

Transporte de Ferro e Silicato Dissolvidos nas Entradas do Sistema Estuarino-Lagunar de Cananéia-Iguape, Julho de 2001.

Barrera-Alba, J.J.¹; Giancesella, S.M.F.; Harari, J.; Miranda, L.B. de; Moser, G.A.O.; Nishihara, L.; Picarelli, S.S.; Saldanha-Corrêa, F.M.P.; Jakovac, A.C.C.; Ricci, F.P.; Mello, R.L.

Resumo – O sistema estuarino-lagunar (SEL) de Cananéia-Iguape apresenta duas comunicações com o mar, uma na parte sul, a barra de Cananéia, e outra na parte norte, a barra de Icapara. Esta recebe uma descarga fluvial mais significativa proveniente do canal do Valo Grande, desvio artificial do Rio Ribeira de Iguape. Neste trabalho são apresentados resultados de transporte de silicato e ferro obtidos na coleta de julho de 2001 em marés de sizígia e quadratura. Durante a sizígia, ocorreu importação de silicato para o sistema estuarino na barra sul e exportação na barra norte, sendo que o ferro foi importado em ambas as entradas. Na quadratura ocorreu sempre exportação de silicato e ferro.

Palavras-chave – Advecção. Importação-exportação, propriedades físico-químicas, classificação de estuários.

I. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista da ecologia marinha os sistemas estuarinos são extremamente interessantes, por serem ambientes de transição entre o meio terrestre e o meio marinho. A vulnerabilidade à influência das ações humanas e a complexidade que estes ecossistemas apresentam lhes confere uma alta fragilidade. O aporte de água doce, o transporte de sedimentos em suspensão e nutrientes dissolvidos, seu papel como área de refúgio, alimentação e reprodução para espécies de interesse econômico-pesqueiro, são aspectos que constituem atrativo para o desenvolvimento urbano, social e econômico das regiões estuarinas e litorâneas [1].

O SEL de Cananéia-Iguape é um ecossistema altamente complexo, apresentando tanto características de uma região lagunar como de uma região estuarina [2]-[3], ao qual está associado um extenso manguezal, atualmente protegido por legislação, dentro da APA - Área de Proteção Ambiental – de Iguape-Cananéia. Ocupa uma área aproximada de 10 000 ha. na costa sudeste de Brasil, situada a 25° S na costa atlântica da América do Sul, no estado de São Paulo, logo ao sul da linha do Trópico de

Capricórnio, e está sujeito a variações climáticas maiores que sistemas similares localizados entre os trópicos [4]. Apresenta duas comunicações principais com o mar, uma na parte sul, a barra de Cananéia, e outra a na parte norte, a barra de Icapara. Esta última recebe uma descarga fluvial mais significativa, proveniente do canal do Valo Grande, que acentua as diferenças entre as entradas norte e sul. Este canal foi aberto no século XIX encurtando o percurso das embarcações em mais de 30 km, e se transformou gradativamente no caminho preferencial das águas do rio Ribeira para o oceano, aumentando os processos erosivos nas margens do Valo Grande e o assoreamento do estuário adjacente. Além disso, a descarga contínua de grande quantidade de água doce no Mar Pequeno provocou uma série de alterações ecológicas no ambiente marinho, como diminuição da salinidade, o citado assoreamento e aumento da turbidez na região adjacente, pela grande quantidade de sedimentos carregados pelas águas do Valo Grande.

O silicato e o ferro dissolvidos são elementos geralmente associados à presença de água de rios, portanto podem ser de grande utilidade para determinar o efeito das águas continentais em sistemas estuarinos. Além disso, estes dois nutrientes apresentam papel biológico ativo na comunidade fitoplanctônica. Assim, o presente estudo teve por objetivo determinar as diferenças das duas barras derivadas da diferente carga de água doce a que são submetidas, através da distribuição da concentração destes elementos e do correspondente transporte entre estuário e oceano.

