

Modelagem numérica da circulação marítima na região costeira do Estado de São Paulo

Joseph Harari & Ricardo de Camargo & Carlos Augusto de Sampaio França
& Afranio Rubens de Mesquita & Simone Seixas Picarelli

Resumo — O modelo numérico hidrodinâmico POM foi implementado para a região costeira do Estado de São Paulo, em grade com 150 x 450 pontos e espaçamento horizontal de 01 Km. O modelo possibilita simulações das circulações geradas por marés, ventos e variações de densidade, separadamente ou em conjunto. Os processamentos permitem o entendimento dos padrões de correntes observados, como por exemplo a importância relativa das forçantes nos sistemas de correntes. A modelagem implementada possibilita a reprodução de correntes extremas, o fornecimento de condições de contorno em grades aninhadas cobrindo áreas interiores rasas e, inclusive, previsões operacionais da circulação costeira.

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 inicialmente implementado para três grades da região costeira do Estado de São Paulo, considerando sua parte central (Harari & Camargo, 1998), a região centro-sul (Picarelli, 2001) e a região centro-norte (Tonin, 2001). Essas três grades possuem orientação EW-NS, espaçamento horizontal de 1 Km e 11 níveis sigma na vertical. A seguir, os resultados obtidos foram utilizados como condições de contorno em aninhamentos para as áreas costeiras rasas, com espaçamento horizontal de 100 m e novamente 11 níveis na vertical (Harari, Camargo & Cacciari, 2000; Harari, Camargo & Miranda, 2002).

No presente trabalho, é apresentada a modelagem de toda a região costeira do Estado de São Paulo numa única grade, cujos eixos são orientados nos sentidos perpendicular e paralelo à costa, com 150 x 450 pontos, mantendo as resoluções horizontal e vertical acima mencionadas (1 Km e 11 níveis sigma). O modelo possibilita simulações das circulações geradas por marés, ventos e variações de densidade, separadamente ou em conjunto. Os processamentos permitem o entendimento dos padrões de correntes observados, como por exemplo a importância relativa das forçantes nos sistemas de correntes.

Joseph Harari (joharari@usp.br), Carlos Augusto de Sampaio França (cafranca@usp.br), Afranio Rubens de Mesquita (ardmesqu@usp.br), Simone Seixas Picarelli (simpic@usp.br) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Cidade Universitária, São Paulo SP, Tel. +55-11-3091.6576. Ricardo de Camargo (ricamarg@model.iag.usp.br) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, Cidade Universitária, São Paulo SP, Brasil, Tel. +55-11-3091.4683.

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.

Na versão implementada para a área costeira do Estado de São Paulo, as marés nos contornos são especificadas por modelo numérico de escala de plataforma (Harari & Camargo, 1994) ou global; 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 (Hellerman & Rosenstein, 1983; 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

Neste trabalho é apresentado um exemplo de estudo referente a uma circulação muito intensa que ocorreu em 20 a 22 de Janeiro de 1997. Inicialmente, a Figura 1 mostra as variações do nível médio do mar calculadas em Alamo

(Santos, SP) no decorrer de todo o mês de Janeiro, as quais são baseadas em filtragens das observações horárias do nível da superfície do mar nesta estação maregráfica (Figura 2). De fato, entre os dias 20 e 22 o nível médio do mar apresentou uma elevação de aproximadamente 50 cm, desde -20 cm até +30 cm (valores referentes à média mensal); esta elevação, devida basicamente a efeitos meteorológicos de meso-escala, foi acompanhada de variações acentuadas do nível do mar devidas às marés de sizígia, provocando correntes enchentes foram muito intensas.

