

PROCESSOS DE TRANSPORTE E RETENÇÃO DE SEDIMENTOS FINOS EM
ESTUÁRIOS DOMINADOS POR RIOS.

Carla de Abreu D'Aquino

Tese de Doutorado

UFRGS

Porto Alegre - 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PROCESSOS DE TRANSPORTE E RETENÇÃO DE
SEDIMENTOS FINOS EM ESTUÁRIOS DOMINADOS
POR RIOS.**

CARLA DE ABREU D'AQUINO

ORIENTADOR – Dr. Carlos A. F. Schettini

CO-ORIENTADOR – Dr. Elírio E. Toldo Jr

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jarbas Bonetti Filho, UFSC

Prof. Dr. Eduardo Siegle, IO-USP

Prof. Dr. Luis Emílio S. Almeida, IPH-UFRGS

Tese de Doutorado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do
Título de Doutor em Geociências.

Porto Alegre – 2010

D'Aquino, Carla de Abreu

Processos de transporte e retenção de sedimentos finos em estuários dominados por rios. / Carla de Abreu D'Aquino. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010.

132 f.] il.

Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2010.

Orientação: Prof. Dr. Carlos A. F. Schettini

Co-Orientador: Prof. Dr. Elírio E Toldo Jr.

1. Geologia Marinha. 2. Transporte de Sedimentos. 3. Estuários. I. Título.

Catlogação na Publicação

Biblioteca Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

A minha família, que é tudo pra mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais Laércio e Rosane, pelo apoio incondicional, ao marido Fábio, companheiro e amigo, ao meu filho Iago, que encheu essa jornada de amor. Ao Guto pela idéia, apoio e empurrões no início e meio do caminho oceanográfico e a Nane, Patty, Dani e Ro pela amizade. Aos companheiros de CTTMar, Marcelo Raimundo, Maycon, Lourival e Thata. Agradeço a todos estagiários e colegas que participaram das muitas saídas de campo, mas em especial a Joao A. Neto e Guilherme Manique. Pelo apoio logístico, agradeço ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Yate Clube de Araranguá, Defesa Civil de Araranguá, Iate Clube de Tubarão. Pelo fornecimento de dados, ao CIRAM/EPAGRI e ANA. Ao LOF/CTTMar/UNIVALI pela disponibilidade dos equipamentos. Aos observadores da Agencia Nacional de Águas (ANA) nas estações fluviométricas: TAQUARUÇU (Sr. Agenor e sua filha Vanessa), FORQUILHINHA (Sr. Rodrigo Loch), MELEIRO (dona Aninha), PRAIA GRANDE (Sr. Zé da água), TUBARÃO (Seu Ita), INDAIAL (Sr. Eribert), Balsa (Sr. Osni), pela leitura das réguas e coleta de água. Ao Prof. Dr. Carlos A. F. Schettini pela orientação e paciência, e também por disponibilizar recursos do projeto TRANSEST, os quais viabilizaram este trabalho. Ao Prof. Dr. Elírio Toldo Jr. pela orientação e apoio desde a banca de TCC. Por fim, a todos aqueles que participaram da jornada deste doutorado, obrigada. Gostaria ainda de agradecer ao deputado Rogério Mendonça e equipe pelo apoio e ao Ciram/Epagri pelo fornecimento de dados hidrográficos e meteorológicos.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre os processos de transporte e retenção de sedimentos finos em estuários dominados por rios no sul de Santa Catarina, mais especificamente os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba. Ele descreve através de três artigos distintos a hidrodinâmica de cada estuário em separado e comparando-o com o estuário do rio Itajaí-açu, o maior e melhor estudado do Estado. O capítulo final apresenta o estudo comparativo entre os estuários estudados.

A metodologia empregada consistiu de quatro etapas principais: 1) Investigação das propriedades físicas e hidrodinâmicas, através de campanhas oceanográficas de 25 horas para medição de correntes, propriedades físicas da água do mar e material particulado em suspensão; 2) Aquisição de dados batimétricos e de sedimentos de fundo, com caráter exploratório. Os dados batimétricos foram coletados com uma ecosonda e os sedimentos de superfície de fundo com uma draga de gravidade do tipo ponar; 3) Levantamento da entrada de MPS no estuário, realizado através da coleta de água a montante, próximo as estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas); e 4) Levantamento de dados complementares, os hidrológicos foram obtidos junto a ANA. E as informações de elevação utilizadas correspondem aos dados de altimetria por satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), junto ao Serviço Nacional de Geólogos dos EUA (USGS/EROS).

Pelo que foi abordado neste trabalho o entendimento geral dos estuários do sul de Santa Catarina responde oceanograficamente aos padrões já bem conhecidos para o estuário do rio Itajaí-açu. Os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba apresentaram-se como estuários dominados pelo rio, com a descarga fluvial e circulação gravitacional como principais forçantes no transporte de sal e material particulado em suspensão (MPS). O comportamento do MPS em resposta a hidrodinâmica de cada estuário está mais associado aos períodos de entrada da maré, as correntes de enchente, para os estuários dos rios Tubarão e Araranguá, enquanto que no Mampituba, mostra grande associação com o encontro da água doce com a salgada, indicando influencia dos processos de flocculação.

O estudo como um todo favorece o entendimento dos processos básicos de transporte de sal e sedimentos em estuários de cunha salina dominados por enchentes

relâmpago. Porém as particularidades de cada estuário são fatores decisivos no conhecimento do ambiente e completam o conhecimento necessário para o entendimento e tomada de decisões.

ABSTRACT

This work presents a study on the processes of transport and retention of fine sediments in estuaries dominated by rivers in the Southern of Santa Catarina, more specifically in the Tubarão, Araranguá and Mampituba river estuaries. Three separate articles describes the hydrodynamics of each estuary separately and comparing it with the Itajaí-açu river estuary, the largest and best studied of the State. The final chapter presents a comparative study of these estuaries.

The methodology consisted of four main steps: 1) Investigation of hydrodynamic and physical properties through oceanographic 25 hours campaign for measuring currents, physical properties of seawater and suspended particulate matter, 2) Acquisition of bathymetric data and bottom sediments, with exploratory intention. The bathymetric data were collected with an Echo sounder and the sediment with a Ponar gravity dredge type, 3) Survey of the MPS input in the estuary, carried out by collecting water upstream, near the gauged stations of ANA (National Water Agency), and 4) Collection of additional data, the hydrology data was obtained from the ANA and the information used corresponding to the elevation data from satellite altimetry SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), by the National Service of Geology U.S. (USGS / EROS).

From what was discussed in this paper a general understanding of the estuaries of Southern Santa Catarina responds oceanographically to patterns already well known to the Itajaí-açu river estuary. The estuaries of the Tubarão, Araranguá and Mampituba presented as estuaries dominated by river, with river discharge and gravitational circulation as main forces in the salt transport and suspended particulate matter (SPM). The behavior of the SPM in response to hydrodynamics of each estuary is more associated with periods of incoming tide, the currents of flooding, for Tubarão and Araranguá river estuaries, while Mampituba shows strong association with the meeting of fresh and salt water, indicating influence of flocculation processes.