II. MATERIAS E MÉTODOS

A. Estratégia de amostragem.

Durante o mês de julho de 2001, nas fases das marés de sizígia e quadratura, foram realizadas duas coletas no SEL de Cananéia-Iguape. Nas duas barras situaram-se estações

¹ J.J. Barrera-Alba, juanalba@usp.br, S.M.F. Giancesella, soniag@ceres.io.usp.br, J. Harari, L.B. de Miranda, G.A.O. Moser, L. Nishiara, S.S. Picarelli, F.M.P. Saldanha-Corrêa, A.C.C. Jakovac, F.P. Ricci, R.L. Mello, Instituto Oceanográfico, Praça do Oceanográfico, 191. CEP 055080-900. São Paulo, SP. Brasil, Tel +55-11-30916551, Fax +55-11-30916607.

Trabalho recebido em 30 de março de 2002. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo, através do Projeto No 2000/07162-6, e pela Agência Espanhola de Cooperação Internacional (AECI), através de uma bolsa de doutorado.

fixas de amostragens de 13 horas de duração cada uma (Fig. 1).

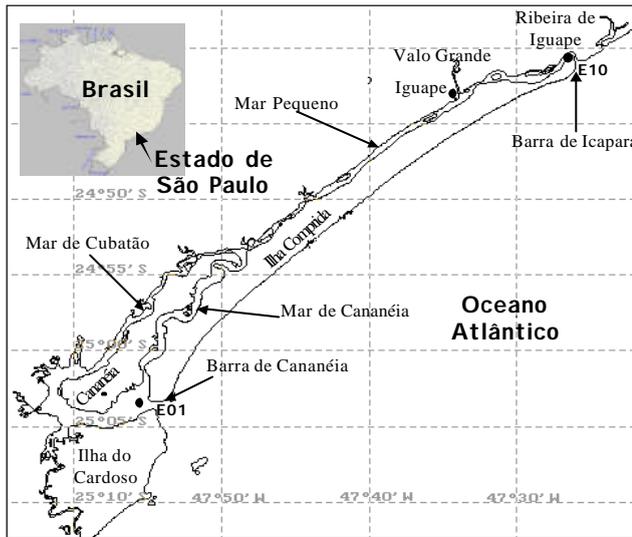


Fig 1. Área de estudo e disposição das estações de amostragem.

A distribuição temporal destas estações foi,

TABELA I
DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS ESTAÇÕES DE AMOSTRAGENS

Estação	Sizígia		Quadratura	
	SE01	SE10	QE01	QE10
Dia amostragem	17/07/01	20/07/01	23/07/01	25/07/01

B. Coleta e Análise Laboratorial das amostras.

Os dados de pluviometria e altura de maré foram coletados na Base de Pesquisa Dr João Paiva Carvalho do IOUSP, analisados posteriormente no laboratório e representados nos gráficos correspondentes.

Em cada estação fixa, em intervalos horários foram realizadas diversas medidas: velocidade e direção da corrente, com um correntômetro vertical de rotor SENSORDATA, modelo SD-4, a cada 1 metro de profundidade; temperatura (°C) e salinidade (p.s.u.) da coluna de água, medidas em perfis contínuos com um CTD, marca SEABIRD, modelo Seacat 19. A partir dos dados de salinidade, temperatura e pressão, foram calculados os valores de sigma-t, de acordo com a equação de estado da água do mar [5].

As concentrações de silicato ($\mu\text{mol/l}$) e ferro ($\mu\text{mol/l}$) dissolvidos foram determinadas a partir da coleta de água em diferentes profundidades com garrafas de Van Dor, a cada 2 horas. A água foi filtrada através de filtros GF/F WHATMAN[®] de 0.45 μm de tamanho de poro nominal e 47 mm de diâmetro. Para a análise de silicato foram congelados aproximadamente 100ml da água filtrada até o tratamento no laboratório por espectrofotometria [6]. Para a determinação da concentração de ferro dissolvido, amostras do filtrado foram coletadas e conservadas em pH 2 adicionando-se 2 gotas de H_2SO_4 a 50%. No laboratório, foram analisadas por método espectrofotometria [7].

