

# Simulações numéricas da circulação marítima na região costeira do Estado de São Paulo

Joseph Harari, Ricardo de Camargo, Simone Seixas Picarelli e Hemerson Everaldo Tonin

**Resumo ?** O modelo numérico hidrodinâmico POM foi implementado para a região costeira do Estado de São Paulo, em três grades com espaçamento horizontal de 01Km; a seguir, os resultados obtidos foram utilizados como condições de contorno em aninhamentos para áreas costeiras rasas, com espaçamento de 100m. Foram realizados processamentos considerando circulações geradas por marés, ventos e variações de densidade, separadamente ou em conjunto. A modelagem de alta resolução permite determinar detalhes da circulação marítima, sobretudo em regiões costeiras rasas, como nos Canais de Bertioga, do Porto de Santos e de São Vicente e no complexo estuarino de Cananéia - Iguape.

**Palavras-chave ?** Modelagem numérica hidrodinâmica, Região costeira do Estado de São Paulo, marés, vento, gradientes de densidade.

## I. INTRODUÇÃO

O modelo numérico hidrodinâmico desenvolvido pela Universidade de Princeton (POM) foi implementado para a região costeira do Estado de São Paulo - de 44.6 a 48° W e de 23.3 a 25.2° S, desde a linha da costa até a isóbata de 70 m aproximadamente (Harari & Camargo, 1998; Harari, Camargo & Cacciari, 2000; Tonin & Harari, 2000; Picarelli, 2001).

O modelo foi utilizado em três grades cobrindo a região de interesse, para as áreas Norte, central e Sul do Estado de São Paulo, com espaçamento horizontal de 1 Km e 11 níveis sigma na vertical. A seguir, os resultados obtidos foram utilizados como condições de contorno em 20 aninhamentos, para as áreas costeiras rasas (até cerca de 20 m), com espaçamento horizontal de 100 m e novamente 11 níveis na vertical.

Foram realizados processamentos considerando as circulações geradas por marés, ventos e variações de densidade, separadamente ou em conjunto. Como condições de contorno, as marés são especificadas por modelo numérico de escala maior, ventos de superfície são fornecidos por modelo numérico atmosférico e valores de densidade são definidos a partir de medições em diversas campanhas oceanográficas. Valores de vento e de densidade podem também ser especificados a partir de dados climatológicos representativos de médias mensais, sazonais ou anuais.

Joseph Harari, [joharari@usp.br](mailto:joharari@usp.br), Ricardo de Camargo, [ricamarg@model.iag.usp.br](mailto:ricamarg@model.iag.usp.br), Simone Seixas Picarelli, [simpic@usp.br](mailto:simpic@usp.br), Hemerson Everaldo Tonin, [hemer@usp.br](mailto:hemer@usp.br) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Praça do Oceanográfico 191, Cidade Universitária, São Paulo, Tel. +55-11-3818.6576, Fax +55-11-3818.6610.

Trabalho apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## II. METODOLOGIA

As principais características da versão do POM utilizada são as seguintes (Blumberg & Mellor, 1987): é tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas completas, para a elevação do nível do mar, correntes, temperatura, salinidade e densidade; essas equações são escritas na forma de fluxo; se adotam as aproximações de Boussinesq e hidrostática; a solução na vertical é com base na coordenada vertical sigma, que acompanha o relevo; se considera um fechamento turbulento de 2a. ordem para os coeficientes de viscosidade e de difusão na vertical, com equações para a energia cinética turbulenta e para a escala do comprimento de turbulência; a viscosidade e a difusão horizontais tem parametrização do tipo Smagorinsky; nas equações se tem a separação dos modos externo e internos, cuja evolução temporal é determinada com passos de tempo diferentes; e na parte numérica, o esquema de leapfrog é utilizado para a integração no tempo e na horizontal, enquanto que a integração vertical é efetuada com um esquema implícito.

