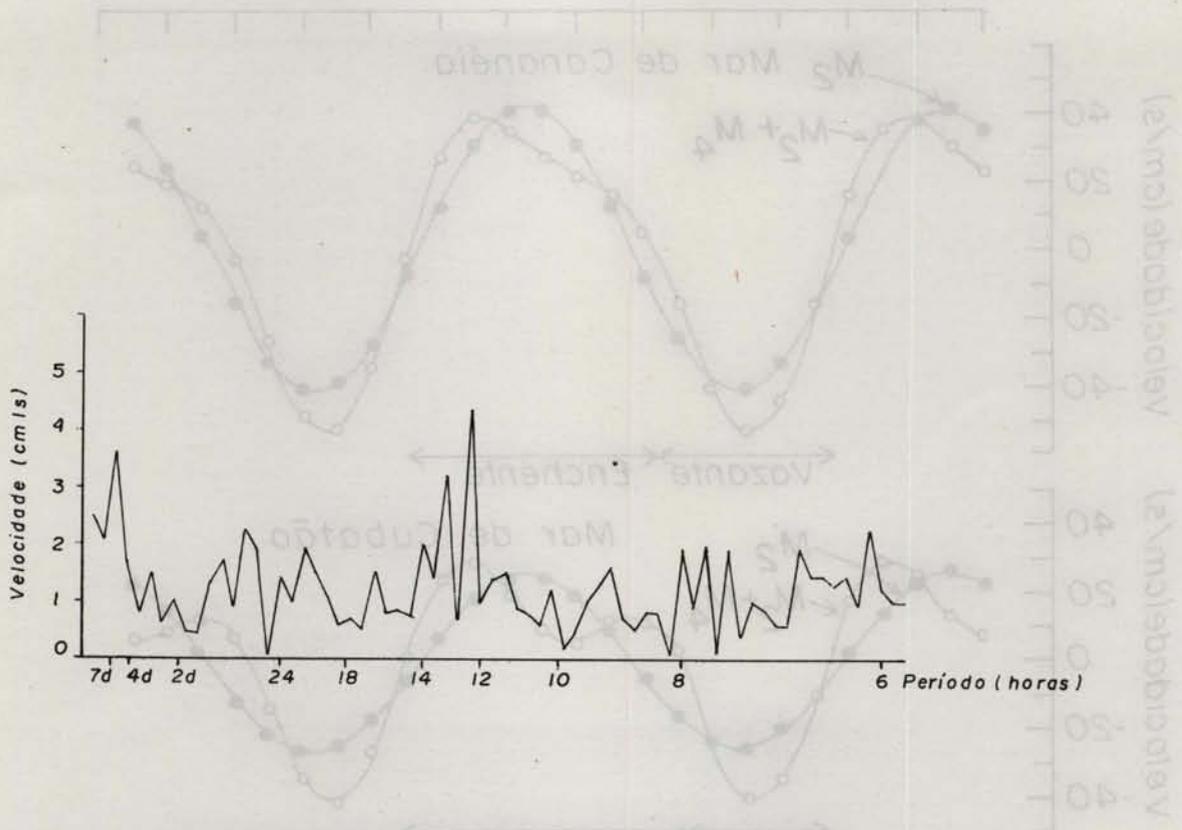


Fig. 9. Espectro da corrente residual do Mar de Cananéia.

