

# Resultados de simulações de dispersão de substâncias e propriedades no Porto e Baía de Santos

Joseph Harari & Michel Gordon

**Resumo** ? Este trabalho apresenta resultados de simulações numéricas da dispersão de substâncias e propriedades no Porto e Baía de Santos, utilizando correntes marítimas calculadas por modelo numérico hidrodinâmico tridimensional. Dois tipos de modelos são utilizados para os estudos de dispersão: 1) a solução da equação da advecção – difusão – decaimento de uma concentração através do método de diferenças finitas; e 2) o deslocamento de partículas, considerando a solução lagrangeana para a advecção e o método do caminho aleatório para a difusão (e o decaimento). Os processamentos realizados demonstram a importância das condições hidrodinâmicas (e meteorológicas) na distribuição de materiais e propriedades.

**Palavras-chave** ? Modelagem numérica da dispersão, dispersão de substâncias e propriedades, Porto e Baía de Santos.

## I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta resultados de simulações numéricas da dispersão de substâncias e propriedades no Porto e Baía de Santos, utilizando informações sobre as correntes marítimas calculadas por modelo numérico hidrodinâmico tridimensional (Harari, Camargo & Cacciari, 2000).

Dois tipos de modelos são utilizados para os estudos de dispersão (Harari, Camargo & Gordon, 2000): 1) a solução da equação da advecção – difusão – decaimento de uma concentração através do método de diferenças finitas; e 2) o deslocamento de partículas, considerando a solução lagrangeana para a advecção e o método do caminho aleatório para a difusão (e o decaimento).

Os sistemas de correntes na área de interesse foram fornecidos por um modelo numérico hidrodinâmico de alta resolução, com espaçamento horizontal em torno de 75 m e vertical de 2 m. Neste modelo foram considerados os efeitos de maré (na sizígia e quadratura) e influências meteorológicas (condições predominantes e ventos associados a frentes frias); diversas combinações das condições de maré e de ventos podem ser consideradas, com eventos típicos (médios) e extremos.

Nos processamentos dos modelos tridimensionais de dispersão foram considerados: 1) pontos potenciais de despejo de materiais e / ou poluentes; e 2) distribuições iniciais de interesse de certas propriedades (como por exemplo a concentração de nutrientes, a biomassa e a produtividade primária).

Joseph Harari, [joharari@usp.br](mailto:joharari@usp.br), Michel Gordon, [mgordon@usp.br](mailto:mgordon@usp.br), Instituto Oceanográfico da USP, Praça do Oceanográfico 191, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil, 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 Tecnológico (CNPq).

## II. METODOLOGIA

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:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} K_h \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_h \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_v \frac{\partial c}{\partial z} -$$

$$K_d c + Q$$

onde  $c$  é a 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, enquanto que a difusão, o decaimento e os efeitos de fontes compõem o segundo membro.

Evidentemente, a solução da equação da advecção - difusão - decaimento envolve técnicas de diferenças finitas (Leonard, 1979; Saul'ev, 1957) e o conhecimento dos campos de correntes na área de interesse, fornecidos por modelo numérico hidrodinâmico tridimensional (os valores de  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ).

Uma alternativa à solução por diferenças finitas da equação da advecção-difusão-decaimento é baseada na solução do problema de dispersão através do rastreamento Lagrangeano e da caminhada aleatória de partículas (Proctor, Flather & Elliot, 1994).

Nessa solução, se representa a substância não mais através de sua concentração, mas por um conjunto de 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.