As Figuras 3 e 4 mostram os mapas de correntes de superfície calculadas pelo modelo num instante de máxima corrente de maré enchente (02:00 GMT de 21 de Janeiro de 1997). Na Figura 3 se encontra o efeito isolado do vento (anulando a contribuição da maré), enquanto que na Figura 4 são representados os efeitos combinados de maré e vento. Note-se que, nessas figuras, é representado um vetor de corrente a cada 31 calculados, de modo a facilitar a visualização das saídas do modelo. No instante considerado, o efeito isolado do vento produziu uma corrente de superfície máxima com 56.3 cm/s (próximo à Ilha de São Sebastião), enquanto que a adição da influência de maré elevou este valor para 99.2 cm/s (na Barra de Cananéia).

Detalhes da circulação em regiões específicas são apresentados nas Figuras 5 e 6, referentes à região do estuário de Cananéia – Iguape e à área contígua à Ilha de São Sebastião, no sul e norte do Estado de São Paulo, respectivamente. Deve-se notar que essas figuras não constituem resultados de grades aninhadas, apenas a seleção de saídas do modelo em sub-regiões na grade original (mantendo-se portanto a resolução horizontal de 1 Km). Entretanto, devido à limitação espacial, podem ser apresentados todos os vetores calculados (pelo processamento considerando os efeitos combinados de maré e vento). Nessas figuras, é notória a grande intensificação das correntes nas duas entradas do estuário de Cananéia – Iguape, bem como a enorme influência da Ilha de São Sebastião (e do Canal de São Sebastião) na intensificação e direcionamento das correntes costeiras. Evidentemente, o uso de grades aninhadas nessas áreas costeiras, com espaçamentos em torno de 100 metros, deve produzir maior detalhamentos das correntes (especialmente a influência da linha da costa e da batimetria).

IV. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram a grande utilidade da modelagem numérica hidrodinâmica costeira e as facilidades proporcionadas pelos modernos recursos computacionais, que permitem simulações de regiões extensas com alta resolução espacial.

A modelagem implementada possui um vasto conjunto de aplicações, incluindo o apoio à navegação e à pesca; ademais, podem ser implementadas grades aninhadas em regiões interiores rasas, como estuários e áreas portuárias, cujas condições de contorno são definidas pelo modelo aqui apresentado. Com as grades aninhadas, os resultados de modelagem podem proporcionar subsídios para o controle da erosão, monitoramento da qualidade da água, apoio a obras de engenharia, etc ...

Finalmente, outra aplicação importante da modelagem hidrodinâmica se encontra na sua utilização em previsões operacionais da circulação costeira (em tempo real), considerando estimativas de correntes e de variações do nível da superfície do mar com antecedência de 1 a 3 dias.

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.
- 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, n° 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, n° 2, p. 71 - 87.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. & MIRANDA, L. B. - 2002 - "Modelagem numérica hidrodinâmica tridimensional da região costeira e estuarina de São Vicente e Santos (SP)" - Pesquisa Naval - Suplemento Especial da Revista Marítima Brasileira, n° 15, p. 79 - 97.
- 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. - 2001 - "Modelagem numérica da circulação da região costeira centro-norte do Estado de São Paulo" - Dissertação de mestrado no Instituto Oceanográfico da USP, 87 p.

