

Transporte de Sal e Hidrodinâmica do Estuário do Rio Tubarão – SC, Brasil

D'Aquino, C.A; Franklin da Silva, L.; Couceiro, M.A.A; Pereira, M.D.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

cadaquino@gmail.com

Schettini, C.A.F

Universidade Federal de Pernambuco

carlos.schettini@pq.cnpq.br

Recebido: 14/05/10 - revisado: 29/11/10 - aceito: 19/01/11

RESUMO

Este trabalho apresenta uma primeira caracterização oceanográfica no estuário do rio Tubarão, avaliando os processos de transporte de sal e caracterizando as principais forças que controlam a hidrodinâmica no baixo estuário. Nos dias 3 e 4 de maio foi realizada uma campanha para aquisição de dados hidrográficos ao longo de dois ciclos completos de maré (25 horas), sob condições de maré de sizígia. Informações de velocidade e direção das correntes, temperatura e salinidade foram obtidas através do fundeio de um PACD e dois CTD's (superfície e fundo). Um transepto longitudinal de cerca de 33 km foi traçado, ao longo do qual foram efetuados perfis verticais com CTD a cada 1 km e sedimentos de fundo foram coletados a cada 2 km. Também foram realizados estudos hidrológicos e hipsométricos. De forma geral as correntes de vazante foram predominantes no estuário e apresentaram as maiores intensidades. A distribuição vertical de salinidade ao longo do estuário mostrou a presença de uma cunha salina bem definida que penetrou cerca de 27 km estuário adentro. Através da decomposição do transporte advectivo de sal foi possível verificar a maior importância da descarga fluvial e da circulação gravitacional sobre os outros mecanismos físicos que influenciam nas características do transporte de sal no estuário. O estuário foi classificado como de cunha salina.

Palavras Chave: transporte de sal, hidrodinâmica, estuário, rio Tubarão

INTRODUÇÃO

Dyer (1973) e Officer (1976) definiram os seguintes tipos de estuários: altamente estratificados ou cunha salina, parcialmente misturados e, bem misturados ou homogêneos. Como são ambientes dinâmicos, principalmente considerando-se uma escala de observação de horas, dias a meses os estuários transitam entre os diferentes tipos classificatórios. De forma que, as interações que ocorrem no interior de um estuário, considerando a presença das águas doce e salgada, sob a influência das condições hidrodinâmicas, trarão para cada estuário um diferente grau de mistura e características de transporte, retenção e distribuição de propriedades (salinidade, material particulado em suspensão, nutrientes, etc.).

Estes ecossistemas dinâmicos têm uma das maiores diversidades do mundo (Hobbie, 2000; Bianchi, 2007) e podem ser vistos sob diferentes escalas de tempo conforme os processos focados.

Sob o ponto de vista dinâmico, numa escala de segundos a anos, os estuários podem ser caracterizados pela mistura entre as águas doce, de origem fluvial, e salgada, de origem marinha; pela circulação gravitacional causada pela diferença de densidade dessas águas; pela influência de forças como a descarga fluvial, ondas e marés e pelo suprimento de sedimentos.

Segundo Dyer (1986), a diferença de salinidade entre a água do mar e do rio é entorno de 35, o que gera uma diferença de densidade próxima de 2%. Mesmo pequena ela é suficiente para gerar um importante fluxo residual, chamado de circulação gravitacional. A descarga fluvial proporciona a entrada de água doce no estuário. Esse volume escoa em direção ao mar, fluindo sobre a água salgada que entra no estuário devido às marés ocasionando, uma circulação bi-direcional, com a água doce fluindo em direção ao mar na camada superficial e a água salgada entrando no estuário junto ao fundo.

Conforme a importância de cada variável envolvida nos processos físicos, um estuário irá se

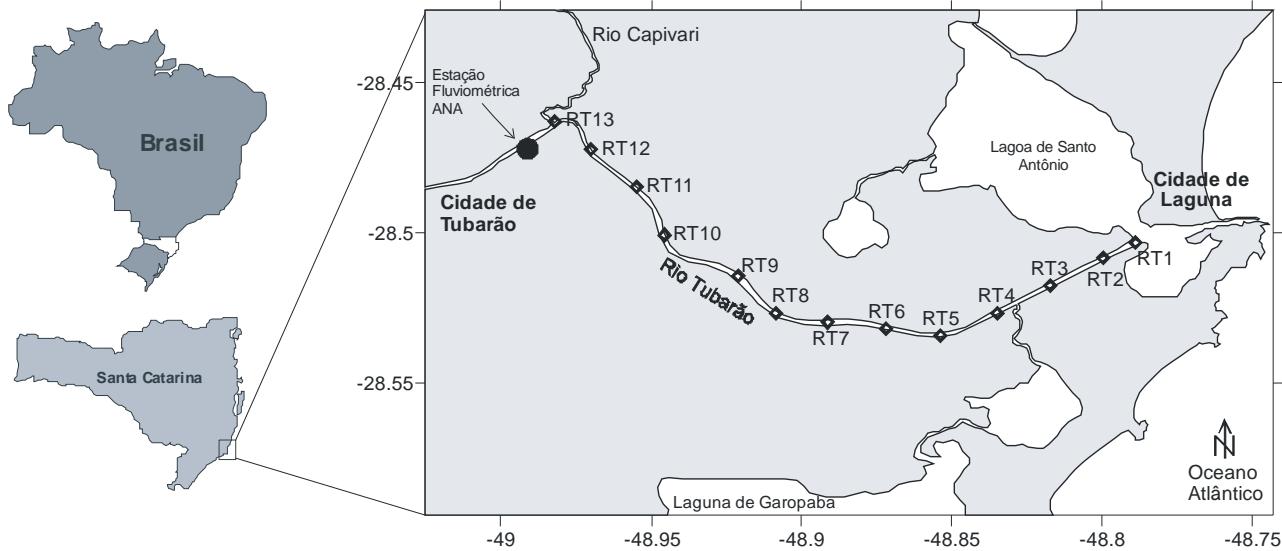


Figura 1 - Estuário do Rio Tubarão. As estações de coleta de sedimento estão indicadas pelos losangos (\diamond) e a localização da estação fluviométrica (ANA) está indicada pelo círculo cheio (●). O fundo foi realizado na estação RT2.

ajustar dinamicamente à dominância de determinada variável sendo que, em longo prazo, percebe-se a predominância de certa condição. Por exemplo: no caso de estuários que têm seu processo de mistura determinado pela ação das marés na maior parte do tempo, apresentam haloclínias mais verticais características de estuários bem misturados, eles são considerados estuários dominados pela maré. Os estuários dominados por rio são aqueles em que a descarga fluvial é a variável dominante nos processos de mistura na maior parte do tempo. A distribuição de sal é marcada por haloclínias mais horizontais, onde se evidencia uma forte estratificação. Apresentam cunha salina e são mais comuns em costas de micro marés, como é o caso da costa de Santa Catarina.

