

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO CUBATÃO, JOINVILLE.

C.A.F. SCHETTINI & J.L.B. CARVALHO

Laboratório de Oceanografia Física – CTTMar/UNIVALI - Cx.P. 360, Itajaí, SC.
guto@cttmar.univali.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma caracterização preliminar da hidrodinâmica do estuário do Rio Cubatão baseada em dados hidrográficos obtidos durante uma campanha de treze horas (um ciclo completo de maré) em condições de maré de sizígia. Dados de velocidade e direção de corrente, salinidade, temperatura e turbidez foram obtidos à 1,5 m abaixo da superfície, próximo da desembocadura do estuário com o fundeio de um correntógrafo acústico. Perfis verticais de salinidade e temperatura foram realizados próximos ao fundeio a cada hora com um CTD para fornecer a estrutura vertical. Perfis de CTD também foram realizados ao longo do estuário durante a preamar. Os resultados mostram que o estuário do Rio Cubatão apresenta-se verticalmente homogêneo com períodos menores de estratificação durante a vazante. O regime de maré mostra uma assimetria acentuada, com correntes de vazante muito mais intensas do que as correntes de enchente.

Palavras chave: Rio Cubatão, estuário, hidrodinâmica.

HIDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE CUBATÃO RIVER ESTUARY, JOINVILLE

ABSTRACT

This paper presents a preliminary approach on the hydrodynamics of the Cubatão River estuary based on hydrographic data from a thirteen-hour campaign (a complete tidal cycle) under spring tide condition. Current speed and direction, salinity, temperature and turbidity were recorded at 1.5 m below the water surface near the estuary mouth, with a moored acoustic currentmeter. Vertical profiles of salinity and temperature were done close to the mooring every hour with a CTD to give the vertical estuarine structure. Vertical profiles of CTD were also done along the estuary during the flood slack water. The results show that the Cubatão River estuary is vertically homogeneous almost time, with small periods with weak stratification during the ebb. The tidal regime was assymmetric, with ebb currents stronger than flood currents.

Keywords: Cubatão River, estuary, hydrodynamics.

INTRODUÇÃO

Estuários são corpos de água restritos costeiros que apresentam uma livre conexão com o mar aberto, dentro dos quais ocorre a diluição mensurável das águas marinhas pelas águas provenientes da drenagem continental (Cameron & Pritchard, 1963). Dentro desta definição encaixam-se inúmeros sistemas aquáticos costeiros, tais como baías, la-

goas e rios mareais, que apresentam características geomorfológicas e hidrodinâmicas distintas (Kjerfve, 1989). Em função da grande diversidade de elementos atuantes nos processos estuarinos, cada estuário apresenta-se como único, sujeito à diferentes forças, e conseqüentemente evoluindo em diferentes taxas (Fairbridge, 1980).

Existem inúmeros sistemas estuarinos ao longo do litoral catarinense, apresentan-

do-se em diversas formas e tamanhos. O maior sistema estuarino do estado é a Baía da Babitonga, localizado na porção norte do litoral. No interior desta baía localizam-se diversos outros estuários de menor porte, como é o caso do estuário do Rio Cubatão. O objetivo deste reporte é o de caracterizar, em caráter preliminar, as características hidrodinâmicas deste estuário.

DETERMINANTES HIDROLÓGICOS

Os padrões hidrodinâmicos observados em estuários resultam de diversos tipos de interações entre águas de características físicas distintas, como as águas fluviais e águas marinhas. Diferentes tipos de mistura podem surgir em função da geomorfologia e do nível de energia suprido pela descarga fluvial e pelo regime de marés.

i. Morfologia

O estuário do Rio Cubatão pode ser descrito como um estuário de planície costeira, apresentando-se meandrante no seu trecho terminal. Próximo à desembocadura ocorre uma vasta vegetação de manguezal, indicando regiões que são periodicamente alagadas durante os períodos de maré alta, e que as águas são de características salobras.

Existe um canal artificial construído para amenizar os problemas de enchentes na região, reduzindo o trajeto do Rio Cubatão para sua desembocadura. Este canal também faz parte do ambiente estuarino e provavelmente também apresenta padrões de circulação estuarina.

Não há informações disponíveis sobre a batimetria do sistema, porém os perfis de CTD realizados para este trabalho indicaram que o canal natural do estuário apresenta profundidades oscilando em torno de 4 m, chegando a 7 m próximo da desembocadura. No Rio Palmital em frente à desembocadura (Figura 1) ocorre uma soleira apresentando um decréscimo acentuado da profundidade.

ii. Regime fluvial

A bacia hidrográfica do Rio Cubatão apresenta uma área de aproximadamente 472 km², estendendo-se a partir de sua foz para oeste (Figura 1). O regime hidrológico do Rio Cubatão, similar aos demais rios da vertente Atlântica de Santa Catarina, é dominado pelo regime pluviométrico. O abastecimento é mantido por chuvas distribuídas ao longo de todo o ano, apresentando dois máximos, no final do verão e na primavera (Figura 2; GAPLAN, 1986).