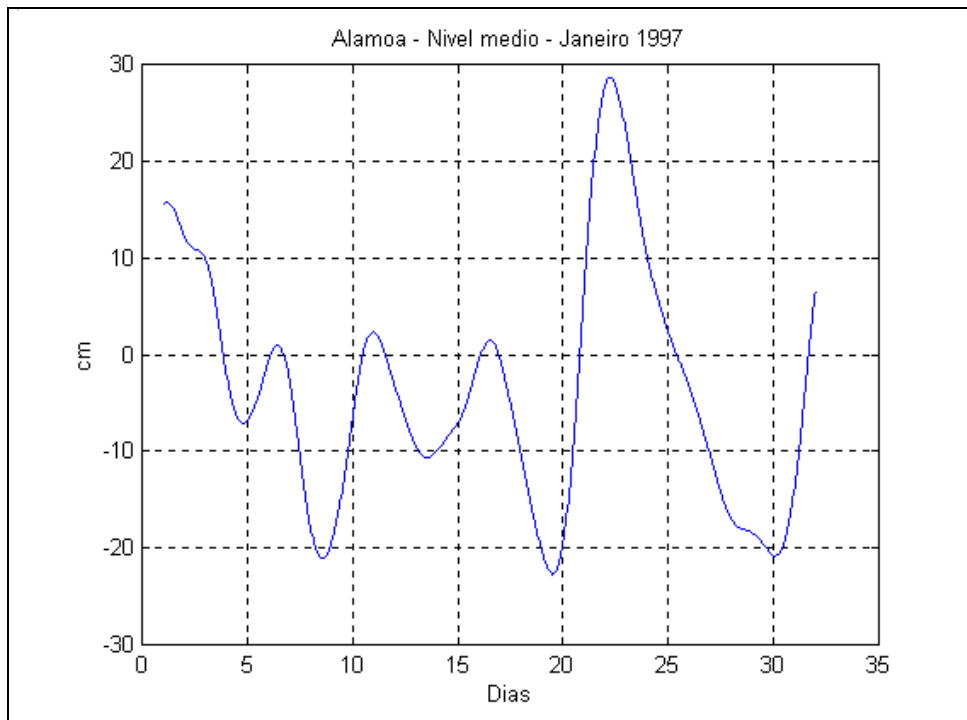


Fig. 1 – Variações do nível médio do mar em Alamoia (Santos SP), em Janeiro de 1997.

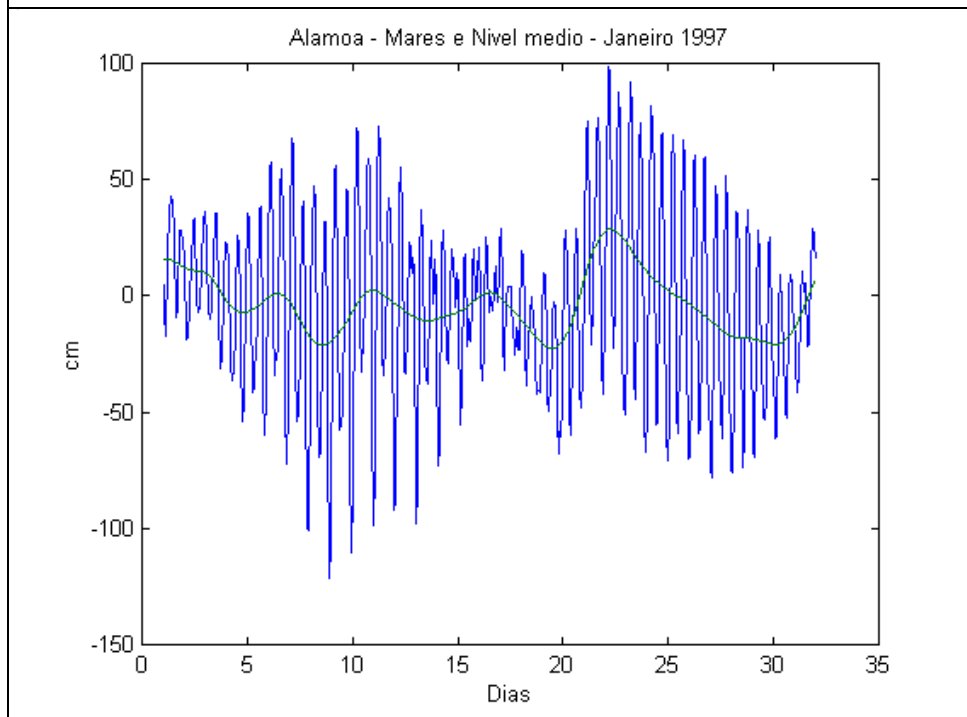


Fig. 2 – Medições do nível da superfície do mar em Alamoia (Santos SP), em Janeiro de 1997.

