

Simulações Numéricas da Dispersão de Substâncias no Porto e Baía de Santos, sob a Ação de Marés e Ventos

Joseph Harari e Michel Gordon

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

Recebido: 20/10/00 - revisão: 23/02/01 - aceito: 22/10/01

RESUMO

Este trabalho determina a evolução da dispersão de substâncias no Porto e na Baía de Santos (SP - Brasil), considerando várias situações hidrodinâmicas e três soluções numéricas, todas elas utilizando campos de correntes gerados pelo Princeton Ocean Model (POM): MAPOM (modelo de dispersão acoplado ao POM, que resolve a equação da advecção-difusão-decaimento em coordenadas verticais sigma, através de métodos de diferenças finitas), MODIF (similar à primeira solução, mas em coordenadas verticais lineares) e MOCAD (modelo de dispersão que representa a advecção com a formulação Lagrangeana e a difusão/decaimento através da técnica da caminhada aleatória). A partir de medições da concentração de nutrientes, foram escolhidas oito áreas e a região do emissário submarino como pontos de descarga de substâncias (consideradas como inertes e totalmente miscíveis na água do mar). Nas primeiras simulações, as substâncias foram submetidas aos efeitos de maré de sizígia apenas; nas simulações subsequentes, as dispersões foram devidas aos efeitos combinados de maré e de correntes permanentes de enchente e vazante, geradas por ventos de sudoeste e nordeste, respectivamente (com direções modificadas no Canal do Porto, devido a efeitos orográficos). Os resultados obtidos demonstram a eficiência e a flexibilidade computacional da metodologia adotada. A influência das marés na distribuição das concentrações é espacialmente restrita; por outro lado, a inclusão de ventos fortes (e correspondentes correntes) tende a aumentar a dispersão de maneira significativa. Futuramente, a modelagem hidrodinâmica deverá considerar variações de densidade da água do mar e os modelos de dispersão deverão ser aplicados a substâncias específicas, de modo que esta metodologia poderá ser muito útil no apoio ao controle da poluição.

Palavras-chave: *circulação costeira; dispersão de substâncias passivas; modelagem numérica hidrodinâmica; modelos de dispersão; Baixada Santista.*

INTRODUÇÃO

A região metropolitana da Baixada Santista é constituída por nove cidades que possuem um total de aproximadamente 1.300.000 habitantes distribuídos em 2887 km². É um dos principais pólos de desenvolvimento do país devido à intensa atividade industrial, ao transporte marítimo, à pesca e ao lazer. O Porto de Santos é o maior do Brasil em volume de mercadorias comercializadas enquanto que as praias da região são intensamente procuradas por turistas.

A região do Canal do Porto e da Baía de Santos possui circulação bastante complexa, com as contribuições de maré, de ventos e do campo de densidade. A circulação na área tem sido estudada em diversos trabalhos, como os de Harari e Camargo (1995), que analisaram registros do nível do mar de 1944 a 1989; Camargo, Harari e Caruzzo (1999),

que realizaram estudo estatístico da maré meteorológica no sudoeste do Atlântico; e de Harari e Camargo (1997, 1998) e Harari, Camargo e Cacciari (1999, 2000), que modelaram a circulação tridimensional, com ênfase na circulação de maré.

O objetivo deste trabalho consistiu em utilizar técnicas de modelagem numérica para estimar a dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos, a partir de resultados de correntes fornecidos por modelo numérico hidrodinâmico aplicado à área. Nesta fase das pesquisas, pretendeu-se avaliar a capacidade da modelagem numérica para estes estudos e obter informações gerais sobre a dispersão (Gordon, 2000). Não se pretendeu, neste estágio, aplicar a modelagem a um efluente específico, mas conhecer aspectos gerais sobre a advecção, difusão e decaimento de substâncias na região de interesse. Em etapas futuras, a modelagem implementada poderá ser aplicada a substâncias específi-

cas como, por exemplo, manchas de petróleo ou indicadores de poluição, como coliformes fecais.

É importante mencionar que a modelagem implementada pode ser aplicada somente a substâncias inertes e totalmente miscíveis na água do mar (“substâncias passivas”); consequentemente, a modelagem se restringiu à “mistura secundária” e não foi incluída a “mistura primária” de substâncias, que ocorre por exemplo nos estágios iniciais da descarga de esgotos, quando essas considerações não são plenamente válidas. A modelagem da “mistura primária” requer formulação específica, que deve levar em conta vários parâmetros, como a densidade do material descarregado. Por outro lado, em geral, transcorridos apenas alguns minutos de ocorrência da “mistura primária”, os processos de dispersão assumem características de “mistura secundária” e podem ser modelados através desta formulação. Outra hipótese inicial simplificada adotada no presente estudo estabelece que as substâncias consideradas na modelagem não se separam da água do mar por efeito da gravidade.

Apesar das limitações citadas, a modelagem desenvolvida no presente trabalho pode ser integralmente aplicada a várias propriedades de interesse, como por exemplo na dispersão de manchas de óleos ou na distribuição de nutrientes da água do mar.

De fato, o uso de técnicas numéricas para a simulação da dispersão de substâncias passivas (e propriedades) tem sido cada vez mais frequente, como visto nos trabalhos de Elliot (1986) e de Elliot, Hurford e Penn (1986), referentes ao espalhamento de óleo no Mar do Norte, e de Proctor, Flather e Elliot (1994), que modelaram a dispersão de petróleo no Golfo Pérsico. No Brasil, essa mesma metodologia tem sido aplicada, como nos trabalhos de Montenegro (1999), Fonseca e Campos (1999) e Castelão, Pimenta e Campos (1999), cobrindo as áreas da Baía de Todos os Santos (BA), Fortaleza (CE) e Mongaguá (SP).

A METODOLOGIA DE MODELAGEM

A equação da variação espaço-temporal da concentração de uma substância inerte, completamente miscível na água do mar, e que não se separa desta por efeito da gravidade, pode ser escrita na forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) - K_d c + Q \end{aligned} \quad (1)$$

onde c é concentração da substância, t é o tempo, (x, y, z) compõem o sistema de coordenadas (para leste, norte e para baixo) com componentes de velocidade (u, v, w) , K_h e K_v são os coeficientes de difusão turbulenta horizontal e vertical, K_d é o coeficiente de decaimento e Q é uma fonte de c . A variação local e a advecção encontram-se no primeiro membro da Equação (1), enquanto que a difusão, o decaimento e os efeitos de fontes compõem o segundo membro.

Evidentemente, a solução da equação da advecção-difusão-decaimento (1) envolve o conhecimento dos campos de correntes na área de interesse (os valores de u, v, w). Neste trabalho, foram utilizados os campos de correntes fornecidos pelo modelo numérico hidrodinâmico tridimensional de Harari, Camargo e Cacciari (1999, 2000).

O modelo numérico implementado na área é baseado no Princeton Ocean Model (POM), desenvolvido por Blumberg e Mellor (1987) e apresentado em detalhes por Mellor (1998): é um modelo tridimensional, de equações primitivas, variante no tempo, com superfície livre e coordenadas σ (sigma), cujas variáveis prognósticas são as três componentes da velocidade, além da temperatura e da salinidade.

O sistema de coordenadas sigma utiliza as mesmas coordenadas horizontais do sistema cartesiano; já a coordenada z é convertida para σ , sendo escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água no local, segundo a relação $\sigma = (z - \eta)/D$, onde D é a profundidade local e η é a elevação da superfície.

O POM inclui um submodelo de fechamento turbulento, que calcula os coeficientes de mistura turbulenta verticais, fundamentais para o cálculo de variáveis em profundidade. É através dele que o modelo gera valores realísticos dos coeficientes de difusão, e consequentemente das velocidades e propriedades ao longo da vertical. No POM, o fechamento turbulento é de 2ª ordem, com a inclusão

de duas equações, para a energia cinética turbulenta e para a escala do comprimento de turbulência, cujos resultados são subsequentemente utilizados no cálculo dos coeficientes cinemáticos verticais de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal (ou substâncias em geral). Nestas duas equações consideram-se os termos de variação local e advectiva, difusão, produção por cisalhamento, produção por flutuação e dissipação. Os cálculos finais dos coeficientes de viscosidade e difusão verticais são efetuados através de várias relações empíricas, que utilizam constantes definidas por experimentos de laboratório e observações de campo (Mellor e Yamada, 1974, 1982).

No POM, a discretização das equações hidrodinâmicas no tempo e no espaço horizontal é realizada através de um esquema explícito de 2ª ordem centrado no tempo e no espaço (esquema de leapfrog); para a discretização das equações no espaço vertical, se utiliza um esquema implícito (método da inversão de linha). A descrição desses esquemas se encontra em Kowalik e Murty (1993).

O POM é um modelo hidrodinâmico intensamente utilizado pela comunidade científica; detalhes de seu desenvolvimento matemático e exemplos de sua utilização em estudos costeiros são apresentados em várias publicações científicas, como nos trabalhos de Oey, Mellor e Hires (1985, 1985a) e de Harari e Camargo (1998) e Harari, Camargo e Cacciari (2000).

O modelo de dispersão acoplado ao POM (MAPOM)

Nesta solução para o problema da dispersão, o Princeton Ocean Model (POM) foi adaptado para a região de Santos visando utilizar suas rotinas de cálculo de advecção-difusão, para o caso específico da dispersão de substâncias (inertes, totalmente miscíveis na água do mar e que não se separam da mesma por gravidade). A solução MAPOM utilizou portanto coordenadas σ e coeficientes de difusão dados pelo fechamento turbulento de segunda ordem.

Dessa maneira, as subrotinas que resolvem a equação de conservação de salinidade (e calor), com os termos de variações locais, advectivas e difusivas, foram repetidas para os cálculos específicos de concentrações de efluentes, mas com a inclusão de um termo de decaimento e um termo de fonte, resultando numa equação similar a (1), mas em coordenadas σ . Nessa solução, o termo de deca-

imento para a concentração c com coeficiente K_d , escrito na forma $(-K_d c)$, foi resolvido por formulação implícita (Kowalik e Murty, 1993).