A descarga fluvial do Rio Cubatão é monitorada diariamente pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na estação limnimétrica de Poço Fundo (27°42'00" S & 48°48'48" O). Esta estação mede a descarga relativa à 400 km² da bacia de drenagem, ou aproximadamente 85 %. Os dados para o período de 1950 até 1995 mostram uma descarga média anual de 12,4 m³.s⁻¹, com as maiores descargas em fevereiro, 18,1 ± 20,1 m³.s⁻¹, e as menores em junho, 9,0 ± 8,8 m³.s⁻¹ (Figura 2).

Observa-se uma grande variabilidade inter-anual do regime de descarga, provavelmente devido ao regime climático sub-tropical. Esta variabilidade é constatada pelo coeficiente de variação dado pela razão do desvio padrão sobre a média. Como mostra a Figura 2, excluindo-se os meses de abril, maio e junho, todos os demais meses apresentam uma valor superior a um.

iii. Regime de marés

As marés astronômicas oceânicas regionais apresentam regime de micro maré, com uma altura média de aproximadamente 0,8 m, variando entre 0,5 até 1,2 m durante períodos de quadratura e sizígia, respectivamente. O número de forma, dado pela razão da soma dos principais constituintes harmônicos diurnos pelos principais constituintes semi-diurnos $[(O_1 + K_1)/(M_2 + S_2)]$ (Pugh, 1987), é em torno de 0,4 (Schettini *et al*, 1996), indi-

