

Análise das Trajetórias das Águas Continentais Afluentes ao Sistema Estuarino de Santos

Trajectory Analysis of Inland Water Discharges into the Santos Estuarine System

Fernando Roversi¹, Paulo C. C. Rosman² e Joseph Harari³

^{1,2} Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

fernandroversi@gmail.com; pccrosman@ufrj.br

³ Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

joharari@usp.br

Recebido: 05/10/15 - Revisado: 03/12/15 - Aceito: 09/12/15

RESUMO

A investigação de processos inerentes a um sistema estuarino permite inferir de forma mais precisa a complexa dinâmica de constituintes presentes em suas águas, de modo a otimizar estratégias de ação em planos de gestão e projetos ambientais em regiões costeiras. Este trabalho apresenta um estudo da hidrodinâmica do Sistema Estuarino de Santos (Estado de São Paulo), com enfoque em aspectos relacionados ao transporte de constituintes presentes em suas águas de origem continental. Por meio do SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) foi implementado um modelo hidrodinâmico computacional para a reprodução dos padrões de circulação do sistema. A partir de simulações com o Modelo de Transporte Lagrangeano, foram representadas as descargas dos afluentes mais expressivos: Rio Boturoca, Rio Cubatão, Rio Quilombo e Rio Itapanhaú. Os resultados foram analisados probabilisticamente em função do tempo de vida das águas que adentram o sistema e de suas porcentagens de ocorrência, numa determinada posição ao longo do período de simulação. Esses resultados permitiram analisar as trajetórias das águas continentais afluentes, na forma de mapas de isolinhas de porcentagem de ocorrência, separados por tempo de vida limite. Os mapas indicaram que as águas do Rio Cubatão alcançam a Baía de Santos preferencialmente pela embocadura do Estuário de São Vicente, diferentemente do Rio Quilombo, cujas águas seguem preferencialmente pelo Canal do Porto. As águas do Rio Cubatão permaneceram na maior parte do tempo aprisionadas nas regiões de mangue. Considerando 3 dias de tempo de vida, apenas durante 1% do período simulado, estas alcançaram os canais principais.

Palavras Chave: Sistema Estuarino de Santos. Modelagem Computacional. Hidrodinâmica Estuarina. Transporte de Constituintes.

ABSTRACT

In order to optimize action strategies for environmental management plans and environmental projects in coastal areas, the investigation of processes related to an estuarine system contributes to a better inference of the complex dynamics of constituents present in its water. This paper reports a hydrodynamic study of the Santos Estuarine System (São Paulo State, Brazil) focused on aspects related to the transport of constituents from inland water discharges. A computational model was implemented using SisBaHiA (Base System for Environmental Hydrodynamics) in order to reproduce the hydrodynamic patterns of the system. Based on the Lagrangian Transport Model the most significant tributary river discharges were represented: Boturoca River, Cubatão River, Quilombo River and Itapanhaú River. Results were probabilistically analyzed based on the lifetime of tributary discharges flowing into the estuarine system and their position during the simulation period. Such simulation results were presented on contour maps of occurrence percentage separated by lifetime limits, supporting a trajectory analysis of the inland water discharges. Map results indicated that water from Cubatão River reaches the Santos Bay preferably through the mouth of the São Vicente Estuary and water from Quilombo River preferably flows through the Port of Santos Channel instead. Water from Cubatão River remained in a mangrove area during most of the simulation period. Considering 3 days of lifetime limit only 1% reached the main channels.

Keywords: Santos Estuarine System. Computational Modeling. Estuarine Hydrodynamics. Constituents Transport.

INTRODUÇÃO

O Sistema Estuarino de Santos localiza-se na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), litoral do Estado de São Paulo (Figura 1). A RMBS é formada por nove municípios, somando um total de aproximadamente 1.600.000 habitantes distribuídos em 2.887 km². A expressiva atividade industrial do Município de Cubatão e a grande movimentação de embarcações no Porto de Santos são alguns dos fatores que caracterizaram a RMBS como um dos maiores exemplos brasileiros de degradação ambiental por poluição hídrica em ambientes costeiros (CETESB, 2001). A intensa ocupação que se espalhou ao redor da Ilha de São Vicente, desde meados do século XIX, acarretou severos danos ambientais à região. A poluição dos corpos d'água pelo lançamento de efluentes in natura e de resíduos sólidos; a degradação dos mangues; a diminuição da quantidade das águas disponíveis para consumo; a redução do índice de balneabilidade das praias; e, ainda, as ocupações irregulares de encostas, de mananciais, das margens de rios e de manguezais, foram alguns dos aspectos que estiveram associados a esse processo de urbanização (ZÜNDE, 2006). Resultados do monitoramento ambiental realizado pela CETESB (2009) mostraram baixos índices de qualidade das águas do Sistema Estuarino de Santos, indicando um cenário de: Depleção de Oxigênio Dissolvido (OD); Incremento de nutrientes (compostos de Nitrogênio e Fósforo) e de matéria orgânica (Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO); e, ainda, presença de microrganismos indicadores de poluição fecal (Coliformes Termotolerantes).

Situado numa região de Planície Costeira, limitada pelo Oceano Atlântico e pelas escarpas da Serra do Mar, o Sistema Estuarino de Santos apresenta uma configuração morfológica bastante complexa, com múltiplas cabeceiras, extensas áreas alagáveis com formação de manguezais e bancos de lama, e também diferentes ligações com o oceano adjacente. Seu sistema hidrográfico pode ser subdividido em três estuários e uma baía: o Estuário do Canal de Bertioga, com extremidades entre os municípios de Guarujá e Bertioga, dividindo a Ilha de Santo Amaro da planície costeira continental; o Estuário do Canal do Porto de Santos e o Estuário de São Vicente, ambos com suas embocaduras na Baía de Santos no entorno da Ilha de São Vicente.

Assim como a geometria intrincada dos canais, efeitos oceanográficos, hidrológicos e meteorológicos são fatores complexos que definem o escoamento das águas e o transporte de poluentes e outros constituintes pelo sistema. Para uma melhor investigação e representação desses fenômenos dinâmicos, a técnica de modelagem computacional constitui metodologia de grande potencial, conforme já verificado em outros trabalhos, como por exemplo: Harari e Camargo (1994), Harari e Camargo (1998), Yassuda (1991), Gordon (2000), Chambel e Mateus (2008), Baptistelli (2008), Gregório (2009), Sampaio (2010) e Ribeiro (2012).