The study as a whole supports the understanding of the basic processes of salt and fine sediment transport of the salt wedge estuaries dominated by flash floods. But the characteristics of each estuary are decisive factors in the understanding of the environment and complement the knowledge necessary for understanding and management decisions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Drenagem Atlântica de Santa Catarina com indicação dos principais rios....	2
Figura 1.2. Estuários dos rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba, de cima para baixo.	4
Figure 2.1. Araranguá river basin (A) with the two main streams (Itoupavas and Mãe Luzia rivers). Estuarine stretch (B) with indication of the sampling stations and mooring position.	13
Figure 2.2. Hydrography of the Itoupava r. for the month of May, 2006. The hachured part represents the campaign period and the points mark when the longitudinal surveys were carried out.	16
Figure 2.3. Temporal variation of the oceanographic data collected at the mooring position during the campaign; (A) vertical and temporal current velocity (+: flood; -:ebb, in ms^{-1}); (B) water level (m); (C) surface and near-bottom salinity; (D) surface pH and (E) near bottom turbidity (NTU).	19
Figure 2.4. Longitudinal salinity distribution at (A) May, 11 th and (B) May, 13 th	21
Figure 2.5. Time-averaged current velocity profiles for 2 tide cycles for the first and last 25-hour periods.	23
Figure 2.6. Temporal variation of Fluvial Discharge (in module) and Gravitational Circulation terms of advective salt transport (in $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$).	25
Figure 2.7. Water level and current velocity diagram for first and last 25 hours of experiment.	26
Figura 3.1. Localização da área de estudos. Bacia do Rio Mampituba, a escala em cinza representa as altitudes na região em metros.	37
Figura 3.2. Calibração de REO para CSS e REA para REO para o estuário do rio Mampituba.	42
Figura 3.3. Series temporais do nível de água observado (SO), e as decomposições em frequências sub-mareal (FSubM), marea (FM) e supra-mareal (FSupM).	45
Figura 3.4. Distribuição longitudinal vertical da salinidade no estuário do rio Mampituba nas campanhas de 2006 (A) e 2008 (B).	47
Figura 3.5. Variação temporal do nível de água (A), da salinidade de superfície (B) e de fundo (C), da velocidade média de correntes (D) e, variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão próximo ao fundo (linha contínua) e média na coluna de água (linha pontilhada) (E) no o estuário do rio Mampituba durante o período de 17 a 18 de maio de 2008.	48
Figura 3.6. Distribuição vertical e temporal da velocidade de correntes (B) e concentração de sedimentos em suspensão (C) no estuário do rio Mampituba.	49
Figura 3.7. Diagrama do nível pela velocidade pra o estuário do rio Mampituba.	50
Figura 3.8. Diagrama de classificação de Hansen Rattray para os estuários do rio Mampituba durante a campanha de 25 h de maio de 2008, do rio Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e para o rio Itajaí-açu (Schettini, 2002).	51
Figura 4.1. Estuário do Rio Tubarão. As estações de coleta de sedimento estão indicadas pelos losangos (◊) e a localização da estação fluviométrica (ANA) está indicada pelo círculo cheio (●).	62
Figura 4.2. Série histórica de vazão para o rio Tubarão na estação (84580500), período de 1 de outubro de 1991 a 1 de dezembro de 2004.	68
Figura 4.3. Altimetria do bacia hidrográfica do rio Tubarão e curva hipsométrica.	69
Figura 4.4: A - distribuição vertical e temporal das correntes e variação temporal do nível de água. B – variação temporal da salinidade de superfície e fundo. C – variação	

temporal da temperatura de superfície e fundo (linha com pontos). Estuário do rio Tubarão, campanha 25 entre os dias 3 e 4 de maio de 2007.	70
Figura 4.5: Perfil vertical da velocidade média na coluna de água durante as 25 horas de campanha no estuário do rio Tubarão.....	71
Figura 4.6. Distribuição longitudinal e vertical da salinidade (acima) e temperatura (abaixo) no estuário do rio Tubarão realizada dia 03 de maio de 2007 na preamar.....	72
Figura 4.7. Distribuição dos percentuais de areia, silte, argila e matéria orgânica (M.O.) nas estações RT1 a 13 para o estuário do rio Tubarão. A estação RT1 foi coletada na desembocadura (km 0) e a RT13 no km 24 (estação mais a montante).	73
Figura 4.8. Diagrama de Flemming para as amostras coletadas no estuário do rio Tubarão no dia 03 de maio de 2007.	73
Figura 4.9. Diagrama de classificação proposto por Hansen & Rattray (1966), com os índices dos estuários dos rios Tubarão, Itajaí (Schettini, 2002), Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e Mampituba (D'Aquino, et al., SUBMETIDO).....	75
Figura 5.2. Relação entre MPS e REO para os estuários dos rios Itajaí-açu (A), Araranguá (B), Tubarão (C) e Mampituba (D).....	89
Figura 5.4. Diagrama de classificação proposto por Hansen & Rattray (1966), com os índices dos estuários dos rios Tubarão (D'Aquino, et al., SUBMETIDO _b), Itajaí (Schettini, 2002), Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e Mampituba (D'Aquino, et al., SUBMETIDO _a).....	93
Figura 5.5. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B), e MPS (C) para o estuário do rio Tubarão no período de realização da campanha oceanográfica em maio de 2007.	94
Figura 5.6. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B), e MPS (C) para o estuário do rio Araranguá no período de realização da campanha oceanográfica em maio de 2006.	95
Figura 5.7. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B) e MPS (C) para o estuário do rio Mampituba no período de realização da campanha exploratória em maio de 2008.	96
Figura 5.8. Concentração de material particulado em suspensão a montante nos rios Itajaí, Tubarão, Araranguá (rio Itoupavas) e Mampituba para os meses de novembro e dezembro de 2006. O dia Juliano 305 é o dia 1 de novembro de 2006 e o dia 350 é o dia 16 de dezembro de 2006.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Bacia de Drenagem, vazão média e profundidade média dos estuários dos rios Itajaí, Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba.....	3
Table 2.1. Salt transport terms calculated for the first and last 25-hour periods of experiment, with comparative results from the Itajaí-Açu Estuary (Schettini et al., 2006). Values in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	21
Tabela 3.1. Constituintes harmônicos de maré para o baixo estuário do rio Mampituba.	46
Tabela 3.2. Parcelas do transporte de sal, material particulado em suspensão (MPS) e material particulado em suspensão calculado pelo método acústico (MPS AC) para o estuário do rio Mampituba nas 25 horas de campanha entre os dias 17 e 18 de maio de 2008.	52
Tabela 4.1. Valores médio, máximo e mínimos de superfície e fundo para velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), salinidade e temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Valor máximo de corrente de enchente e vazante. Os valores negativos de velocidade de correntes representam água saindo do estuário (vazante).	71
Tabela 4.2. Termos do transporte advectivo de sal para o estuário do rio Tubarão, referente a campanha 25 horas de maio de 2007. Os termos negativos representam fluxo saindo do estuário.	74
Tabela 5.1. Estações fluviométricas da ANA utilizadas como referencia para coleta de água e obtenção de dados de vazão.	91
Tabela 5.2. Termos do transporte de MPS ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados segundo metodologia proposta por Miranda, et al. (2002), para os estuários dos rios Tubarão, Araranguá (dividido nas primeiras e ultimas 25 horas de campanha) e Mampituba, e para o baixo e médio estuário do rio Itajaí-açu conforme Schettini, et al. (2006).	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1. Parâmetros hidrológicos, físicos e oceanográficos dos estuários estudados e do rio Itajaí-açu (Q_{mlt} – vazão média de longo termo; Q_{90} , Q_{50} e Q_{10} – vazões de permanência mínimas esperadas a 90, 50 e 10% do período; R/P – razão de fluxo pelo prisma de maré; Comp. – comprimento; Temp – temperatura; Vel. – velocidade). 101

SUMARIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE QUADROS	ix
SUMARIO.....	x
APRESENTAÇÃO.....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – INTRODUÇÃO.....	1
2.1 – HIPÓTESE	5
1.3 – OBJETIVOS	5
1.3.1 – Objetivo Geral:	5
1.3.2 – Objetivos Específicos:	6
1.4 – METODOLOGIA.....	6
1.4.1 – Investigação das propriedades físicas e hidrodinâmicas	6
1.4.2 – Aquisição de dados batimétricos e de sedimentos de fundo	6
1.4.3 – Levantamento da entrada de MPS no estuário	7
1.4.4 – Levantamento de dados complementares	7
1.5 – Referências Bibliográficas.....	7
CAPÍTULO 2 - FLUVIAL MODULATION OF HYDRODYNAMICS AND SALT TRANSPORT IN A HIGHLY STRATIFIED ESTUARY.....	9
2.1 – ABSTRACT	9
2.2 – RESUMO.....	10
2.4 – INTRODUCTION	11
2.5 – STUDY AREA	12
2.6 – MATERIAL AND METHODS.....	15
2.6.1 - Field Survey	15
2.6.2 - Decomposition of Advective Salt Transport.....	16
2.7 – RESULTS.....	18
2.8 – DISCUSSION.....	22
2.7.1 - Acid Waters.....	26
2.8 – CONCLUSIONS	28
2.9 – ACKNOWLEDGMENTS	28
2.10 – REFERENCES	29

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO MAMPITUBA, SC.	33
3.1 – RESUMO.....	33
3.2 – ABSTRACT	34
3.3 – INTRODUÇÃO.....	34
3.4 – ÁREA DE ESTUDO	36
3.5 – MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.5.1 - Coleta de dados	38
3.5.2 - Processamento dos dados	39
3.5.3 - Determinação da CSS.....	40
3.5.4 - Decomposição do transporte advectivo de sal e sedimentos em suspensão	42
3.6 – RESULTADOS	44
3.7 – DISCUSSÃO	52
3.8 – AGRADECIMENTOS	55
3.9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
CAPÍTULO 4 - TRANSPORTE DE SAL E HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO TUBARÃO – SC, BRASIL.....	59
4.1 – RESUMO.....	59
4.2 – ABSTRACT	60
4.3 – INTRODUÇÃO.....	60
4.4 – MATERIAS E METODOS	63
4.3.1 - Levantamento de dados Hidrológicos.....	63
4.3.2 – Hipsometria	64
4.3.3 - Campanha de coleta de dados	64
4.3.4 - Calculo do Transporte de Sal	65
4.3.5 - Índices estuarinos	66
4.4 – RESULTADOS	67
4.4.1 - Hidrologia.....	67
4.4.2 - Hipsometria	68
4.4.3 - Oceanografia	69
4.4.4 - Transporte de Sal.....	74
4.4.5 - Classificações do estuário do rio Tubarão.....	74
4.5 – DISCUSSÃO	75
4.5.1 - Hidrologia.....	75
4.5.2 - Hipsometria	76
4.5.3 - Oceanografia	76
4.5.4 - Transporte de Sal.....	77
4.5.5 - Classificações do estuário do rio Tubarão.....	77

4.6 – CONCLUSÕES	78
4.7 – AGRADECIMENTOS	79
4.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	79
CAPÍTULO 5 – ESTUDO COMPARATIVO SOBRE OS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NOS ESTUÁRIOS DOS RIOS TUBARÃO, ARARANGUÁ E MAMPITUBA, SC - BRASIL.	82
5.1 – RESUMO.....	82
5.2 – INTRODUÇÃO.....	83
5.3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	86
5.3.1 - Campanhas de Campo.....	86
5.3.2 - Intercalibração de Sensores.....	87
5.3.3 – Conversão de REA para MPS	89
5.3.4 – Transporte Advectivo de MPS	90
5.3.5 – Aporte Fluvial de MPS.....	91
5.5 – RESULTADOS	92
5.6 – DISCUSSÃO	102
5.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
5.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
ANEXOS	114
Anexo 1 – E-mail de encaminhamento da versão final e primeira página do artigo.....	114
Anexo 2 – E-mail de recebimento do artigo submetido a Revista Brasileira de Recursos Hídricos.....	116
Anexo 3 – E-mail de recebimento do artigo submetido a Revista Brasileira de Geofísica.....	117

APRESENTAÇÃO

A tese está organizada no formato de artigos, conforme normas de 12 de março de 2008 do Programa de Pós Graduação em Geociências do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentando um capítulo inicial introdutório, capítulos de 2 a 4 contendo cada um deles um artigo aceito ou submetido e um capítulo de encerramento.

Cada um dos artigos trata de um estuário da região sul de Santa Catarina em particular, e todos eles têm características geomorfológicas comuns e estão sujeitos ao mesmo regime pluviométrico. O primeiro artigo trata da hidrodinâmica e transporte de sedimentos finos em suspensão no estuário do rio Araranguá. O segundo faz uma caracterização oceanográfica e de transporte de finos no estuário do rio Mampituba. No terceiro artigo é observado no estuário do rio Tubarão seu transporte de sal e hidrodinâmica.

Todos os estuários estudados nesta tese eram praticamente inexplorados em termos oceanográficos, e os estudos foram baseados em campanha de coleta de dados realizadas por pelo menos dois ciclos completos de maré (~25 horas). Sua geomorfologia, hidrodinâmica e componentes do transporte de sal e sedimentos finos foram comparados aos do estuário do rio Itajaí-açu. Este que é o maior estuário Catarinense e também o mais estudado em termos oceanográficos, tendo sua hidrodinâmica e modos de transporte bastante bem conhecidos, sendo este aspecto comparativo abordado no último capítulo

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO

Estuários são ambientes transicionais que recebem os materiais carreados pelos rios, onde ocorre a interação entre o rio e o mar. Os estuários podem atuar como filtros (Schubel & Carter, 1984), desempenhando um papel fundamental no transporte e distribuição de propriedades. A hidrodinâmica estuarina é quem irá condicionar a retenção ou distribuição dos materiais no estuário, de forma que seu conhecimento é fundamental para o entendimento dos processos físicos, geológicos, químicos, ecológicos e para conservação e uso sustentável destes ambientes.

A grande variabilidade temporal e espacial destes forçantes e dos processos a eles associados, torna o estudo dos padrões de circulação e distribuição de propriedades nos sistemas estuarinos bastante complexo (Kjerfve *et al.*, 1982). Durante um ciclo de maré, observa-se uma forte relação entre as velocidades das correntes, o transporte e as concentrações material particulado em suspensão (Nichols, 1986; Kjerfve & Wolaver, 1988; Dyer, 1988). O cálculo do balanço de massas para um ambiente estuarino fornece estimativas de valores de exportação e/ou importação de água e materiais num ciclo de maré, com os quais é possível detectar variações no aporte de sedimentos, na ciclagem interna e nos padrões de erosão e sedimentação associados aos ciclos de maré (Kjerfve & McKellar, 1980; Dyer, 1988).

Dentre a rica diversidade de sistemas estuarinos (Fairbridge, 1980), os estuários do tipo altamente estratificados são os que apresentam um nível de conhecimento mais modesto quando comparado com sistemas parcialmente misturados ou verticalmente homogêneos (e.g., Schettini *et al.*, 2006). Estes sistemas estão associados com o baixo curso de rios em planícies costeiras, sendo relativamente estreitos quando comparados com outros tipos de estuários. O estuário do rio Itajaí-açu é o maior de uma série de estuários dominados por rio ao longo da costa de Santa Catarina (Figura 1.1). Além dele, os estuários dos rios Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba, são também bastante expressivos, considerando o tamanho da bacia hidrográfica e importância econômica para a região.