A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão encontra-se na Região Sul do estado de Santa Catarina e pertence à vertente de drenagem Atlântica. É a mais expressiva bacia hidrográfica da Região Sul de Santa Catarina. As águas desta bacia servem como fonte para o abastecimento público de pelo menos seis municípios, além de serem usadas também para abastecimento industrial, irrigação, recreação, atividade pesqueira e turística. Toda esta bacia é considerada bastante impactada principalmente por atividades carboníferas, agrícolas, pecuárias, entre outras (Lima et al., 2001). O rio tubarão nasce junto a Serra Geral, e tem como seus principais afluentes

os rios Braço do Norte e Capivari. Após percorrer uma distância de 120 km e drenar uma área de 5.640 km² (Beltrame, 2003) ele desemboca na Lagoa de Santo Antônio. A vazão média do rio Tubarão é de 44 m³/s para os meses de inverno e 152 m³/s para os meses de verão. O domínio climático na região é do tipo mesotérmico (cfa), com média pluviométrica anual de 1370 mm.

O vento é predominantemente nordeste (cerca 30%), com calmarias (20 % das observações) e vento sul (16%) segundo a estação meteorológica de laguna (ELETROSUL, 1990).

Conforme a SDM (1997), as principais fontes poluidoras do Rio Tubarão e seus respectivos tipos de poluição são: a) Mineração: resíduos da extração de carvão; b) Urbano-industrial: efluentes orgânicos e tóxicos; c) Engenhos de mandioca: efluentes tóxicos; d) Atividades relacionadas à lavoura: agrotóxicos e assoreamento do rio; e) Atividades relacionadas à pecuária: coliformes fecais por dejetos de suínos. Além de problemas como ocorrência de retificação, canalização e dragagem de cursos de água e salinização dos solos nas áreas irrigadas.

Autores como ELETROSUL (1990), Marcomin (1996), Bertoluzzi (2003) estudaram a Bacia Hidrográfica e rio Tubarão observando o aspecto sócio-ambiental geral da bacia, usos da água e os impactos ambientais decorrentes das atividades re-

gionais. Beltrame (2003) foi o primeiro a relatar e verificar características mais oceanográficas na região, porém com enfoque na atividade de cultivo de camarões. O presente tem como objetivo principal apresentar uma primeira caracterização oceanográfica do estuário do rio Tubarão (Figura 1), através da análise dos mecanismos de transporte de sal, e da caracterização das principais forças físicas que controlam a hidrodinâmica no baixo estuário. Também são analisados e discutidos a distribuição de sedimentos do leito do estuário, o regime hidrológico do rio Tubarão, e a situação geomorfológica da bacia hidrográfica.

MATERIAS E METODOS

Levantamento de dados Hidrológicos

Dados históricos de vazão foram obtidos através da Agência Nacional das Águas (ANA), disponibilizados através do hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>), para a estação do Rio Tubarão (8458 0500), compreendendo o período de 1991 a 2004. Esta é a estação mais a jusante monitorada neste rio e representa uma área de drenagem de 2.840 km². A análise dos dados foi realizada com auxílio do programa HIDRO (Sistema de Informações Hidrológicas da ANA, 2003) de onde obteve-se a vazão média a longo termo (Q_{mlt} , ou vazão média histórica) e das vazões de permanência, para os períodos de 10, 50 e 90 % (Q_{10} , Q_{50} e Q_{90}), através da curva de permanência para 20 classes. A vazão de permanência dá a probabilidade de ocorrência de determinada vazão no tempo.

Hipsometria

As informações de elevação utilizadas correspondem aos dados de altimetria por satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizados pelo Serviço Nacional de Geólogos dos EUA (USGS/EROS). Estes dados apresentam uma resolução vertical de 1 m e horizontal de 90 m.

O cálculo hipsométrico consiste na determinação de quanto cada altitude compõe a bacia hidrográfica e foi realizado no programa SURFERTM (Golden Software, 1995). O método de interpolação utilizado foi triangulação com interpolação linear, por ser um método exato com grande fidelidade aos dados originais, especialmente quando regularmente distribuídos.

Segundo Asp et al. (2009) a curva hipsométrica resume de maneira precisa o aspecto geral de

uma bacia de drenagem. Estas curvas são elaboradas a partir da intersecção de planos com o modelo de elevação digital, sendo calculadas as áreas que se encontram acima de cada plano de elevação utilizado. Com a confecção de curvas hipsométricas absolutas, onde elevações (h) e áreas (a) são relativadas em função da elevação máxima (H) e da área total (A) de cada bacia, uma comparação direta de bacias é possibilitada em termos de a/A e h/H . A digitalização do contorno da bacia também foi realizada no programa SURFERTM, a partir da base hidrológica fornecida pela ANA.

Campanha de coleta de dados

A campanha para aquisição de dados hidro-oceanográficos teve início às 13:00 h do dia 3 com término às 13:00 h do dia 4 de maio de 2007, sob condições de maré de sizígia. Informações sobre intensidade e direção de correntes foram obtidas com o fundo (Figura 1, estação TR2) de um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (PACD) da marca NortekTM, modelo Aquadopp Profiler[®], com freqüência de trabalho de 1 MHz.

A salinidade e temperatura no ponto de fundo foram obtidas em superfície, através de um CTD SensorData, modelo sd204 e junto ao fundo, através de um CTD modelo sd200.

A oscilação do nível da água foi monitorada com um marégrafo de pressão marca RBR modelo XR-420-TG, acoplado ao PACD.

Para obtenção da distribuição espacial de salinidade e temperatura ao longo do estuário foi realizado um levantamento que percorreu cerca de 33 km, a partir da desembocadura da Barra de Laguna, subindo estuário acima. Perfis verticais de salinidade e temperatura foram registrados em estações de amostragem espaçadas em 1 km (Figura 1). Amostras de sedimento do leito foram coletadas a cada 2 km com uma draga do tipo “Ponar”.

O perfil vertical da velocidade de corrente foi ajustado pelos valores da variação do nível e referenciado pelo tempo e pelo espaço. A distribuição das correntes ao longo do tempo e da coluna de água foi feita com base nas células válidas registradas pelo PACD, com variação da coluna de água de 1 a 3,5 m acima da superfície do fundo, enquanto o local de fundo apresentava uma profundidade de 4,5 metros. A variação de nível de água também está representada nesta distribuição de correntes. As correntes de vazante foram assinaladas como negativas e as correntes de enchente como positivas. Essa marcação foi fundamentada no histograma dos dados de direção de correntes, com classes coerentes

com ciclo de 360 graus. Onde o setor que demonstrou maior energia, entre 20 e 175, corresponde a vazante, e o setor complementar enchente. Como o intervalo de amostragem do PACD e do CTD foi o mesmo, de dez minutos, os valores de salinidade e temperatura, na superfície e no fundo, foram ajustados ao tempo da velocidade de corrente.

A análise granulométrica do sedimento de fundo foi realizada no laboratório de Sedimentologia da UNIVALI, a partir dos métodos de peneiramento (grosseiros) e pipetagem (finos) conforme Suguió (1973) e determinação da matéria orgânica total dos sedimentos (Gross, 1971). Neste artigo serão apresentados os resultados dos percentuais de areia, silte e argila conforme diagrama proposto por Flemming (2000).

Calculo do Transporte de Sal

Com base em princípios físicos e considerando um estuário lateralmente homogêneo, o transporte de sal médio durante um ou mais ciclos de maré é dado pela equação 1.