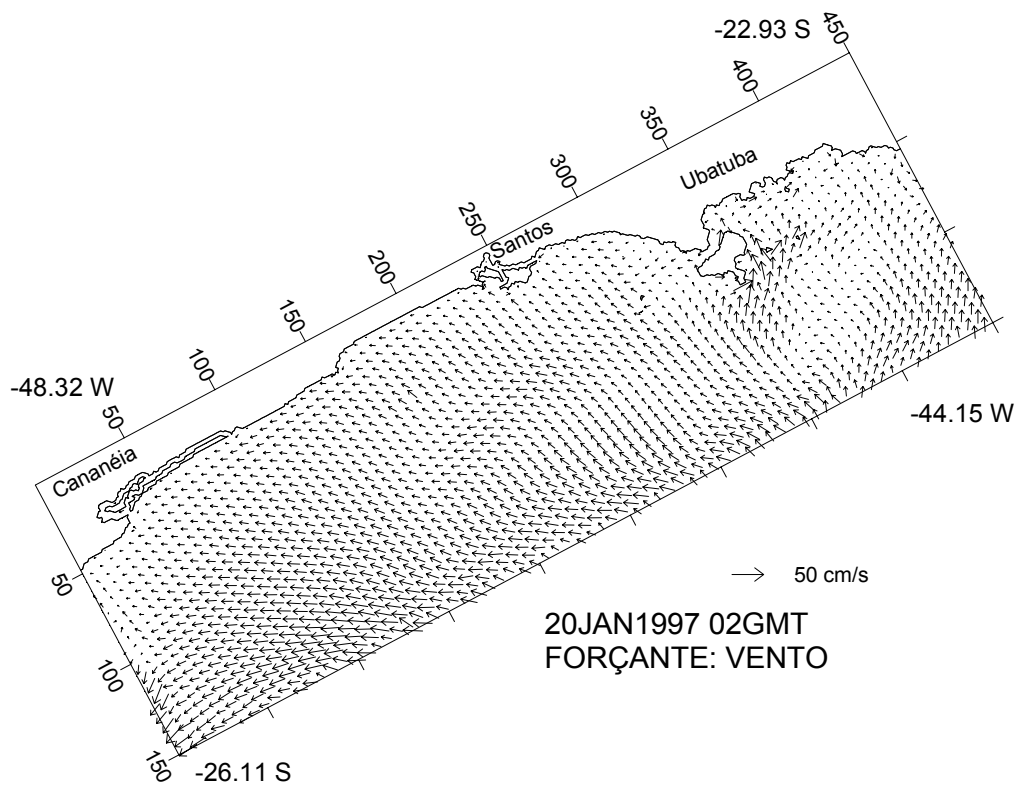


Fig 3. Correntes de superfície calculadas pelo modelo, considerando forçante de vento (plotagem de 1 vetor a cada 31 calculados).