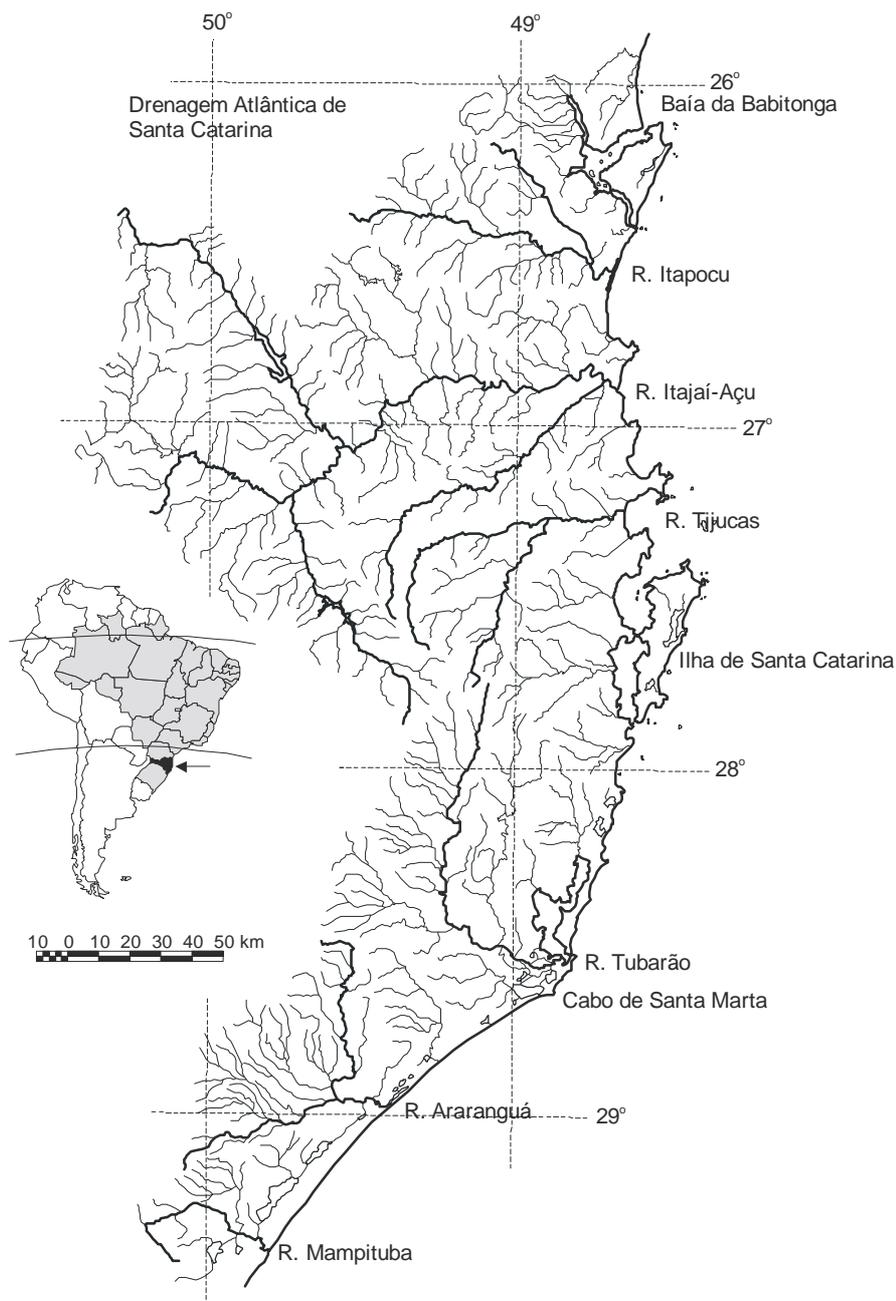


Figura 1.1: Drenagem Atlântica de Santa Catarina com indicação dos principais rios.

O rio Itajaí-açu apresenta uma bacia de drenagem de 15.500 km², sendo o maior rio da Vertente Atlântica de Santa Catarina, vazão média de 250 m³/s (Schettini, 2002) e uma profundidade natural média de 7 m (Tabela 1.1). O rio Tubarão drena uma área de aproximadamente 5.100 km², possuindo uma vazão média de 130 m³/s e profundidade de 5 m. A bacia de drenagem do rio Araranguá apresenta uma área de 3020 km², com vazão média de 65 m³/s e profundidade de 8 m. O rio Itapocú drena uma área de 2.930 km² (Gaplan, 1986), apresenta uma vazão média de 77 m³/s (Schettini e Carvalho,

1998b) e uma profundidade média de 4 m. O rio Tijucas apresenta uma bacia de drenagem de 2.400 km², vazão média de 50 m³/s e profundidade média de 3 m. O rio Mampituba, que faz divisa com o estado do rio Grande do Sul, drena uma área de aproximadamente 1.200 km², com vazão média de 19 m³/s e uma profundidade média em torno de 4 m. A Figura 2.1 apresenta os estuários dos rios Itajaí-açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba.

Tabela 1.1. Bacia de Drenagem, vazão média e profundidade média dos estuários dos rios Itajaí, Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba.

Rios	Bacia de Drenagem (km ²)	Vazão média (m ³ .s ⁻¹)	Profundidade média (m)
Itajaí	15.500	250	7
Tubarão	5.100	130	5
Araranguá	3.020	65	8
Itapocu	2.930	77	4
Tijucas	2.400	50	3
Mampituba	1.200	19	4

No estuário do rio Itajaí-açu, que é o melhor estudado no estado de Santa Catarina, o comprimento da intrusão salina e a concentração de material particulado em suspensão são fortemente reguladas pelas variações da descarga fluvial, respondendo rapidamente as mudanças na descarga. A dinâmica do material particulado em suspensão (MPS) neste estuário pode ser distinta em dois modos principais (Schettini & Toldo Jr., 2006): o Modo Marinho, durante os períodos de baixa vazão, quando as marés controlam os processos de transporte, o influxo de MPS é reduzido e grande parte fica retido no estuário. E, o segundo, o Modo Fluvial, em condições de vazão elevada, quando a retenção de MPS diminui, o influxo de MPS aumenta significativamente e é exportado diretamente para a plataforma adjacente. Durante os períodos de baixa descarga, o MPS é importado da plataforma pelas correntes de fundo (Schettini & Carvalho, 1998a; Schettini, et al., 2006), e durante eventos hidrológicos extremos ocorre erosão do sedimento de fundo (Schettini, 2002). Apesar do que já se conhece sobre a dinâmica sedimentar no estuário do rio Itajaí-açu, ainda existem perguntas a serem

respondidas em relação aos processos que efetivamente causam a retenção de MPS no estuário.