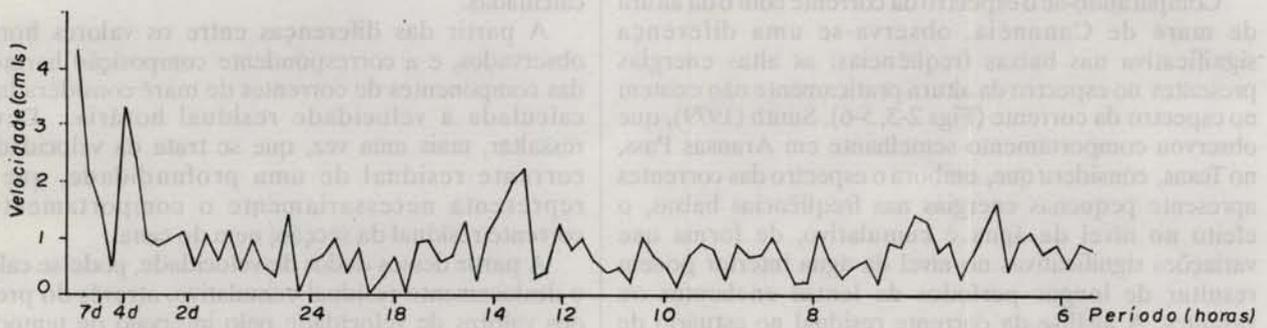


Fig. 10. Espectro da corrente residual do Mar de Cubatão.