O modelo de dispersão com diferenças finitas (MODIF)

A segunda solução para o problema da dispersão envolve a solução da equação tridimensional de advecção-difusão-decaimento com coordenadas lineares (1), através de diferenças finitas de alta ordem. A partir dos valores de correntes fornecidos pelo POM, devidamente interpolados para a coordenada vertical z , o MODIF gera séries espaço-temporais de valores da concentração de uma determinada substância. Para a conversão dos valores hidrodinâmicos gerados pelo POM de coordenadas σ para coordenadas verticais lineares z , foram utilizadas interpolações com polinômios de baixa ordem. A seguir, serão apresentados os esquemas numéricos de alta ordem utilizados na solução MODIF, com a notação de índices m para o tempo t e j para o espaço x ; T é o passo de tempo e h é o espaçamento de grade (em x); o parâmetro q é calculado como $q = uh/T$.

Um esquema computacional de ordem superior para a equação da advecção é o QUICKEST (Leonard, 1979). Considerando-se isoladamente o problema da advecção na direção x , pode-se escrever a seguinte equação:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

O método QUICKEST calcula o fluxo numa célula da grade através da equação:

$$\int_{-h/2}^{h/2} (c^{m+1} - c^m) dx = u_l \int_0^T c_l dt - u_r \int_0^T c_r dt \quad (3)$$

onde u_l e u_r são as velocidades à esquerda e à direita da célula, com as correspondentes concentrações c_l e c_r (Kowalik e Murty, 1993).

O desenvolvimento matemático de (3) considera expansões em séries de u_l , u_r , c_l e c_r e leva à expressão final da discretização da equação da advecção (2), para velocidades u positivas, que corresponde a:

$$c_j^{m+1} = c_j^m - q \left[0.5(c_{j+1}^m - c_{j-1}^m) - \frac{1}{2}q(-2c_j^m + c_{j-1}^m + c_{j+1}^m) + \frac{1}{6}(1 - q^2)(c_{j-2}^m - 3c_{j-1}^m + 3c_j^m - c_{j+1}^m) \right] \quad (4)$$

Expressões similares podem ser obtidas no caso de velocidades negativas e para padrões bi e tridimensionais.

Para resolver numericamente os processos difusivos, foi utilizado o método de segunda ordem de Saul'ev (1957), que considera dois níveis de tempo e alterna as direções de varredura da grade a cada passo de tempo. Nesse esquema, dada a equação da difusão unidimensional:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5)$$

a solução para a varredura ascendente na grade corresponde a:

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = \frac{K_h}{h^2} \left[(c_{j+1}^m + c_j^{m+1}) - (c_j^m - c_{j-1}^{m+1}) \right] \quad (6)$$

e para a varredura descendente:

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = \frac{K_h}{h^2} \left[(c_{j+1}^{m+1} - c_j^m) - (c_j^{m+1} - c_{j-1}^m) \right] \quad (7)$$

Essa discretização é pseudo-implícita, ou seja, os termos $(m + 1)$ dos segundos membros das Equações (6) e (7) podem ser transferidos para os primeiros membros, de modo que o esquema é implícito na notação mas explícito na realização (Richtmeyer e Morton, 1967). Esse método é incondicionalmente estável e foi aplicado às três dimensões espaciais (x, y, z) .

A discretização do termo de decaimento envolve um esquema implícito, incondicionalmente estável; desse modo, para:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -K_d c \quad (8)$$

a solução numérica corresponde a:

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = -K_d c_j^{m+1} \quad (9)$$

Um ponto essencial da modelagem da dispersão se encontra na especificação dos coeficientes de difusão vertical. Para a solução MODIF, uma alternativa muito conveniente utiliza o número de Richardson Ri, que leva em conta o gradiente verti-

cal de densidade ρ e o cisalhamento vertical de velocidade u , através da expressão:

$$Ri = \frac{-g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{-2} \quad (10)$$

onde g é a aceleração da gravidade. E o cálculo final do coeficiente de difusão é realizado pela relação empírica (Bowden, 1983):

$$K_v = K_o (1 + Ri)^{-2} \quad (11)$$

onde K_o vale entre 5 e 100 cm^2/s .

As Expressões (10) e (11) demonstram que o aumento da estratificação vertical $(\partial\rho/\partial z)$ aumenta o número de Richardson e diminui o coeficiente de difusão K_v (consequentemente inibe a difusão); analogamente, a diminuição da estratificação favorece a difusão; por outro lado, o aumento do cisalhamento vertical $(\partial u/\partial z)$ diminui Ri e aumenta K_v (o que favorece a difusão); e a diminuição do cisalhamento inibe a difusão. Alternativamente, ao considerar o oceano homogêneo $(\partial\rho/\partial z = 0)$, resulta $Ri = 0$ e K_v constante $(= K_o)$, de modo que a difusão não varia na vertical.

Note-se que, enquanto a maioria dos modelos de dispersão adota formulações sofisticadas para o cálculo dos coeficientes de difusão na vertical, em geral, são considerados valores constantes para os correspondentes coeficientes na horizontal, dependentes apenas do espaçamento de grade utilizado.

O modelo de dispersão com o "caminho aleatório" (MOCAD)

Uma alternativa à solução da equação da advecção-difusão-decaimento (1) foi também utilizada, baseada na solução do problema de dispersão através do rastreamento Lagrangeano e da caminhada aleatória de partículas, de forma análoga ao modelo de espalhamento de óleo para o Golfo Pérsico, desenvolvido por Proctor, Flather e Elliot (1994).

Portanto, na solução MOCAD, se representa a substância não através de sua concentração, mas por um conjunto de partículas. Note-se que, ao contrário dos modelos anteriores, este gera resulta-

dos pontuais, tanto para a advecção quanto para a difusão (e decaimento) das partículas. Nesta metodologia, inicialmente são utilizadas interpolações polinomiais uni e bidimensionais, na vertical e na horizontal, de modo a estimar as correntes marítimas nas posições exatas das partículas, as quais não coincidem necessariamente com os pontos da grade do modelo hidrodinâmico. Dessa forma, a advecção das partículas é considerada através do transporte das mesmas pelas correntes, calculadas por interpolação exatamente em suas posições. Subsequentemente, efetuam-se os cálculos de difusão e decaimento das partículas, sendo ambos guiados por um gerador de números aleatórios, com distribuição Gaussiana de média zero e desvio padrão unitário (Press, Vetterling, Teukolsky e Flannery, 1992).

O método do caminho aleatório será a seguir ilustrado, com um exemplo para a direção x. Se L é a máxima distância que pode ser percorrida por uma partícula ao longo do eixo x a cada passo de tempo deste modelo, então a cada passo de tempo a partícula pode se deslocar entre $-L$ e $+L$, de uma forma puramente aleatória (representada no modelo pelo gerador de números aleatórios). Se este procedimento é repetido ao longo do tempo, e um grande número de partículas é descarregado, com cada uma delas se movendo independentemente em caminhadas aleatórias, então o número de partículas por unidade de distância pode ser interpretado como a concentração do material nessa distância (e sua distribuição equivale ao efeito da difusão da substância). De fato, os cálculos com a aproximação da caminhada aleatória são equivalentes aos da equação da difusão quando o coeficiente de difusão desta equação corresponde a $(n L^2 / 2)$, onde n é o número de deslocamentos por unidade de tempo e L é o máximo deslocamento permitido a cada caminhada (Bowden, 1983).

Em relação ao decaimento, a cada passo de tempo T_p (do MOCAD) se compara um número aleatório, gerado para cada partícula, com a relação $(1 - \exp(-T_p/\tau))$, onde τ é o "*e-folding time*" do decaimento; se o número aleatório for menor, a partícula desaparece (Proctor, Flather e Elliot, 1994).

Note-se que, também no modelo MOCAD, admite-se como hipótese inicial que a substância que sofre dispersão (representada por partículas) é inerte, totalmente miscível e que não se separa da água por efeito da gravidade.

PROCESSAMENTOS DOS MODELOS - RESULTADOS

Os processamentos hidrodinâmicos

Resultados de processamentos do POM têm sido rotineiramente obtidos no Instituto Oceanográfico da USP, para a área de $46^{\circ}17'W$ a $46^{\circ}23'W$ e de $23^{\circ}52'S$ a $24^{\circ}01'S$, com espaçamentos horizontais de 75 metros, numa grade regular de 148×218 pontos na horizontal. Nos processamentos são considerados 11 níveis σ na vertical, posicionados em 0.00, -0.03125, -0.0625, -0.125, -0.250, -0.500, -0.750, -0.875, -0.9375, -0.96875 e -1.000 (Harari, Camargo e Cacciari, 1999, 2000).

No presente trabalho, foram inicialmente considerados os resultados do POM com forçantes de maré apenas, para o período de 7 a 9 de fevereiro de 1997, caracterizado por uma sizígia, que corresponde a intensas correntes de maré (a origem do tempo neste trabalho, $t = 1$ h, é a 01:00 GMT de 7 de fevereiro de 1997). Foram então obtidos 72 valores horários de correntes nos níveis σ acima mencionados, os quais foram interpolados para as profundidades de 0, 2, 4, 6, ... metros, na vertical de cada ponto da grade, até o fundo.