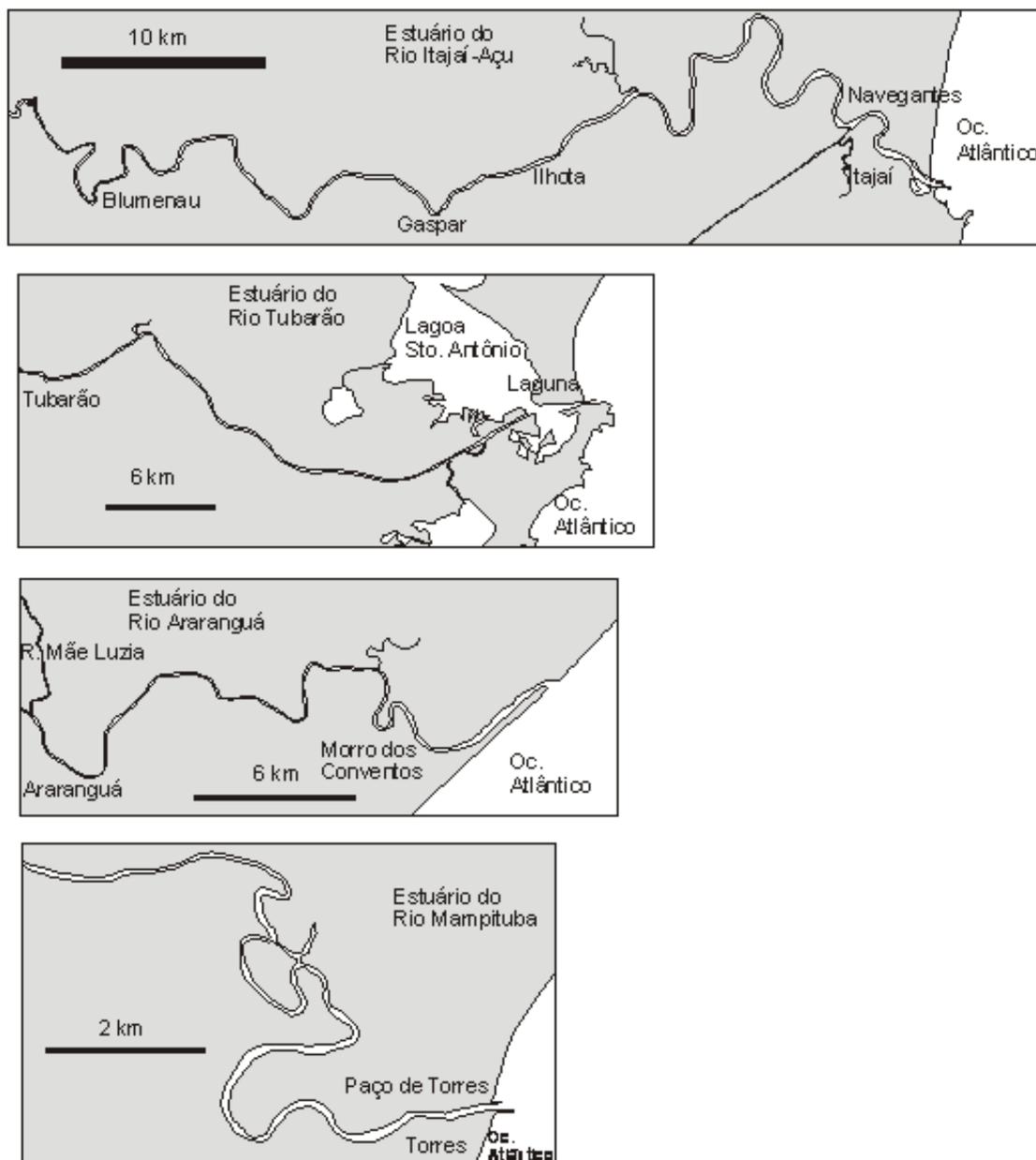


Figura 1.2. Estuários dos rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba, de cima para baixo.

O foco deste trabalho foi o estudo dos estuários da região Sul de Santa Catarina, Tubarão, Araranguá e Mampituba (Figura 2.1), praticamente inexplorados em termos oceanográficos. Dos estuários estudados apenas o Tubarão apresenta estudos anteriores, com coleta de dados oceanográficos, porém sem análise desses dados. O fato de serem

estuários relativamente profundos, com bacias que desenvolvem atividades contribuidoras para material particulado em suspensão (MPS) e no caso do Tubarão e Araranguá atividades altamente impactantes em termos ecológicos como a mineração, como ocorre a dinâmica deste material no estuário é uma questão bastante relevante e até o presente sem discussão científica. Será que estes estuários se encaixariam no modelo ao qual responde o estuário do rio Itajaí-açu, no qual enchentes relâmpago desempenham um papel de retirada de MPS do estuário? Seriam eles estuários dominados pela descarga fluvial? A resposta a essas questões e a comparação oceanográfica entre os estuários do Sul de Santa Catarina e o estuário do rio Itajaí-açu é o tema abordado neste trabalho.

2.1 – HIPÓTESE

Os estuários dos rios Mampituba, Araranguá, Tubarão e Itajaí-Açu apresentam características geomorfológicas distintas, porém são estuários de planície costeira (relativamente estreitos e rasos), que estão sujeitos ao mesmo clima e regime de marés. Considerando as particularidades de cada um, como desembocadura fixa ou livre, presença de atividades de dragagem e etc, a dinâmica de sedimentos finos em cada um deles pode ser relacionada? Ela se enquadra ao modelo já conhecido para o estuário do rio Itajaí-açu onde a cunha salina e o MPS respondem rapidamente as variações na descarga fluvial?

1.3 – OBJETIVOS

1.3.1 – Objetivo Geral:

Conceitualizar e quantificar comparativamente os processos de transporte e retenção de material particulado em suspensão nos estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba.

1.3.2 – Objetivos Específicos:

- a) Estabelecer o regime hidrodinâmico de cada estuário;
- b) Conhecer os sedimentos do leito do estuário;
- c) Quantificar e qualificar a entrada de sedimentos finos nos estuários em questão;
- d) Estabelecer a relação entre vazão fluvial e intrusão salina no estuário;
- e) Identificar os mecanismos que atuam no transporte e retenção de material particulado em suspensão em cada estuário;
- f) Estabelecer um modelo conceitual de transporte e retenção de MPS para os estuários do Sul de Santa Catarina;

1.4 – METODOLOGIA

1.4.1 – Investigação das propriedades físicas e hidrodinâmicas

A investigação das propriedades físicas dos estuários foi realizada em duas etapas: 1) aquisição de salinidade, temperatura e turbidez em um ponto fixo, em dois níveis, próximo ao fundo e em sub-superfície; e 2) medição de salinidade, temperatura e turbidez através de perfis verticais, realizados ao longo do estuário a cada quilômetro. As propriedades hidrodinâmicas foram adquiridas através da instalação de um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (PACD), em um ponto fixo por um período mínimo de 25 horas ou dois ciclos completos de maré e a instalação dos CTD (sonda para medição de salinidade, temperatura, turbidez e pressão) foi realizada simultaneamente.

1.4.2 – Aquisição de dados batimétricos e de sedimentos de fundo

O levantamento batimétrico e a coleta de sedimentos de fundo foram realizados nos estuários dos rios Tubarão e Araranguá, no estuário do rio Mampituba apenas a coleta de sedimentos foi realizada. A batimetria teve um caráter exploratório e os dados foram coletados com auxílio de uma ecosonda. Os sedimentos de fundo foram coletados com uma draga de gravidade do tipo ponar. As amostras foram analisadas em termos de granulométrica, teor de matéria orgânica e carbonatos.

1.4.3 – Levantamento da entrada de MPS no estuário

O levantamento da entrada de MPS nos estuários foi realizado através da coleta de água a montante, próximo as estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas). Em laboratório a concentração de MPS foi determinada através do método gravimétrico. Esse procedimento foi realizado concomitantemente em todos os estuários estudados e no estuário do rio Itajaí-açu.

1.4.4 – Levantamento de dados complementares

Dados hidrológicos foram obtidos junto a ANA através do programa hidroweb da própria agência disponíveis livre e gratuitamente em <http://hidroweb.ana.gov.br>. As informações de elevação utilizadas correspondem aos dados de altimetria por satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e são disponibilizados livre e eletronicamente pelo Serviço Nacional de Geólogos dos EUA (USGS/EROS).

1.5 – Referências Bibliográficas

Dyer, K.R., 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: *Physical Processes in Estuaries*. J. DRONKERS & W.V. LEUSSEN (Eds). Spring-Verlag, New York, p: 295-310.

Fairbridge, R.W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E. & CATO, I. (Eds.). *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. New York, John Wiley and Sons, pp.1-35.

GAPLAN. 1986. Atlas do Estado de Santa Catarina. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral, Florianópolis, 173 p.

Kjerfve, B. & Mckellar, Jr., H.N., 1980. Time series measurements of estuarine material fluxes. In: *Estuarine Perspectives*. V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, p: 341-357.