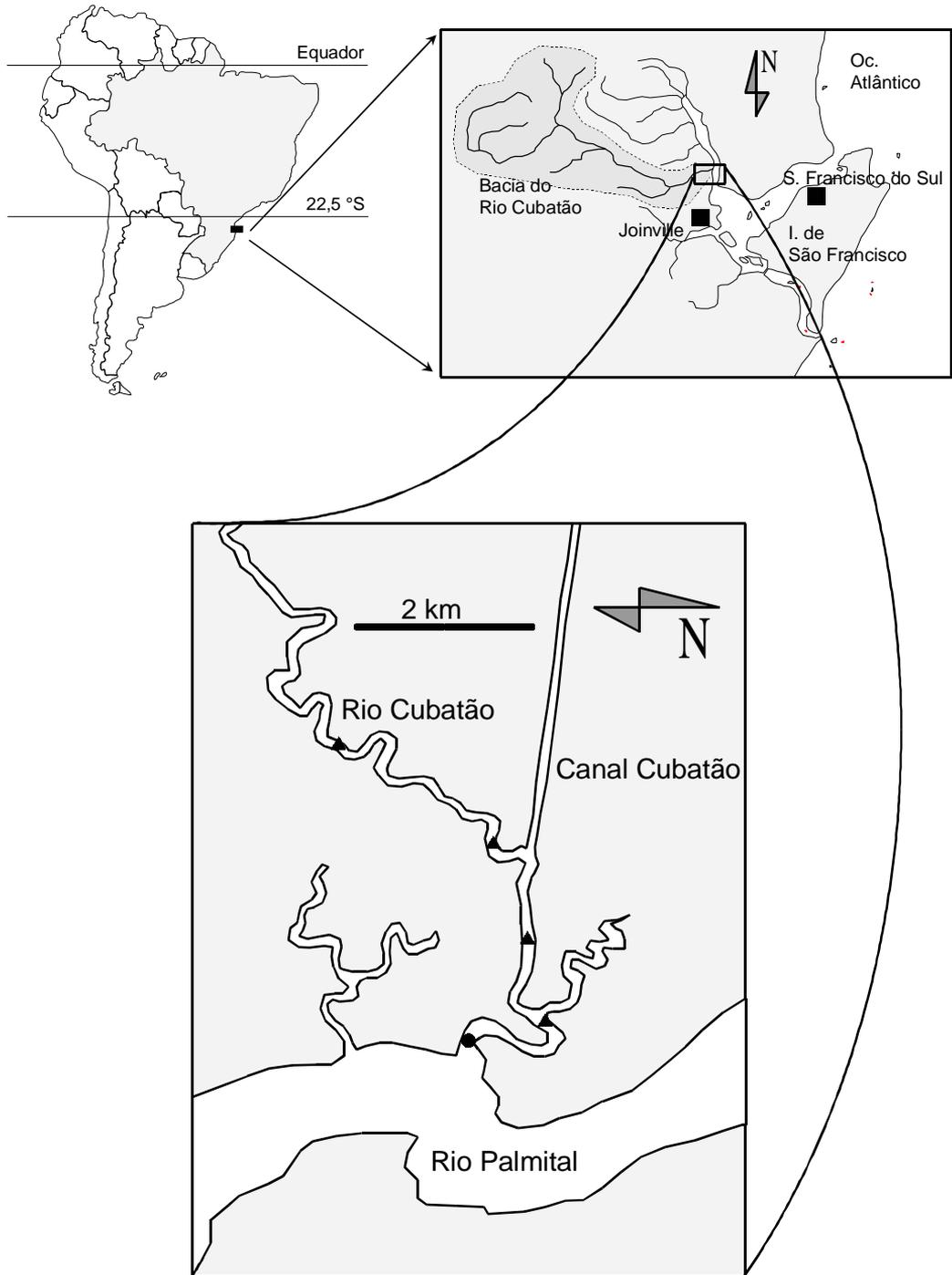


Figura 1: Localização do estuário do Rio Cubatão, Município de Joinville, SC, com o posicionamento das estações de coleta de dados hidrográficos: círculo – fundo de correntógrafo e perfilagem horária de CTD; triângulo – perfilagem de CTD durante a estufa de preamar.

cando um padrão misto, com predominância semi-diurna, porém com desigualdades de altura entre ciclos de marés consecutivos.

As marés astronômicas sofrem processos de distorção ao entrarem em sistemas restritos devido aos efeitos friccionais e constritivos, podendo haver diminuição (hiposíncrono), manutenção (síncrono) ou amplificação (hipersíncrono) da altura de marés (Nichols & Biggs, 1985). Na Baía da Babitonga observa-se uma amplificação da altura de maré astronômica no Porto de São Francisco em relação à Enseada (Truccolo & Melo, 1997), indicando um comportamento hipersíncrono.

Efeitos meteorológicos podem causar expressivas sobre-elevações no nível do mar em relação às marés astronômicas na região costeira adjacente à baía, podendo estas serem superiores a um metro em condições extremas (Truccolo, 1998). Não existem estudos indicando como estas sobre-elevações na região costeira se comportam no interior da baía.

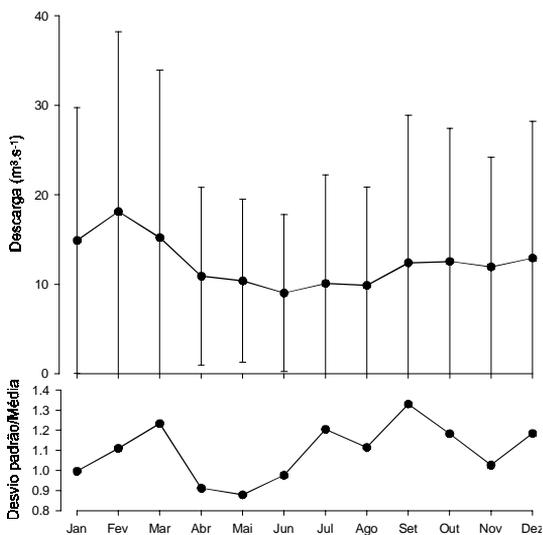


Figura 2: Variação anual média da descarga fluvial do Rio Cubatão, referente à estação limimétrica da ANEEL em Poço Fundo, para o período de 1950 até 1995.

MATERIAL & MÉTODOS

Com o objetivo de elaborar um quadro significativo das características hidrodinâmicas do estuário do Rio Cubatão, foi realizada uma campanha de aquisição de dados hidrográficos ao longo de um ciclo completo de maré (13 horas), sob condições de maré de sizígia.

Informações sobre o regime de correntes foi obtido com o fundeio de um correntógrafo acústico Falmouth® ACM3D, fundeado próximo à desembocadura do sistema (círculo na Figura 1), como mostrado no esquema da Figura 3. O mesmo instrumento forneceu informações de salinidade, temperatura e turbidez, a uma taxa amostral de 20 minutos. Cada amostra foi integrada a partir de períodos de 30 segundos com taxa de aquisição de 5 aquisições por segundo.

Informações sobre a estrutura vertical de salinidade e temperatura no ponto de fundeio do correntógrafo foram obtidas a cada hora com o uso de um CTD SensorData® SD202. Adicionalmente, foram realizadas

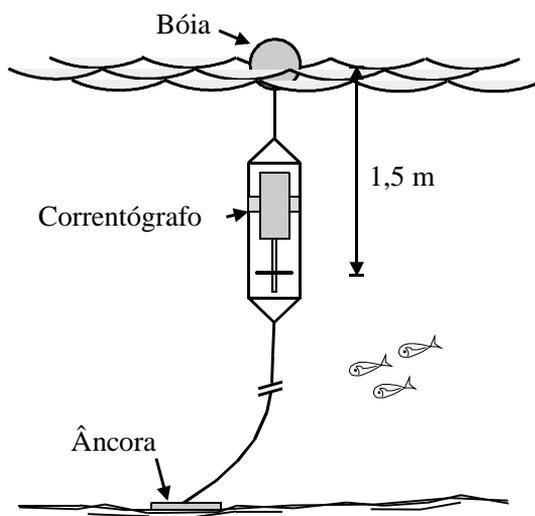


Figura 3: Esquema de fundeio utilizado para aquisição de dados de corrente.

perfilagens verticais em estações à montante da barra do estuário durante o período de estufa de preamar (triângulos na Figura 1 e Tabela 1).