O presente estudo tem como objetivo apresentar uma análise das trajetórias das águas continentais afluentes ao Sistema Estuarino de Santos, utilizando como metodologia básica a modelagem computacional para a representação da hidrodinâmica do sistema e do transporte de constituintes presentes em suas águas.

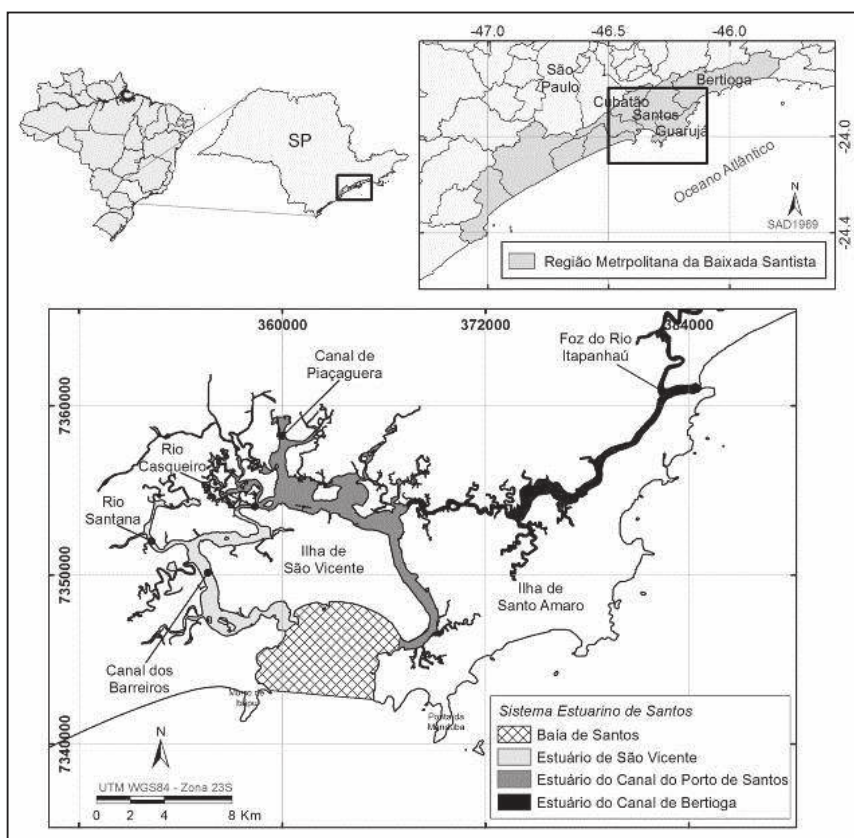


Figura 1 – Localização do Sistema Estuarino de Santos e seus subsistemas hidrográficos

MODELO HIDRODINÂMICO E DE TRANSPORTE DE PROPRIEDADES

As simulações computacionais foram realizadas por meio do SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental): um sistema profissional de modelos computacionais, registrado pela Fundação Coppetec (órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ), desenvolvido para projetos, estudos e gestão ambiental de recursos hídricos. O SisBaHiA pode ser aplicado em simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, visando o estudo da dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais (ROSMAN, 2015). Os seguintes módulos do SisBaHiA foram utilizados no presente estudo:

Modelo Hidrodinâmico 2DH

Trata-se de um modelo hidrodinâmico da linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), otimizado para corpos d'água naturais com escoamento pouco sensível à baroclinicidade vertical (ROSMAN, 2015). Dentro da formulação matemática utilizada destacam-se as seguintes características:

- Resolve as equações completas de Navier-Stokes, considerando a aproximação de águas rasas (aproximação de pressão hidrostática) e a aproximação de Boussinesq;
- Aplica a modelagem da turbulência baseada em técnicas de filtragem semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (*LES - Large Eddy Simulation*);
- Utiliza a Equação de Estado, segundo a Fórmula de Eckart;
- No Módulo 2DH as equações da conservação da quantidade de movimento e a equação da continuidade são promediadas na vertical (escoamento bidimensional).

A formulação numérica do modelo hidrodinâmico emprega o Método dos Elementos Finitos com elementos sub-paramétricos Lagrangeanos biquadráticos, para a discretização espacial horizontal. A discretização temporal é feita por meio de esquema numérico implícito de diferenças finitas. Os efeitos de alagamento e secamento do domínio foram modelados pelo Método Poroso-Rugoso (ROSMAN, 2015).

Modelos de Transporte Euleriano e Lagrangeano

Tratam-se de modelos para a simulação do transporte advectivo e difusivo de propriedades presentes no escoamento, podendo incluir ainda reações cinéticas de produção e consumo do constituinte de interesse. Quando o constituinte é ativo, por exemplo o sal, o estudo do transporte do constituinte é um problema acoplado à modelagem hidrodinâmica, pois sua presença interfere nas características do escoamento; porém, quando o constituinte é passivo a solução é desacoplada (ROSMAN, 1997).

Na modelagem Euleriana o transporte de um constituinte qualquer é determinado, a partir do princípio da conservação da massa, pela seguinte equação matemática:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_c \delta_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \sum R_{p\&c} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

onde: C é a concentração do constituinte; u_i é a componente do vetor velocidade na direção i ; D_c é o coeficiente de difusão molecular; $R_{p\&c}$ são reações cinéticas de produção ou consumo; δ_{ij} é o delta de Kronecker, introduzido para possibilitar a notação indicial (quando $i = j \Rightarrow \delta_{ij} = 1$, quando $i \neq j \Rightarrow \delta_{ij} = 0$). Na modelagem Lagrangeana os constituintes transportados são representados por um número de partículas que são então carregadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico, sendo que a posição de qualquer partícula no instante seguinte (P^{n+1}) é determinada por meio de uma expansão em Série de Taylor de segunda ordem, a partir da posição anterior conhecida (P^n):

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} \quad (2)$$

Admite-se que as velocidades que promovem o transporte das partículas correspondem às velocidades calculadas pelo modelo hidrodinâmico. Após determinada a posição de uma dada partícula, os efeitos das velocidades difusivas (movimentos em escalas não resolvíveis pela grade adotada) podem ser incluídos, por meio de um desvio aleatório de posição, em função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas (ROSMAN, 2015).

