

CIRCULAÇÃO/ESTRATIFICAÇÃO TRANSIENTE NO COMPLEXO ESTUARINO DE SANTOS: COMPARAÇÕES ENTRE O ESTUÁRIO INTERNO E ÁREA COSTEIRA ADJACENTE DURANTE SIZIGIA

André Luiz Belém¹, Gleyci Aparecida Oliveira Moser², Maria Fernanda Palanch-Hans³, Frederico Fábio Mauad⁴ & Liliane Lazzari Albertin⁵

RESUMO – Modos transientes de circulação/estratificação do complexo estuarino de Santos, SP, Brasil, são importantes estados físicos que condicionam o transporte hídrico entre continente e zona costeira, bem como controlam a dispersão de sedimento e poluentes através da pluma estuarina. Neste trabalho, o acoplamento entre a zona interna estuarina e a área adjacente da Baía de Santos foi monitorado em um estudo prático desenvolvido com alunos do curso de graduação em Oceanografia da UNIMONTE, através da realização de uma campanha de amostragem durante o regime de maré de sizígia, em 22 e 23 de setembro de 2006. Dados físicos sobre a circulação e estratificação em 11 pontos ao longo do estuário e zona costeira adjacente foram realizados, e os resultados obtidos mostram que durante as condições de maré viva (sizígia) o estuário se apresentou bem misturado e com circulação moderada, sendo classificado como estuário homogêneo segundo Cameron & Pritchard (1963). No entanto, diferenças de salinidade da porção interna para a área costeira adjacente mostram que a estrutura halina e os gradientes de salinidade encontrados podem desempenhar um papel importante na remobilização de possíveis contaminantes adsorvidos no sedimento que atualmente é retirado do canal estuarino e lançado na zona costeira.

ABSTRACT – Transient modes of circulation/stratification of the Santos estuarine complex, Brazil, are important physical states that control the water transport between the continent and the coastal zone, as well as the dispersion of sediment and pollutants through the estuarine plume. In this work, the coupling between the estuary internal zone and the adjacent coastal area was monitored, during a practical study of the undergraduate course in Oceanography/UNIMONTE, through the accomplishment of a field survey during the spring tide, on September 22nd and 23rd, 2006. Physical data on the circulation and stratification in 11 stations along the estuary and adjacent coastal zone had been carried out, and results show that during high water (syzygy), the estuary shows well mixed and moderate circulation conditions, being classified as homogeneous estuary according to Cameron & Pritchard (1963). However, the differences of salinity between the internal portion and adjacent coastal area show a vertical haline structure that can drive important oceanographic processes, specifically in the disposing area of dredged sediments from Port of Santos, playing an important role in the reallocation of possible pollutants adsorbed in sediment removed from the estuary to the coastal zone.

Palavras-chave: oceanografia física, circulação estuarina, dragagem.

¹ Professor Doutor - Laboratório de Oceanografia Física, UNIMONTE - Centro Universitário Monte Serrat, Av. Rangel Pestana, 99 Vila Mathias Santos/SPCEP 11013-551. E-mail: andrebelem@unimonte.edu.br.

² Professora Doutora – Curso de Oceanografia, UNIMONTE. E-mail: gleycimoser@terra.com.br.

³ Professora M.Sc. – Curso de Oceanografia, UNIMONTE. E-mail: mfpalanch@yahoo.com.br.

⁴ Doutoranda em Ciências da Engenharia Ambiental. NH/CRHEA – EESC/USP. E-mail: lilianelazzari@hotmail.com

⁵ Professor Doutor – Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP. E-mail: mauadffim@sc.usp.br.

1 - INTRODUÇÃO

O Complexo Estuarino de Santos, localizado no litoral médio de São Paulo, Brasil, é uma região de confinamento geológico com características de estuário de planície costeira, mas delimitado por áreas de afloramento geológico que condicionam a geometria estuarina (Figura 1). Segundo a classificação de Cameron & Pritchard (1963), o estuário de Santos é do tipo Planície costeira, caracterizado por ser uma região semi-fechada influenciada pelas descargas de água doce oriundas da Serra do Mar e uma extensa área de drenagem continental. Devido às características da planície e o afloramento geológico na sua porção baixa, o complexo apresenta circulação residual tidal (montante), passando por circulação gravitacional típica (canal principal) até a sua porção costeira onde ocorre a mistura completa com águas salinas. A importância deste estuário é um aspecto de considerável peso, já que devido aos nutrientes que as águas continentais transportam, o estuário de Santos apresenta geralmente uma região com elevada produtividade biológica. No entanto, devido a ser uma região semi-fechada, sofre particularmente os efeitos da poluição e a pressão antrópica das cidades ao seu redor e do Porto de Santos. Principalmente nas duas últimas décadas, em razão do crescente desenvolvimento industrial, houve uma deterioração do sistema estuarino de Santo, conforme está expresso no relatório CETESB (2001).