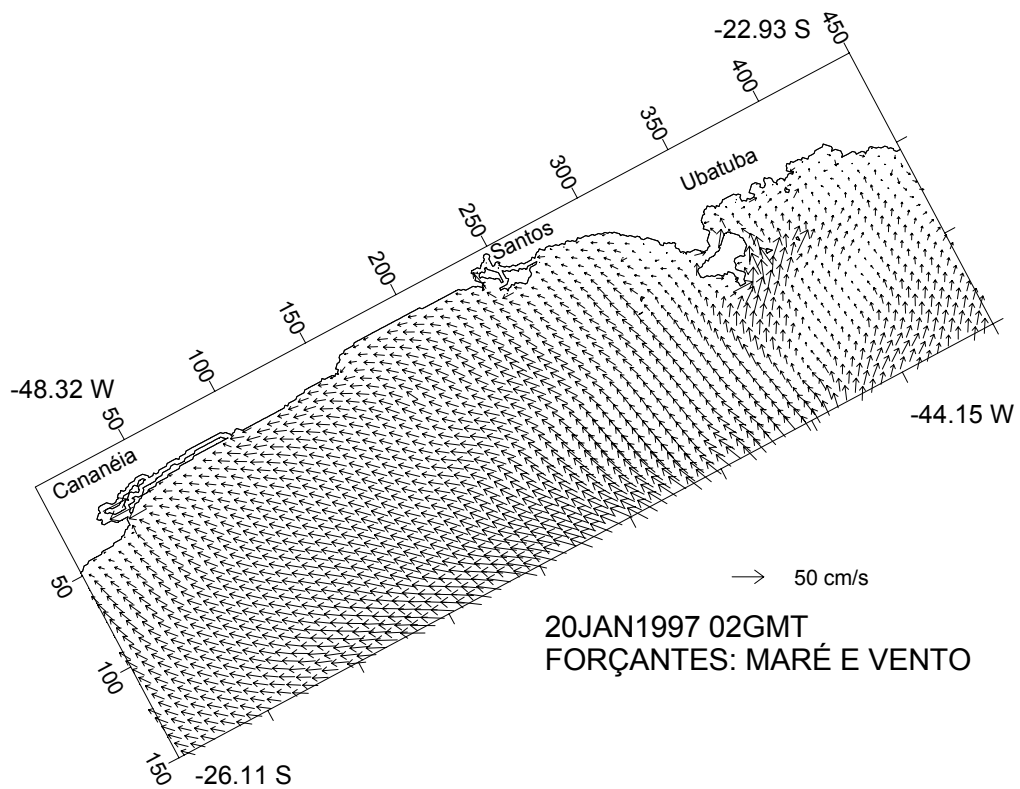


Fig 4. Correntes de superfície calculadas pelo modelo, considerando forçantes de maré e vento (plotagem de 1 vetor a cada 31 calculados).