DOMÍNIO DE MODELAGEM

As fronteiras do modelo foram definidas por meio de: imagens de satélite do Google Earth; mapeamentos das áreas de manguezal e dos bancos de lama do estuário (CANTAGALLO, 2008; CUNHA, 2009; PERINOTTO, 2010); e Cartas Náuticas da DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil. A discretização espacial do domínio de modelagem foi realizada por meio de uma malha de elementos finitos, representando as principais feições do espelho d'água do Sistema Estuarino de Santos. A construção da malha considerou a geometria intrincada dos vários canais e das áreas alagáveis, como os manguezais e os bancos de lama. As informações referentes à batimetria da região foram extraídas das Cartas náuticas da DHN (nº 1711 e nº1701) e de levantamentos batimétricos efetuados pelo CTH - Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - Escola Politécnica da USP (CTH, 1976; CTH, 1968). Nos limites inferior e superior das regiões alagáveis, as cotas foram definidas como sendo, respectivamente, os níveis médios das baixa-mares e das preamares de sizígia. Um valor médio de rugosidade equivalente de fundo igual a 0,02 m foi adotado para todo o domínio.

A Figura 2 apresenta o domínio de modelagem com a malha construída e a Figura 3 apresenta o mapa batimétrico do domínio.

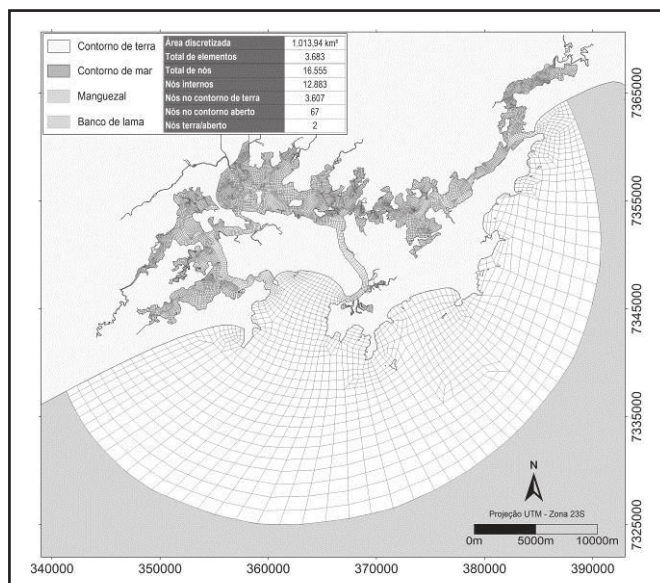


Figura 2 – Malha utilizada para a discretização espacial do domínio de modelagem

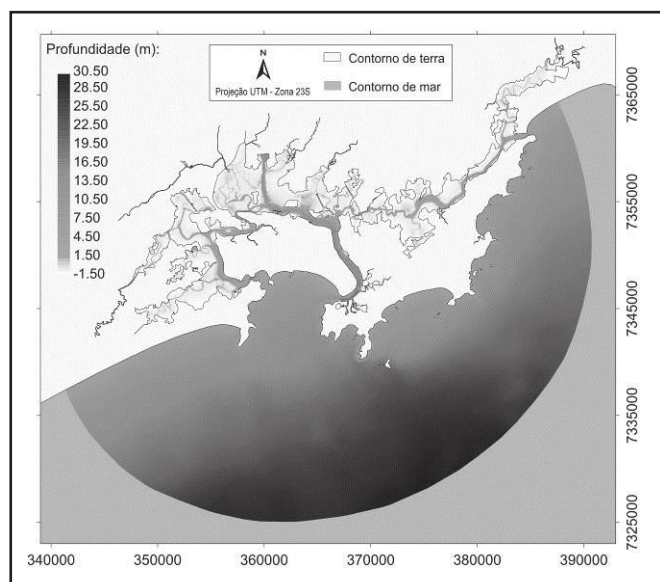


Figura 3 – Batimetria utilizada no domínio de modelagem

CENÁRIOS HIDRODINÂMICOS

Os cenários hidrodinâmicos para a modelagem foram considerados com o intuito de reproduzir a combinação dos efeitos da maré astronômica, das vazões fluviais afluentes (representativas de verão e de inverno) e do gradiente horizontal de salinidade, sendo este gerado pela mistura das águas continentais com águas provenientes da região costeira. As forçantes (citadas em ordem de relevância) predominam sobre o escoamento local e são responsáveis pelas condições hidrodinâmicas mais frequentes. Na ausência de efeitos meteorológicos significativos, a circulação de maré, isoladamente, pode ser considerada como uma boa aproximação da circulação local (HARARI; CAMARGO, 1998).

Como condição de contorno para a fronteira aberta do domínio foi prescrita uma série temporal de elevação da

superfície livre, construída a partir das constantes harmônicas calculadas pela Fundação de Estudos do Mar, para a Estação Ilha das Palmas (FEMAR, 2000). Em cada cenário, todos os nós da malha computacional pertencentes à fronteira aberta recebem a mesma série de valores de elevação da superfície livre, porém com uma defasagem no tempo para cada nó. Esta defasagem na propagação da maré ao longo do domínio foi calculada a partir do trabalho de Harari e Camargo (1994).

Para representar condições típicas de verão, caracterizado como um período chuvoso, e de inverno, caracterizado como um período de estiagem, foram utilizadas as vazões fluviais médias de longo período ($Q_{L,P}$) e as vazões $Q_{7,10}$, respectivamente. Os dados foram extraídos dos estudos hidrológicos apresentados no Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (SHS, 2007). A vazão turbinada da usina hidrelétrica Henry Borden, lançada no rio Cubatão, foi considerada constante e igual a 6 m³/s (RAGNEV, 2005). Na Figura 4 são apresentados os valores e as posições das descargas fluviais inseridas no modelo hidrodinâmico.