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \rho u S dz dt \quad (1)$$

onde ρ é a densidade da água, u a componente da velocidade, S a salinidade e T o intervalo de tempo. O detalhamento do método de cálculo das parcelas do transporte de sal está descrito em Miranda et al. (2002), fundamentado em trabalhos de Bowden (1963), Fischer (1976), Hunkins (1981), Dyer (1974) e Kjerfve (1986).

Um dos objetivos deste método é separar as parcelas do transporte de sal, geradas pelos componentes de influência periódica da maré (barotrópico) e circulação gravitacional (baroclinico). Para indicar os processos físicos responsáveis pelo movimento estuário acima (dispersivo) e estuário abaixo (advecativo), decompõe-se os componentes de velocidade longitudinal, salinidade e a espessura da coluna de água, de forma que o transporte de sal possa ser representado em 7 termos.

O termo 1 representa o transporte gerado pela descarga fluvial e com seu valor sempre estuário abaixo, de natureza adveciva. O termo 2 representa o transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré no estuário (deriva de Stokes), geralmente transportando sal estuário abaixo. O termo 3 é a correlação de maré dos valores médios de velocidade e salinidade na coluna de água, nor-

malmente gerencia o transporte de sal estuário acima. O termo 4 é o transporte da circulação estacionária (diferença entre a corrente de gravidade e o componente gerado pela descarga fluvial ou residual). O termo 5 é resultado do cisalhamento oscilatório e o movimento gerado pelo vento e flutuações turbulentas de velocidade, com escala de tempo inferior ao período de maré. O termo 6 é a dispersão da maré. E por último, o termo 7 que corresponde a media temporal da correlação entre salinidade e a maré ponderada pela velocidade residual.

Índices estuarinos

Foram calculados os parâmetros de circulação e estratificação proposto por Hansen & Rattray (1966). O parâmetro de circulação relaciona a corrente residual de superfície com o fluxo médio da coluna de água (Miranda et al., 2002) em um ou mais ciclo de maré (U_s/U_m). O parâmetro de estratificação é obtido pela razão entre a diferença de salinidade de fundo e superfície e a média vertical de salinidade ($(S_f - S_s)/S_m$).

Para análise de mistura e estratificação utilizou-se o número de Richardson de camada (Ri_L), que fornece uma comparação entre as forças estabilizadoras da estratificação e a fricção vertical que produz mistura e homogeneização:

$$Ri_L = \frac{gH\beta\Delta S}{u^2} \quad (2)$$

onde g é gravidade, H a profundidade local, β o coeficiente de contração salina médio, ΔS a diferença entre a salinidade de fundo e de superfície e u a velocidade média na coluna de água integrada no tempo em um ciclo de maré. Quando $Ri_L < \frac{1}{4}$ os efeitos friccionais prevalecem causando mistura e quando $Ri_L > \frac{1}{4}$ a estratificação é estável (Dyer, 1997; Miranda et al., 2002).

Ainda na análise da estratificação utilizou-se a razão entre o prisma de maré (P), que representa o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente, e o fluxo de água doce a cada período de maré (R) (Miranda et al., 2002):

$$R = Q_{mlt} \times T \quad (3)$$

$$P = h \times A_s \quad (4)$$

onde T é o período de um ciclo de maré, h é a altura da maré e A_s a área superficial do estuário. Esta

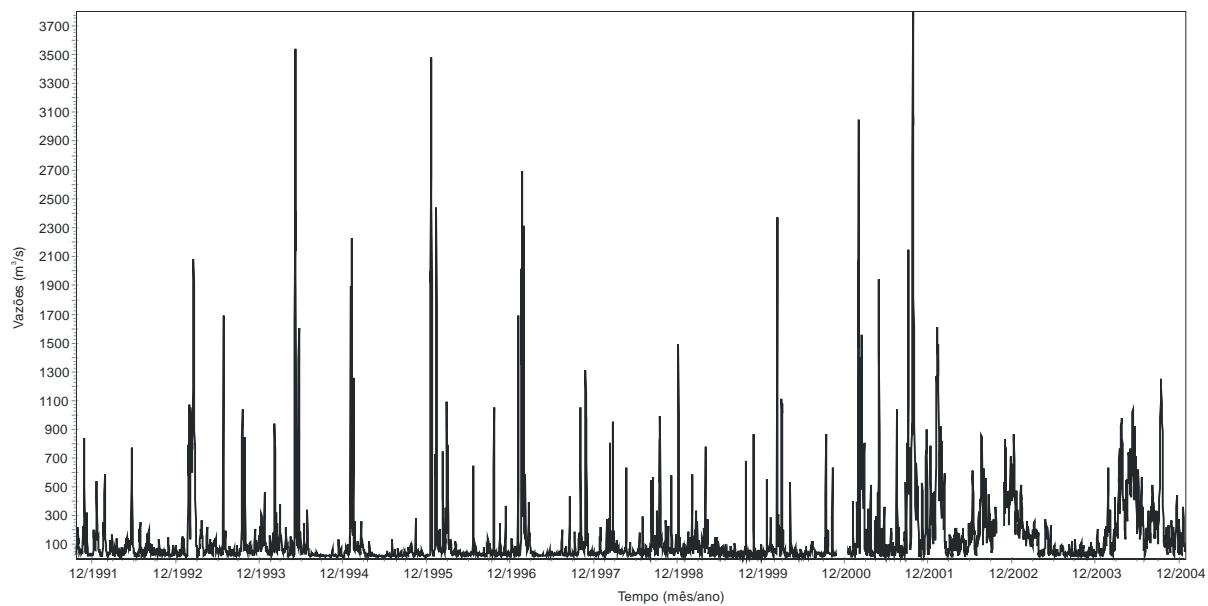


Figura 2 - Série histórica de vazão para o rio Tubarão na estação (84580500), período de 1 de outubro de 1991 a 1 de dezembro de 2004.