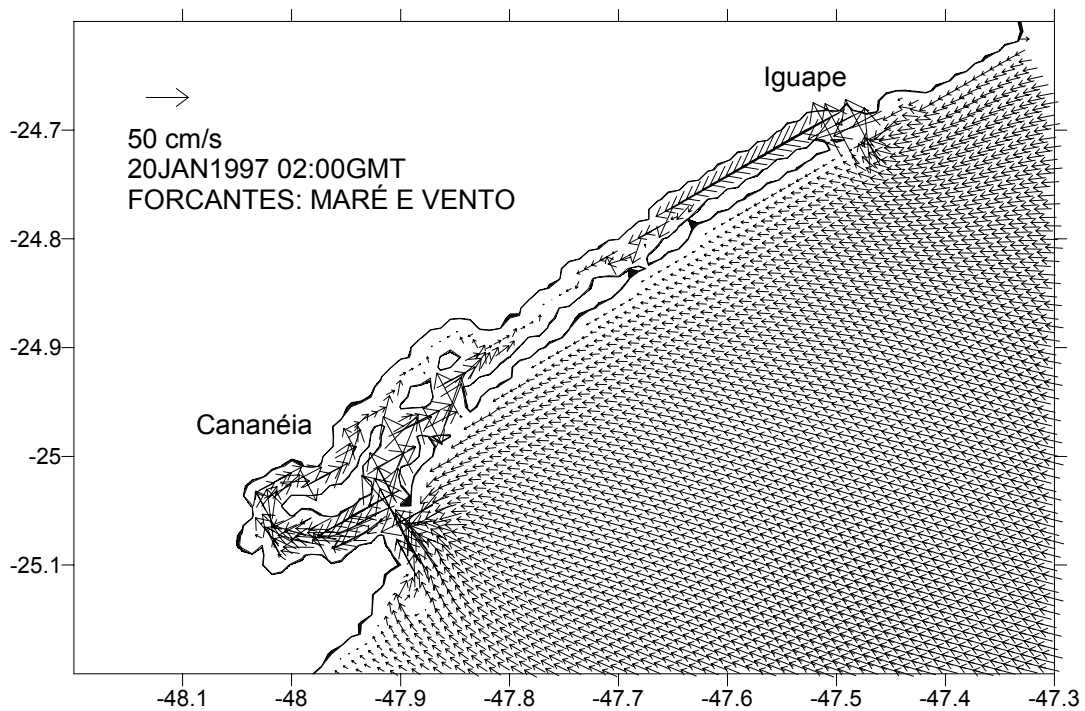


Fig 5. Correntes de superfície calculadas pelo modelo na região Sul do Estado de São Paulo, considerando forçantes de maré e vento (plotagem de todos os vetores calculados).

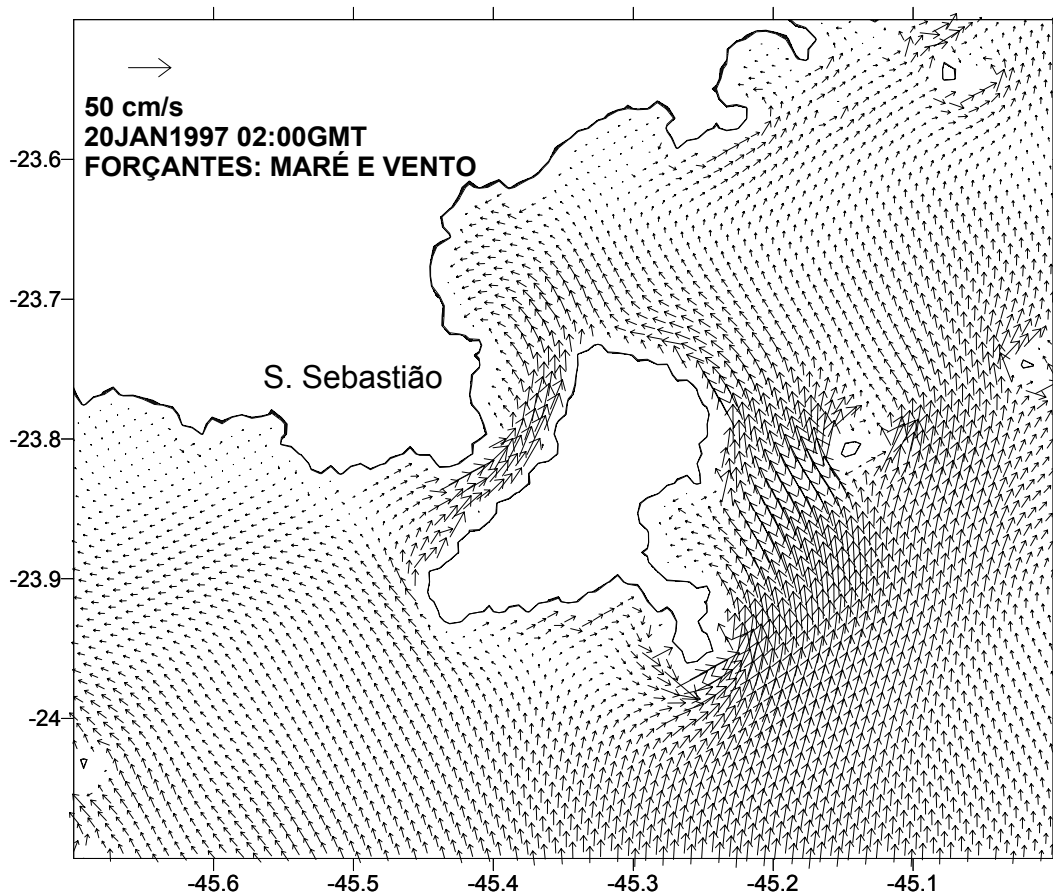


Fig 6. Correntes de superfície calculadas pelo modelo na região Norte do Estado de São Paulo, considerando forçantes de maré e vento (plotagem de todos os vetores calculados).