Além das simulações hidrodinâmicas de maré, foram também realizados dois processamentos do POM considerando ventos intensos: o primeiro reproduzindo aproximadamente os efeitos de frentes frias, com ventos de SW de 50 km/h na Baía de Santos, e que por efeitos orográficos passam a SE no Canal do Porto; e o segundo, reproduzindo um efeito máximo do centro de Alta Pressão do Atlântico Sul, com ventos de NE de 50 km/h na baía (passando a ser de NW no canal). Embora os efeitos orográficos não sejam conhecidos com grande precisão, várias medidas de vento na área demonstram sua influência (Harari, Camargo e Cacciari, 2000a); assim, uma forma de considerar estes efeitos consistiu em impor os ventos na região do Porto aproximadamente na direção do canal. Note-se que, nos processamentos, foi definido um vetor de vento para cada célula da malha (não apenas no Canal do Porto, mas em toda a grade oceanográfica). O efeito da frente foi acompanhado por uma elevação de 50 cm no nível do mar no contorno aberto, em cerca de dois dias, enquanto que o efeito da Alta do Atlântico Sul foi de rebaixar o nível médio do mar em 50 cm. Os valores de vento considerados nos processamentos do POM para a

área de estudo são baseados (conceitualmente e não exatamente) no Atlas da DHN (1993).

Os processamentos do POM com as forças de vento foram realizados por períodos de vários dias; em função dos ventos constantes no tempo, o POM determinou correntes praticamente constantes no tempo (mas variáveis no espaço). Evidentemente, os processamentos do modelo numérico hidrodinâmico podem ser realizados com ventos variáveis não somente no espaço, mas também no tempo; entretanto, foram considerados ventos constantes no tempo, de modo a facilitar a análise das dispersões resultantes.

Para os modelos de dispersão, foram então consideradas as correntes geradas pelos ventos ao final de 3 horas de processamento, em adição às correntes de maré de sizígia, no período de 7 a 9 de fevereiro de 1997 (acima mencionado). Dessa forma, foram calculadas somas vetoriais das correntes geradas por processamentos separados do modelo, para os efeitos de marés e de ventos. Este procedimento pressupõe que, nessa região, efeitos não lineares de interação são desprezíveis, o que é confirmado por processamentos em que as forças de maré e de vento são impostas simultaneamente.

Este trabalho não tem por finalidade discutir os resultados produzidos pela modelagem da circulação, o que pode ser encontrado nos trabalhos de Harari e Camargo (1998) e Harari, Camargo e Cacciari (1999, 2000), os quais incluem a validação dos resultados através de sua comparação com medições (contínuas) do nível do mar e algumas medidas (esparsas) de correntes. O objetivo deste trabalho foi o de utilizar os valores de correntes produzidos pelo POM para a modelagem da dispersão, de modo que apenas as informações mais essenciais sobre esses valores são fornecidas.

A evolução das condições de maré, com a sequência de baixamares e preamares no período de simulação, se encontra na Tabela 1 (Harari e Mesquita, 1995).

Exemplos de mapas de correntes na superfície obtidos encontram-se na Figura 1, contemplando as marés vazantes de sizígia e os efeitos aditivos das correntes vazantes e enchentes geradas pelos ventos. Tendo em vista a alta resolução espacial da modelagem e o consequente excessivo número de vetores de correntes calculados, na Figura 1 foi representado um a cada seis vetores de corrente calculados. Os efeitos orográficos na área do Canal do Porto podem ser verificados na Figu-

ra 2, que apresenta ventos médios mensais observados em 1997 (Harari, Camargo e Cacciari, 2000a).

Os pontos de descarga de efluentes

Foram escolhidos nove pontos de descarga de substâncias para o presente estudo de dispersão, que constam da Figura 3. Esses pontos foram selecionados a partir do trabalho observacional da distribuição de silicato na área, de Braga et al. (2000), no qual foram amostrados diversos nutrientes no estuário de Santos; os mapas da concentração de silicato mostraram máximos, provavelmente relacionados a processos de poluição, cujas posições foram selecionadas para as descargas de substâncias nesse trabalho de modelagem. A relação dos nove pontos de descarga se encontra na Tabela 2.

Para todos os pontos de descarga, nas soluções MAPOM e MODIF foram estabelecidas concentrações iniciais de 100 unidades e fontes contínuas de 3600 unidades por hora, para os cinco primeiros níveis de profundidade (esse último valor corresponde ao termo Q da Equação 1); na solução MOCAD, foram consideradas descargas iniciais de 3 partículas e emitidas mais 3 partículas a cada hora, somente na superfície. Esses valores de concentrações iniciais e de “fontes contínuas” correspondem a grandezas adimensionais, tendo em vista os propósitos da pesquisa. Diversos testes numéricos preliminares demonstraram que esses parâmetros são adequados, considerando os efeitos físicos modelados e a capacidade dos recursos computacionais disponíveis. Em todos os mapas de resultados do MODIF (ou MAPOM), os valores de concentração foram normalizados para uma escala (percentual) de 0 a 100.

Na Figura 3 está também demarcada a área de praias da região de estudo, entre os Canais do Porto de Santos e de São Vicente.

Os processamentos de dispersão

A solução para a dispersão MAPOM utilizou campos de correntes renovados a cada passo de tempo (do modo externo) do modelo hidrodinâmico (igual a 30 s); isto se deve ao fato que o MAPOM é acoplado ao POM, com cálculos de dispersão a cada renovação dos campos de correntes pelo modelo hidrodinâmico. As soluções MODIF e MOCAD utilizaram resultados horários de correntes (fornecidas pelo POM).

Tabela 1. Tábua das marés para Santos, com a previsão dos instantes de ocorrência e dos níveis atingidos, em baixamar (BX) ou preamar (PR), segundo Harari e Mesquita (1995).

Dia Fev 97	Hora:min (GMT)	Nível do mar (m)	(BX) ou (PR)	Dia Fev 97	Hora:min (GMT)	Nível do mar (m)	(BX) ou (PR)
06	23:21	-0.2	BX	08	12:34	0.4	BX
07	06:30	1.5	PR		19:26	1.4	PR
	12:26	0.3	BX	09	00:56	-0.2	BX
	18:51	1.4	PR		07:11	1.4	PR
08	00:08	-0.2	BX		13:00	0.4	BX
	06:53	1.5	PR		19:32	1.3	PR

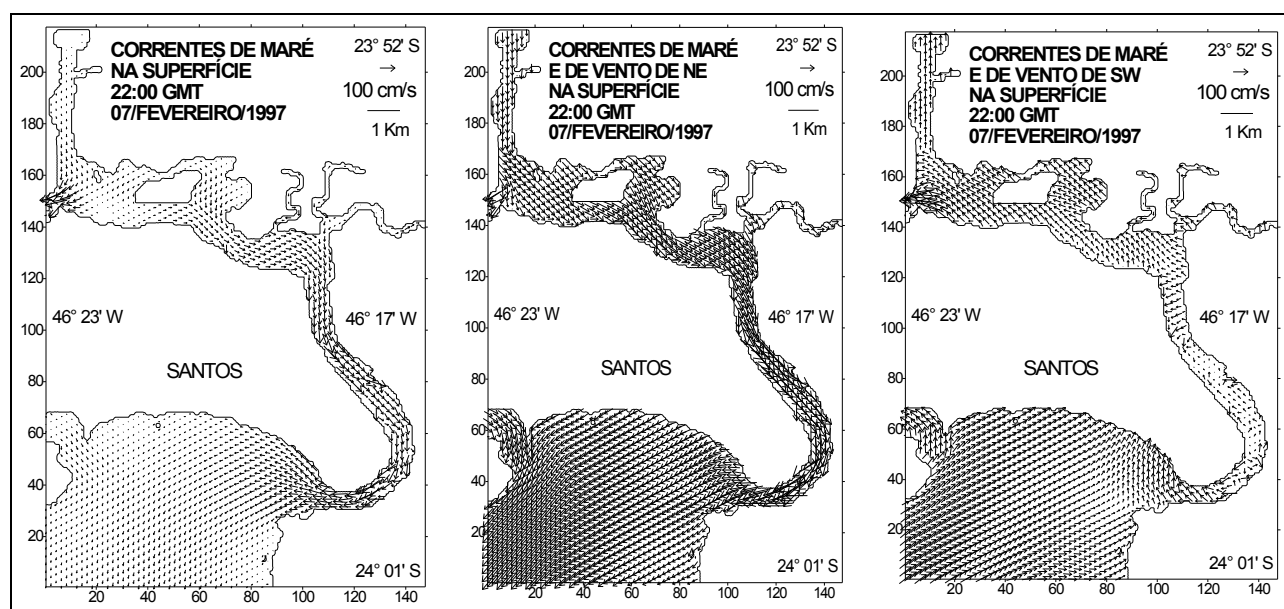


Figura 1. Correntes de superfície na Baía e Porto de Santos, para maré vazante na sizígia (esq.) e com a adição de correntes de deriva devidas a ventos de NE (centro) e de SW (dir.) - referentes ao instante $t = 22$ h de processamento dos modelos; representação de um vetor a cada seis calculados.

As soluções MAPOM e MODIF são muito similares, visto que, afinal, são baseadas na solução da mesma equação, apenas que a primeira usa coordenadas verticais sigma (e coeficientes de difusão dados por fechamento turbulento de segunda ordem), enquanto que a segunda adota coordenadas verticais lineares (e utiliza o número de Richardson para a prescrição dos coeficientes de difusão). O passo de tempo dessas soluções foi de 30 s (na realidade esse é o passo dos modos internos do modelo hidrodinâmico); já na solução MOCAD foi utilizado um passo de tempo de 20 minutos. A solução MODIF adotou coeficientes de difusão constantes ($400 \text{ cm}^2/\text{s}$ na horizontal e $20 \text{ cm}^2/\text{s}$ na vertical); na solução MOCAD, foram considerados valores de 10 m e de 2 m, para os deslocamentos máximos horizontal e vertical, em cada passo de

tempo (de 20 minutos). Note-se que, como as soluções MODIF e MOCAD utilizaram resultados horários do POM e seus passos de tempo são menores que 01 hora (30 s e 20 min, respectivamente), nesses modelos foi necessário realizar interpolações dos valores de correntes no tempo.