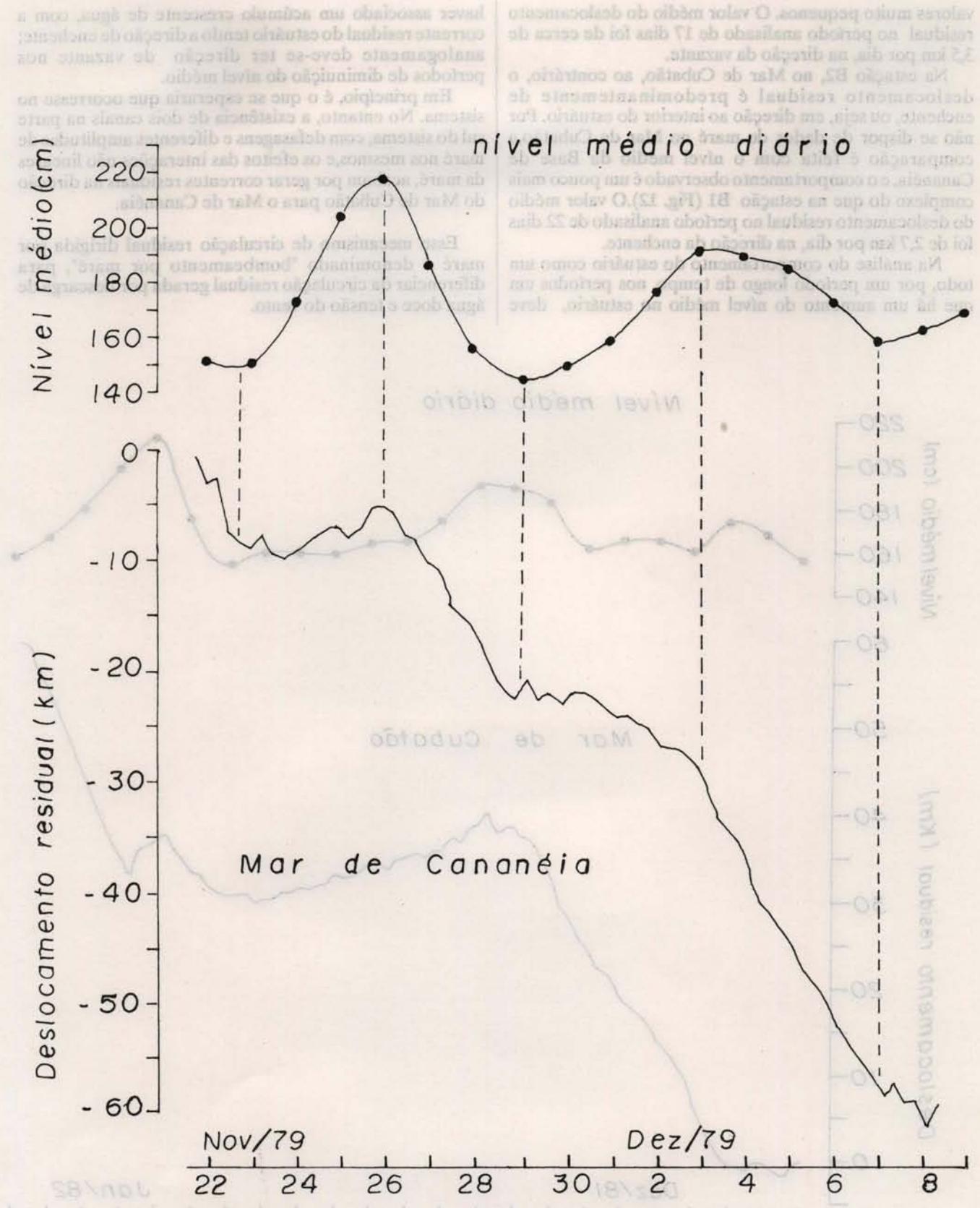


Fig 11. Deslocamento cumulativo no Mar de Cananéia e nível médio do mar na Base de Cananéia.

Fig. 12. Deslocamento cumulativo no Mar de Cubatão e nível médio do mar na Base de Cananéia.

valores muito pequenos. O valor médio do deslocamento residual no período analisado de 17 dias foi de cerca de 3,5 km por dia, na direção da vazante.

Na estação B2, no Mar de Cubatão, ao contrário, o deslocamento residual é predominantemente de enchente, ou seja, em direção ao interior do estuário. Por não se dispor de dados de maré no Mar de Cubatão, a comparação é feita com o nível médio da Base de Cananéia, e o comportamento observado é um pouco mais complexo do que na estação B1 (Fig. 12). O valor médio do deslocamento residual no período analisado de 22 dias foi de 2,7 km por dia, na direção da enchente.

Na análise do comportamento do estuário como um todo, por um período longo de tempo, nos períodos em que há um aumento do nível médio no estuário, deve

haver associado um acúmulo crescente de água, com a corrente residual do estuário tendo a direção de enchente; analogamente deve-se ter direção de vazante nos períodos de diminuição do nível médio.

Em princípio, é o que se esperaria que ocorresse no sistema. No entanto, a existência de dois canais na parte sul do sistema, com defasagens e diferentes amplitudes de maré nos mesmos, e os efeitos das interações não lineares da maré, acabam por gerar correntes residuais na direção do Mar de Cubatão para o Mar de Cananéia.

Esse mecanismo de circulação residual dirigida por maré é denominado "bombeamento por maré", para diferenciar da circulação residual gerada por descarga de água doce e tensão do vento.