C. Classificação das entradas e cálculo do transporte de sal, silicato e ferro.

Em cada estação foram calculadas as componentes da velocidade (m s^{-1}) da corrente longitudinal (u) e transversal (v) à entrada da barra. A decomposição foi efetuada levando-se em conta a declinação magnética local fornecida pela carta náutica 1.702 da DHN, sendo $20,01^\circ$ para a barra de Cananéia e $20,224^\circ$ para a barra de Icapara. Na decomposição foram usadas as seguintes relações trigonométricas:

$$u = V \cos (\theta) \quad (1)$$

$$v = V \sin (\theta) \quad (2)$$

O ângulo θ é o ângulo formado entre o vetor e o eixo longitudinal à entrada do estuário, medido no sentido anti-horário, e foi calculado através de (3):

$$\theta = 90^\circ - (dc - D) - B \quad (3)$$

onde dc é a direção da corrente, D é a declinação magnética e B é o de rotação anti-horária para alinhar a ordenada longitudinalmente à entrada do.

Para minimizar o efeito da variação da profundidade da coluna de água devido à oscilação da maré, a profundidade local foi reduzida à profundidade adimensional (Z):

$$Z = z / h(t), \quad (4)$$

Onde z é a profundidade considerada, h(t) é a profundidade local no instante t. A profundidade adimensional varia entre 0 na superfície e 1 no fundo. Posteriormente os dados coletados foram interpolados através do método “cubic spline” [8].

Para classificar as duas entradas do sistema foi usada o diagrama de estratificação-circulação descrito por [9] e a equação deduzida por [10]:

$$P.E. \theta \frac{S_f - S_s}{S} \quad (5)$$

$$P.C. \theta \frac{u_s}{u_f} \quad (6)$$

Onde P.E. e P.C. são os parâmetros de estratificação e circulação, respectivamente. S_f e u_s são a salinidade e velocidade longitudinal na superfície, S_s é a salinidade no fundo e u_f a velocidade residual. S com barra é a salinidade média.

Para o cálculo dos transportes no canal o estuarino foi considerando lateralmente homogêneo, assim os transportes instantâneos e advectivos das concentrações de sal (M_s), silicato (M_{Si}) e ferro (M_{Fe}) foram calculados respectivamente através das equações:

$$M_s = \int_0^h \rho U S dz = \overline{\rho U S h}; \text{ (kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

$$M_{Si} = \int_0^h \rho U S_i dz = \overline{\rho U S_i h}; \text{ (? mol m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

$$M_{Fe} = \int_0^h \rho U F_e dz = \overline{\rho U F_e h}; \text{ (? mol m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \quad (9)$$

Onde a barra sobre as variáveis indica médias em profundidade dos valores interpolados.

Posteriormente foi obtido o valor do transporte resultante ao longo do ciclo de maré para cada uma das variáveis estudadas, calculando-se a média no tempo dos transportes instantâneos, durante o período de amostragem (T) na estação fixa:

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T M_s dt = \overline{\langle U S h \rangle}; \text{ (kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

$$T_{Si/Fe} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{Si/Fe} dt = \overline{\langle U M_{Si/Fe} h \rangle}; \text{ (kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Pluviometria e variação da altura de maré.

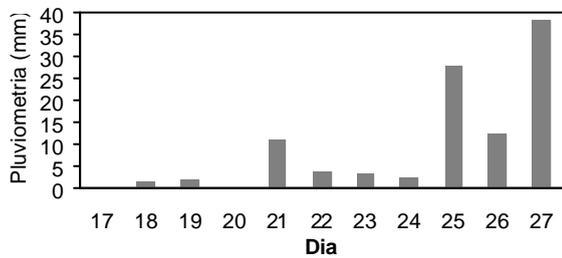


Fig. 2. Dados pluviométricos (mm) durante o período de amostragem.

Durante a etapa de sizígia, foram registradas precipitações muito pequenas, de no máximo 2mm. A partir do dia 25 de julho, dia da coleta na barra sul, as precipitações foram significativas.

Na Fig. 3 são apresentados os registros de marés e os períodos de amostragem correspondentes. Verifica-se que as amplitudes máximas de maré na sizígia e quadratura foram de 141 e 80 cm. A estação denominada QE10 representou uma transição entre a sizígia e a quadratura, pela falta de coincidência entre a maré prevista e a maré real, devido às influências meteorológicas.