- Kjerfve, B.; Proehl, J.A.; Schwing, F.B.; Seim, H.E. & Marozas, M., 1982. Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: Estuarine comparisons. V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, p: 37-51.
- Kjerfve, B. & Wolander, 1988. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. *American Fisheries Society Symposium*, vol. 3, p: 26-33.
- Nichols, M.M., 1986. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. A.J. Mehta (Ed.), Springer-Verlag, New York, vol. 14, p: 5-42.
- Schettini, C. A. F., 2002. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(1), pp.123-142.
- Schettini, C.A.F. & Carvalho J.L.B., 1998a. Suspended sediment balance in the estuary of Itajaí-açu river during a low discharge period. *An. Acad. Bras. Cienc.* 70(2):325-334.
- Schettini, C.A.F. & Carvalho, J.B.L. 1998b. Hidrodinâmica e distribuição de sedimentos em suspensão dos estuários dos rios Itapocu, Tijucas e Camboriú. NOTAS TÉCNICAS DA FACIMAR, vol. 2, pp.141-153.
- Schettini, C.A.F. & Toldo, E.E. Jr. 2006. Fine sediment transport modes in the Itajaí-Açu estuary, Southern Brazil. *J Coastal Res*, SI, 39:515–519.
- Schettini, C.A.F.; Ricklefs, K.; Truccolo, E. C.; Golbig, Volker. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. *Ocean Dynamics*, Germany, v. 56, p. 308-319.
- Schubel, J.R. & Carter, H.H., 1984. Fine-grained suspended sediment. In: KENNEDY, V.S. (Ed.). *The estuary as a filter*. Orlando, Academic Press, INC., pp.81-105.

CAPÍTULO 2 - FLUVIAL MODULATION OF HYDRODYNAMICS AND SALT TRANSPORT IN A HIGHLY STRATIFIED ESTUARY.

Artigo aceito por:

BRAZILIAN JOURNAL OF OCEANOGRAPHY

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

Editora Chefe: Ana Maria Setubal Pires Vanin

Endereço: Praça do Oceanógrafo, 191. Cidade Universitária.

05508-120 – São Paulo. SP. Brasil.

Tel: (11) 3091-6501 / (11) 3032-3092

2.1 – ABSTRACT

An oceanographic campaign was conducted in the Araranguá river estuary during the period from May 11th to 13th of 2006 in order to produce a first hydrographic characterization of this system. The campaign was carried out during the spring tide period, and coincidentally after an intense rain event in the region which produced a peak in river discharge. Water level, currents and salinity time series were recorded hourly during a 50-hour period, at a site nearly 7 km upstream from the estuarine mouth. Two longitudinal distributions of salinity along the estuary were also recorded. The hydrographic data time-series were used to compute the advective salt flux in order to investigate the changes in the transport terms as a function of the change in discharge. The results showed that the estuarine structure was strongly modulated by the river discharge. The drop in water level of about 0.5 m during the first 24 hours was directly related to the ebb phase of the river flood. The water column was highly stratified throughout the period, therefore the stratification increased during the last 24 hours. The currents were stronger, ebbing and uni-directional at the beginning and became weaker and bidirectional as the water level went down, assuming a tidal pattern. The total salt transport in the first 25 hours was of $-13.6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (seawards), decreasing to $3 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ during the last 25 hours (landwards). It was also noticeable that the pH in the estuary, recorded together with the salinity, was around 5, showing

that the water quality in the estuary is affected by the coal mining activity in the hydrographic basin.

Descriptors: Estuarine circulation; Salt wedge, Flash flood.

2.2 – RESUMO

Uma campanha oceanográfica foi realizada no estuário do rio Araranguá durante o período de 11 e 13 de maio de 2006, objetivando fazer uma primeira caracterização hidrográfica do sistema. A campanha foi realizada em condição de maré de sizígia, e coincidentemente após um evento de chuvas intensas na região que produziu um pico de descarga fluvial. Séries temporais de nível da água, correntes e salinidade foram registradas durante 50 horas, em um local aproximadamente 7 km da desembocadura. Dois levantamentos de salinidade longitudinais também foram realizados. Os dados hidrográficos foram utilizados para calcular o fluxo advectivo de sal para investigar os termos do transporte em função da mudança da descarga fluvial. Os resultados mostram que a estrutura estuarina foi fortemente modulada pela vazão fluvial. O nível da água baixou em torno de 0,5 m durante as primeiras 25 horas em relação direta com o decaimento da enchente do rio. A coluna de água foi altamente estratificada durante todo o período, entretanto a estratificação aumentou durante as últimas 25 horas. As correntes foram mais intensas, de vazante e uni-direcionais no início, tornando mais fracas, bidirecionais a medida que o nível da água baixou, adquirindo um padrão de maré. O transporte total de sal nas primeiras 25 horas foi de $-13,6 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (sentido do mar), mudando para $3 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ nas últimas 25 horas (sentido de terra). Foi também notável que o pH no estuário, registrado junto com a salinidade, foi em torno de 5, indicando que a qualidade da água no estuário é afetada pela atividade de mineração de carvão que ocorre na bacia hidrográfica.

Descritores: Circulação estuarina, Cunha salina, Enchente relâmpago.

2.4 – INTRODUCTION

Estuaries are found in all the coastal regions of the globe, under different climatic conditions and within different tidal range regions, assuming a wide range of geomorphologic, oceanographic and sediment characteristics, although sharing common attributes (Nichols & Biggs, 1985). They are defined as semi-enclosed bodies of coastal water which have free connection with the open sea and within which sea water is measurably diluted by fresh water derived from land drainage (Cameron & Pritchard, 1963). The effects of up-estuary tidal propagation, fresh water discharge, density difference between fluvial and marine waters and local morphology will determine the mixing pattern of salt and fresh water. The resulting salt distribution may be distinguished as (1) vertically homogeneous, (2) partially mixed or (3) highly stratified (Dyer, 1997; Miranda *et al.*, 2002). Estuaries are, therefore, subject to incessant changes in ebb/flood tides, spring and neap tide periods, variations in fresh water flow, random effects of wind and irregularities in estuarine geometry, all of which may strongly change the estuarine structure.

The highly stratified estuaries are those, among the various types, of which least is known as compared with partially mixed or vertically homogeneous systems (Schettini *et al.*, 2006). Highly stratified estuaries are associated with the lower stretches of river courses in coastal plains and are relatively narrow as compared to other types of estuaries. The lower stretches of the rivers Itajaí-Açú, Tubarão, Araranguá, Itapocú, Tijucas and Mampituba, on the coast of Sta. Catarina, are examples of this type of estuary. The hydrodynamic and transport processes of the Itajaí-Açú estuary have been more intensively studied because of its economic importance (Schettini & Carvalho, 1998; Schettini, 2002a,b; Schettini & Toldo, 2006; Schettini *et al.*, 2006); the Itapocu and Tijucas river estuaries have been investigated once (Schettini, *et al.*, 1996); and the estuaries of the Tubarão, Araranguá and Mampituba rivers have never ever been investigated at all as regards their hydrodynamics. The lack of knowledge of these systems was the main motivation for the present study.

In order to obtain a first characterization of the estuarine hydrography, an exploratory oceanographic campaign was conducted in the Araranguá river estuary. During this campaign the estuary's characteristics regarding salt distribution, current pattern and water level variations were observed. Coincidentally, the campaign was conducted just after a period of heavy rain, which made it possible to observe the effects

of a river discharge peak on the estuarine hydrodynamics and on the advective transport mechanisms responsible for the salt fluxes. The objective of the present paper is to report on this initial assessment of the physical characteristics of the Araranguá river estuary and present a discussion of the effects of the rapid changes in river discharge on the estuarine salt structure. The pH was also recorded during the experiment. The coal mining activity undertaken in the Araranguá hydrographic basin is an important economic activity with implications for water quality, and this aspect was also discussed.