A oscilação do nível da água foi monitorada com um marégrafo de pressão Richard Bracker® TG-205, posicionado junto à margem. A taxa de aquisição do marégrafo foi de 20 minutos, com período de integração de 15 segundos a 2 Hz. Em função da condição abrigada da região onde foi instalado, este período foi considerado satisfatório para a eliminação de oscilações por ondas geradas por barcos ou ondas de ventos.

RESULTADOS

Os resultados obtidos com o fundeio do correntógrafo próximo da superfície e pró-

ximo da desembocadura do estuário do Rio Cubatão estão sumariados na Tabela 2, e suas evoluções no período de aquisição estão apresentadas na Figura 4. Observa-se que o padrão de maré observado na desembocadura do estuário do Rio Cubatão é diferente do observado na região costeira adjacente. Observou-se uma forte assimetria, com aproximadamente 5 horas de vazante e 7 horas de enchente. Isto reflete-se no padrão de corrente, com as correntes de vazante mais intensas ($\gg 40 \text{ cm.s}^{-1}$) do que as de enchente ($\gg 27 \text{ cm.s}^{-1}$). Observa-se também que o padrão de correntes de enchente é irregular ao longo do tempo, com um pico de máxima velocidade no início do período de enchente às 11 horas, um decaimento para velocidades próximas de zero às 14 horas, e uma elevação antes de iniciar a vazante às 16:30.

Tabela 1: Posicionamento das estações de coleta de dados.

Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)
# 1 (aeroporto)	26° 12' 44"	048° 47' 58"
# 2 (marina)	26° 12' 06"	048° 47' 31"
# 3	26° 11' 54"	048° 46' 58"
# 4	26° 11' 48"	048° 46' 22"
# 5 (fixa)	26° 12' 21"	048° 46' 12"

Tabela 2: Sumário dos resultados obtidos com o fundeio do correntógrafo e perfilagens com CTD.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Corrente (cm.s^{-1})	-39,6	26,9	-6,0	22,2
Salinidade (‰)	6,8	20,5	15,8	4,5
Salinidade _{CTD} (‰)	8,5	21,1	18,0	3,7
Temperatura (°C)	22,3	24,5	23,4	0,7
Temperatura _{CTD} (°C)	22,4	24,0	23,5	0,4
Turbidez (mg.l^{-1})	41,6	148,2	74,8	32,3