Simulações da propagação de ondas de maré são realizadas com condições de contorno definidas pelo modelo de plataforma de Harari & Camargo (1994) e análises de séries temporais geradas pelo modelo através do Método Harmônico de Análise de Maré (Franco, 1988; Franco & Harari, 1987); efeitos meteorológicos são considerados nos processamentos através dos valores médios mensais, fornecidos por HELLERMAN & ROSENSTEIN (1983); e efeitos de variações dos campos de temperatura e salinidade são inseridos na modelagem através dos valores médios mensais de Levitus & Boyer (1994).

Processamentos com efeitos combinados de maré, meteorológicos e de densidade permitem estudos de casos, com ênfase em variações extremas do nível do mar, considerando condições meteorológicas e valores da maré meteorológica na plataforma fornecidos pelo site <http://www.surge.iag.usp.br> (Camargo et al, 2000). Nesses processamentos, podem ser utilizadas medições "in situ" de temperatura e salinidade da água do mar.

## III. RESULTADOS

Exemplos dos resultados obtidos com as simulações se encontram nas Figuras 1 e 2, com correntes de maré instantâneas na superfície, no litoral Norte (na grade básica) e no litoral Sul do Estado de São Paulo (nas grades aninhadas para a região de Cananéia); nesses gráficos, é interessante notar as intensas correntes de maré reproduzidas pela modelagem na entrada do estuário de Cananéia – Iguape.

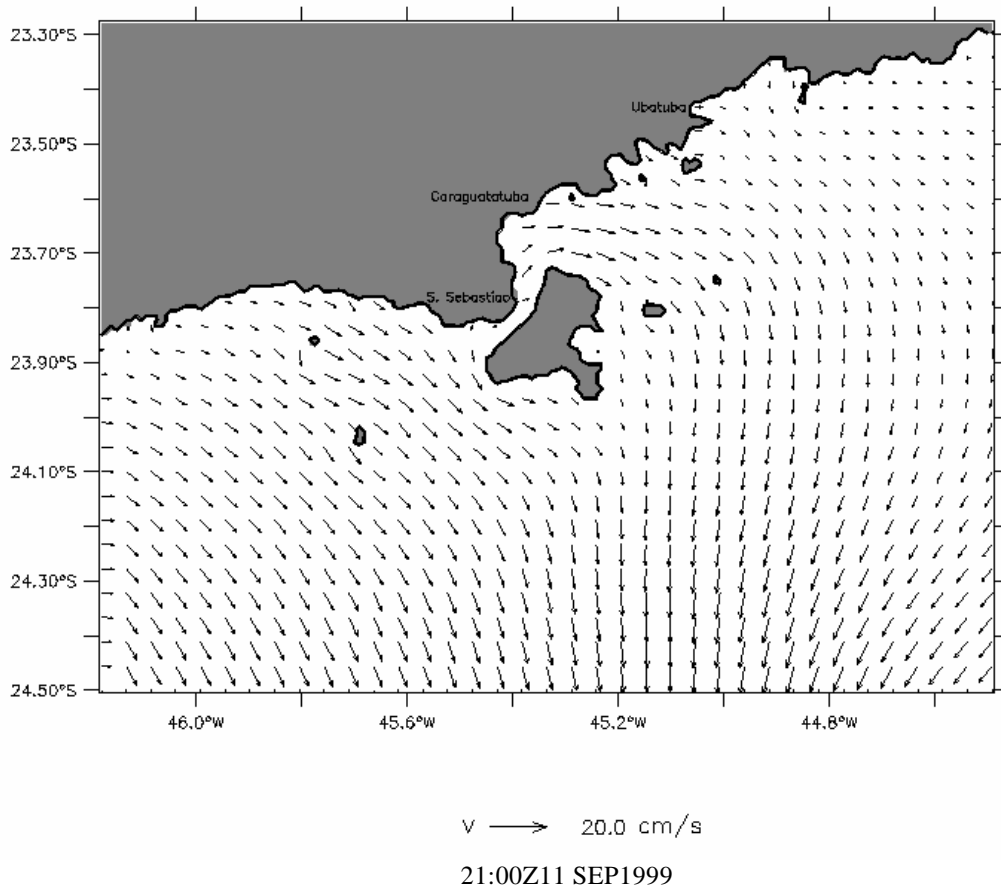


Fig. 1 - Correntes de maré instantâneas, na superfície, no litoral Norte do Estado de São Paulo.