Para os processamentos de dispersão com decaimento, é possível exprimir esse efeito em função do T_{90} , que é definido como o período de tempo necessário para que haja um decaimento exponencial de 90% da concentração inicial da substância. Nas simulações do MAPOM e do MODIF com decaimento, foi utilizado um valor de T_{90} igual a 24 horas, que corresponde a um valor para o coeficiente de decaimento $K_d = 2.665 \times 10^{-5}$; na solução MOCAD, foi considerado um "e-folding time" $\tau = 24$ horas para o decaimento das partículas. Como a

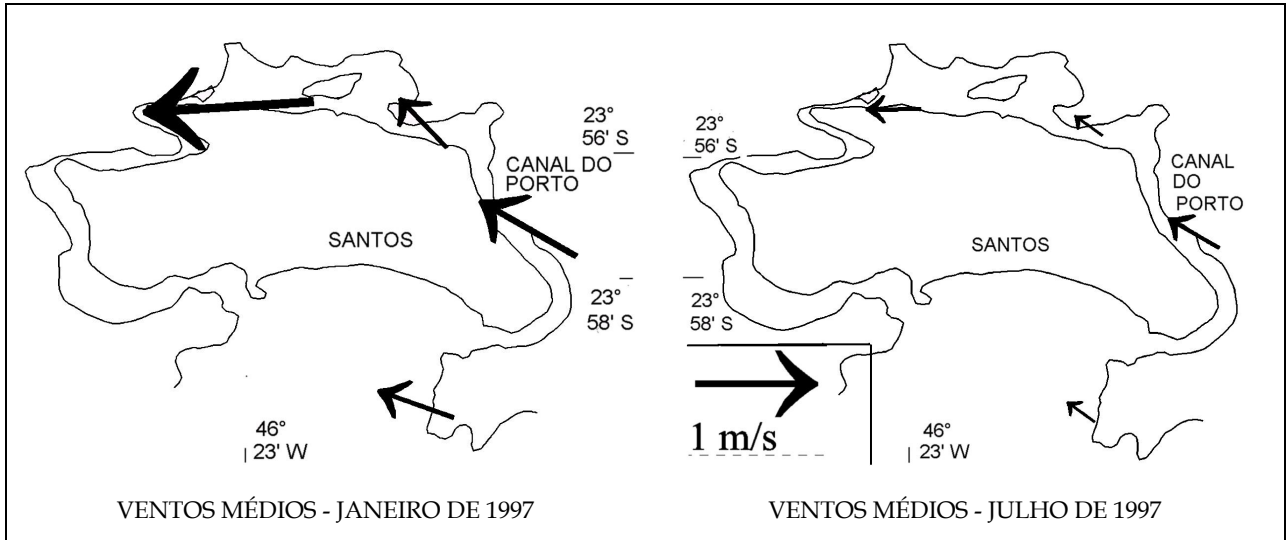


Figura 2. Ventos médios mensais de superfície em janeiro e julho de 1997, medidos ao longo do Canal do Porto e na Baía de Santos (segundo Harari, Camargo e Cacciari, 2000a).

modelagem utilizada não foi referente a alguma substância ou efluente específico, foram escolhidos apenas valores típicos para esses coeficientes de decaimento, não sendo portanto representativos de uma substância em particular.

Grande parte dos resultados obtidos com a modelagem utilizada se encontra em Gordon (2000). No presente trabalho, serão selecionados apenas os resultados mais significativos. Como os resultados das soluções MAPOM e MODIF são muito similares (embora não exatamente iguais), são apresentados, neste trabalho, somente os resultados obtidos com o MODIF, na forma de isolinhas (e áreas sombreadas), as quais representam as regiões com as mesmas concentrações (em escalas percentuais, de 0 até 100). Já os mapas referentes à solução MOCAD possuem pontos (círculos em preto) representando as posições das partículas (esses mapas incluem partículas que atingiram posições em terra; neste caso, as partículas mantêm suas posições e não sofrem mais os efeitos de advecção, difusão e decaimento).

A Figura 4 mostra as soluções MODIF e MOCAD, a partir das descargas nos nove pontos selecionados, considerando apenas efeitos de maré, sem decaimento (Processamento 1); as Figuras 5 e 6 apresentam os resultados dos modelos MODIF e MOCAD considerando as marés e correntes de deriva vazantes e enchentes, sem decaimento (Processamentos 2 e 3). As Figuras 4 a 6 apresentam as soluções de dispersão na superfície, ao final de dois ciclos completos da principal maré semi-diurna (instante $t = 26$ horas, em 02:00 GMT de 08 de feve-

Tabela 2. Relação dos nove pontos de descarga de substâncias para os processamentos de dispersão (ver localização na Figura 3).

Ponto	Localização
1	Canal de Piaçaguera
2	Rio Quilombo
3	Largo do Caneú
4	Ilha Barnabé
5	Vicente de Carvalho
6	Canal do Porto
7	Boca do Canal do Porto
8	Boca do Canal de São Vicente
9	Emissário Submarino

reiro de 1997). Resultados do MODIF ao final de quatro ciclos de maré (para $t = 49$ h, em 01:00 GMT de 09 de fevereiro de 1997), na superfície e a 8 m de profundidade, para o processamento 03 (marés e vento de SW, sem decaimento), encontram-se na Figura 7. Os efeitos do decaimento nas soluções MOCAD, para correntes de maré com correntes de deriva vazantes e enchentes (Processamentos 4 e 5), encontram-se na Figura 8 (na superfície, ao final de dois ciclos de maré).

Nas escalas de resultados percentuais do MODIF, a cor branca acima de 100% constitui apenas uma limitação dos softwares de interpolação e plotagem utilizados e, evidentemente, deve ser associada a concentrações nulas.

A Tabela 3 contém um sumário das informações sobre os cinco conjuntos de processamentos efetuados.

Como os resultados do modelo MODIF são expressos em termos percentuais, não haveria diferenças nos resultados entre seus processamentos com e sem decaimento, e por isso esse efeito só foi considerado com as soluções MOCAD; futuramente, ao associar a modelagem a valores específicos de concentrações de substâncias (absolutos e não apenas percentuais), certamente os resultados MODIF com decaimento deverão ser minuciosamente analisados. Apenas para efeito de simplificação de análises, foram consideradas descargas (e resultados) de partículas no modelo MOCAD somente na superfície e, conseqüentemente, resultados em profundidade são restritos à solução MODIF.

DISCUSSÃO

Inicialmente são discutidos alguns aspectos da hidrodinâmica da área, de modo a demonstrar a coerência entre esta modelagem e a da dispersão.

A análise das componentes da maré astronômica em séries temporais do nível do mar no Porto de Santos mostra a preponderância das energias associadas aos efeitos de maré na circulação da área. De fato, os trabalhos de Harari e Camargo (1995, 1998) e Harari, Camargo e Cacciari (1999, 2000) demonstram que, na ausência de efeitos meteorológicos significativos, a circulação de maré astronômica pode ser considerada como uma boa aproximação da circulação total; no entanto, efeitos meteorológicos extremos, como por exemplo frentes frias intensas, podem gerar circulações e variações do nível do mar com a mesma ordem de grandeza das geradas pelas marés. A decomposição das séries de nível do mar de vários registros na Baixada Santista (e áreas próximas, como Ubatuba e Cananéia), segundo contribuições periódicas (marés) e residuais (vento e densidade), demonstra que a circulação associada aos campos de densidade tem importância local (especialmente na desembocadura de rios) mas seu efeito na circulação geral é significativamente menor que os das marés e ventos (Harari, Camargo e Cacciari, 1999, 2000). E como os estudos de dispersão se restringiram à "mistura secundária", também os efeitos de densidade na dispersão são muito menores que os devidos às marés e às correntes geradas pelo vento.

Padrões de circulação similares a este se encontram em várias regiões estuarinas parcialmente misturadas, como no estudo de Oey, Mellor e Hires (1985, 1985a), que modelaram a circulação geral no estuário de Hudson - Raritan. Eles conclu-

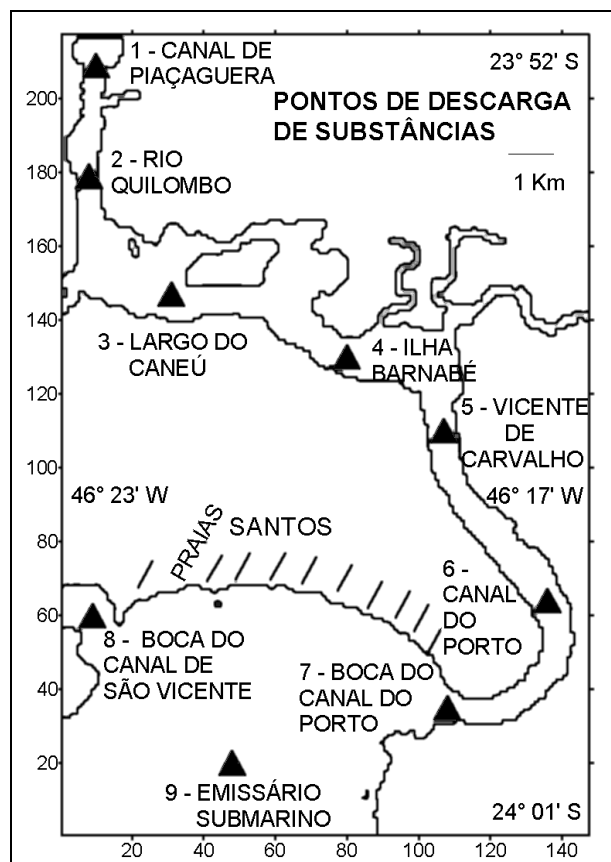


Figura 3. Pontos de descarga de substâncias para as simulações de dispersão (ver Tabela 2).

iram que, nesse estuário, os efeitos do campo de densidade na circulação são muito menores que as marés e as influências do vento, de modo que apenas em áreas específicas, próximas às desembocaduras de rios, a baroclinicidade afeta bastante a circulação, a mistura e a dispersão (de sal e eventuais contaminantes). Mesmo nessas áreas, os efeitos máximos da baroclinicidade são transientes, com duração típica entre 1 e 2 horas.