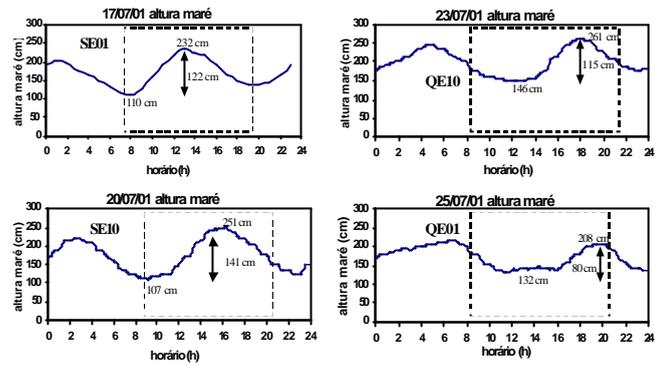


Fig. 3. Registro de maré nos dias de amostragem: - estações de sizígia SE01 e SE10; - estações de quadratura QE01 e QE10. O quadriculado representa o período de amostragem.

B. Concentrações médias e intervalos de variação.

A salinidade média foi sempre superior na entrada sul, sendo que o intervalo de variação da salinidade foi muito maior na entrada norte, mostrando um maior aporte de água doce nesta última que provocou uma diferença importante entre a salinidade superficial e do fundo (Tabela II).

TABELA II
VALORES MÉDIOS E INTERVALOS DE VARIAÇÃO.

		SE01	SE10	QE01	QE10
Salinidade	Média	30	27.1	29.4	28.2
	Variação	22-33	11-35	23-32	10-34
Silicato (? mol/l)	Média	5.2	21.2	5.4	15.5
	Variação	2.4-12	2.5-87	2.8-7.7	1.7-60
Ferro (? mol/l)	Média	17.1	28.9	28.8	37.5
	Variação	7.6-36	13-45	19-42	21-158

As concentrações de silicato e ferro foram superiores na estação E10 em todas as ocasiões. Na barra de Cananéia não foram registradas variações importantes na concentração de silicato entre a sizígia e a quadratura, sendo que na barra de Icapara foi registrada uma diminuição tanto no valor médio como no valor máximo de concentração na quadratura. Quanto à concentração de ferro, os valores médios e máximos aumentaram em ambos os pontos na quadratura, especialmente na estação E10. Todos estes resultados confirmaram o efeito do maior aporte de água doce nesta última estação.

Os valores de concentração de silicato foram similares aos obtidos para a região [11] em coletas realizadas entre 1997 e 1998, mostrando que a carga deste nutriente não aumentou significativamente nos últimos anos, embora, tenha havido um aumento significativo em relação a estudos feitos no período em que o Valo Grande esteve fechado [12].

As concentrações médias de ferro na parte sul do estuário foram similares às obtidas para águas de manguezal [13], sendo que, no presente trabalho, a concentração máxima encontrada foi de 158 ? mol/l durante a quadratura na barra de Icapara, valor similar ao obtido para o Valo Grande na mesma época do ano (dados não publicados).

C. Classificação das entradas e transporte.

Para o cálculo do transporte, as entradas do canal foram consideradas lateralmente homogêneas, i.e., as medidas obtidas no ponto central estariam representando toda a secção transversal ao mesmo.

Considerando o diagrama de estratificação-circulação, a entrada sul na quadratura e a entrada norte na sizígia foram classificadas como pertencentes a um estuário Tipo 2 ou parcialmente misturado. A entrada sul na sizígia e a entrada norte na quadratura foram classificadas como pertencentes a um estuário Tipo 1 ou bem misturado. Levando em conta a estratificação vertical da coluna de água, foram classificadas como estando no limite entre o Tipo a (francamente estratificado) e Tipo b (altamente estratificado), salvo a situação de quadratura na barra de Icapara que foi claramente Tipo b.

O sentido do transporte de sal, silicato e ferro nas duas entradas seguiram a evolução do registro de maré, observando-se um transporte estuário acima durante a enchente e sentido mar durante a vazante (Fig. 4 e 5). Em todas as estações ocorreu uma importação líquida de sal para o estuário (Tabela III). Os resultados de transporte para a etapa de sizígia foram da mesma ordem de magnitude daqueles obtidos para a barra de Cananéia [14] e uma ordem de magnitude maior daqueles obtidos por outros autores na região do mar de Cananéia [15].