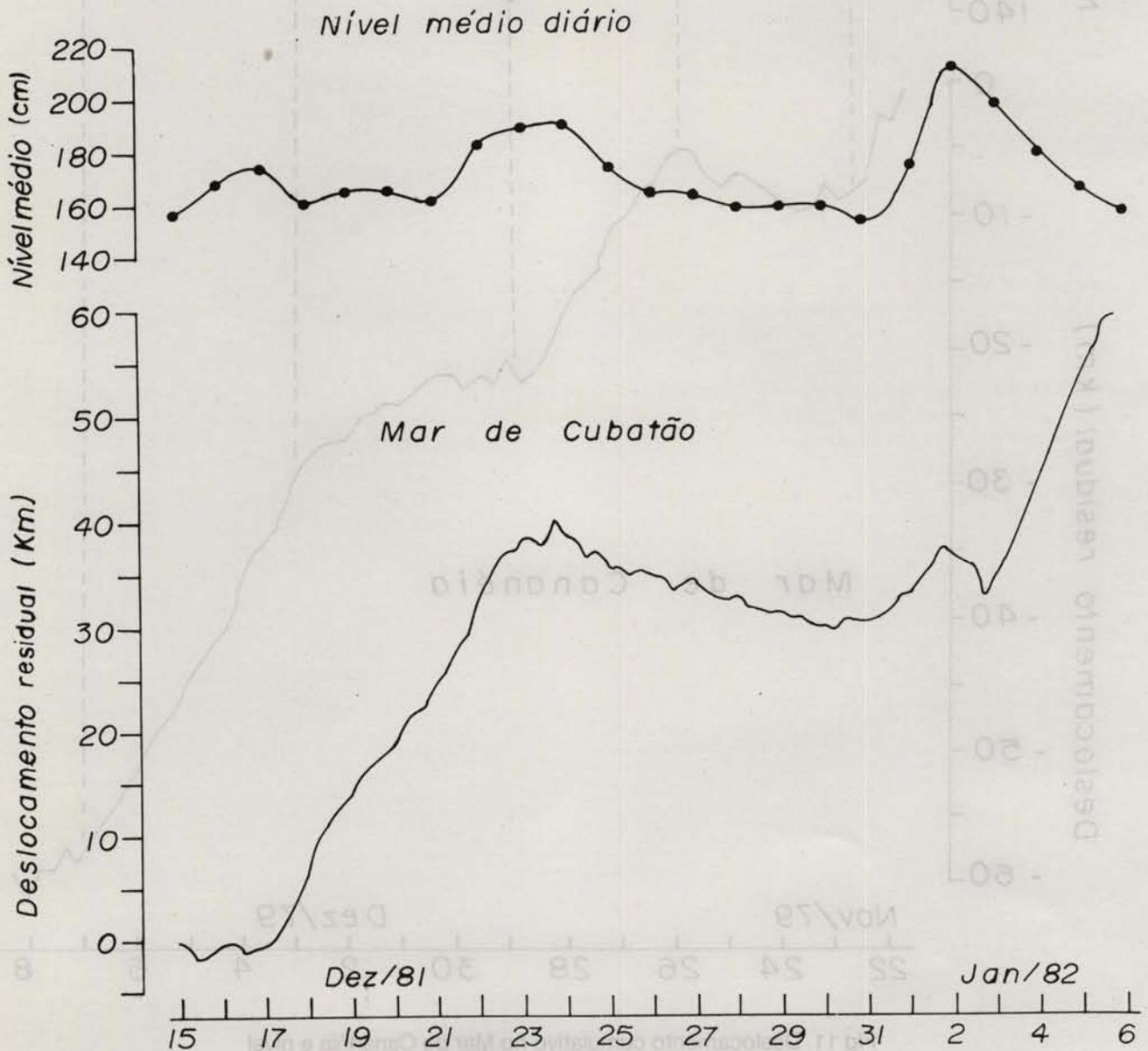


Fig. 12. Deslocamento cumulativo no Mar de Cubatão e nível médio do mar na Base de Cananéia.

Uma avaliação da ordem de grandeza das componentes da velocidade residual associadas com o gradiente de densidade ou com a ação direta da tensão do vento no estuário para as condições médias da região, indica valores respectivamente de quase uma e duas ordens de grandeza menores do que os observados. Esses valores, somados ao fato de que as correntes residuais de fundo apresentam sentidos opostos no Mar de Cananéia e no Mar de Cubatão, enquanto o gradiente longitudinal de densidade tem o mesmo sentido nos dois canais, reforçam a suposição de que as correntes residuais observadas sejam devidas, predominantemente, ao bombeamento por maré. A corrente residual seria, neste caso, predominantemente barotrópica, e o comportamento da circulação baseado nas medições de uma profundidade, poderia, para fins de uma análise preliminar da circulação geral no estuário, ser extrapolado para as secções.

Nesta análise não foi considerado o efeito da eventual contribuição da corrente residual do Mar Pequeno no padrão descrito da parte sul do sistema estuarino. Acredita-se, todavia, que ela não chegue a invalidar o mecanismo proposto, uma vez que medições realizadas nas proximidades da Pedra do Tombo, neste canal, indicaram velocidade residual muito pequena, em direção à Barra de Icapara (Miyao *et al.*, 1986).