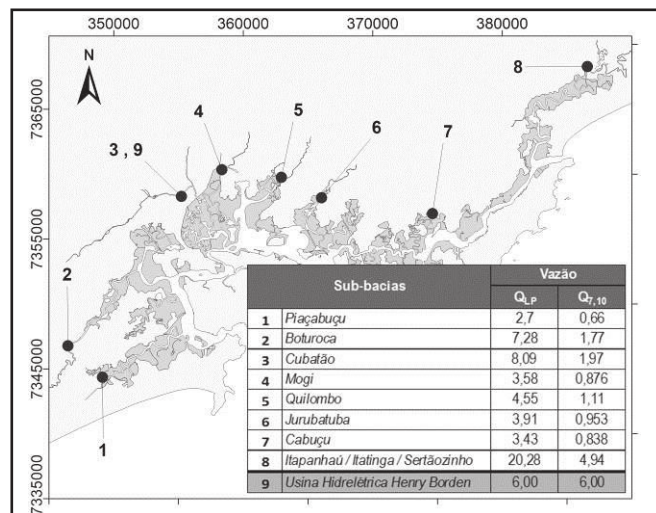


Figura 4 – Descargas fluviais inseridas no modelo hidrodinâmico

A salinidade foi modelada como um constituinte ativo no escoamento. O sal, ao ser transportado pelos processos de advecção e de difusão, pode alterar a densidade da água e criar gradientes horizontais de pressão que contribuem para a hidrodinâmica local. Para o modelo de transporte de sal foram prescritas as seguintes condições de contorno: 35 psu para afluxo através da fronteira aberta (contorno de mar) e 0 psu para vazões continentais afluentes. Padrões de distribuição espacial de salinidade típicos de verão e de inverno, obtidos com simulações de cinco meses de duração (ROVERSI, 2012), foram utilizados como condições iniciais das simulações.

O modelo foi calibrado com cenários datados, utilizando os seguintes dados: i) séries de elevação da superfície livre, medidas em quatro estações maregráficas da DHN, do dia 01 ao dia 15 de maio de 2004 (FRF, 2008); ii) velocidades, obtidas via ADCP instalado na Ilha das Palmas, durante o mês de fevereiro de 2010; e iii) salinidade da água, medida durante duas campanhas de monitoramento ambiental, realizadas nos meses de janeiro e de agosto de 2011 (ASA, 2011).

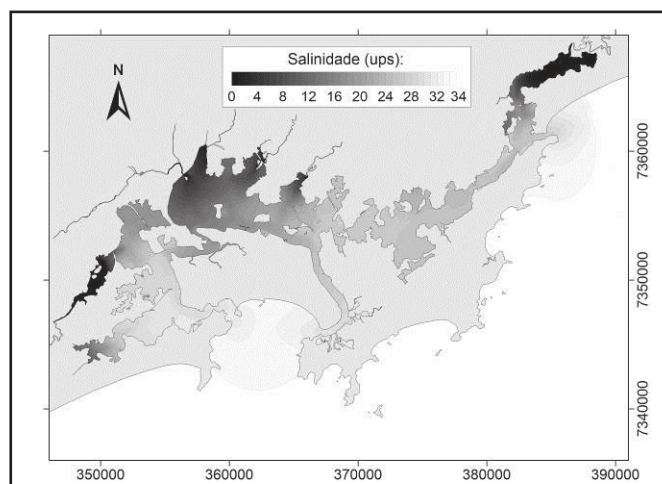


Figura 5 – Mínima intrusão salina (período representativo de verão)

De forma geral o modelo representou de forma satisfatória a hidrodinâmica existente na região, assim como o transporte de sal presente no escoamento. As velocidades calculadas se ajustaram à magnitude e à direção predominante das correntes medidas pelo ADCP (médias na coluna d'água). A salinidade calculada foi capaz de capturar padrões de distribuição espacial típicos, com valores próximos aos medidos. Na Figura 5 é ilustrada a distribuição de salinidade no instante de mínima

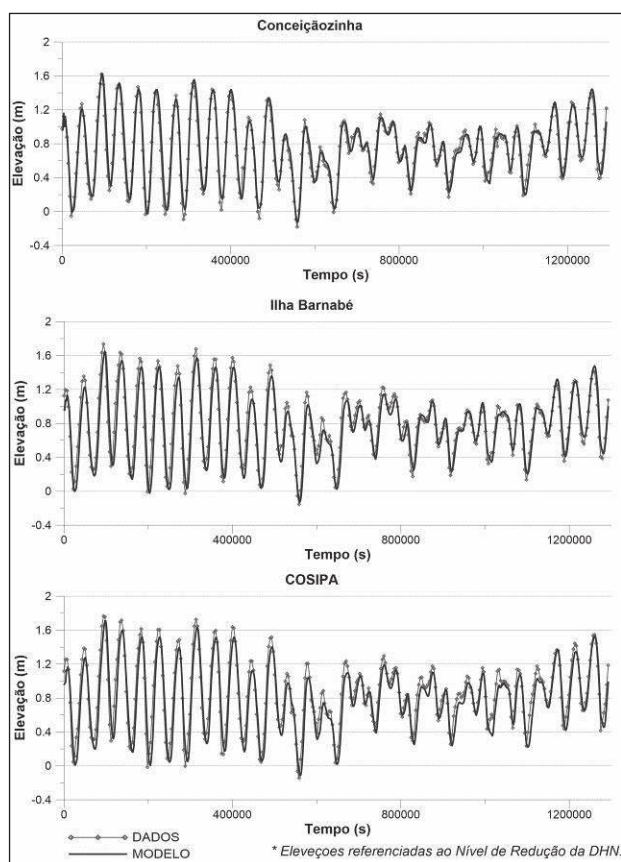


Figura 6 – Níveis d'água calculados pelo modelo hidrodinâmico e medidos nas Estações Maregráficas de Conceiçãozinha (23°58'0" S, 46° 18'0" W), Ilha Barnabé (23°55'6" S, 46°20'0" W) e COSIPA (23°52'4" S, 46°22'6" W), ao longo do Canal do Porto de Santos

intrusão salina (vazante), para o período representativo de verão.

Na Figura 6 são apresentados em maior detalhe os resultados da calibração de níveis d'água. Nota-se que o modelo apresentou uma melhor aderência com a série de nível d'água medida na Estação Maregráfica Conceiçãozinha, localizada na entrada do Canal do Porto de Santos. Nas demais estações, localizadas nas regiões mais internas do estuário, os resultados apresentaram um ajuste menos preciso. Tal resultado está relacionado com a qualidade das informações batimétricas fornecidas ao modelo. Nas regiões mais próximas ao Canal do Porto há uma maior precisão na batimetria inserida, ao passo que, nas regiões mais internas do domínio, incluindo principalmente as áreas alagáveis, há uma maior incerteza nos valores de profundidade prescritos.

ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS DAS ÁGUAS CONTINENTAIS AFLUENTES

A análise das trajetórias das águas continentais afluentes ao Sistema Estuarino de Santos foi efetuada a partir de simulações com o Modelo de Transporte Lagrangeano do SisBaHiA. Lançamentos pontuais de partículas conservativas foram definidos junto às descargas dos afluentes mais expressivos: Rio Boturoca, Rio Cubatão (cujas vazões são somadas à contribuição da Usina Henry Borden), Rio Quilombo e Rio Itapanhaú (cuja vazão é somada às contribuições das bacias afluentes Itatinga e Sertãozinho). As partículas foram lançadas com intervalos de 30 minutos, por um período de 30 dias de simulação. A cada passo de tempo da simulação o Modelo de Transporte computou a posição e o tempo de vida de cada partícula dentro do domínio.

As simulações consideraram apenas as vazões fluviais médias de longo período (Q_{LP}), apresentadas na Figura 4. Resultados de simulações realizadas para os demais afluentes ao sistema podem ser verificados em Roversi (2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica e da modelagem de transporte, para os diferentes períodos simulados. Serão analisadas em maior detalhe as trajetórias das águas continentais afluentes ao Sistema Estuarino de Santos.

Modelo Hidrodinâmico do Sistema Estuarino de Santos

Os resultados das simulações hidrodinâmicas permitiram a representação da circulação existente na região de interesse, a partir das velocidades médias na coluna d'água calculadas pelo modelo. Como exemplos são apresentados nas Figuras 7 e 8 os padrões de correntes em instantes de meia maré de enchente e de meia maré de vazante, respectivamente, para o período de sizígia do cenário representativo de verão. Os vetores indicam a direção e a intensidade do escoamento no dado instante, sendo que escala de cores auxilia a visualização da intensidade

(módulo da velocidade).

O Canal do Porto de Santos apresenta, em todos os instantes, as velocidades mais intensas de todo o domínio. Na região próxima à sua embocadura as velocidades chegam até 1,4 m/s na sizígia e até 0,7 m/s na quadratura. Durante as marés de quadratura as velocidades dos canais principais (desconsiderando as regiões próximas às embocaduras) alcançam até aproximadamente 0,4 m/s. Durante as marés de sizígia as velocidades são mais intensas e apresentam maior variabilidade espacial, alcançando até 1,2 m/s aproximadamente.

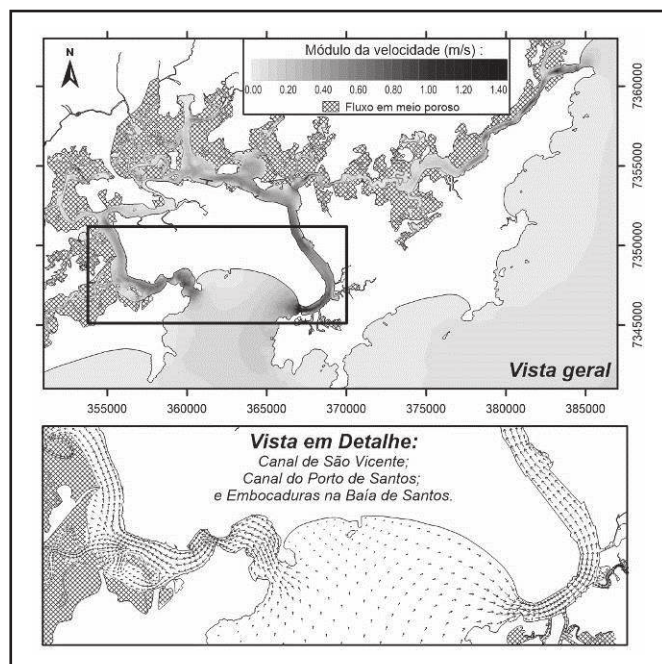


Figura 7 – Padrão de correntes em instante de meia maré de enchente (sizígia)

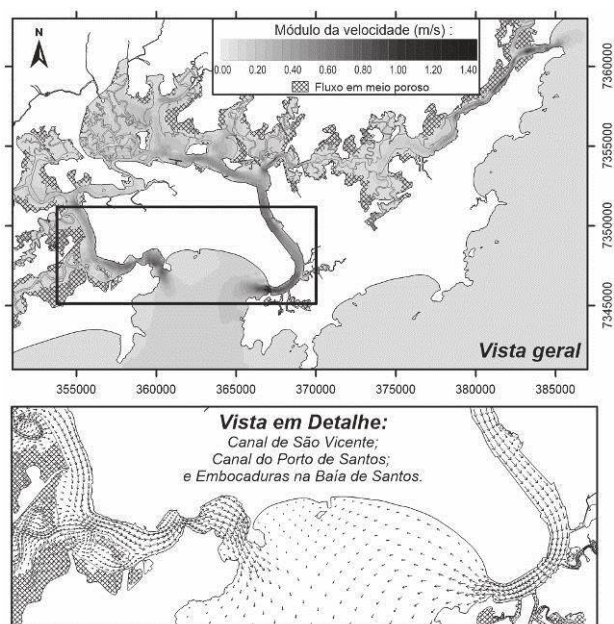


Figura 8 – Padrão de correntes em instante de meia maré de vazante (sizígia)

As regiões marcadas como “fluxo em meio poroso” correspondem às áreas secas, isto é, no instante mostrado o nível d’água calculado está abaixo da cota do terreno. A Figura 9 apresenta os valores elevação máximos e mínimos calculados pelo modelo. Nota-se que quase todas as áreas do domínio estão alagadas no instante de máxima preamar, enquanto que, no instante de mínima baixa-mar, quase todas as áreas definidas como manguezais e bancos de lama estão secas, isto é, o nível d’água calculado neste instante está abaixo da cota definida para o terreno.