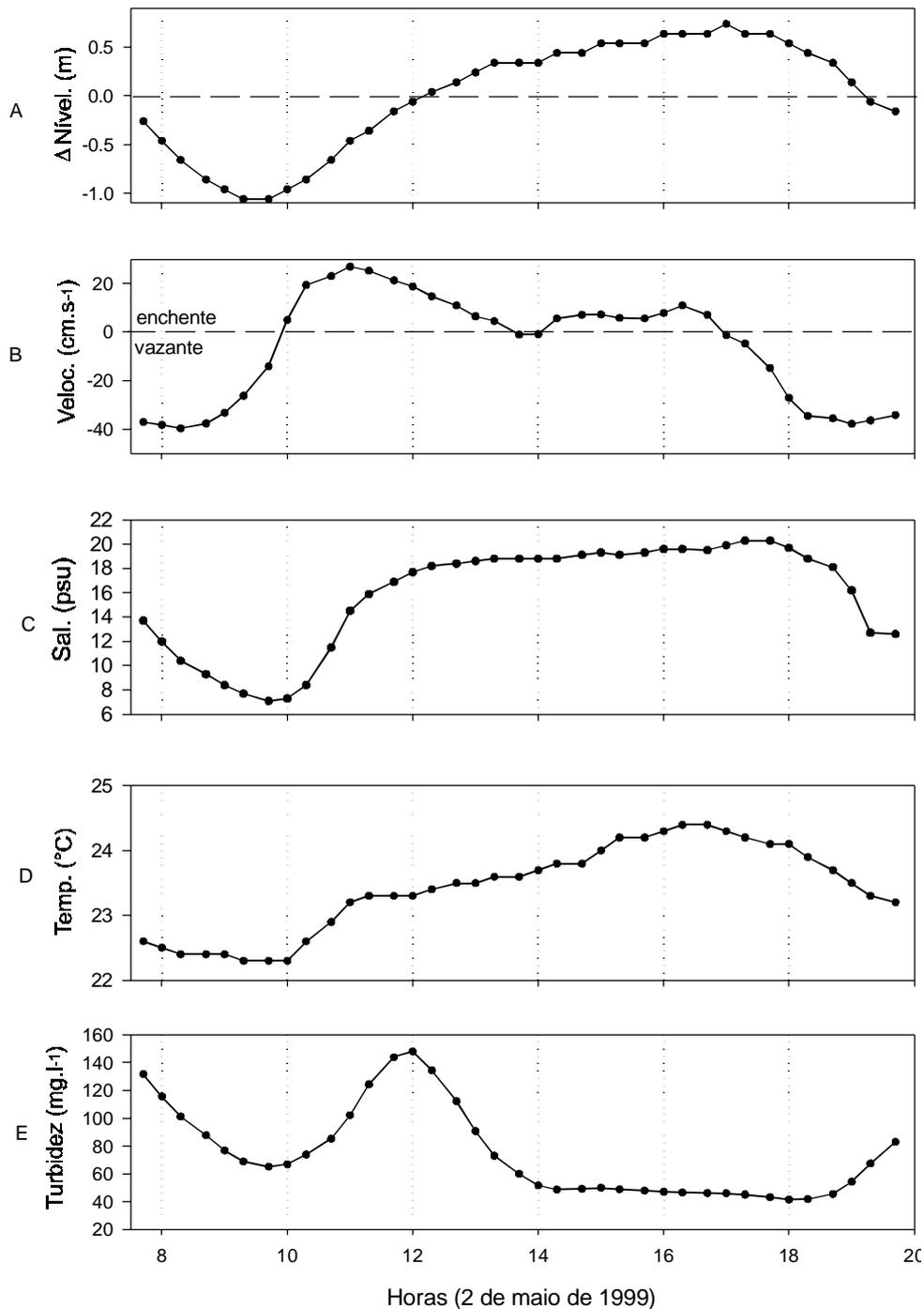


Figura 4: Variação temporal (A) do nível da água (m) próximo ao ponto de fundeio, (B) velocidade de corrente (cm.s⁻¹; + enchente, - vazante), (C) salinidade (‰), (D) temperatura (°C), e (E) turbidez (mg.l⁻¹).

A salinidade e a temperatura apresentaram padrões similares à variação do nível, indicando uma relação direta entre a variação destes parâmetros como função dependente da maré. A turbidez apresentou um comportamento diferenciado, fracamente relacionada com os outros parâmetros medidos. Até às 12 horas a turbidez apresentou um padrão similar ao da salinidade, porém após

este horário ela passou a apresentar uma relação inversa.

Os campos de distribuição vertical/temporal de salinidade e temperatura no ponto de fundeio do correntógrafo são apresentados na Figura 5, e os dados médios verticais, mínimos, máximos, e seus desvios padrões são mostrados na Tabela 2. Pode-se observar pelas distribuições temporais que a es-