Pode-se portanto, de uma forma genérica, dizer que a circulação residual observada é composta de constituintes de diferentes frequências, sendo as principais: uma, na faixa de frequência de maré, originária do bombeamento por maré; outra, resultante do efeito cumulativo de longo período, associada à variação do nível médio do mar em Cananéia. Convém observar que componentes da circulação residual associadas à tensão do vento ou à circulação gravitacional podem, local ou temporariamente, representar contribuições significativas.

Em relação às variações de longo período do nível do mar, pode-se esperar que os processos responsáveis pelos mesmos afetem também as componentes da circulação residual na escala de tempo correspondente. Nesse sentido, as condições meteorológicas em grande escala representam o fator mais importante, uma vez que o vento associado ao sistema de propagação das frentes frias parece ser o fator predominante da variação do nível do mar na região, nas frequências abaixo das de maré (Johannessen, 1967; Castro Filho, 1985).

Castro Filho (*op. cit.*) analisando dados da costa sul-sudeste, entre Cabo Frio (lat. 23°S) e Arvoredo (lat. 27°S), identificou as proximidades de Cananéia como sendo uma região onde as perturbações atmosféricas alcançam a costa, e, a partir daí, se propagam ao longo da mesma em direções opostas. Dessa forma, oscilações do nível do mar são forçadas pelos ventos locais, e, a partir daí, se propagam como ondas ao longo da costa, em direções opostas. As variações do nível do mar nas frequências abaixo das de maré são assim atribuídas a ondas de plataforma continental forçadas por ventos.

As frequências dominantes dessas oscilações, nessa região, se situam nas faixas de 12 a 10 dias, e de 7 a 6 dias, que correspondem a respostas do nível do mar aos ventos com direções predominantes para NE e NW, respectivamente (Castro Filho, *op. cit.*).

Por efeito da ação do vento portanto, tendo o oceano costeiro como agente intermediário, o nível do mar no interior do estuário deve apresentar oscilações em baixas frequências, que induzem por sua vez componentes da corrente residual, as quais se somam às componentes geradas por bombeamento por maré e às demais.

A circulação residual do estuário tem uma importância muito grande, uma vez que pode influir de forma significativa na eficiência da renovação das águas do estuário produzida pela maré, além de ter uma relação direta com o transporte dos sedimentos e poluentes no estuário.

Tabela 4. Velocidades de propagação das principais componentes, calculadas a partir das diferenças de fase entre Cananéia e Subaúna ($\Delta x = 37$ km)

	Frequência angular (graus/hora)	Defasagem graus	Velocidade m/s
O ₁	13,94	18,76	7,7
K ₁	15,04	17,79	8,7
M ₂	28,98	42,54	7,0
S ₂	30,00	41,86	7,3
M ₃	43,47	78,28	5,7
M ₄	57,96	116,45	5,1

Conclusões

A análise preliminar dos dados de altura de maré e de correntes no sistema estuarino de Cananéia permitiu conhecer as características gerais da maré no sistema, as modificações que ocorrem em sua propagação no interior do estuário, bem como avaliar a correspondente corrente residual. As principais conclusões dessa análise, as indicações sugeridas pelos resultados, e as hipóteses levantadas em função dos mesmos, são resumidas a seguir.

O espectro da maré de Subaúna apresenta energias maiores que o de Cananéia (Fig. 1), principalmente nas frequências SD, 3D e 4D (Figs 2,3,4). Tanto em Subaúna como em Cananéia, tem-se marés predominantemente semidiurnas, com números de forma F iguais a 0,27 e 0,20, respectivamente. As amplitudes de maré em Subaúna e Cananéia são de 97 e 83 cm, respectivamente, na sizígia, e 13 cm em ambos os locais na quadratura, sendo esses valores resultantes da análise harmônica da maré nesses locais (Tab. 1).