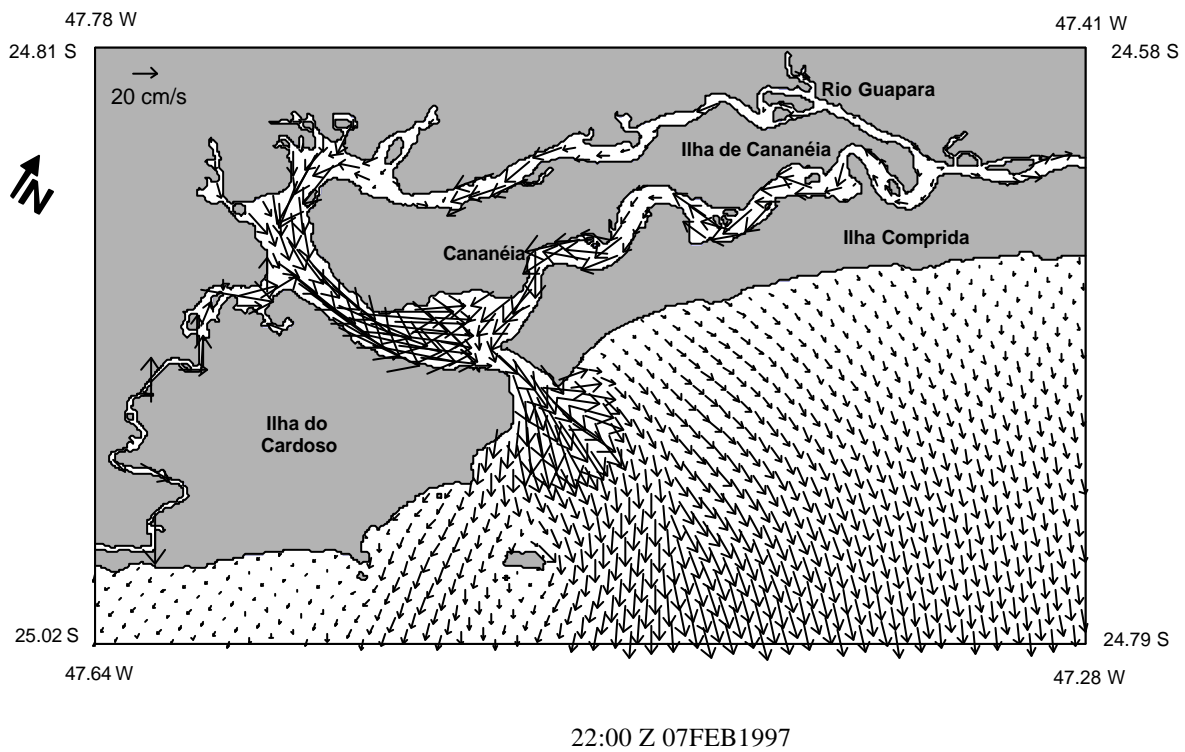


Fig. 2 - Correntes de maré instantâneas, na superfície, na região de Cananéia.