2.5 – STUDY AREA

The Araranguá river basin is located in the southern part of Santa Catarina State, having a total area of 3020 km² (SANTA CATARINA, 1997). The climate is mesothermal wet with rains regularly distributed throughout the year on a monthly means basis, although the precipitation rate is highly varied on a daily basis. The annual precipitation and potential evapotranspiration rates are 1220 and 886 mm.yr⁻¹, respectively. The average temperature is 19°C, ranging from 14 to 23°C (GAPLAN, 1986).

Most of the river springs are located in Serra Geral, and about 15 main streams compose the drainage system (Krebes, 2004). The Araranguá River is formed by the confluence of the Itoupavas and Mãe Luzia rivers (Figure 2.1), having an extension of roughly 35 km before flowing into the sea. It flows from east to west, with meandering morphology. The lower course (~ 7 km) changes to a northeasterly direction, parallel to the coast line, where the inlet is located crossing a dune field. The shore is particularly dynamic, presenting a moderate to strong northerly drift (Siegle and Asp, 2007).

The fluvial discharge is monitored on a daily basis at several fluvimetric stations by the Brazilian National Water Agency (ANA) distributed throughout the drainage basin. The lowermost stations with no tidal effect on the main tributaries are: Taquaruçu Station (#84950000; ANA), on the Itoupavas River, and Forquilha Station (#84820000; ANA) on the Mãe Luzia River, with catchment areas of 898 and 523 km², respectively (30 and 18 % of the total drainage, respectively). The historical (1943 to 2004) mean discharge for Taquaruçu Station is $42.2 \pm 73.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, with a maximum of $847 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The Forquilha Station's historical (1942 and 2004) mean

discharge is of $23.5 \pm 51.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, with a maximum of $1103 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The historical mean discharge for the month of May, when the field campaign was conducted, is $11.1 \pm 12.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $22.5 \pm 21.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for the Forquilha and Taquaruçu Stations, respectively.

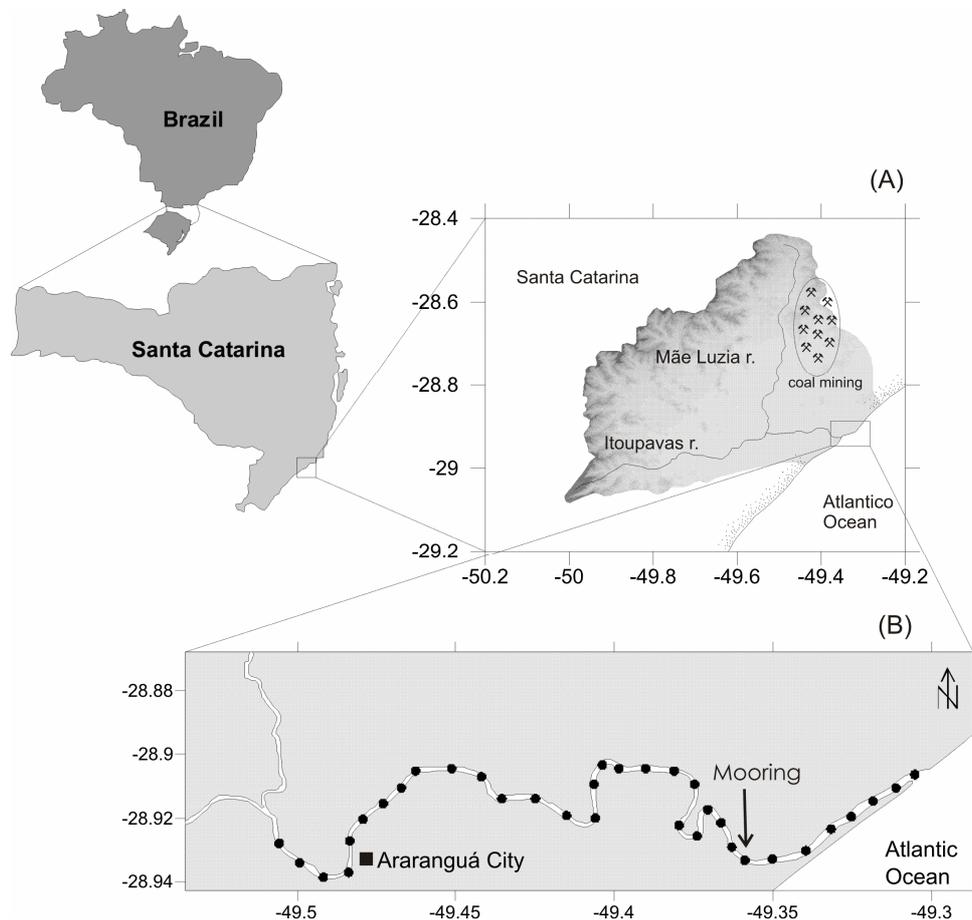


Figure 2.1. Araranguá river basin (A) with the two main streams (Itoupavas and Mãe Luzia rivers). Estuarine stretch (B) with indication of the sampling stations and mooring position.

The historical records of river discharge present large temporal variability with a poor seasonal pattern, which is in accord with the climatic characteristics of the region. According to Krebs (2004), the cold fronts that cross the Santa Catarina State throughout the year generate climatic instability and the high precipitation rate right through the year. The localization of the drainage basin and its morphology determine the rain patterns and distribution, resulting in short time of concentration of the hydrogram which produce flash flood events. The variation in topography within the catchment area, the greatest heights being the Serra Geral scarp peaks (1400 m),

produces both orographic and convective rainfall, which affects the spatial distribution of the precipitation.

The main economic activities of the region are agriculture (mainly rice production), cattle breeding and the mining and processing of coal. Studies addressing water utilization and pollution issues have been conducted in the region (Andrade, 1989; Gothe, 1989; Villela, 1989; Althoff, 1990; Gaidizinski, 2001; Scheibe, 2002) and have shown that both agricultural and coal mining activities produce pollutants at levels that cause negative effects. Pyrite oxidation is one of the main processes associated with coal mining. When exposed to air and rain, the pyrite oxidizes, generating sulfuric acid and iron compounds, thus acidifying the water. The Araranguá River is affected by this process, mainly by the water from the Mãe Luzia River, the pH levels of which can sink below 3.5 (Gothé, 1993).

The rice culture affects the nutrient budgets, although the main concern relates to water utilization. Estimates published by EPAGRI (1998) have shown that the water demand of the rice crops in the region can be up to six times the averaged fluvial discharge. This can affect the water supply for human consumption and also increases the salt intrusion into the estuarine stretch. It is empirically known by water users that salinity is observed up to 35 km up estuary, reaching the Itoupavas and Mãe Luzia rivers.

The local coast is wave dominated, having a microtidal regime. Wintertime waves are more energetic, being associated with the cold fronts (Araújo *et al.*, 2003). Tidal records from Mampituba estuary, 60 km to the south of Araranguá inlet, present a tidal range of from 0.2 to 0.6 m during neap and spring tides, respectively. The tidal form number, defined as the ration between main diurnal and semi-diurnal components of tide = $[O_1+K_1]/[M_2+S_2]$ (e.g. Pugh, 1987), is 1.3 which means a mixed type. The influence of the meteorological tides may be expected to be at least as important as it is on the northern coast of Santa Catarina (Truccolo *et al.*, 2006) considering that the tidal range is smaller.

The offshore water salinity and temperature have been investigated in terms of meso-scale shelf processes (Miranda, 1972; Moller *et al.*, 2008; Hille *et al.*, 2008). The region is dominated by Coastal Water (CW) and South Atlantic Coastal Water (SACW). The CW is associated with the local fresh water contribution and with the Plata River Plume on a larger scale, mainly during the winter. The SACW occurs mainly during the

summer in association with the upwelling that occurs around Santa Marta Cape (Pereira et al., 2009).