A maré observada no sistema, resultante de duas ondas progredindo em direções opostas, provenientes das duas Barras, tem características intermediárias entre progressiva e estacionária. As componentes de maré de Subaúna apresentam uma defasagem e amplificação em relação a Cananéia. Componentes de pequeno fundo são importantes na distorção das componentes fundamentais; a razão das amplitudes de M₄ e M₂, que pode ser considerada como uma medida desta distorção, vale 0,19

em Cananéia e 0,15 em Subaúna; as respectivas diferenças de fase são de 22° e 54°, resultando numa assimetria entre enchente e vazante maior em Subaúna do que em Cananéia (Fig. 7). As velocidades de propagação das ondas, calculadas a partir das defasagens fornecidas pelas análises de Subaúna e Cananéia (Tab. 4) concordam razoavelmente com os valores teóricos esperados, considerando-se que há o efeito do atrito. A onda de maré M₃ é particularmente amplificada em Subaúna, atingindo 12,48 cm (Tab. 1), provavelmente por ocorrerem no canal condições próximas às de ressonância, para essa frequência.

No espectro das correntes da estação B1 no Mar de Cananéia e estação B2 no Mar de Cubatão, as componentes SD, 3D e 4D são as mais importantes, sendo que a importância relativa das componentes 4D no Mar de Cubatão é muito grande (Figs 5 e 6). Nas estações amostradas, as correntes diurnas praticamente inexistem. O número de forma F das correntes no Mar de Cananéia e no Mar de Cubatão é de 0,12 e 0,03, respectivamente, indicando correntes semidiurnas, embora as componentes 3D e 4D sejam muito significativas nesses locais (Tab. 2). A excursão média de enchente e vazante da maré semidiurna no Mar de Cananéia tem o valor de 9,2 km, na sizígia, e de 2,6 km, na maré de quadratura. No Mar de Cubatão esses valores são, respectivamente, de 5,9 km e de 1,5 km (Tab. 3).

A razão das amplitudes das correntes M₄ e M₂ é de 0,33 para o Mar de Cananéia e 0,64 para o Mar de Cubatão. A diferença de fase entre M₂ e M₄ é de 139° nos dois locais. Esses valores indicam distorções acentuadas das curvas de corrente (Fig. 8), com velocidades de pico de vazante maior que de enchente, e duração de enchente maior que de vazante.

Nos espectros das correntes residuais do Mar de Cananéia e Mar de Cubatão, nas frequências mais altas, alguns picos presentes podem ser atribuídos a eventuais componentes de pequeno fundo não computadas na análise (Figs 9 e 10). Os deslocamentos residuais médios nas profundidades amostradas apresentaram valores de 3,5 km/dia no Mar de Cananéia, na direção de vazante, e de 2,7 km/dia no Mar de Cubatão, na direção de enchente (Figs 11 e 12).

A circulação residual observada na região é aparentemente resultante da soma de dois efeitos, sendo o principal originário do bombeamento por maré (que produz correntes residuais predominantes do Mar de Cubatão para o Mar de Cananéia, no sentido horário) e outro associado à variação do nível do mar em Cananéia (que produz correntes residuais de enchente ou vazante, relacionadas respectivamente ao aumento ou diminuição do nível médio no estuário).

O fato da variação do nível médio do estuário em escala de tempo mais longa do que os ciclos predominantes de maré ser bem correlacionada com o vento, sugere que a circulação residual seja também função dessa influência.

Como a obtenção dos dados apresentados neste trabalho não foi programada com o objetivo específico de se fazer este tipo de análise, as séries de dados não têm a abrangência espacial nem temporal desejada. Por este motivo, esta análise tem caráter preliminar. De qualquer forma, os resultados obtidos neste trabalho, embora limitados pela duração e extensão geográfica das observações, evidenciam a necessidade e a importância do

estudo da maré e das correntes de maré em regiões estuarinas, com especial atenção nas componentes de pequeno fundo. Tais estudos podem trazer resultados de grande utilidade na calibração e verificação de modelos matemáticos de estuários, bem como em vários campos de pesquisa interdisciplinar. Por outro lado, as evidências de uma relação direta entre a corrente residual do estuário e a variação do nível médio do mar, e este, por sua vez, com as condições meteorológicas, em particular o vento, reforçam a necessidade de estudos mais abrangentes, que permitam identificar os vários mecanismos associados que determinam a dinâmica da região.