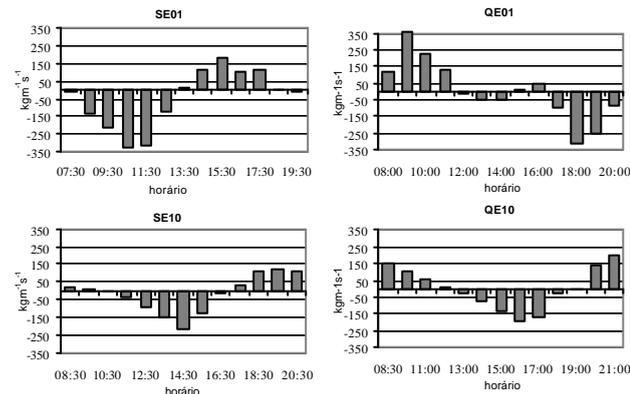


Fig. 4. Transporte instantâneo de sal ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) nos diferentes horários para cada estação fixa. Valores positivos indicam exportação e negativos importação.

Durante a etapa de sizígia o transporte resultante foi 2 vezes maior na barra sul em relação à barra norte, sendo que, na quadratura, os valores de transporte foram 1 ordem de magnitude maior na barra de Icapara. Este último resultado pode decorrer da falta de coincidência entre a maré prevista para a coleta e a maré real. Além disso, no dia da amostragem da barra de Cananéia (dia 25) foram registradas precipitações significativas. Esta clara diferença entre os valores de transporte resultante na sizígia e quadratura indica quão intensos são os movimentos de entrada para o interior do sistema durante a sizígia, especialmente na barra de Cananéia. Assim, durante esta etapa foi registrado inclusive um transporte

resultante estuário acima de silicato na entrada sul e de ferro nas duas barras (Tabela III).

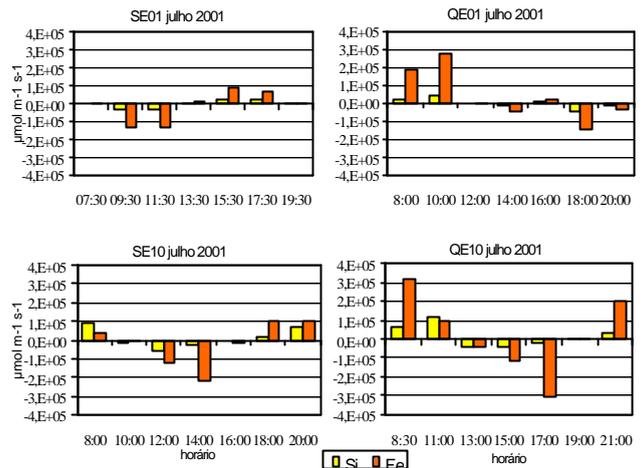


Fig. 5. Transporte instantâneo de silicato (amarelo) e ferro (laranja) ($\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$) nos diferentes horários para cada estação fixa. Valores positivos indicam exportação e valores negativos importação.

Na quadratura, os transportes resultantes de silicato e ferro foram nitidamente do estuário para o mar, provavelmente, em função da menor intensidade das correntes de maré e das maiores precipitações registradas, que contribuíram a uma maior vazão e maiores transportes sentido mar.

TABELA III
TRANSPORTE RESULTANTE.

	Sizígia		Quadratura	
	SE01	SE10	QE01	QE10
Sal ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	-50.22	-25.35	-0.51	-13.56
Silicato ($\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	-1439	+6149	+104	+7869
Ferro ($\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	-6637	-8557	+19643	+12490

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A comparação dos resultados de transporte na sizígia entre as barras sul e norte indica claramente a maior contribuição da água doce na barra norte. Na quadratura, os resultados na barra norte podem ter sido prejudicados pela condição especial da maré na ocasião da coleta.

A maior exportação de silicato na entrada norte (cerca de 7 vezes maior que na entrada sul), bem como os altos valores de concentração observados confirmam o transporte de material continental via Valo Grande, com o consequente assoreamento que se verifica na porção norte do mar Pequeno.

Os valores de concentração de ferro dissolvido para a região sul foram similares aos obtidos em trabalhos anteriores. Na parte norte do sistema, durante a quadratura, os valores foram próximos aos encontrados no Valo Grande na mesma época do ano, indicando o efeito das águas provenientes do mencionado canal na barra de Icapara.