Figura 1 - Imagem de Satélite do complexo estuarino de Santos e as principais áreas do estuário.
Fonte: Miranda & Coutinho (2004).

Além deste aspecto, a atividade constante de dragagem, necessária a manutenção do maior porto da América Latina, é afetada diretamente pela dinâmica do sistema estuarino. Se por um lado, a vantagem desta atividade é o fato do aumento da profundidade e conseqüentemente aumento na circulação e a renovação de água, por outro lado a área de descarte desse sedimento, que normalmente são áreas relativamente próximas à costa, acaba sendo contaminada, interferindo de forma agressiva no ecossistema aquático. Tais cenários são fortemente influenciados pelas condições oceanográficas (circulação e estratificação) e pelo aspecto dinâmico transiente da região estuarina e costeira adjacente, bem como do seu acoplamento.

O presente estudo é uma contribuição na caracterização estuarina, de forma quase-sinótica, e do estado hidrográfico do estuário de Santos e zona costeira adjacente (Baía de Santos), com base em metodologias simples que permitiram o entendimento de ambas as regiões e sua conexão. Tais resultados podem contribuir substancialmente para entender como os modos transientes de circulação afetam a dispersão de poluentes através do complexo estuarino e impactam o ecossistema marinho costeiro.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

A delimitação dos pontos de coleta seguiu critérios geográficos e a distribuição das fontes de poluição presentes na região, baseada no relatório da CETESB (2001). Foram estabelecidos 11 pontos de coletas ao longo do Estuário e Baía de Santos, posicionados com a utilização de um DGPS (Figura 2). Dos 11 pontos, seis se encontram no Estuário (#1 ao #6) e os 5 pontos restantes estão localizados na Baía de Santos (#7 ao #11), sendo o ponto #11 localizado na atual área de descarte do material dragado do Porto de Santos. As coletas foram realizadas a bordo do trawler de pesquisa oceanográfica "LUGANO", da UNIMONTE, nos dias 22 e 23 de setembro de 2006. As coletas de água foram realizadas em períodos de maré vazante (dia 22/09) e enchente (dia 23/09). Os parâmetros oceanográficos (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e condutividade) foram obtidos através de um sensor multi-parâmetros, da marca YSI, obtidos em perfis verticais com espaçamento de 1 metro, da superfície ao fundo. Para os dados de corrente utilizou-se de um derivador (flutuador) tipo lagrangeano com um elemento de arrasto (vela) submersa à 1 metro da superfície com aproximadamente 40x40 cm, estimando-se assim a velocidade superficial através do tempo entre lançamento e recolhimento do mesmo, assim como suas posições iniciais e finais. O parâmetro de estratificação foi calculado para cada ponto utilizando a distribuição vertical de salinidade obtida nos perfis, segundo Miranda *et al* (2002). Este estudo objetivou a determinação das características físicas e oceanográficas da área de estudo, aqui descritas, mas amostras de

sedimento e água foram coletadas conjuntamente com os dados físicos, e os resultados biológicos são apresentados por Moser *et al.* (2007).



Figura 2 – Distribuição dos pontos de coleta. Os pontos (em verde) de #1 ao #6 localizam-se no estuário interno e os pontos de #7 ao #11 se encontram na Baía, sendo o último ponto localizado na área de descarte de material dragado do porto de Santos.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de velocidade superficial variaram entre 11 e 65 cm/s, compatíveis com observações anteriores no sistema (Harari *et al.*, 2002). A boa correlação entre a curva da maré (Figura 3) e os valores de velocidade superficial (Tabela 1) mostra que o principal controle da circulação nesse período é feito pela maré, mas com pouca influência sobre a estratificação encontrada.

Tabela 1 Resultados dos parâmetros físicos principais nas estações de coleta.