Referências bibliográficas

- BOON, J.D. III & BYRNE, R.J. 1981. On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Mar. Geol.* 40(1/2):27-48.
- CASTRO FILHO, B. M. 1985. Subtidal response to wind forcing in the south Brazil Bight during winter. Tese de doutorado. University of Miami. 211 p.
- DEFANT, A. 1961. *Physical oceanography*. Oxford, Pergamon Press. v. 2, 598 p.
- FRANCO, A.S. 1975. Componentes harmônicas da maré em pequenos fundos. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. 69 p.
- _____. 1981. Tides: fundamentals, analysis and prediction. São Paulo, IPT. 232p.
- _____. & HARARI, J. 1983. Improved techniques of short period tidal analysis. Canadian Hydrographic Service Centennial Conference, Ottawa, 1983, p. 42-45.
- _____. 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.
- _____. & ROCK, N.J. 1971. The fast Fourier Transform and its application to tidal oscillations. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 20:145-199.
- GEOBRÁS. 1966. *Complexo Valo Grande - Mar Pequeno - Rio Ribeira de Iguape*. São Paulo, DAEE. 2 v.
- GODIN, G. 1972. *The analysis of tides*. Liverpool, Liverpool University Press. 264p.
- HUTHNANCE, J.M. 1980. On shelf-sea "resonance" with application to Brazilian M₃ tides. *Deep-Sea Res.*, 27A:347-366.
- IEEE. 1967. Group on Audio and Electro-acoustics. Special issue on Fast Fourier Transform. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, AU-15 (2):43-113.

- IPPEN, A.T. & HARLEMAN, D.R.F. 1966. Tidal dynamic estuaries. In: Ippen, A. T., ed. Estuary and coastline hydrodynamics. New York, McGraw-Hill. p.493-545.
- JOHANNESSEN, O.M. 1967. Preliminary studies on the mean daily oscillations of sea level and atmospheric pressure at Cananéia and Santos on the southern part of the Brazilian coast. *Contrções Inst. oceanogr. Univ. S Paulo, sér. Oceanogr. fís.*, (9):8-15.
- LORENZZETTI, J.A. 1976. Aplicação da técnica de análise espectral cruzada ao estudo da correlação entre as oscilações do nível do mar observadas em Cananéia e Bom Abrigo. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 118p.
- MESQUITA, A.R. de & HARARI, J. 1983. Tides and tide gauges of Cananéia and Ubatuba - Brazil (lat 24°). *Relat. int. Inst. Oceanogr. Univ. S Paulo*, (11):1-14.
1987. Harmonic constants of tides and currents of the southern Brazilian shelf. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DA COSTA SUL E SUDESTE BRASILEIRA: SÍNTESE DOS CONHECIMENTOS, Cananéia, 1987. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo. v. 2. p.415-422.
- MINIUSSI, I.C. 1959. Propagação da maré em torno da Ilha de Cananéia. *Contrções Inst. oceanogr. Univ. S.Paulo., sér. Oceanogr. fís.*, (2):1-5.
- MIYAO, S.Y.; NISHIHARA, L. & SARTI, C.C. 1986. Características físicas e químicas do sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape. *Bolm Inst. oceanogr.*, S Paulo, 34(único):23-36.
- PINGREE, R.D. & GRIFFITHS, D.K. 1979. Sand transport paths around the British Isles resulting from M₂ and M₄ tidal interactions. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, 59:497-513.
- SMITH, N.P. 1979. Tidal dynamics and low-frequency exchanges in the Aransas Pass, Texas. *Estuaries*, 2(4):218-227.

(Recebido em 02-12-88;
aceito em 08-08-89)