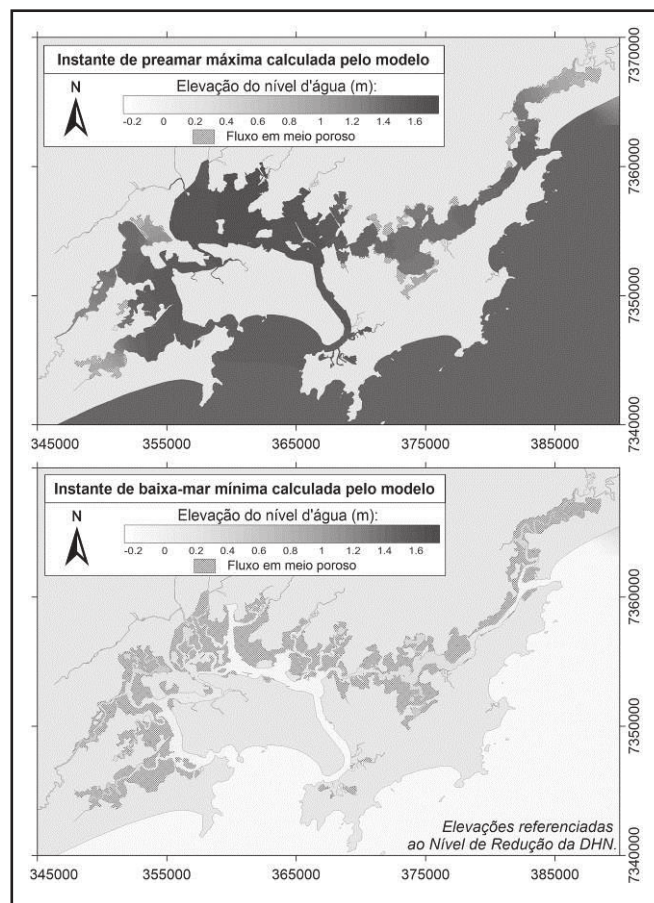


Figura 9 – Elevação do nível da água ao longo do domínio em instantes de máxima preamar (acima) e de mínima baixa-mar (abaixo)

Análise da trajetória das águas continentais que adentram o Sistema Estuarino de Santos

Os resultados foram analisados probabilisticamente em função do tempo de vida das partículas e de suas porcentagens de ocorrência, numa determinada posição ao longo do período de simulação. Para cada fonte foram calculadas as porcentagens de ocorrência de partículas com tempo de vida menor que: 1 dia, 3 dias, 7 dias e 15 dias. Essa análise é apresentada em mapas de isolinhas de porcentagem de ocorrência, separados por fonte e por tempo de vida limite. Os mapas gerados são apresentados da Figura 10 à Figura 13.

As águas do Rio Boturoca adentram o domínio com uma vazão constante de 7,28 m³/s. Nas proximidades onde esta foi

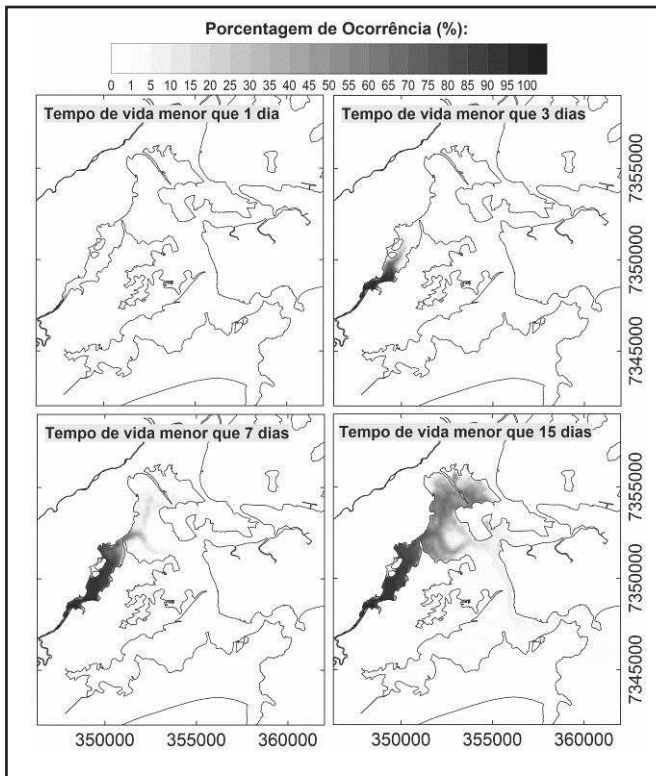


Figura 10 – Porcentagens de ocorrência das águas do Rio Boturoca

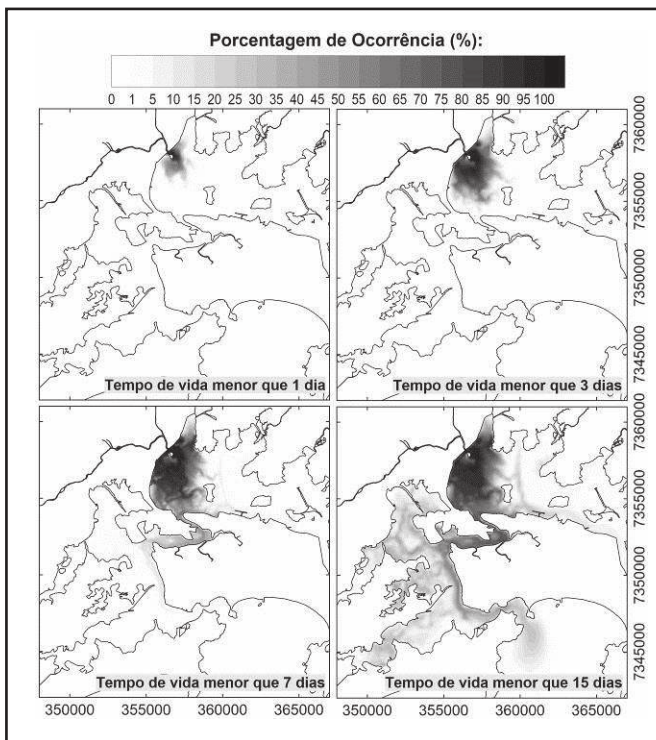


Figura 11 – Porcentagens de ocorrência das águas do Rio Cubatão

prescrita, o modelo hidrodinâmico também representa algumas inversões de fluxo, porém com predomínio de vazante. As águas, com até 7 dias de tempo de vida, alcançaram uma bifurcação existente no canal do rio, durante cerca de 50 % do período simulado. As águas com até 15 dias de tempo de vida passaram,