Ponto de Coleta	Data	Hora	Latitude	Longitude	Vel. Estimada (cm/s)	Dir*	Estratificação	Sal. Média
# 01	22/set	14:00	23° 52' 36,2"S	046° 22' 33,1"W	19,6	V	2,47E-01	27,58
# 02	22/set	15:30	23° 55' 01,3"S	046° 22' 09,2"W	11,7	V	6,12E-02	29,43
# 03	22/set	16:30	23° 55' 36,1"S	046° 19' 39,9"W	65,2	V	1,34E-02	30,98
# 04	22/set	18:10	23° 58' 06,3"S	046° 17' 26,6" W	**	V	3,66E-02	32,76
# 05	22/set	19:03	23° 59' 11,9"S	046° 17' 23,0"W	**	V	2,50E-02	32,02
# 06	22/set	19:50	23° 59' 37,7"S	046° 18' 27,9"W	34,4	V	2,75E-02	32,73
# 07	23/set	09:28	23° 59' 14,3" S	046° 21' 05,7" W	27,2	E	3,57E-02	33,60
# 08	23/set	10:50	24° 00' 06,0" S	046° 20' 55,0" W	58,9	E	5,93E-02	33,74
# 09	23/set	12:10	24° 01' 36,2" S	046° 20' 05,2" W	31,0	E	3,77E-02	34,48
# 10	23/set	13:03	24° 03' 02,5" S	046° 19' 24,1" W	41,9	E	2,31E-02	34,68
# 11	23/set	14:23	24° 04' 31,8" S	046° 18' 33,2" W	40,0	E	2,57E-02	35,03

* V=Vazante; E=Enchente; ** Dados não coletados

Os valores indicados na tabela para o parâmetro de estratificação podem ser considerados baixos, mostrando que a situação transiente no momento da coleta era de homogeneização da

coluna d'água (parcialmente misturado na estação #1 e misturado nas outras estações). Os valores de salinidade média entre 27,58 e 35,03 sugerem uma contribuição continental pequena. Valores de salinidade abaixo de 20 seriam esperados nos pontos #1 a #3. No entanto, pelo fato do estuário experimentar maré de sizígia no período estudado, e das coletas nos primeiros pontos terem sido realizadas no regime de vazante, é de se considerar uma alta taxa de renovação, o que explicaria as salinidades mais altas.

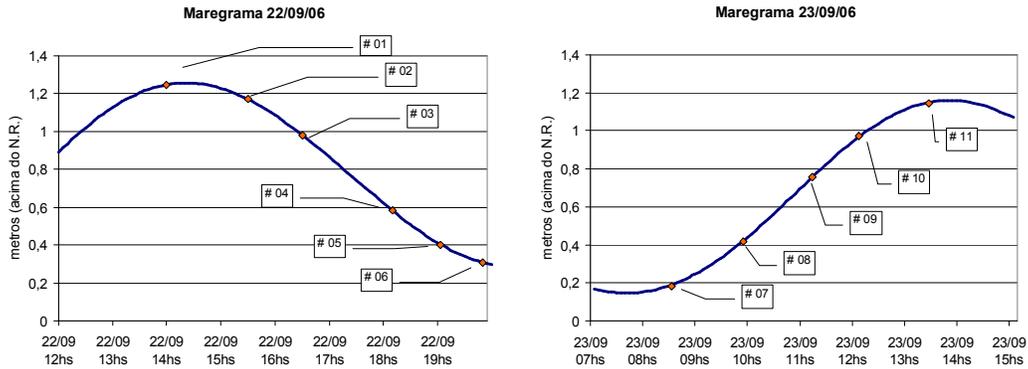


Figura 3 - Maregramas dos dias 22 e 23 de Setembro de 2006. Os pontos indicam o momento das coletas sobre a curva de maré. Note que as estações #1 à #6 foram amostradas em regime de vazante e as das estações #7 à #11 em regime de enchente.

O diagrama TS (Figura 4) mostra que mesmo com baixos valores de estratificação, variações na salinidade com relativa homogeneidade em termos de temperatura podem ser observadas nas estações #1 à #6, que compreendem a porção estuarina interior do complexo. Já os dados obtidos para as estações #7 à #11 (notadamente esta última, localizada praticamente na área externa da baía de Santos), mostram uma relativa homogeneidade em relação a salinidade com um significativo gradiente de temperatura, resultado das maiores profundidades encontradas nestes locais e influência de águas costeiras.