O período específico de simulação, com correntes de maré cobrindo condições de sizígia, tem a vantagem de provocar uma dispersão significativa, ao contrário da quadratura, cujas correntes fracas tendem a inibir a dispersão. Adicionalmente, efeitos meteorológicos também foram levados em consideração, gerando intensos campos de correntes, o que também favorece a dispersão. Como o objetivo deste trabalho consistiu em utilizar técnicas de modelagem numérica para estimar a dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos, de modo a avaliar a capacidade da modelagem numérica para estes estudos, o interesse se concentrou em simular condições com forte dispersão. Porém,

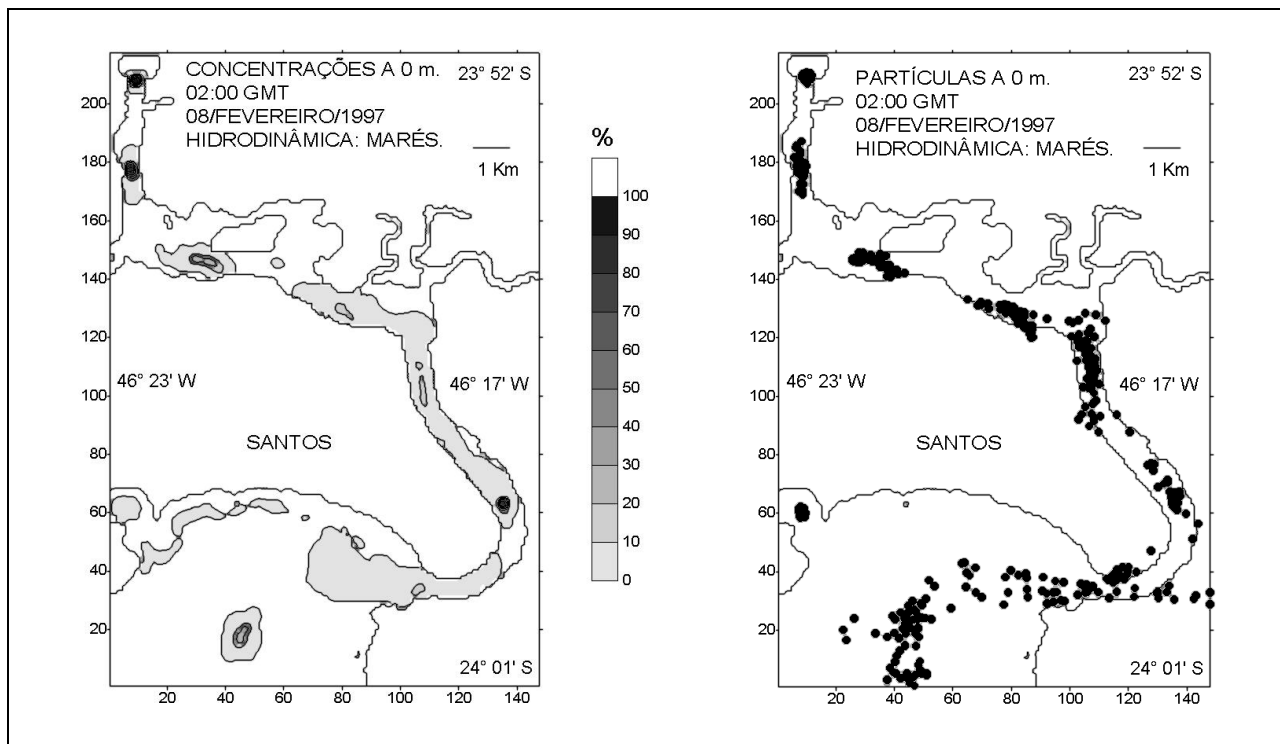


Figura 4. Soluções de dispersão na superfície segundo os modelos MODIF (esq) e MOCAD (dir), considerando apenas marés, no instante $t = 26$ h.

futuramente, ao aplicar esta modelagem para substâncias específicas e com a finalidade de estudar processos de poluição, então o interesse das pesquisas deverá ser direcionado aos casos de mínima dispersão, com correntes muito fracas, como as associadas a períodos de quadratura.

Como exemplos dos campos de correntes utilizados, a Figura 1 mostra as fortes correntes de maré (com valores de até 100 cm/s, ao longo do Canal do Porto), no instante de máxima vazante ($t = 22$ h, 22:00 GMT de 07 de fevereiro de 1997 - ver Tabela 1); a mesma figura mostra os efeitos acumulativos das correntes geradas pelos ventos de NE e SW, que, respectivamente, intensificam a vazante (originando valores de até 150 cm/s, ao longo do canal) e chegam a revertê-la. Deve-se notar que a variabilidade espacial das correntes calculadas foi muito grande, principalmente em relação às correntes de maré, com algumas áreas apresentando valores máximos abaixo de 10 cm/s, como por exemplo no Canal de Piaçaguera.

É interessante frisar que correntes fortes têm a vantagem de promover a dispersão, espalhando as substâncias por áreas maiores (e, em geral, facilitando o seu decaimento natural); em contraste, correntes fracas tendem a dificultar a dispersão, mantendo altas concentrações das subs-

tâncias em áreas restritas; por outro lado, no caso de substâncias com pequeno decaimento, as correntes fracas têm a vantagem de restringir (espacialmente) o impacto da descarga dessas substâncias.

Quanto às variações das correntes na vertical, deve-se observar que as correntes de maré têm um caráter nitidamente barotrópico e decaem pouco com a profundidade, com exceção da camada próxima ao fundo, onde decaem por efeito de fricção (Harari, Camargo e Cacciari, 2000). Resultados do modelo demonstram que apenas para locais muito rasos (com profundidades menores que 10 m) as correntes de maré decaem desde a superfície; para profundidades maiores, os valores de correntes se mantêm por toda a coluna e só decaem próximo ao fundo. Evidentemente, a adoção de uma densidade constante nos processamentos do modelo também contribui para o caráter barotrópico das correntes de maré. Por outro lado, as correntes de deriva decaem bastante com a profundidade, desde a superfície.

Ainda em relação aos campos de correntes considerados nas simulações de dispersão, a Figura 2 ilustra o redirecionamento dos ventos ao longo do Canal do Porto de Santos devido a efeitos orográficos. Os dados utilizados nesse estudo foram coletados em três posições ao longo do Canal e na

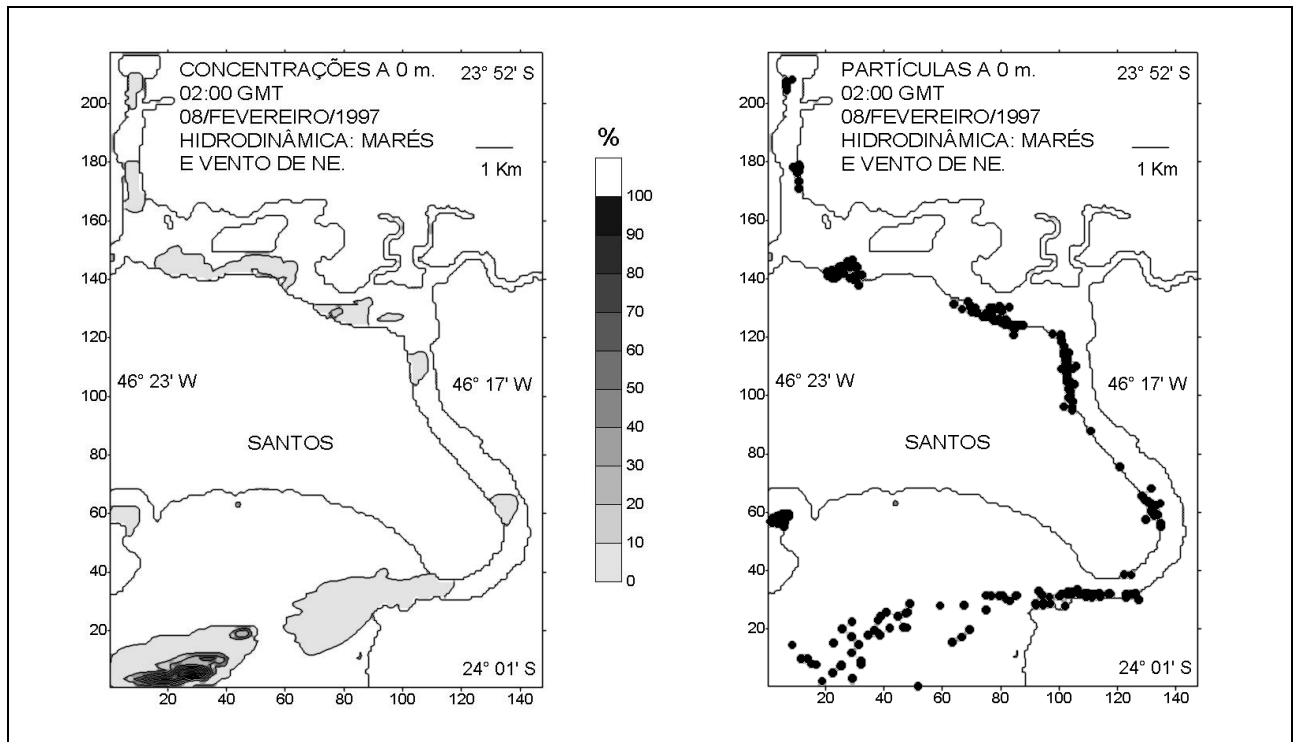


Figura 5. Soluções de dispersão na superfície segundo os modelos MODIF (esq) e MOCAD (dir), considerando marés e vento de NE, no instante $t = 26$ h.

parte mais a Oeste da Baía de Santos (que por ser uma estação em terra, também sofre os efeitos da topografia continental). Os valores médios das medidas de vento em janeiro e julho de 1997 representaram uma certa predominância dos ventos mais fortes gerados pelas frentes frias, em relação aos gerados pela Alta do Atlântico Sul, que embora mais persistentes são mais fracos.