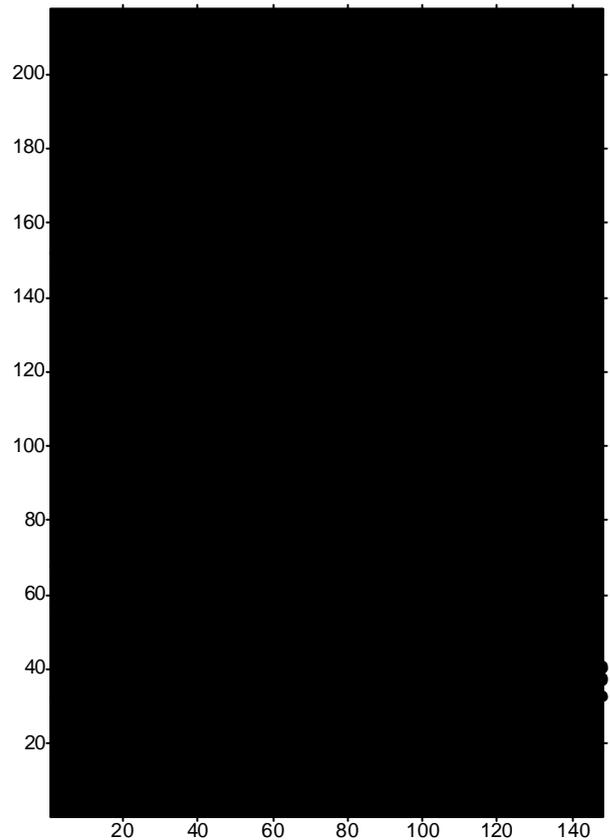
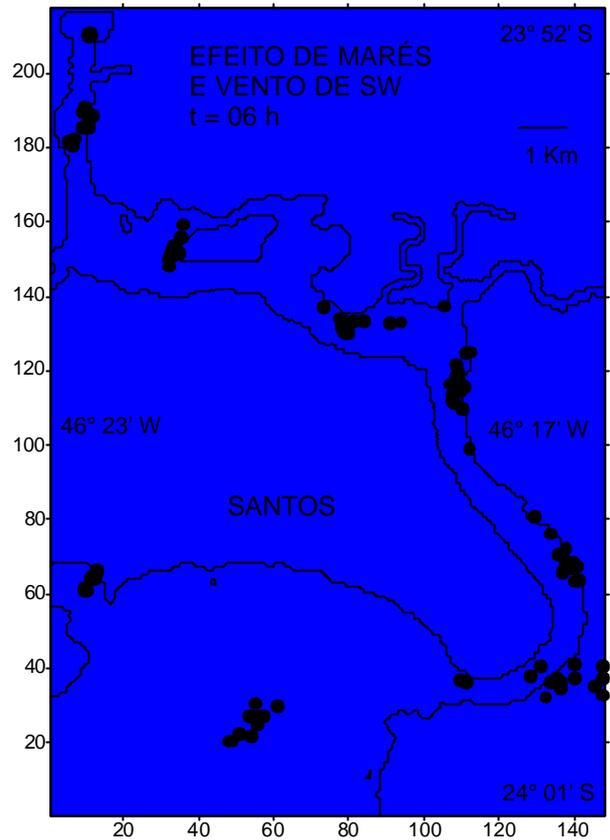
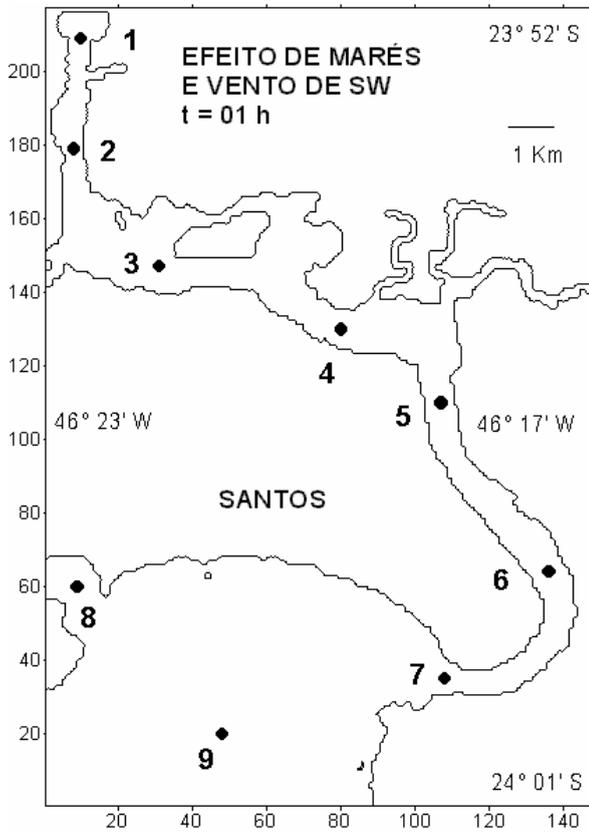
Subsequentemente, são efetuados os cálculos de difusão e decaimento das partículas, sendo ambos guiados por um

gerador de números aleatórios, com distribuição Gaussiana de média zero e desvio padrão unitário.

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

### III. RESULTADOS

Como exemplo dos resultados obtidos com a modelagem da dispersão, as figuras mostram a evolução da distribuição de partículas, de 0 até 24 horas, quando submetidas a efeitos de maré de sizígia e de intensos ventos de SW (com 50 Km/h), a partir dos despejos nos locais: (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 e (9) Emissário Submarino; em cada um desses pontos, foram consideradas descargas iniciais de 3 partículas e emitidas mais 3 partículas a cada hora, somente na superfície.



#### IV. CONCLUSÕES

As características hidrodinâmicas da área são refletidas nas distribuições das concentrações, com deslocamentos seguindo as enchentes e vazantes da maré, de período preponderantemente semi-diurno, bem como as influências das correntes de deriva. Analisando as figuras apresentadas, nos locais em que a advecção é maior ocorre também uma maior difusão das substâncias, espalhando os materiais em áreas maiores e diminuindo as concentrações máximas nos pontos centrais de despejo; desse modo, a dispersão final na Boca do Canal do Porto (local com máxima advecção) resulta numa grande área atingida mas com pequenas concentrações; por outro lado, no Canal de Piaçaguera e próximo ao Rio Quilombo (locais de mínima advecção) as áreas atingidas são pequenas e as concentrações remanescentes são muito grandes.

Dessa forma, os processamentos realizados demonstram a importância das condições hidrodinâmicas (e meteorológicas) na distribuição de materiais e propriedades, com a delimitação de áreas relativamente estagnadas (que dificultam a dispersão) e áreas de intensas correntes (que promovem a dispersão).

A modelagem implementada poderá no futuro ser usada de forma operacional, com diversas aplicações em engenharia e meio ambiente, como por exemplo no controle da qualidade da água.

#### REFERÊNCIAS

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. & GORDON, M. - 2000 - "Numerical simulations of the hydrodynamics and the dispersion of substances in the coastal area of Santos (SP, Brazil)" - publicado em formato digital pela ICECE 2000 - International Conference on Engineering and Computer Education, realizada em São Paulo (SP), Brasil, em Setembro de 2000, 4p.

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, pp. 59-98.

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, pp 531-545.

SAUL'EV, V. K. (1957) On a method of numerical integration of the equation of diffusion - Doklady Akad. Nauk USSR, 115, 1077.