elevation (cont), temperature (sh) and currents – B. SANTISTA

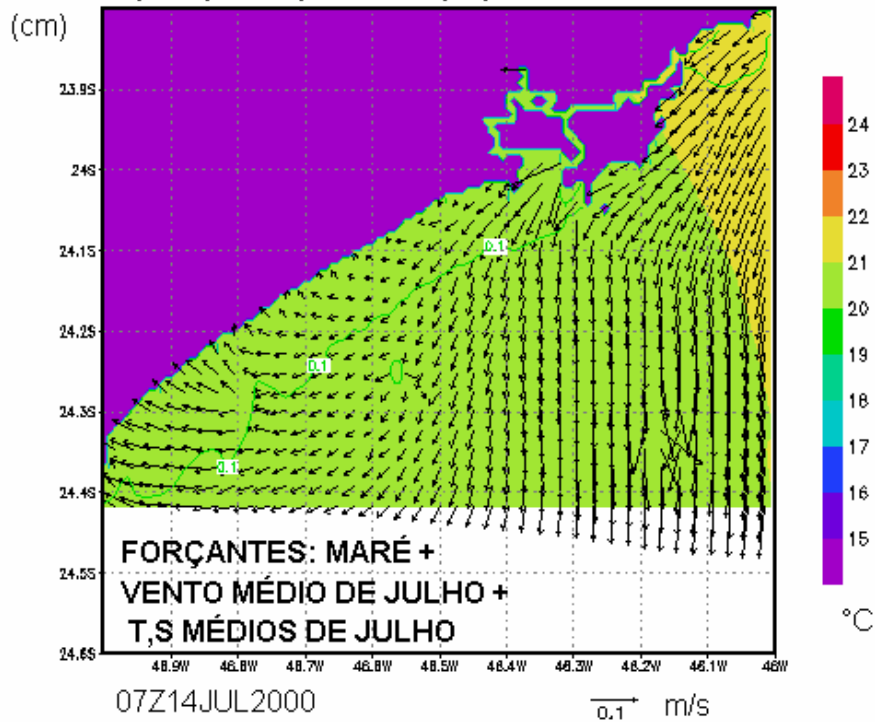


Fig. 3– Circulação de maré na superfície, na vazante de sizígia, considerando adicionalmente os efeitos de ventos médios de Julho e valores de temperatura e salinidade médios de Julho.

FORÇANTES: MARÉ + VENTO DE SW DE 10 m/s +  
T, S MÉDIOS DE JULHO  
Baixada Santista 07Z14JUL2000

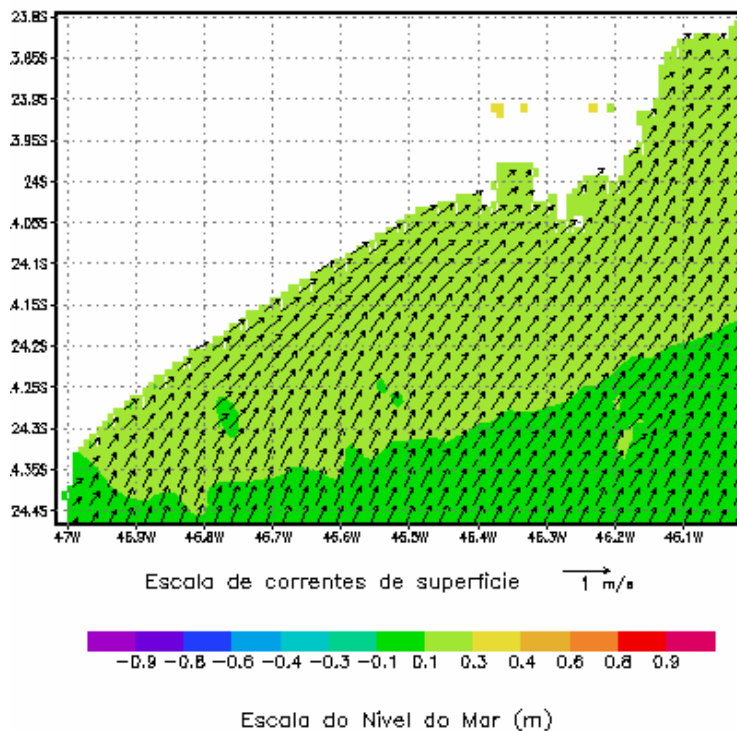


Fig. 4 – Circulação de maré na superfície, na vazante de sizígia, considerando adicionalmente os efeitos de ventos de SW com 36 Km/h (influência de frente fria) e valores de temperatura e salinidade médios de Julho.