As condições hidrodinâmicas consideradas não levaram em conta todos os efeitos presentes na área, como por exemplo a estratificação e a contribuição de rios. Ao desconsiderar a estratificação, também não foram levados em conta efeitos de empuxo devido a diferenças de densidade entre as substâncias descarregadas e a água do mar. Ao adotar a hipótese de oceano homogêneo nos cálculos hidrodinâmicos, por consistência foram também considerados coeficientes de difusão constantes (na solução MODIF); e a consistência foi também mantida na modelagem como um todo, através da representação apenas da "mistura secundária". Nos próximos estágios de modelagem numérica da dispersão, detalhes dos campos hidrodinâmicos (a baroclinicidade) e do comportamento de substâncias (especialmente a densidade e a forma de descarga) deverão ser considerados (com a possível inclusão da "mistura primária" na modelagem).

Um ponto importante a salientar na análise dos resultados obtidos é a razoável concordância entre as soluções da equação da advecção/difusão/decaimento e da formulação Lagrangeana/caminhada aleatória (ver Figuras 4 a 6). De fato, essa concordância era esperada a partir do uso de valores relacionados dos coeficientes de difusão e dos máximos deslocamentos de partículas, como acima citado. É interessante notar que, apesar da similaridade dos resultados e da possibilidade de sua comparação, admitindo que a quantidade de partículas por volume no MOCAD corresponde a uma determinada concentração no MODIF, há uma diferença básica entre as duas formulações: em princípio, a solução MODIF seria mais adequada para processamentos operacionais com substâncias ou propriedades contínuas e a solução MOCAD com substâncias ou propriedades não totalmente contínuas.

A seguir, serão analisados aspectos específicos das simulações realizadas. Os efeitos sofridos pelas descargas, quando submetidas somente a forçantes de maré, são tipicamente localizados, cobrindo distâncias relativamente pequenas a partir dos pontos de emissão (Figura 4). É evidente que as características das marés na área são refletidas nas distribuições das concentrações, com deslocamentos seguindo as enchentes e vazantes, de período

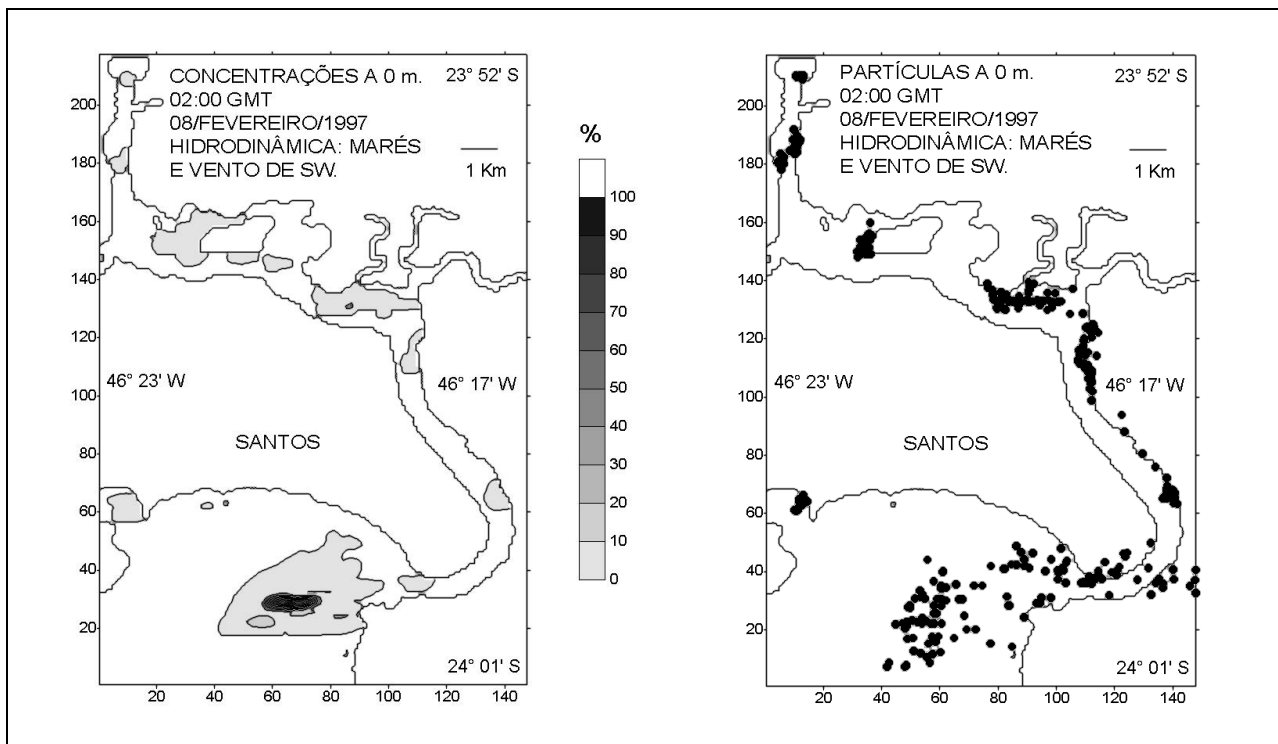


Figura 6. Soluções de dispersão na superfície segundo os modelos MODIF (esq) e MOCAD (dir), considerando marés e vento de SW, no instante $t = 26$ h.

preponderantemente semi-diurno; desse modo, nos instantes de máxima enchente (ou vazante) os efeitos de advecção são máximos, e os deslocamentos dos centros das manchas em relação aos pontos de descarga são maiores. Entretanto, ao final de cada ciclo de maré semidiurna, o fluxo e refluxo das marés praticamente anulam o deslocamento líquido do centro das substâncias, de modo que as distâncias acima citadas correspondem praticamente ao efeito da difusão apenas. Por outro lado, nos locais em que a advecção é maior resulta maior difusão das substâncias, espalhando os materiais em áreas maiores e diminuindo as concentrações máximas no seu centro; desse modo, a dispersão final na Boca do Canal do Porto (local com máxima advecção) resulta numa grande área atingida mas com pequenas concentrações, enquanto que no Canal de Piaçaguera e próximo ao rio Quilombo (locais de mínima advecção) as áreas atingidas são pequenas e as concentrações remanescentes, muito grandes.

Deve-se notar que as correntes de maré são tão intensas na boca do Canal do Porto que chegam a advectar as partículas por distâncias em terra consideráveis. É preciso frisar que os modelos implementados identificam os limites dos corpos d'água e não permitem advecção, difusão ou deca-

imento de partículas (ou concentrações) que atingem a terra. Entretanto, estando na água, partículas podem ter intrusão maior ou menor no continente dependendo das intensidades das correntes e correspondentes efeitos de advecção. O uso de um passo de tempo menor no MOCAD certamente eliminaria uma intrusão tão acentuada das partículas no continente (mas iria requerer um tempo de processamento maior).

Nos processamentos com correntes permanentes adicionadas às correntes de maré, nota-se um significativo aumento da dispersão de materiais; a advecção é fortemente incrementada e, por consequência, também a difusão. Esses efeitos foram intensos tanto no caso das correntes de deriva vazantes, que proporcionaram a dispersão de materiais desde o Canal do Porto até a Baía de Santos (Figura 5), como no caso das correntes de deriva enchentes, que provocaram uma intensa dispersão dos materiais em direção às praias e ao interior do estuário (Figura 6). Por influência das fortes correntes permanentes, até os locais que mantinham grandes concentrações pontuais (como no Canal de Piaçaguera) apresentaram sensível diminuição das mesmas; por outro lado, no Canal do Porto, a influência dos ventos fez com que grande parte das con-