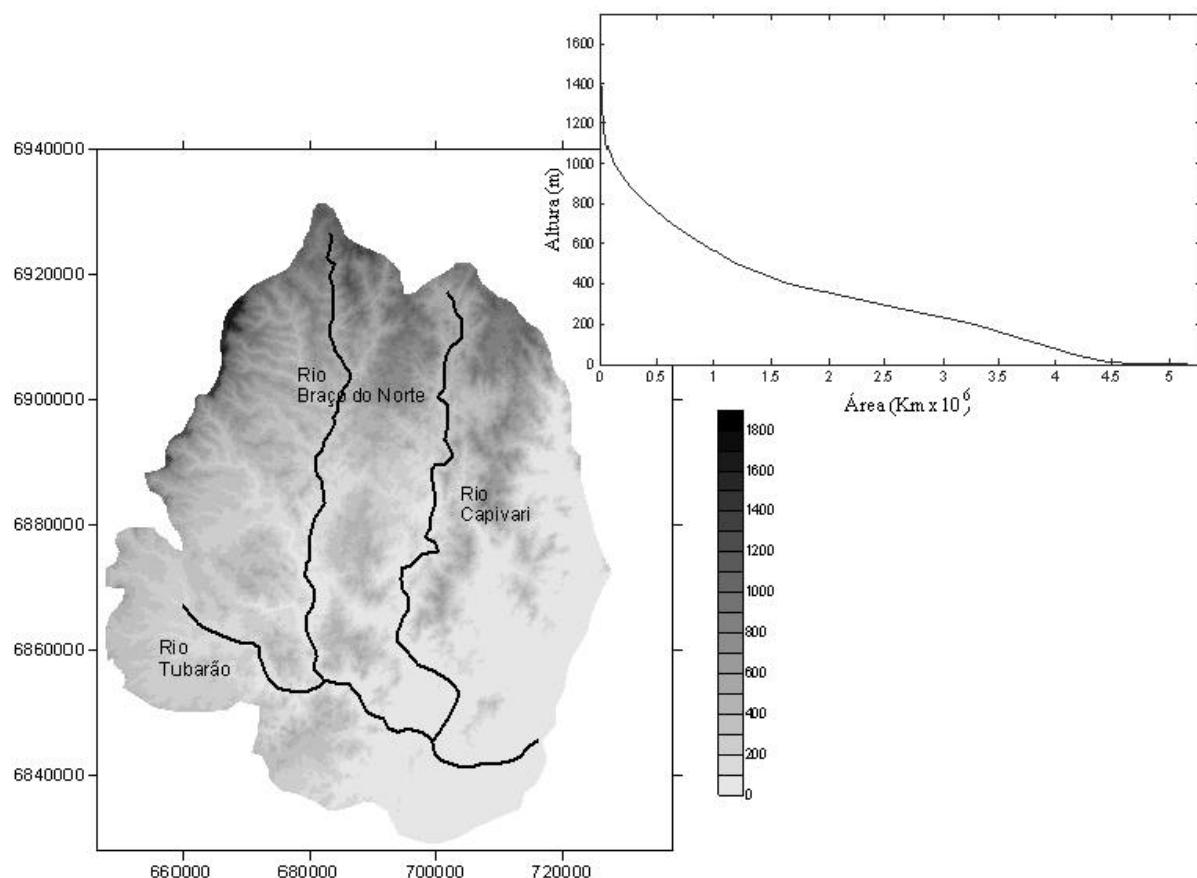


Figura 3 - Altimetria do bacia hidrográfica do rio Tubarão e curva hipsometrica.

razão representa a importância relativa entre as forçantes de maré e a descarga fluvial do estuário. Segundo Dyer (1997) um estuário é classificado como altamente estratificado quando a razão de fluxo é superior a unidade.

RESULTADOS

Hidrologia

Conforme Monteiro (2001), Santa Catarina é um dos estados que apresenta melhor distribuição pluviométrica ao longo do ano, sendo os eventos pluviais decorrentes da passagem de frentes frias, de vórtices ciclônicos, de cavados de níveis médios, da convecção tropical, da ZCAS (zona de convergência do Atlântico Sul) e da circulação marinha. Essa distribuição se reflete na série histórica de vazão (Figura 2 - estação 84580500) compreendendo o período entre 1 de outubro de 1991 e 1 de dezembro de 2004. Observa-se a ocorrência de picos de vazões ao longo de toda a série, sem uma periodicidade marcante. Com base nessa série, a vazão média histórica ou Q_{mlt} foi de $146 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Para o mês de maio (mês da coleta) a media histórica foi de $181 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, com valores médios máximo e mínimo de 694 e $50,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente. As vazões de permanência Q_{10} , Q_{50} e Q_{90} foram 420 , $83,6$ e $29,9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente.

Hipsometria

A área da bacia hidrográfica do rio Tubarão, os principais afluentes, as alturas da bacia e a curva hipsometrica são apresentadas na Figura 3.

Segundo GAPLAN (1986) os rios da vertente Atlântica em Santa Catarina apresentam um perfil longitudinal bastante accidentado no curso superior. No curso inferior onde cortam as planícies aluviais, geralmente formam meandros, os perfis assinalam baixa declividade. Essa descrição se aplica a bacia do rio Tubarão que apresenta 77,4% da área em cotas abaixo dos 400 m. As cotas de 0, 200 e 300 metros são as que ocupam maior área, cada uma delas ocorrendo em cerca de 15% da bacia. As cotas de 10 a 50 ocupam juntas cerca de 11% da área. A máxima altitude é de 1.766 m incluída em pouco mais de 2% da área que fica acima dos 1000 m. Estas maiores altitudes correspondem as bordas Oeste e Norte da bacia que fazem fronteira com a Serra Geral. A declividade média da bacia foi calculada em $4,8^\circ$, bastante próxima da bacia hidrográfica do rio Itajaí, a qual possui uma declividade média de $4,3^\circ$ conforme Asp et al. (2009).

Oceanografia

Durante o experimento de 25 horas foram observados dois períodos de enchente e dois de vazante. A Figura 4 apresenta as variações temporal e vertical das velocidades de corrente, e a variação temporal da salinidade e temperatura de superfície e fundo no local de fundeo (próximo a desembocadura, estação RT2, Figura1). O nível de água no estuário foi mais alto no primeiro período de enchente (entre a segunda e quarta hora de experimento), mostrando um padrão geral de decréscimo ao longo do tempo. Neste período de enchente mais intenso, observa-se as correntes de enchente ocupando toda coluna de água, juntamente com o maior nível observado. No segundo período (após 14 horas de experimento) a enchente não foi tão intensa, porém foi seguida por forte vazante, ainda com o nível em decréscimo, fato que favoreceu os valores de velocidade de vazante mais intensos observados após 19 horas de experimento.

A variação do nível de água no estuário apresentou leve assimetria de enchente durante a campanha de medições, levando maior tempo para vazante do que para enchente (Figura 4A). Esse comportamento é característico de estuários do tipo cunha salina (Dyer, 1997) e foi observado em outros estuários catarinenses como o Mampituba (D'Aquino et al., SUBMETIDO) e o Araranguá (D'Aquino et al., 2010).

Na Figura 4B observa-se a estratificação de salinidade presente em todo o período. A salinidade média de superfície foi de $6,7 \pm 2,3$, enquanto a de fundo foi de $33,4 \pm 3,2$, indicando um forte gradiente de densidade vertical, acentuado pela temperatura. A qual variou na media cerca de 1°C entre superfície e fundo (Figura 4C). Segundo Pickard & Emery (1990) um ΔT de 1°C causa uma variação de 0,2 na densidade, enquanto um ΔS de 1 psu causa uma variação de 0,7, de forma que, nos estuários onde a diferença de salinidade é muito mais expressiva, é essa propriedade a principal responsável por gerar diferenças de densidade. Sendo o efeito da temperatura desprezível.

No momento em que o estuário apresentou maior nível de água, observou-se as maiores variações na salinidade e temperatura de fundo, bem como a maior velocidade de enchente próximo ao fundo.