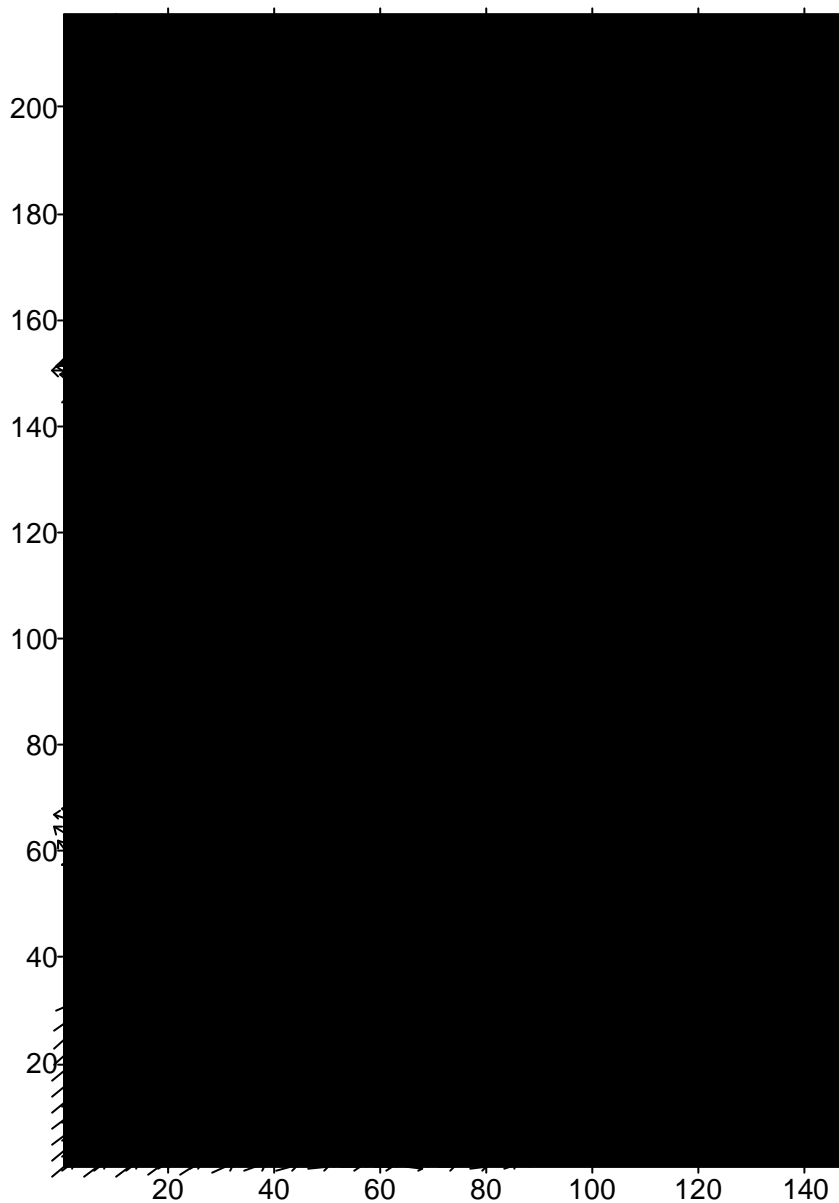


Fig. 5 - Correntes de superfície na Baía e Porto de Santos, para maré vazante na sizígia com a adição de correntes de deriva geradas por ventos de SW com 50 Km/h (representação de um vetor a cada seis calculados).

Processamentos referentes a circulações sazonais médias e eventos extremos são apresentados nas Figuras 3 e 4, referentes à região central do Estado de São Paulo, incluindo a Baixada Santista; esses resultados contemplam, respectivamente, marés e condições médias de Julho (situação típica de inverno) e marés com ventos fortes de SW, de 36 Km/h (influência de frentes frias); essas figuras mostram como a incursão de frentes frias modifica radicalmente os padrões de circulação médios, gerando correntes muito mais intensas, aproximadamente na direção do vento.