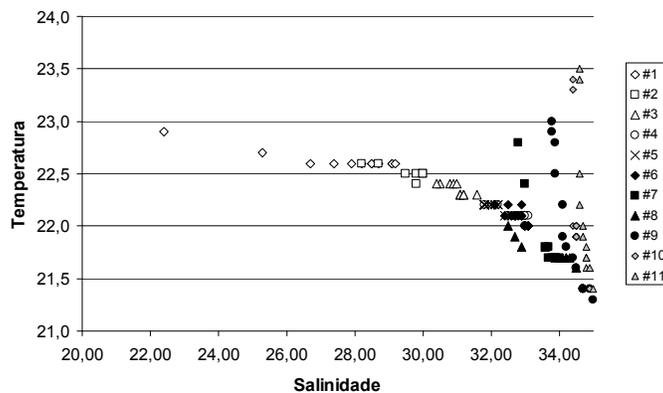


Figura 4 - Diagrama TS das estações de coleta. Veja texto para detalhes.

A diferença de salinidade entre montante do estuário (#1) e a área de descarte do material dragado do Porto de Santos (#11) é de 7,45, em termos de salinidade média. Tal gradiente é extremamente relevante, já que o material dragado em regiões internas do estuário experimenta um choque halino que pode ser responsável por alterações químicas no sedimento descartado, e conseqüente remobilização de compostos químicos na área de descarte.

4 - CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que o estuário de Santos e a área costeira adjacente apresentam modos transientes de circulação/estratificação, sendo aqui observado um estado de baixa estratificação (bem misturado) e intermediário de circulação, acoplados ao regime de maré de sizígia. Estes resultados seriam positivos no caso da renovação das águas estuarinas e na dispersão de contaminantes. No entanto, mesmo com a classificação dentro os parâmetros definidos na literatura, como bem misturado, os resultados mostram significativos gradientes de salinidade na porção interior do estuário e gradientes de temperatura na porção costeira, com um gradiente salino entre as estações #1 e #11 de 7,45. É importante notar que estas diferenças de salinidade podem ser significativas, quimicamente falando, mas consideradas pequenas pela classificação estuarina corrente (veja os valores de estratificação em Miranda *et al*, 2002). Mesmo assim, recomenda-se cautela no uso de tais informações para o acoplamento entre a física do sistema e a química do sedimento, especificamente em estudos de dragagem. Para uma melhor avaliação dos estados transientes do estuário é necessária a realização de coletas sinóticas e contínuas ao longo de todo o ano, inseridos em um programa de monitoramento da região. Tais resultados podem contribuir de forma significativa para o monitoramento ambiental de operações de dragagem e servir para o gerenciamento ambiental da região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as respectivas instituições filiadas pelo apoio operacional durante as coletas de campo, bem como os alunos de oceanografia participantes na campanha e a equipe da embarcação “LUGANO” da UNIMONTE. O processamento dos dados foi realizado conjuntamente no Núcleo de Hidrometria – CRHEA – EESC São Carlos, SP e no Laboratório de Oceanografia Física da UNIMONTE. Agradecimentos à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela bolsa de estudos (doutorado) concedida a um dos autores.

BIBLIOGRAFIA

- CAMERON, W.M. Y PRITCHARD, D.W. (1963). *Estuaries*, in: The Sea. Hill, M. N. (ed.), Wiley, New York, 700 pp.
- CETESB (2001). *Sistema Estuarino de Santos e São Vicente*, São Paulo, BR. 178p.
- HARARI, J.; CAMARGO, R.; MIRANDA, L.B. (2002). *Modelagem numérica hidrodinâmica tridimensional da Região Costeira e Estuarina de São Vicente e Santos (SP)*. Pesquisa Naval, Rio de Janeiro, n. Suplemento, p. 79-97.
- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. (2002). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo, SP. Editora EDUSP.
- MOSER, G.A.O.; PALANCH-HANS, M.F.; BELÉM, A. L.; NEVES, A.D.; CARVALHO, J.T.; MONTAGNER, S.; SCHMIDT, R.F.; QUIROGA, A. A. M. (2007). *Utilização do potencial de crescimento algal para análise do grau de eutrofização no canal estuarino de Santos (SP)*. Anais do XII COLACMAR. Disponível em CD-ROM.
- MIRANDA, E. E. de; COUTINHO, A. C. (2004). *Brasil Visto do Espaço*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, Disponibilizado via internet no endereço: <<http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 31 maio 2007.