A Tabela 1 mostra os valores médios, máximos e mínimos absolutos de correntes, salinidade e temperatura para superfície e fundo, além de valores máximos absolutos de velocidade de enchente e vazante, durante as 25 horas de experimento. A

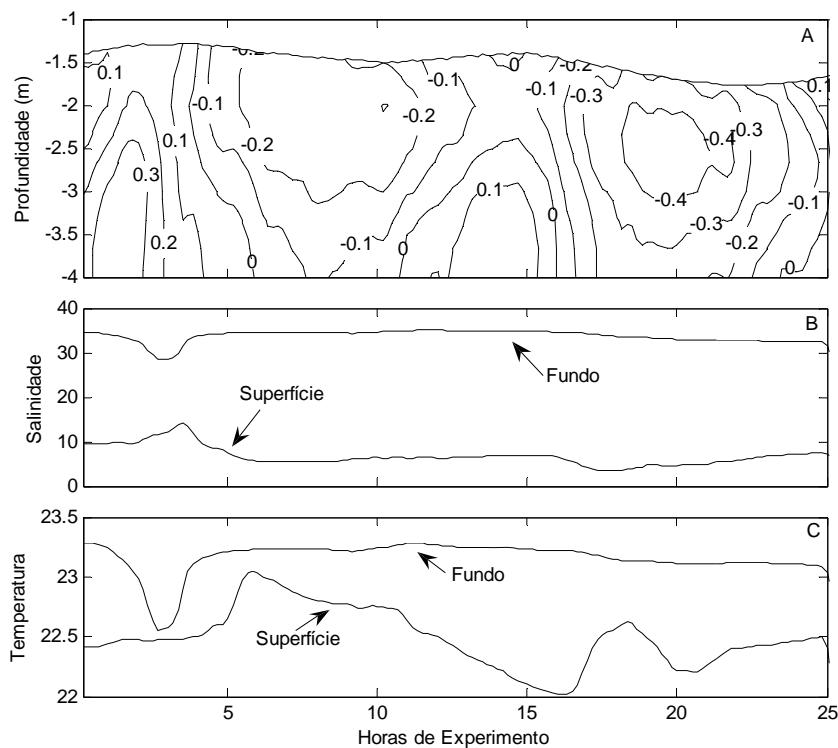


Figura 4 - Distribuição vertical e temporal da velocidade das correntes e variação temporal do nível de água (A), variação temporal da salinidade de superfície e fundo (B) e variação temporal da temperatura de superfície e fundo (C), observadas durante 25 h de campanha no estuário do rio Tubarão entre os dias 3 e 4 de maio de 2007.

velocidade média de corrente de fundo apresentou valor com sentido vazante o que representa um reflexo do forte evento de enchente no início das observações equilibrado pelo intenso evento de vazante ocorrido no final do período, este porém apresentando correntes mais fortes. Também analisando-se a máxima velocidade absoluta de correntes de superfície e de fundo, observa-se que ambas tem sentido vazante.

A Figura 5 apresenta o perfil vertical de velocidade de correntes média durante o período de observação, o valor na porção mais superficial da coluna de água foi de $-0,12 \text{ m.s}^{-1}$ e na porção mais próxima do fundo foi de $0,05 \text{ m.s}^{-1}$. Observa-se também que o estuário apresentou um padrão de correntes bidirecional, porém com a coluna de água predominantemente vazante. A maior velocidade média de vazante ocorreu a 3 metros acima do fundo ($-0,17 \text{ m.s}^{-1}$).

A distribuição longitudinal e vertical da salinidade e da temperatura está representada na Figura 6. Observa-se o estuário bastante estratificado com uma cunha salina penetrando cerca de 28 km e um gradiente de salinidade de aproximadamente

25, ocorrendo entre 2 e 3 m de profundidade. A Temperatura aparece homogênea no estuário, com exceção do ponto localizado a 25 km, que apresenta uma temperatura de 25°C próximo dos 2 m de profundidade, local onde desemboca o rio Capivari.

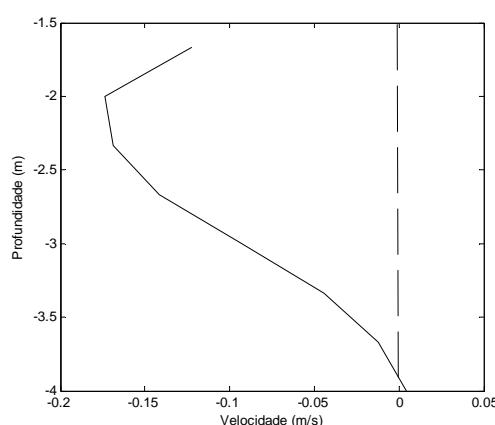


Figura 5 - Perfil vertical da velocidade média na coluna de água durante as 25 horas de campanha no estuário do rio Tubarão.

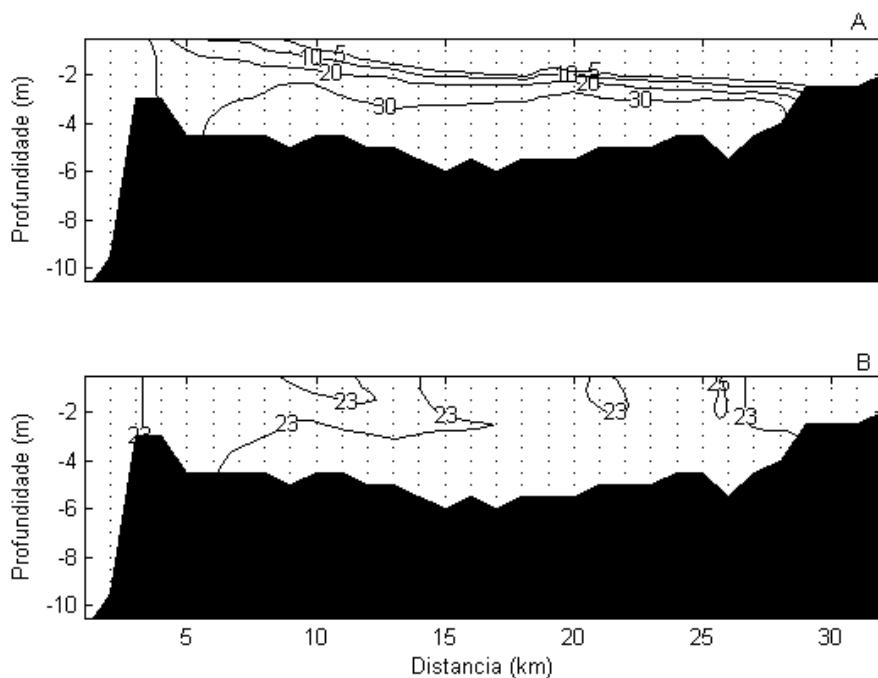


Figura 6 - Distribuição longitudinal e vertical da salinidade (A) e da temperatura (B) no estuário do rio Tubarão, obtidas no dia 03 de maio de 2007 na preamar.

Tabela 1 - Valores médios, máximos e mínimos absolutos de velocidade ($m.s^{-1}$), salinidade e temperatura ($^{\circ}C$). Os valores negativos de velocidade representam água saindo do estuário (vazante).