Finalmente, a Figura 5 mostra resultados de simulação considerando marés e intensos ventos de SW, de 50 Km/h, em grade aninhada cobrindo a Baía de Santos e o Canal do

Porto de Santos; esses ventos chegam a anular as correntes vazantes, ou até mesmo a inverter seu sentido.

#### IV. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram a grande importância das regiões interiores rasas, que apresentam significativa intensificação dos sistemas de correntes e transportes. De fato, um aspecto de grande importância no aprimoramento da modelagem hidrodinâmica das áreas costeiras do Estado de São Paulo se encontra na adoção de aninhamentos de grade, com espaçamentos em torno de 100 m. Isto permitiu uma melhor definição das linhas de costa e significativo aumento de precisão dos campos de correntes calculados.

Dessa forma, a modelagem de alta resolução permite determinar detalhes da circulação marítima, sobretudo em regiões costeiras rasas, como nos Canais de Bertioiga, do Porto de Santos e de São Vicente e no complexo estuarino de Cananéia - Iguape. Influências batimétricas também são encontradas nos sistemas de correntes, desde as maiores, como a Ilha de São Sebastião, até as menores, como alguns parciais próximo à Praia Grande.

A modelagem implementada poderá contribuir em atividades ambientais e sócio-econômicas, como por exemplo em segurança de navegação, apoio à pesca, controle da erosão, monitoramento da qualidade da água, etc ...

Como exemplos de utilização da modelagem hidrodinâmica implementada, se tem a simulação da dispersão de óleos e propriedades (como concentrações de oxigênio e nutrientes) e a implantação de previsões operacionais da circulação costeira.

#### REFERÊNCIAS

Blumberg, A. F. & Mellor, G. L. - 1987 - "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model" - In: Three-Dimensional Coastal Ocean Models, vol 4, Ed: N. S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D. C., USA, p 1 - 16.

CAMARGO, R. & HARARI, J. & DIAS, P. L. S. & CARUZZO, A. & ZACHARIAS, D. C. - 2000 - "Implementação de sistema de previsão de marés meteorológicas no Atlântico Sudoeste" - publicado em formato digital pelo XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, realizado no Rio de Janeiro (RJ), de 16 a 20 de Outubro de 2000, p. 2646 - 2654.

FRANCO, A. S. - 1988 - "Tides: fundamentals, analysis and prediction" - Publicações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, S. Paulo, 232p.

FRANCO, A. S. & J. HARARI - 1987 - "Computer programs for tidal data checking, correction, analysis and prediction by the harmonic method" - Relatório Interno do Instituto oceanográfico, Universidade de São Paulo, vol 16, p.1 - 65.

Harari, J. & Camargo, R. - 1994 - "Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico" - Boletim do Instituto Oceanográfico da USP, nº 42 (1), p. 35 - 54.

HARARI, J. & CAMARGO, R. - 1998 - "Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré" - Revista Brasileira de Oceanografia, vol. 46 (2), p. 135 - 156.

HARARI, J. & CAMARGO, R. & CACCIARI, P. L. - 2000 - "Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na Baixada Santista" - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 5, nº 2, p. 71 - 87.

Hellerman, S. & Rosenstein, M. - 1983 - "Normal monthly wind stress over the World Ocean with error estimates" - Journal of Physical Oceanography, vol. 13, p. 1093 - 1105.

Levitus, S & Boyer, T. P. - 1994 - "World Ocean Atlas 1994" - Technical Report vol. 4, National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory, 117 p.

Picarelli, S. S. - 2001 - "Modelagem numérica da circulação de maré na região costeira centro-sul do Estado de São Paulo" - Dissertação de mestrado no Instituto Oceanográfico da USP, 116 p.

TONIN, H. E. & HARARI, J. - 2000 - "Simulação da circulação de maré no litoral Norte do Estado de São Paulo" - Resumos da XIII Semana Nacional de Oceanografia, organizada pelo Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMAR) da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), em