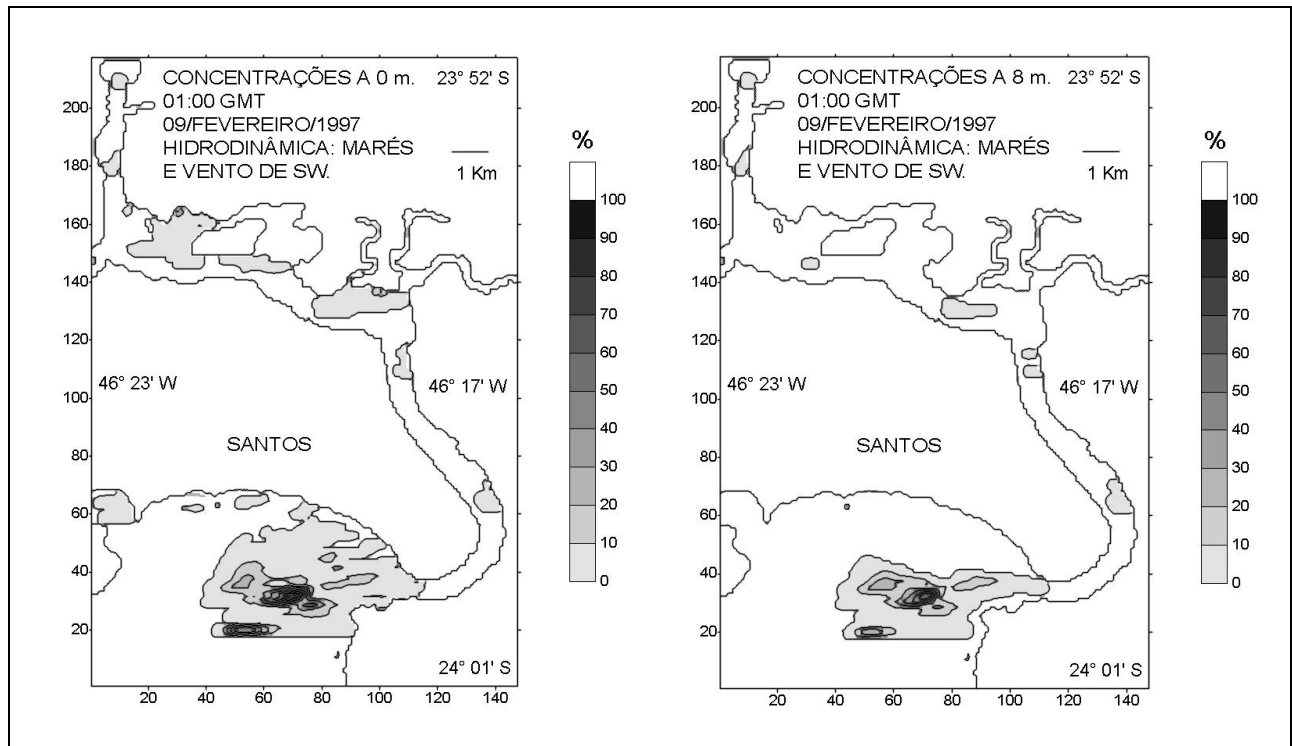


Figura 7. Soluções de dispersão na superfície (esq) e a 8 m de profundidade (dir) segundo o modelo MODIF, considerando marés e vento de SW, no instante $t = 49$ h.

centrações (ou partículas) atingisse as laterais do Canal, o que não ocorre com as correntes de maré, que mantêm as substâncias no corpo d'água.

A análise das Figuras 4, 5 e 6 requer um cuidado especial. Na realidade, os modelos de dispersão e os *softwares* de interpolação e plotagem têm algumas limitações. Na plotagem de resultados do MODIF (e do MAPOM) concentrações que atingem a terra (ou seja, os limites mar-continente) não são representadas; além disso, nestas soluções, concentrações que alcançam os contornos abertos deveriam ser afetadas por condições de contorno especificadas (mas, devido à ausência de informações correspondentes, concentrações nas bordas abertas foram mantidas nulas). Por outro lado, na plotagem de resultados do MOCAD, partículas que chegam à terra são mantidas fixas nas posições alcançadas, enquanto que partículas que saem da região modelada, seja através dos contornos abertos ou fechados, deixam de ser representadas nas figuras. Com base nessas limitações, verifica-se que, enquanto na Figura 4, com o efeito de maré apenas, o MODIF apresenta máximas concentrações em canais interiores, nas Figuras 5 e 6, com os efeitos de marés e ventos, e o consequente aumento de dispersão, o MODIF tem as concentrações diminuí-

das no Canal do Porto (mas partes das manchas que alcançaram as laterais do Canal não estão representadas nas figuras). No MODIF, o aumento relativo das concentrações na área do emissário devido às correntes de deriva deve ser interpretado da seguinte maneira: no caso de vento de NE (Figura 5), as concentrações atingiram o contorno aberto do modelo e, na ausência de especificações das condições de contorno, resultou num acúmulo de substâncias; e no caso de vento de SW (Figura 6), a mancha provinda do emissário se sobrepõe à do Canal do Porto, o que também gerou um máximo local de concentrações.

As limitações dos *softwares* também são evidentes ao comparar as soluções MODIF e MOCAD da Figura 5 (marés e vento de NE): devido à ausência de condições de contorno adequadas, o MODIF incrementa as concentrações na área do emissário, enquanto que o MOCAD permite que as partículas ultrapassem o contorno aberto da grade (e a plotagem deixa de representar estas partículas no domínio do modelo).

A concordância das soluções MODIF e MOCAD é particularmente notável na Figura 6, ao comparar as manchas provenientes do emissário com correntes enchentes sobrepostas à maré, quan-

Tabela 3. Processamentos computacionais realizados e suas características.

Processamento	Hidrodinâmica	Decaimento	Solução	Figuras
01	Marés	Sem	MODIF / MOCAD	4 (0 m, t = 26 h)
02	Marés e vento de NE	Sem	MODIF / MOCAD	5 (0 m, t = 26 h)
03	Marés e vento de SW	Sem	MODIF / MOCAD e MODIF	6 (0 m, t = 26 h) e 7 (0 e 8 m, t = 49 h)
04	Marés e vento de NE	Com	MOCAD	8 (0 m, t = 26 h)
05	Marés e vento de SW	Com	MOCAD	8 (0 m, t = 26 h)

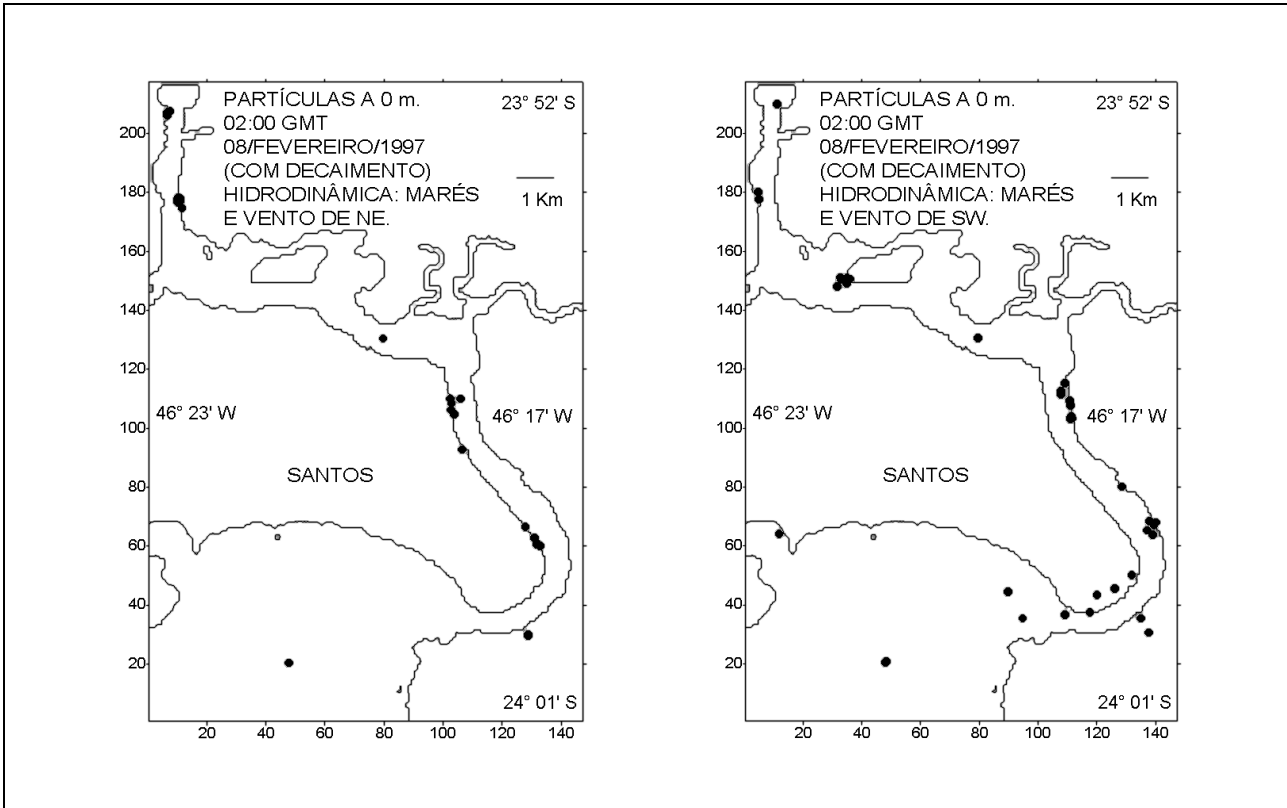


Figura 8. Soluções de dispersão na superfície segundo o modelo MOCAD, considerando marés e vento de NE (esq) e marés e vento de SW (dir), com decaimento das substâncias, no instante t = 26 h.

do as duas manchas de substâncias se aproximam das mesmas áreas de praia. Na realidade, pode-se dizer que a única discrepância mais significativa que ocorreu nos resultados dos diferentes modelos utilizados foi no caso de forçantes de maré, em relação às substâncias descarregadas na Boca do Canal de São Vicente, cujo resultado MODIF apresentou concentrações em frente às praias e o resultado MOCAD não (Figura 4). Um aprimoramento futuro a ser considerado na modelagem consiste na descarga de um número significativamente maior de partículas nos processamentos do MOCAD e num tratamento estatístico das distribuições das partículas quando sujeitas a advecção, difusão e decaimento.

A Figura 7 demonstra que áreas de praia sofreriam o impacto de substâncias providas do emissário somente no caso de ocorrência de ventos de SW muito fortes por um longo período (praticamente ao final de quatro ciclos da maré semi-diurna, em t = 49 h). Os resultados da modelagem em profundidade não apresentam características muito diferentes das de superfície; para efeito de ilustração, a Figura 7 apresenta resultados do MODIF na superfície e a 8 m de profundidade, referentes a marés e ventos de SW (sem decaimento), no instante t = 49 h. O único ponto de interesse no mapa referente ao nível de 8 m é que as substâncias deixam

de atingir as praias, por se encontrarem em níveis de profundidade maiores.

Finalmente, os gráficos com decaimento demonstram que, ao considerar esse efeito (com os parâmetros T90 ou "*e-folding time*" adotados), as concentrações (ou o número de partículas) são sensivelmente diminuídos (Figura 8); consequentemente, as áreas de praia deixam de ser atingidas.