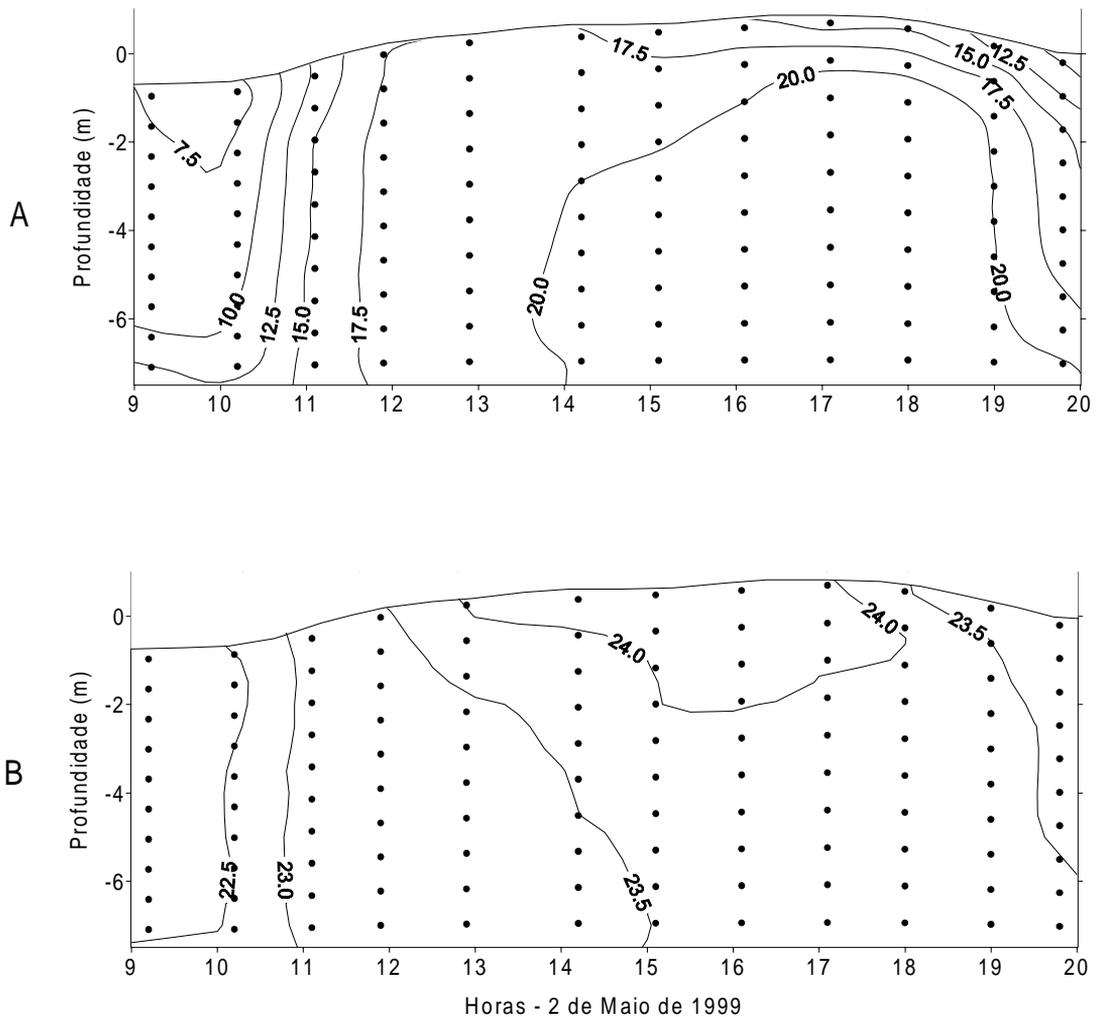


Figura 5: Variação temporal/vertical da salinidade (‰) e temperatura (°C) no ponto de fundeio do correntógrafo.

estrutura vertical apresenta-se homogênea a maior parte do tempo, com exceção dos períodos de vazante quando ocorre maior estratificação. Embora a distribuição de temperatura apresente padrões interessantes, a variação geral foi bastante inferior ao apresentado pela salinidade.

Os campos de distribuição vertical/longitudinal de salinidade e temperatura do perfil ao longo do estuário realizado durante a preamar são apresentados na Figura 6, e os

dados de salinidade de superfície, meia água, próximo ao fundo e média da coluna de água são mostrados na Tabela 3. Embora o padrão próximo da desembocadura do estuário mostre um padrão verticalmente homogêneo, à montante do estuário a estrutura salina caracteriza-se mais por apresentar uma estratificação mais acentuada. Observa-se também que a penetração da cunha salina ocorre até quatro quilômetros à montante da desembocadura. É possível que a entrada de