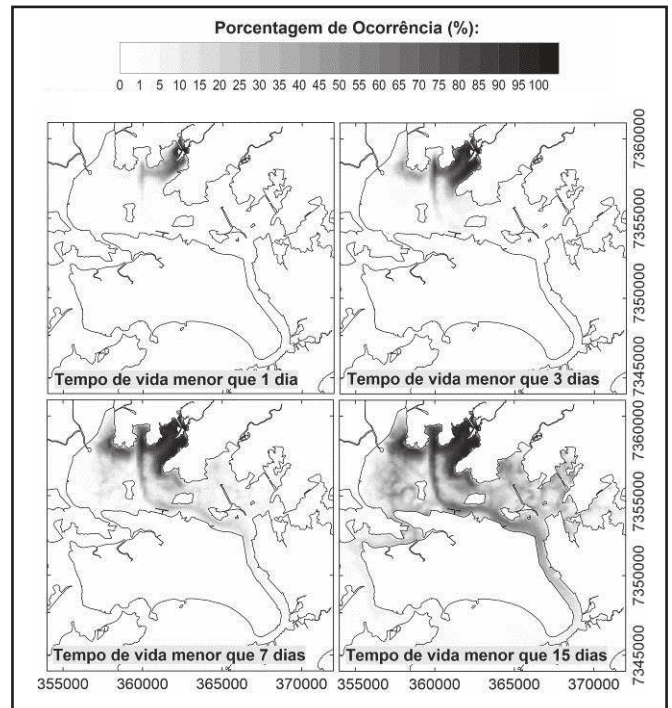


Figura 12 – Porcentagens de ocorrência das águas do Rio Quilombo

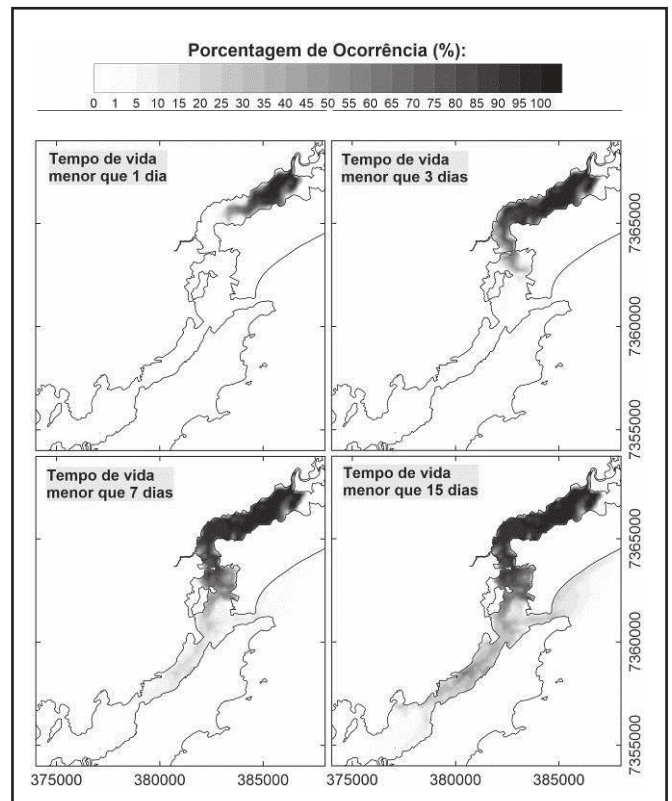


Figura 13 – Porcentagens de ocorrência das águas do Rio Itapanhaú

durante cerca de 50 % do período simulado, próximas a esta bifurcação, com maior ocorrência na parte norte (Rio Santana). Essas águas alcançaram a Baía de Santos, pela embocadura do Estuário de São Vicente, durante 1 % do período simulado.

As águas do Rio Cubatão, somadas às descargas turbina-

das da Usina Hidroelétrica Henry Borden, adentram o domínio com uma vazão constante de 14,09 m³/s. Esse volume d'água que chega ao estuário passa por uma extensa região de mangue, formada por diversos canais sinuosos, até alcançar canais de maior proporção: o Canal de Piaçaguera, na parte leste, e o Rio Casqueiro, na parte sul. A partir dos resultados nota-se que esse volume d'água permanece na maior parte do tempo aprisionado nas regiões de mangue. Águas com até 3 dias de tempo de vida alcançaram os canais principais durante apenas 1% do período simulado. Águas com tempo de vida limite de 15 dias foram transportadas, pelo Canal de Piaçaguera, durante cerca de 25 % do período, e pelo Canal dos Barreiros, durante cerca de 50 % do período. Essas águas alcançaram a Baía de Santos preferencialmente pela embocadura do Estuário de São Vicente (cerca 25 % de ocorrência na região da embocadura e cerca de 1 % de ocorrência no limite da baía com a região costeira).

As águas do Rio Quilombo adentram o domínio com uma vazão constante de 4,55 m³/s. Em 1 dia essas águas foram capazes de alcançar o Canal de Piaçaguera durante 40 % do período simulado. Águas com tempo de vida de até 3 dias alcançaram esse canal cerca de 80 % do período. É possível observar que preferencialmente as águas seguem em direção ao Canal do Porto. Águas com tempo de vida limite de 15 dias passaram pelas proximidades da Ilha Barnabé durante cerca de 50 % do período simulado.

As águas do Rio Itapanhaú adentram o domínio com uma vazão constante de 20,28 m³/s (valor inclui também as contribuições de outras duas bacias afluentes ao Rio Itapanhaú: Bacia do Rio Itatinga e Bacia do Rio Sertãozinho). Até sua foz, próximo à embocadura do Canal de Bertioga, a descarga do Rio Itapanhaú percorre um canal sinuoso, cercado por regiões de mangue. Nesta região houve a maior porcentagem de ocorrência de suas águas. As águas com tempo de vida de até 3 dias chegaram à sua foz durante 1 % do período simulado. Para um tempo de vida limite de 7 dias esse valor passou para aproximadamente 20 %. Na região costeira houve 1 % de ocorrência de águas com tempo de vida limite de 7 dias, e cerca de 10% de ocorrência de águas com tempo de vida limite de 15 dias.