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo
Corrente de superfície	$-0,12 \pm 0,14$	-0,17	-0,03
Corrente de fundo	$0,05 \pm 0,16$	-0,14	0
Corrente de vazante	—	-0,48	—
Corrente de enchente	—	0,40	—
Salinidade de superfície	$6,7 \pm 2,3$	14,8	0
Salinidade de fundo	$33,4 \pm 3,2$	35,1	28,3
Temperatura de superfície	$22,5 \pm 0,3$	23	21
Temperatura de fundo	$23,1 \pm 0,2$	23,3	21,5

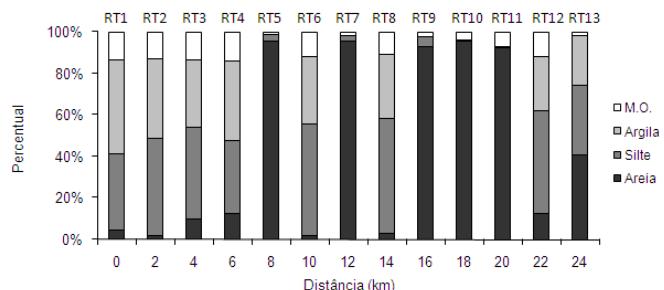


Figura 7 - Distribuição dos percentuais de areia, silte, argila e matéria orgânica (MO) nas estações RT1 a 13 no estuário do rio Tubarão. A estação RT1 foi coletada na desembocadura e a RT13 a 24 km (estaçao mais a montante).

Os pontos de coleta de sedimentos compreenderam os 24 km iniciais do estuário (Figura 1), onde a estação RT1 (km 0) está localizada na desembocadura e a RT13 bem próximo a desembocadura do rio Capivari (km 24). Nos primeiros 6 km as amostras apresentaram maiores percentuais de argila, silte e matéria orgânica (MO) (Figura 7). O mesmo padrão é observado nos quilômetros 10, 14 e

22 (respectivamente RT6, 8 e 12). Nos quilômetros 8, 12, 16 e 20 (respectivamente RT5, 7, 9 e 11), ocorre um domínio da fração arenosa superior a 90%. A estação mais próxima ao rio Capivari, localizada no quilômetro 24 (RT13), apresentou um padrão distinto, com uma melhor distribuição entre os percentuais de areia, silte e argila e pouquíssima MO. No Diagrama de Flemming (Figura 8), onde o percentual de MO não é considerado, também se observa esses dois grupos distintos de amostras.

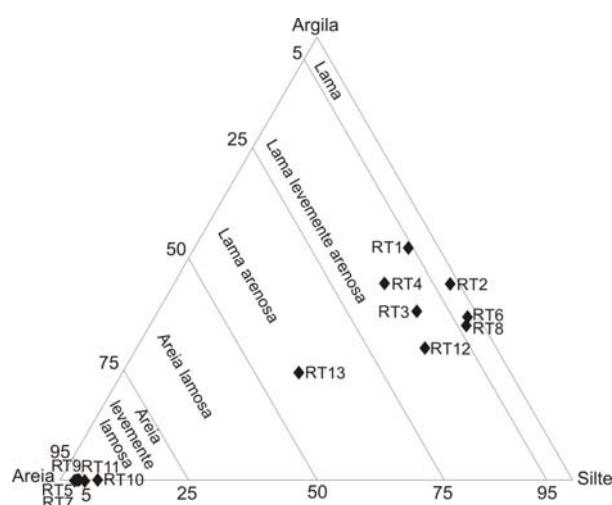


Figura 8 - Diagrama de Flemming para as amostras coletadas no estuário do rio Tubarão no dia 03 de maio de 2007.

Transporte de Sal

A Tabela 2 apresenta os 7 termos do Transporte advectivo de Sal, representados em ordem alfabética de A a G, o somatório dos termos e o transporte resultante. Os termos mais significativos foram a Descarga fluvial (A) e a Circulação Gravitacional (D), com $-5,97$ e $4,20 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Dentre os termos de menor importância, com uma ordem de grandeza a menos, o de Correlação de Maré (C) foi o mais significativo, com $0,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. O transporte se sal resultante de $-0,91 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ foi saindo do estuário.

Classificações do estuário do rio Tubarão

O estuário do rio Tubarão pode ser classificado como do tipo cunha salina, relacionando os números adimensionais parâmetro de circulação (2,05) e parâmetro de estratificação (1,33) no diagrama proposto por Hansen & Rattray (1966) (Figura 9).

O número de Richardson de 5,7, indica condições que favorecem uma estratificação estável. A razão entre o prisma de maré e o fluxo de água doce de 7,1 indica uma dominância dos processos relacionados a descarga fluvial no estuário, onde o volume de água doce que escoa pelo rio é aproximadamente 7 vezes maior do que aquele que é trocado a cada ciclo de maré.

Tabela 2 - Termos do transporte advectivo de sal para o estuário do rio Tubarão. Os termos negativos representam fluxo saindo do estuário.

Termos	Fluxo ($\text{kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
A	-5,97
B	0,25
C	0,40
D	4,20
E	0,13
F	0,09
G	-0,06
Somatório	-0,94
Transporte Resultante	-0,91

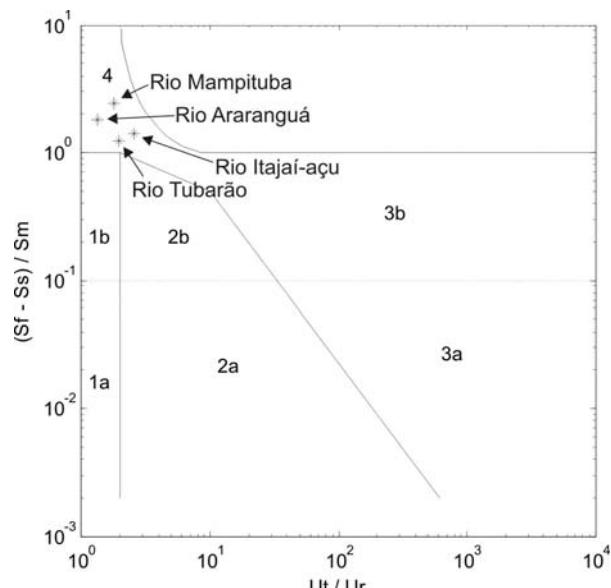


Figura 9 - Diagrama de classificação proposto por Hansen & Rattray (1966), com os índices dos estuários dos rios Tubarão, Itajaí (Schettini, 2002), Araranguá (D'Aquino, et al, 2010) e Mampituba (D'Aquino, et al., SUBMETIDO).

DISCUSSÃO

Hidrologia

Segundo Bertoluzzi (2003), as vazões entre Q_{50} e Q_{95} representam uma faixa de vazões onde a curva de permanência é mais utilizada. Para a mesma estação fluviométrica, porém utilizando uma série que foi de janeiro de 1975 a dezembro de 1997, o autor encontrou uma vazão de permanência Q_{50} de $66 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Valor inferior ao observado na série mais recente ($83,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). O que pode representar uma maior disponibilidade hídrica atualmente, já que esta estação é a mais a jusante no rio Tubarão e fica logo antes de onde o mesmo recebe as águas do rio Capivari, seja por usos da água por maior quantidade de chuvas. Segundo SDM (1997), a captação excessiva de recursos hídricos é um dos fatores de degradação da bacia hidrográfica do rio Tubarão, de forma que a maior vazão de permanência observada no período pode indicar que a série representa um período de maior concentração de chuvas.