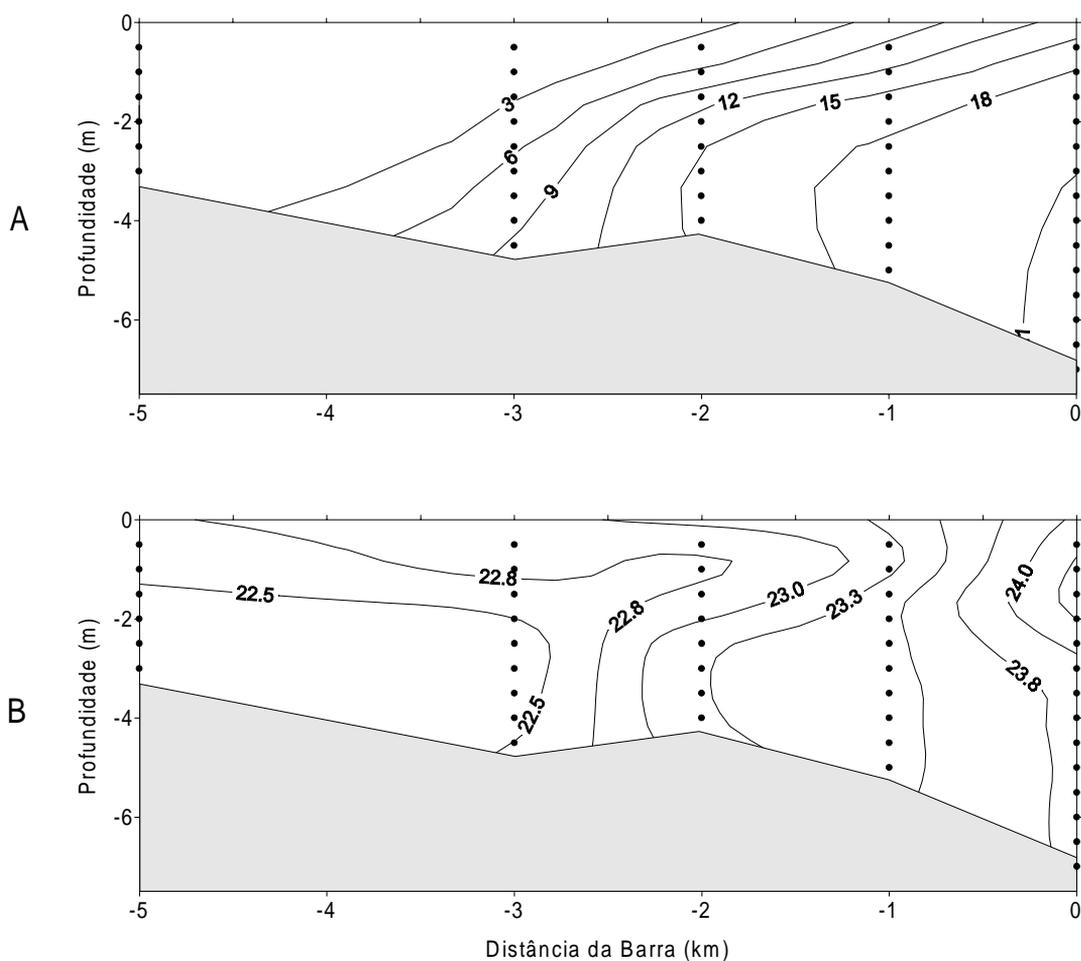


Figura 6: Distribuição vertical/longitudinal de salinidade (‰) e temperatura (°C) ao longo do estuário do Rio Cubatão durante à preamar.

Tabela 3: Sumário dos resultados de salinidade ao longo do estuário do Rio Cubatão. Entre parênteses encontra-se a distância aproximada à montante da estação da barra.

Estação	Superfície	Meia água	Fundo	Média
# 1 (5 km)	0	0	0	0
# 2 (3 km)	0,9	5,0	8,5	4,8
# 3 (2 km)	2,1	14,2	16,2	12,3
# 4 (1 km)	8,1	18,3	19,0	16,7
# 5 (0 km)	15,7	21,3	21,7	20,6

água salgada pelo fundo ocorra mais intensamente através do canal do Cubatão, porém não foram feitas medições para constatação.

Classificação do Estuário do Rio Cubatão

Baseando-se nas informações da estrutura salina do estuário, bem como de correntes, é possível classificar o estuário segundo os parâmetros de estratificação e circulação propostos por Hansen & Rattray (1966). O parâmetro de estratificação consiste da razão da diferença entre a salinidade residual (promediada ao longo de um ciclo completo de maré) de fundo e a da superfície pela salinidade residual média da coluna de água $[(S_F - S_S)/S_{média}]$. Este parâmetro foi estimado em 0,32 para o estuário do Rio Cubatão baseando-se nos dados adquiridos com o CTD.

O parâmetro de circulação pode ser estimado pela razão da velocidade residual próximo à superfície, $0,06 \text{ cm.s}^{-1}$, pela velocidade atribuída somente em função da descarga fluvial no período em questão. Esta pode ser estimada dividindo-se a descarga pela área da seção transversal onde foram realizadas as medições (Kjerfve, 1990). Devido à falta de informações detalhadas a respeito da área da seção transversal próximo à desembocadura do estuário onde foi realizado o levantamento de dados, considerou a seção como sendo um triângulo apresentan-

do a profundidade máxima média observada pelas perfilagens de CTD (7,2 m). Considerando uma largura de 50 a 100 m, tem-se como aproximação que a área da seção deve ser entre 150 e 350 m^2 .

A descarga fluvial no dia 2 de maio de 1999 pode ser estimada pela proporção entre a descarga do Rio Cubatão com a descarga do Rio Itajaí-açu, estação Indaial. Considerando-se também que o período de duas semanas prévias à campanha foi sem precipitações meteorológicas expressivas, esta estimativa pode ser considerada como aproximação razoável. Tomando-se a descarga média de ambos os rios, 230 e $12,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e a descarga média nos sete dias anteriores no Rio Itajaí-açu, $140 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, tem-se uma descarga estimada de $7,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para o período de amostragem. Dividindo-se este valor pela área mínima e máxima esperada, obtém-se que a velocidade na seção transversal devida à descarga fluvial é algo entre 0,051 e $0,022 \text{ m.s}^{-1}$. A velocidade média de corrente medida divide por estes valores fornece o parâmetro de circulação entre 1,2 e 2,7.