Os resultados do transporte líquido na quadratura mostraram uma exportação desse nutriente do estuário para a região costeira adjacente, sendo que na sizígia foi observado um transporte estuário acima nas duas barras. O máximo de transporte resultante de ferro para o mar na quadratura coincidiu com o mínimo no transporte de sal e máximo de pluviometria, decorrendo num maior aporte continental dos pequenos rios do sistema, embora, este possível aumento no aporte não seja refletido no transporte de silicato.

Os valores de transporte resultante de sal durante a sizígia foram da mesma ordem de magnitude daqueles registrados em outros trabalhos na região, e indicam quão intensos foram os processos advectivos estuário acima, explicando o fato da decorrência de transportes resultantes de silicato e ferro para o interior do estuário, quando é este a fonte destes nutrientes.

Os processos de importação de silicato e ferro, em períodos nos quais domina a componente de maré no transporte (sizígia), e de exportação, em períodos nos quais a componente fluvial é mais intensa (quadratura), podem indicar a existência de um ciclo na dinâmica destes elementos entre o SEL de Cananéia-Iguape e a região costeira adjacente.

Os resultados obtidos no presente trabalho representam condições de inverno na área, quando a pluviosidade tende a ser mais baixa. A coleta realizada no verão está ainda sendo estudada, e os seus resultados deverão complementar os aqui representados.

REFERÊNCIAS

- [1] L.E Cronin, "The Role of Man in Estuarine Processes", in *Estuaries*, G.H. Lauff, Ed. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science, 1967, pp. 667-689.
- [2] C. Teixeira, *Estudos sobre algumas características do fitoplâncton da região de Cananéia e seu potencial fotossintético*, Tese de doutoramento. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1969, pp. 82.
- [3] J. Tundisi, *Produção primária "standing-crop" e fracionamento do fitoplâncton na região lagunar de Cananéia*, Tese de doutoramento. Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1969, pp. 130.
- [4] Y. Schaeffer-Novelli, G. Cintron-Molero and H. de S.L. Mesquita, "The Cananéia lagoon estuarine system, São Paulo, Brazil", *Estuaries*, vol. 13, pp. 193-203, 1990.
- [5] Unesco, , *International oceanographic tables*, vol 2, National Institute of Oceanography of Great Britain, pp.141,1981
- [6] K. Grasshoff, , M. Ehrhardt and K. Kremling, *Methods of seawater analysis*, 2nd Revised and extended ed., Chemie: Wienhien Verlag, pp. 419 1983.
- [7] S.L Banderner, . and P.J. Schaible, "Determination of Iron. A Study of the o-Phenantroline", *Method. Anal. Chem.*, vol. 16, pp. 317-319, 1944.
- [8] R.H. Pennington, *Computer methods and numerical analysis*, 2nd ed., The Macmillan Co., pp. 425, 1970.
- [9] D.V. Hansen and M. Rattray, "New dimensions in estuarine classification", *Limnol. Oceanogr.*, vol 11, pp 319-326, 1966.
- [10] L.B. de Miranda, *Cinemática e Dinâmica de Estuários*, apostila de aula do curso de pós-graduação IOF-827, Departamento de Oceanografia Física, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo: São Paulo, 1998.
- [11] M. Brichta, *Biomassa e Produção Autotrófica Planctônica no Complexo Estuarino-Lagunar Iguape-Cananéia*, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico: São Paulo, pp. 93, 2000.
- [12] CETESB, Levantamento preliminar das condições ecológicas atuais do complexo Valo Grande-Mar Pequeno, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental: São Paulo, pp. 51, 1982.
- [13] J-P Carmouze, S.G. Galvão, L. Nishiara and H. de S.L. Mesquita, "Modelling chemical changes of tidal waters emerging from a mangrove forest Cananéia, Brazil", *Mangroves and Salt Marshes*, vol 2, pp. 43-49, 1998.
- [14] A.L. Bérghamo, *Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de Sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía do Trapandé*, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico: São Paulo, pp. 214, 2000.
- [15] L.B. de Miranda and B.M Castro Filho, "On the salt transport in the Cananéia Sea during a spring tide experiment", *Rev. bras. Oceanogr.*, vol 44(2), pp 123-133, 1996.