Um aumento da vazão pode significar maior capacidade de transporte. Na porção estuarina isso pode refletir em maior presença de material arenoso, já que os finos seriam transportados mais facilmente. Os impactos ambientais causados por uso inadequado do solo ou desmatamento da mata ciliar ajudam na disponibilização de material que chega à porção estuarina da bacia hidrográfica.

Hipsometria

A hipsometria da região mostrou uma bacia hidrográfica com área predominante entre as cotas de 0 e 400 m, como já indicado por SDM (1997), o qual observou que cerca de 33% da região ocorre em topografia plana e/ou suavemente ondulada, porção essa, sem problemas evidentes de erosão.

Segundo Bertoluzzi (2003), na Bacia do rio Tubarão o material transportado da encosta é proveniente do desmonte de rochas sedimentares, e o material do centro da bacia é proveniente do desmonte do granito e apresenta grande quantidade de resíduo de areia quartzosa. Já a parte planar e sedimentar da bacia é menos contribuidora caracterizando-se mais como área de deposição.

SDM (1997) observou que a cobertura vegetal é insignificante ocupando apenas 1% da bacia. Fato que contribui significativamente com a disponibilidade de sedimentos, que serão depositados na região mais plana da bacia, cheagando à porção estuarina do rio Tubarão. Grande quantidade desse material é carreado para o sistema lagunar, onde

parte pode ficar retida no estuário e parte exportada para a plataforma interna.

Segundo Strahler (1952), o ciclo geomorfológico das bacias de drenagem pode ser simplificado em termos de curvas hipsométricas partindo de uma curva que representa uma fase jovem ou imatura (desequilíbrio), indo até uma curva que representa uma fase madura (equilíbrio). Esse gradiente inclui ainda a fase *Monadnock*, onde remanescentes de uma topografia mais elevada ficam preservados, enquanto boa parte já havia sido erodida, por diferenças nas características e propriedades físico-químicas. Segundo Asp et al. (2009), a Bacia do rio Itajaí-açu, a maior do estado, enquadra-se nesta categoria. Neste contexto, a bacia do rio Tubarão apresentou integral hipsométrica de 0,3, sendo classificada como ainda na fase *Monadnock*. Esta informação indica que o perfil hipsométrico desta bacia ainda encontra-se em fase de mudanças, as quais contribuem para a geomorfologia costeira adjacente, especialmente nas vazões e descarga de sedimentos para a região costeira (Asp et al., 2009).

Oceanografia

O estuário apresentou maior nível de água no inicio do experimento, juntamente com as maiores velocidades de enchente que ocuparam toda coluna de água. Esse processo está bastante relacionado com a forçante meteorológica conforme já indicado por Beltrame (2003): “Em condições de vento nordeste (com intensidade de moderada a forte), ocorre um aumento do fluxo de vazante, tornando as águas próximas à desembocadura menos salinas e com maior turbidez. Esta condição é propícia à formação de uma pluma superficial na região costeira adjacente a desembocadura, a qual pode atingir vários metros de extensão. Por outro lado, durante o predomínio de ventos do quadrante sul, ocorre um empilhamento das águas marinhas junto a costa e consequentemente uma maior penetração de água salgada para o interior da laguna, represando o fluxo fluvial nas áreas mais a montante do sistema. Sob esta condição, a carga de material em suspensão é menor a jusante do sistema, enquanto a montante ocorre uma intensificação do processo de flocação, levando a deposição do material fino trazido em suspensão”.

A influencia meteorológica pode ser a responsável pela maior quantidade de materiais finos encontrados no fundo do estuário neste trabalho, em comparação com o levantamento que foi feito por Beltrame (2003). No qual foram coletadas amostras de fundo nos primeiros 20 km do estuário e

todas elas apresentaram-se predominantemente arenosas. A maior quantidade de sal no estuário pode favorecer os processos de floculação e sedimentação no estuário, principalmente se há um incremento na disponibilidade de finos e matéria orgânica na coluna de água como resultado das atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica. Por outro lado a presença da cunha salina favorece a dispersão dos finos pela camada de água doce superficial, que escoa sob a cunha, favorecendo a exportação desse material para fora do sistema.

Transporte de Sal

O transporte de sal no estuário do rio Tubarão foi dominado pelo transporte advectivo, com participação de 53,8% do termo de descarga fluvial, e também pelo efeito dispersivo da circulação gravitacional, termo com participação de 37,8% no transporte total. O termo de correlação de maré foi o terceiro em importância na participação do transporte de sal e pode ser justificado pela assimetria de correntes observada no sistema. O quarto termo em importância foi a deriva de Stokes, e pode estar relacionado a alteração do nível de água no estuário durante as 25 horas de campanha. Os termos de maré (C – correlação de maré; E – bombeamento de maré; F – cisalhamento de maré) somados representaram 7,1% do total de transporte e representam forçantes dispersivas no estuário. A dominância dos processos advectivos caracteriza a importância dos processos fluviais no transporte de sal no estuário do rio Tubarão.

Classificações do estuário do rio Tubarão

D'Aquino et al., (SUBMETIDO) relacionaram estuários geomorfologicamente similares na costa de Santa Catariana (Itajaí, Araranguá e Mamipuba), com a hidrodinâmica e perceberam que estes estuários respondem primeiramente a forçante fluvial. A Figura 9 mostra o diagrama de classificação de Hansen & Rattray (1966), apresentado em D'Aquino et al., (SUBMETIDO) com a adição do estuário do rio Tubarão. Observa-se que todos os estuários enquadraram-se no tipo “cunha salina”, onde os processos advectivos fluviais prevalecem sobre os processos dispersivos de transporte de sal e outros escalares (Miranda et al., 2002). O que está de acordo com o observado nos termos do transporte de sal do estuário do rio Tubarão.

Mesmo sem medições diretas e quantitativas de material particulado em suspensão (MPS) no estuário do rio Tubarão, pode-se, através do com-

portamento hidrodinâmico e do transporte de sal, inferir o transporte de MPS de forma qualitativa. Neste estudo, o estuário do rio Tubarão: a) foi classificado como do tipo cunha salina; b) apresentou, conforme o número de Richardson, condições que favorecem uma estratificação estável; c) indicou, conforme relação entre o prisma de maré e a razão de fluxo, dominância dos processos fluviais e; d) indicou, de acordo com os principais termos responsáveis pelo transporte de sal, dominância advectiva. Estes resultados permitem classificar este estuário quanto ao transporte de sedimentos, em dois modos de transporte de sedimento: modo marinho, quando sob condições de baixa vazão, o estuário se torna um importador de sedimentos em suspensão; e modo fluvial, quando o estuário apresenta condições de alta vazão, tornando-se um exportador de sedimentos em suspensão (esta classificação foi proposta por Schettini & Toldo (2006), para o estuário do rio Itajaí-açu).