A classificação de Hansen & Rattray pode ser expressa graficamente como mostra a Figura 7. Neste diagrama, a elipse cinza é a região onde se situa o estuário do Rio Cubatão, baseando-se nos cálculos acima descritos. O diagrama é dividido em quatro regiões distintas, mostradas pelos números

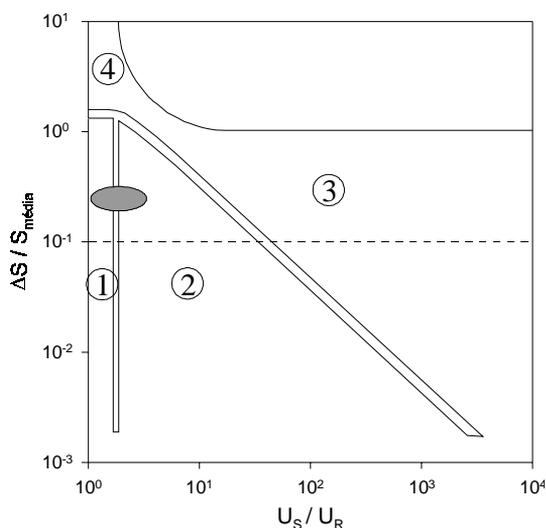


Figura 7: Diagrama de circulação/estratificação para classificação de estuário (Hansen & Rattray, 1966). A elipse vermelha indica a região onde está situado o estuário do Rio Cubatão.

dentro de círculos. A região 1 representa sistemas estuarinos para os quais a circulação gravitacional não desempenha um papel importante, de modo que o transporte de sal à montante ocorre por difusão turbulenta, sendo que àqueles situados acima da linha divisória apresentam alguma estratificação vertical. A região 2 representa sistemas denominados de parcialmente estratificados, onde a circulação gravitacional já desempenha algum papel, e o transporte de sal ocorre também por advecção (Kjerfve, 1990).

Assim sendo, de acordo com as observações realizadas o estuário do Rio Cubatão pode ser classificado como um sistema que apresenta um baixo grau de estratificação salina, e o transporte de sal para montante ocorre principalmente por processos de macro-difusão turbulenta gerados principalmente pela variação do nível do mare causado pela maré, e em menor grau pela advecção fluvial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estuário do Rio Cubatão deságua no braço norte da Baía da Babitonga, denominado de Rio Palmital. Desta forma, a dinâmica das massas de água que periodicamente são trocadas entre o estuário e sistema maior tornam-se bastante complexas, visto a presença de inúmeros outros sistemas estuarinos menores na região próxima.

A presença de uma extensa vegetação de maguezal indica uma vasta área de inundação periódica pelas marés, e provavelmente isto gera a assimetria da onda de maré, bem como do regime de correntes com predominância das correntes de vazante. Isto implica que o balanço de sedimentos ao longo do tempo é negativo, ou seja, o estuário exporta sedimentos para a região externa, e estes provavelmente depositam-se formando a soleira do sistema, no Rio Palmital.

A baixa descarga fluvial do Rio Cubatão durante o período de coleta, juntamente com a situação de sizígia e a amplificação da altura da onda de maré no interior da Baía da Babitonga, tornam este sistema verticalmente homogêneo. Isto implica que a maré é o principal mecanismo regulador da qualidade da água no interior do sistema. Durante períodos de maior descarga, uma maior importância pode ser atribuída à advecção fluvial, porém em situações episódicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Valdenir Ines por sua colaboração nas atividades de campo. Este trabalho foi financiado pela Empresa OAP de consultoria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cameron, W.N. & D.W. Pritchard. 1963. Estuaries, p. 306-324. In: M.N. Hill [Ed.], The sea. Vol. 2. New York, John Wiley & Sons.

- GAPLAN 1986. Atlas de Santa Catarina. Florianópolis, Gabinete de Planejamento, 173p.
- Fairbridge, R. 1980 The estuary: its definition and geodynamic cycle, p. 1-35. In: E. Olausson & I. Cato [Eds.], Chemistry and biogeochemistry of estuaries. New York, John Wiley & Sons.
- Hansen, D.V. & M. Rattray Jr. 1966. New dimensions on estuarine classification. *Limnology and Oceanography*, 11:319-326.
- Kjerfve, B. 1989. Estuarine geomorphology and physical oceanography, p. 47-78. In: J.W. Day Jr.; C.A.S. HALL; W.M. KEMP; A. YAÑES-ARANCIBIA [Eds.], Estuarine ecology. New York, John Wiley & Sons.
- Kjerfve, B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. Paris, UNESCO/UNDP, 79p.
- Nichols, M.M. & R.B. Biggs. 1985. Estuaries, p. 77-186. In: R.A. Davis [Ed.], Coastal sedimentary environments. New York, Springer Verlag.
- Pugh, D.T. 1987. Tides, surges and mean sea level. New York, John Wiley and Sons, 472p.
- Schettini, C.A.F.; J.L.B. Carvalho; P. JABOR. 1996. Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State, Southern Brazil. Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries, Bahia Blanca, Proceedings... IAI, p.29-32.
- Truccolo, E.C. 1998. Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul, SC. Dissertação de Mestrado, Florianópolis, UFSC, 100p.
- Truccolo, E.C. & E. Melo Fo. 1997. Estudo da variação dos constituintes harmônicos de maré ao longo da Baía da Babitonga – SC. In: SEMINÁRIO SOBRE ONDAS E MARÉS, 2, Arraial do Cabo, Resumos... IEAPM, p35.