A comparação dos comportamentos de cada área considerada para a descarga de materiais demonstra alguns resultados de interesse. No Canal de Piaçaguera e na região do Rio Quilombo, em todos os casos estudados, as correntes são muito fracas e as descargas de materiais nessas áreas não afetam as demais; dessa forma, os efluentes ali descarregados não se dispersam e podem causar sérios danos aos ecossistemas locais. Já na Boca do Canal do Porto, a situação é inversa: o material descarregado nessa área rapidamente se dispersa mesmo que seja somente sob o efeito das marés, mas pode então atingir outras regiões. Os pontos de descarga do Largo do Caneú, Ilha Barnabé, Vicente de Carvalho, Canal do Porto e Boca do Canal de São Vicente apresentam comportamentos intermediários entre esses dois extremos.

Quanto às manchas associadas ao emissário submarino, ao considerar somente as marés, as mesmas têm extensão espacial muito limitada, após deslocamentos com período tipicamente semi-diurno (Figura 4); somente a ação dos ventos pode produzir uma dispersão mais significativa das substâncias nessa área (Figuras 5 e 6); e apenas ventos muito fortes soprando por longo período, em direções muito favoráveis, podem levar substâncias provindas da área do emissário, ao nível da superfície, para as praias (Figura 7); entretanto, mesmo com ação das intensas correntes de deriva, ao considerar o efeito de decaimento nos processamentos, a extensão das manchas provenientes do emissário se torna muito reduzida (Figura 8).

CONCLUSÕES

É importante frisar novamente o objetivo do presente trabalho, qual seja, o de modelar aspectos gerais da dispersão, de modo a habilitar o uso desta técnica em trabalhos futuros, para a abordagem de situações específicas, como por exemplo determinados efluentes ou condições meteorológicas transientes.

Um aspecto relevante no trabalho realizado está na implementação de uma metodologia de

processamento computacional flexível e eficiente. A partir de campos de correntes já calculados e arquivados (e que podem considerar diversas situações hidrodinâmicas de interesse), esse trabalho possibilitou a implementação de rotinas computacionais que permitem a estimativa da dispersão segundo as mais variadas situações, como, por exemplo, pontos isolados de descarga, combinações de descargas em vários locais, modificações nas taxas de difusão e de decaimento, etc.

Por outro lado, mesmo modelando apenas aspectos gerais da dispersão de substâncias, o trabalho realizado apresenta muitos resultados de interesse. Como os campos hidrodinâmicos utilizados são bastante realísticos para a região, com marés e ventos típicos da área, foi possível quantificar o alcance típico da dispersão de efluentes, considerando emissões em locais anteriormente amostrados.

Dessa forma, foi importante estimar o alcance típico da descarga de efluentes sob influências de maré e de condições meteorológicas, separadamente ou conjuntamente. Na realidade, enquanto o fluxo e refluxo das marés produzem uma dispersão limitada dos materiais, o efeito adicional de correntes de deriva pode impactar áreas relativamente distantes dos locais de descarga das substâncias.

As informações sobre as concentrações de silicato na região de estudo foram utilizadas no presente trabalho apenas para a escolha de locais de descarga; futuramente, medições da evolução no tempo dessas concentrações poderão ser utilizadas para a calibração dos modelos numéricos de dispersão.

É inegável que, se foi obtido um grande avanço na modelagem de dispersão de substâncias na Baía e no Canal do Porto de Santos, ainda há muitos aspectos a pesquisar e implementar de forma operacional, especialmente a calibração da modelagem em relação a substâncias específicas (óleos, coliformes fecais, nutrientes, etc.).

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem o apoio recebido do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas (FUNDESPA) e Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP).

REFERÊNCIAS

- BLUMBERG, A. F. & MELLOR, G. L. (1987). A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. In: N. S. Heaps (Ed.), *Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models - American Geophysical Union*, p. 1 - 16.
- BOWDEN (1983). *Physical oceanography of coastal waters* - Ellis Horwood Limited, John Wiley & Sons - UK
- BRAGA, E. S.; BONETTI, C. V. D. H.; BURONE, L. & BONETTI FILHO, J. (2000). Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista Estuarine System - Brazil, *Marine Pollution Bulletin*, 40 (2), p. 165 - 173.
- CAMARGO, R.; HARARI, J. & CARUZZO, A. (1999). Basic statistics of storm surges over the southwestern Atlantic - *Afro-America Gloss News*, vol. 3 (2), p. 12 - 14.
- CASTELÃO, R. M.; PIMENTA, F. M. e CAMPOS, E. J. D. (1999). *Modelagem da circulação e dispersão de materiais passivos na baía de Santos (SP Brasil)*. Trabalho apresentado na XII Semana Nacional de Oceanografia em novembro.
- DHN (1993). *Atlas de Cartas Piloto (material cartográfico)/Diretoria de Hidrografia e Navegação - Escala 1: 10 000 000 - Marinha do Brasil*, p. 24.
- ELLIOT, A. J. (1986). Shear diffusion and the spread of oil in the surface layer of the North Sea - *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, n°39, p. 113 - 137.
- ELLIOT, A. J.; HURFORD, N. & PENN, J. (1986). Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Marine Pollution Bulletin*, n°7, p. 308 - 313.
- FONSECA, C. A. & CAMPOS, E. J. D. (1999). *Simulações numéricas da circulação e dispersão de efluentes do emissário submarino de Pecém - Ceará*. Relatório Técnico.
- GORDON, M. (2000). *Modelagem da dispersão de substâncias no porto e baía de Santos*. Dissertação de mestrado no IOUSP, p. 133.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. (1995). *Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989*. Relatório interno do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, n°36, p. 1 - 15.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. (1997). Simulação da circulação de maré na região costeira de Santos (SP) com modelo numérico hidrodinâmico. *Revista Pesquisa Naval/Suplemento da Revista Marítima Brasileira*, vol. 10, p. 173 - 188.
- 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. e CACCIARI, P. L. (1999). *Implantação de um sistema de previsão de marés e de correntes de maré na Baixada Santista através de modelo numérico tridimensional*. Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico da USP, n°45, p. 21.
- HARARI, J.; CAMARGO, R. e 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. e CACCIARI, P. L. (2000a). *Análise de medições oceanográficas e meteorológicas no Canal do Porto de Santos (SP)*. Resumo estendido submetido ao XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, programado para o Rio de Janeiro (RJ), de 16 a 20 de Outubro de 2000.
- HARARI, J. e MESQUITA, A. R. (1995). *Tábuas das marés de Ubatuba, Santos e Cananéia para os anos de 1996 e 1997*. Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico da USP, n°42, p. 28.
- KOWALICK, Z. & MURTY, T. S. (1993). Numerical modeling of ocean dynamics. *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 5. Singapore, World Scientific.
- LEONARD, B. P. (1979). A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 19, p. 59 - 98.
- MELLOR, G. L. (1998). *User's Guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Princeton University, Internal Report, p. 40.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. (1974). A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 31, p. 1791 - 1806.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Review of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, p. 851 - 875.
- MONTENEGRO, A. (1999). *Estudo da circulação forçada por ventos e marés na Baía de Todos os Santos e plataforma continental adjacente*. Simulações com o modelo oceânico da Universidade de Princeton (POM). Dissertação de mestrado no Instituto Oceanográfico da USP, p. 94.
- OEY, L. Y.; MELLOR, G. L. & HIRES, R. I. (1985). Tidal modelling of the Hudson - Raritan Estuary - Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, n°20, p. 511 - 527.
- OEY, L. Y.; MELLOR, G. L. & HIRES, R. I. (1985a). A three-dimensional simulation of the Hudson - Raritan Estuary. Part I: Description of the model and model simulations. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 15, p. 1676 - 1692.
- PRESS, W. H.; VETTERLING, W. T.; TEUKOLSKY, S. A. & FLANNERY, B. P. (1992). Numerical Recipes in Fortran. *The Art of Scientific Computing* - Cambridge University Press.
- PROCTOR, R.; FLATHER, R. A. & ELLIOT, A. J. (1994). Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf - Applications to the gulf oil spill - *Continental Shelf Research*, vol. 14, n°5, p. 531 - 545.
- RICHTMEYER, R. D. & MORTON, K. W. (1967). Difference Methods for initial - value problems - *Interscience Publishers*.
- SAUL'EV, V. K. (1957). *On a method of numerical integration of the equation of diffusion* - *Doklady Akad. Nauk USSR*, 115, 1077.

***Numerical Simulations of Substance
Dispersion in the Port and Bay of
Santos (São Paulo, Brazil), Under
the Effect of Tides and Winds***

ABSTRACT

This study estimates the evolution of the dispersion of substances in the Port and Bay of Santos (SP - Brazil), considering several hydrodynamic situations and three numerical solutions, all of them based on the stream fields generated by the Princeton Ocean Model (POM): MAPOM (dispersion model coupled to POM, which solves the advection-diffusion-decay equation in vertical sigma coordinates, using finite difference methods), MODIF (similar to the former solution, but in vertical linear coordinates) and MOCAD (dispersion model representing the advection with a Lagrangean formulation and diffusion/decay using the random-walk technique). Based on measurements of nutrient concentrations, eight areas and the region of the submarine emissary were selected as the points to release substances (considered as inert and completely mixed in the sea water). In the initial simulations, the substances were submitted to the effects of spring tides only; in the subsequent simulations, the dispersions were due to the combined effects of tides and permanent currents of flooding and ebbing, generated by southwest and northeast winds, respectively (with changed directions in the Channel of the Port, due to orographic effects); these simulations were performed without and with the decay of the released substances. The results obtained here show the computational efficiency and flexibility of the adopted methodology. The influence of tides on the distribution of the concentrations is spatially limited; on the other hand, the inclusion of strong winds (and corresponding currents) tends to increase the dispersion significantly. In future, hydrodynamic modeling will consider seawater density variations and dispersion models will be applied to specific substances, so that this methodology will be very useful to support pollution control.

Keywords: coastal circulation; dispersion of passive substances; hydrodynamic numerical modeling; dispersion models; Baixada Santista.