CONCLUSOES

O perfil hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Tubarão encontra-se em fase de mudanças, as quais contribuem para a geomorfologia costeira adjacente, especialmente nas vazões e descarga de sedimentos para a região costeira. Alterações na composição do sedimento de fundo, como maior presença de finos, e nas vazões de permanência (incremento) foram observadas, em comparação com trabalhos anteriores. O estuário do rio tubarão é um estuário dominado por processos fluviais, no qual ocorre a presença de cunha salina e o transporte de sal ocorre primariamente como função das forçantes advectivas. É classificado como de cunha salina e, por comparação a outros sistemas, seu transporte de sedimentos ocorre de acordo com a descarga fluvial. Contudo, diferentemente, ele está relacionado com um grande sistema lagunar, o qual funciona como um filtro para a forçante de maré, ao mesmo tempo em que pode aumentar a influencia da forçante meteorológica sobre o estuário, a qual tem grande influencia sob os processos oceanográficos locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio logístico do Corpo de Bombeiros de Tubarão (Tem.

Marcos A. Barcelos, Sd Alessandro de Meleiros e Sd Nei) e ao Iate Clube de Tubarão. Trabalho executado com recursos do CNPq: Processos de Transporte e Retenção de Sedimentos em Estuários Dominados por Rios - TRANSEST (Universal2004, CNPq 480851/2004-2). CAD é bolsista de DR o CNPq. CAFS é bolsista do CNPq 306217/2007-4.

REFERENCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. 2003. HidroWeb - Sistemas de Informações hidrológicas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>.
- ASP, N.E.; SIEGLE, E.; SCHETTINI, C.A.F. LOSSO, A.P. & KLEIN, A.H.F. 2009. Geologia e hipsometria de bacias de drenagem do centro-norte catarinense (Brasil): implicações para a zona costeira. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 01, p. 98-108.
- BELTRAME, E. 2003. Aplicação de geotecnologias na seleção de sítios para o cultivo de camarões marinhos e o planejamento da atividade. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 212p.
- BERTOLUZZI, I.P. 2003. Estudos sobre as interações entre a água e o material em suspensão, na bacia do rio tubarão e complexo lagunar – SC/Brasil. Tese de Doutorado, Universidade de Santiago de Compostela/Universidade do Sul de Santa Catarina. Santiago de Compostela. 322p.
- BIANCHI, T.S. 2007. Biogeochemistry of estuaries. New York, Oxford University Press, 706p.
- BOWDEN, K. F. 1963. The mixing processes in a tidal estuary. *Journal Air Water Pollution*, 7:343-356.
- D'AQUINO, C.A.; SCHETTINI, C.A.F & PEREIRA FILHO, J. 2010. Fluvial modulation of salt transport in a highly stratified estuary. *Braz. J. Oceanogr.*, 58(2):165-175.
- D'AQUINO, C.A.; ANDRADE NETO, J.S.; BARRETO, G.A.M & SCHETTINI, C.A.F. (submetido) Caracterização oceanográfica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. *Res. Bras. Geof.*
- DYER, K.R. 1973. Estuaries: a physical introduction. London, John Wiley and Sons, 140p.
- DYER, K.R. 1974. The salt balance in stratified estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2:273-281.
- DYER, K.R. 1986. Coastal and estuarine sediment dynamics. New York, John Wiley and Sons, 342p.
- DYER, K.R. 1997. Estuaries: a physical introduction. (2ed). John Wiley & Sons, Chichester. England. 195p.
- ELETROSUL. DET. DEAT. 1990. Monitoramento ambiental na região de Tubarão 1987/1988. Florianópolis: ELETROSUL.
- FISCHER, H. B. 1976. Mixing and dispersion in estuaries. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8:107-133.
- FLEMMING, B.W. 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Cont. Shelf Res.* 20:1125–1137.
- GAPLAN – GABINETE DE PLANEJAMENTO DE SANTA CATARINA. 1986. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173 p.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. 1995. Surfer™ for Windows V6. Reference manual. Golden, Colorado USA.
- GROSS, M. G. 1971. Carbon determination. In: Carver, R. E. (Ed) *Procedures in Sedimentology Petrology*. Wiley Interscience, New York, p.49-94,
- HANSEN, D.V. & RATTRAY, M. 1966. New dimension in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, 11(3):319-325.
- HOBBIE, J. 2000. Estuarine science: the key to progress in coastal ecological research. In: HOBBIE, J. (Ed.) *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*. Washington, DC, Island Press, pp. 1-16.
- HUNKINS, K. 1981. Salt dispersion in the Hudson estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 11:729-738.
- KJERFVE, B. 1986. Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In: Kreeke, van de. (Ed). *PHysics of Shallow Estuaries and Bays*. New York, Spring-Verlag, p.22-29.
- LIMA, M. C.; GIACOMELLI, M. B.; STÜPP, V.; ROBERGE, F. D. 2001. Especiação de cobre e chumbo em sedimento do rio Tubarão pelo Método Tessier. *Quim. Nova*. V. 24. 6:734-742.
- MARCOMIN, F.E. 1996. Zoneamento ambiental do Rio Tubarão – SC, através da análise de metais pesados em água, sedimento, substrato e planta e de componentes estruturais da paisagem. Tese de Mestrado, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP. 424p.
- MONTEIRO, M. A. 2001. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Revista Geosul*, 16(31): 117-133.
- OFFICER, C.B. 1976. *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters)*. New York, Wiley-Interscience, 465p.
- PICKARD, G.L; EMERY, W.J. 1990. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Great Britain: Pergamon Press, 5ed. 320p.
- SCHETTINI, C.A.F. - 2002 - Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. *Rev. Bras. Rec. Hidríc.*, 7(1):123-142.

- SCHETTINI, C. A. F & TOLDO Jr, E.E. - 2006 - Fine sediment transport modes in the Itajaí-açu estuary, Southern Brazil. Journ. Coast. Res., SI, 39:515-519.
- STRAHLER, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of América, 63:1117-1142.
- SDM. 1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: diagnóstico geral. Florianópolis.
- SUGUIO, K. 1973. Introdução à sedimentologia. Editora Edgar Blucher, São Paulo, 317 p.

Salt Transport and Hydrodynamics of the Tubarão River Estuary- State of Santa Catarina, Brazil

ABSTRACT

This paper presents an initial oceanographic characterization of the Tubarão River estuary, assessing the salt transport processes and characterizing the main physical forcing mechanisms that control hydrodynamics in the low estuary. On May 3 and 4, a campaign was carried to out obtain hydrographic data during two complete tidal cycles (25 hours), under syzygy tide conditions. Information about velocity and direction of the currents, temperature and salinity were obtained by installing a PACD and two CTDs (surface and bottom). A longitudinal transect, about 33 km long, was traced along which vertical profiles were performed with a CTD at every 1 km and bottom sediments were collected at every 2 km. Hydrological and hypsometric studies were also performed. In general, the ebb tide currents predominated in the estuary and were most intense. The vertical distribution of salinity along the estuary showed the presence of a well defined saline wedge which penetrated about 27 km into the estuary. Through the decomposition of the advective transport of salt the greater importance of river discharge and gravitational circulation on the other physical mechanisms that influence the salt transport characteristics in the estuary could be verified. The estuary was classified as salt wedge estuary.

Keywords: salt transport, hydrodynamics, estuary, Tubarão river.