As trajetórias das águas continentais representadas pelo modelo podem ser também analisadas com foco em constituintes de interesse presentes nas descargas fluviais prescritas. Considerando um constituinte qualquer que possa adentrar o Sistema Estuarino de Santos, completamente misturado ao longo da seção do escoamento, trazido pela contribuição natural da bacia hidrográfica ou por lançamentos efetuados ao longo de seus cursos d'água, o modelo representa então o transporte advectivo-difusivo deste constituinte ao longo do domínio e suas porcentagens de ocorrência.

As análises de porcentagens de ocorrência, separadas por tempo de vida limite, podem ser ainda interpretadas como um estudo do transporte de substâncias distintas que se diferenciam por suas taxas de decaimento características. Determinar, por exemplo, um tempo de vida limite de 24 horas para as partículas lançadas no domínio seria equivalente a representar o transporte de um constituinte que tenha como característica um decaimento exponencial com T_{90} de 24 horas (tempo necessário para que haja um decaimento de 90% da concentração inicial do constituinte).

CONCLUSÃO

A aplicação da técnica de modelagem computacional mostrou-se eficaz para a representação da hidrodinâmica da região de estudo, possibilitando o detalhamento das características do escoamento estuarino. Os cenários simulados permitiram analisar em detalhe as trajetórias das águas continentais afluentes ao Sistema Estuarino de Santos, representando de forma satisfatória os principais mecanismos que proporcionam a mistura das águas dentro do domínio modelado.

A compreensão da hidrodinâmica deste ambiente complexo é fundamental para o planejamento e o gerenciamento ambiental adequado da região. A investigação detalhada de processos inerentes ao sistema permite inferir de forma mais precisa a dinâmica de constituintes presentes em suas águas, de modo a otimizar estratégias de ação em planos de gestão e projetos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ASA - Applied Sciences Associates. Monitoramento da Qualidade da Água Marinha, Sedimentos e Organismos no Estuário de Santos e São Vicente e nas Zonas Litorâneas e Adjacentes nos Municípios de Bertioga, Guarujá, Cubatão, Santos, São Vicente e Praia Grande. 2011. 306 p. *Relatório Final* – Fase 1. São Paulo, SP, 2011.
- BAPTISTELLI, S. C. *Análise Crítica da Utilização de Modelagem Matemática na Avaliação da Dispersão de Efluentes Leves no Litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo)*. 2008. 314 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.
- CANTAGALLO, C. *Mapeamento de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Petróleo do Sistema Estuarino de Santos, Estado de São Paulo*. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro SP, 2008.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Programa de Controle de Poluição - Sistema Estuarino de Santos e São Vicente. 2001. 141 p. *Relatório*. São Paulo, SP, 2001. Disponível em: <http://praias.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 11 set. 2015.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo - 2009. 310 p. *Relatório*. São Paulo, SP, 2010. Disponível em: <http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 11 set. 2015.
- CHAMBEL, J.; MATEUS, M. Deliverable 2.3: Calibration of the hydrodynamic model for the Santos Estuary. *Integrated Ecological Coastal Zone Management System* -ECOMANAGE. Relatório. Portugal, Lisboa: Instituto Superior Técnico (IST) –

HIDROMOD, 2008. 35 p

CTH - Centro Tecnológico de Hidráulica. *Relatório Final dos Estudos de Recuperação e Proteção da Praia de São Vicente*. São Paulo, SP, 1976.

CTH - Centro Tecnológico de Hidráulica. *Relatório das Atividades da Missão Hidrográfica de Santos para a COPLAT*. São Paulo, SP, 1968.

CUNHA, F. P. da. *Mapeamento de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo na Região Costeira de Bertioga – SP*. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro SP, 2009.

FEMAR - Fundação de Estudos do Mar. *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*. Rio de Janeiro, RJ, 2000. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html>. Acesso em: 03 dez. 2015.

FRF - Fundação Ricardo Franco. Dragagem de aprofundamento do canal de navegação, bacias de evolução e berços de atracação do Porto Organizado de Santos. 2008. *Estudo de Impacto Ambiental*. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

GORDON, M. *Modelagem da dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos*. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

GREGÓRIO, H. P. *Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos*. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, SP, 2009.

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

HARARI, J.; CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, n. 42, p. 35-34, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1994.

RAGNEV, W. *Estudo de potência reativa, tensão, contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na grande São Paulo*. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2005.

RIBEIRO, R. B. *Modelagem numérica da influência das fontes de nutrientes sobre a variabilidade da biomassa fitoplancônica no Sistema Estuarino de Santos-São Vicente*. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP 2012.

ROVERSI, F. *Estudo Hidrodinâmico e de Renovação das Águas do Sistema Estuarino de Santos*. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ROSMAN, P. C. C. (Org.) *Referência Técnica do SisBaHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V95.pdf. Acesso em: 11 set. 2015.

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. In: ROSMAN, P. C. C.; ALMEIDA, A. B.; EIGER, S. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. 3ª ed., Porto Alegre, ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. Cap. 3, p. 238-348,

SAMPAIO, A. F. P. *Avaliação da correlação entre parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos - São Vicente, através de modelagem numérica ambiental*. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

SHS – Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. Situação dos Recursos Hídricos da Baixada Santista. *Relatório ao Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista (CBH-BS) e Departamento de água e Energia Elétrica (DAEE)*. São Carlos, 2007. 441 p. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7042/volume-i.pdf>. Acesso em: 11 set. 2015.

YASSUDA, E. A. *Modelo numérico do transporte de sedimentos no canal principal do estuário de Santos*. 1991. 122 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1991.

ZÜNDT, C. Baixada Santista: uso, expansão e ocupação do solo, estruturação de rede urbana regional e metropolização. In: CUNHA, J. M. P. (Org.) *Novas Metrópoles Paulistas - População, Vulnerabilidade e Segregação*. Campinas, Núcleo de Estudos da População Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, 2006. Cap. 1. p. 305-336.

Contribuição dos autores:

Fernando Roversi: Desenvolvimento da modelagem computacional, preparação de gráficos e mapas apresentados, interpretação e discussão de resultados.

Paulo Cesar Colonna Rosman: Organização da estrutura e da metodologia do trabalho, discussão e interpretação dos resultados da modelagem.

Joseph Harari: Discussão dos resultados da modelagem, revisão e fechamento do texto.