2.6 – MATERIAL AND METHODS

2.6.1 - Field Survey

The field campaign was conducted at 11 to 13 May 2006, during a period of spring tide. The campaign coincided with the waning phase of a flash flood event (Figure 2.2). Bathymetric data, bottom samples, time series of water level, currents, salinity, and pH, and spatial distribution of salinity and temperature were acquired.

Bathymetric data was recorded with an echo-sounder L4100 by Furuno™, and the position with a GPS receiver XL12 by Garmin™. The surveyed stretch comprised since the estuarine mouth until the Araranguá city, nearly 27 km up-estuary. The bathymetric data was reduced to a base level referenced by the lower level measured by the moored instruments in the lower estuary (cf. below).

Water level, currents, salinity and pH time series were acquired with moored instruments in the lower estuary, nearly at 7.5 km upstream from the mouth (28°55'40.6"S & 49°21'33.2"W; Figure 2.1A), in the cross section thalweg at 8.5 m deep. This position was chosen based on presence of a nautical facility there. Water level and current speed and direction were recorded with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Aquadopp Profiler® by Nortek™, of 1000 kHz. The ADCP was setup to record data at 10-minutes intervals, averaging 120 seconds at a 2 Hz sampling rate, with 0.3 m of cell size (e.g. the vertical resolution). For convention, down estuary current directions were assigned negative, and up estuary positive.

Salinity and temperature were recorded at 1 m above de bed (bottom) and nearly 1 m below the surface. The bottom data was recorded with a CTD probe SD-204 by Saiv™, which also recorded turbidity through an optical back scatter SeaPoint™ sensor. The surface data was recorded with a multi-parameter probe 6600 by YSI™, sampling at 5-minute intervals. The multi-parameter probe, besides salinity and temperature, also recorded pH, dissolved oxygen and chlorophyll-a. Therefore, only the pH data will be described and discussed. The data acquisition from the mooring lasted for 50 hours, from 11 to 13 May.

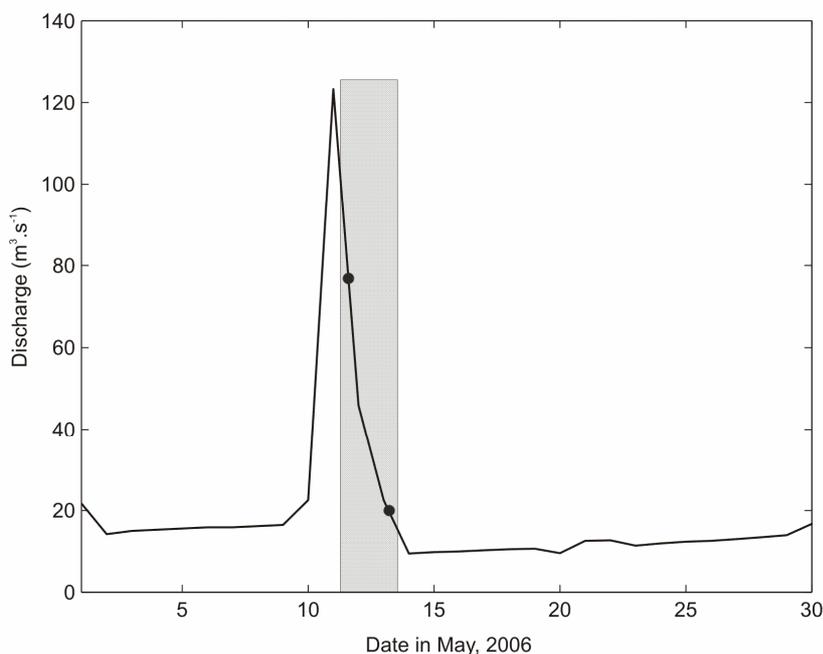


Figure 2.2. Hydrography of the Itoupava r. for the month of May, 2006. The hachured part represents the campaign period and the points mark when the longitudinal surveys were carried out.

Two surveys along the estuary were carried out at 11 and 13 May to acquire salinity and temperature data. The surveys were performed with a speed boat allowing it to be concluded in less than 2 hours, furnishing a quasi-synoptic picture of the estuarine structure. The vertical profiles of salinity and temperature were recorded every 1 km from the estuarine mouth until the city of Araranguá using a CTD probe SD-204 by Saiv™ (Figure 2.1B).

Complementary data of precipitation and river discharge were obtained with the Center of Environmental Resources and Hydrometeorology Information of Santa Catarina State (CIRAM/EPAGRI).

2.6.2 - Decomposition of Advective Salt Transport

The decomposition of the advective transport of salt has been applied to assess the modification of the estuarine dynamics during the recession of the flood peak. Decomposition is a tool used to evaluate the main mechanism acting in the estuarine transport (Medeiros & Kjerfve, 2005). The decomposition scheme applied was described by Miranda et al. (2002), based on Bowden (1963), Fisher (1976), Hunkins

(1981), Dyer (1974) and Kjerfve (1986). Considering a laterally homogeneous estuarine cross section, the longitudinal velocity component u can be decomposed as

$$u(x, z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, z) + u'(x, z, t) \quad (1)$$

where u_a is the time and depth-averaged value, given by $\langle \bar{u} \rangle$. The depth-average operation is designated by the over bar, and the time-average operation is designated by the brackets, which must be averaged over one or more complete tidal cycles. The u_t term represents the variation of the instantaneous depth-averaged velocity along the tidal cycle related to u_a , given by $u_t = \bar{u} - u_a$. The u_t term was considering the bottom and surface levels at the same level of salinity were collected. The u_s term represents the variation of the time-averaged velocity along the water column, given by $u_s = \langle u \rangle - u_a$. The u' term represents the residuals, which can be attributed to small-scale physical processes, given by $u' = u - u_a - u_t - u_s$. Similar decomposition can be applied to the salinity.

The total water depth h also varies with the tide, and can also be decomposed by its variation along the tidal cycle as

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t) \quad (2)$$

where h_a is the time-averaged water depth, given by $\langle h \rangle$, and h_t is the water level variation along the tidal cycle. The averaged salt transport for one or more tidal cycles T_S is given by

$$T_S = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \rho u S \, dz \, dt \quad (3)$$

where ρ is the water density and S is the salinity. The substitution of Eq. 1 is similar for salinity in the Eq. 3 producing 32 terms in which only 7 have physical significance and are non-zeros. Thus, the total average salt transport for one or more tidal cycles can be written as

$$T_S = \bar{\rho}(u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \bar{u}_s \bar{S}_s + \dots \\ \dots + h_a \langle \bar{u}' S' \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle) \quad (4)$$

where according to Miranda *et al.*, (2002), the seven terms inside the parenthesis can be attributed to (A) fluvial discharge, (B) Stokes drift, (C) tidal correlation, (D) gravitational circulation, (E) tidal pumping, (F) tidal shear, and (G) wind fluctuation. The seventh term may also be attributed to supra tidal effects, either wind fluctuation or changing river discharge. The decomposition was performed using a 25-hour window running over the 10 minute data, what 128 sets of transport terms.

2.7 – RESULTS

The mean estuarine depth was of 7.2 m along the 27 km between its mouth and the town of Araranguá. The river has a well defined channel throughout this part without islands, shallows or intertidal flats. The estuary is shallower along the lower 10 km stretch, with mean depth of about 5 m. The depth increased up-estuary to around 9 m, with variation of more or less 2 m. The mean estuarine breath was about 170 m near the mouth, decreasing upstream, and being of about 80 m at the town of Araranguá.

The campaign was carried out just after an intense rain shower event that lasted for three days. The accumulated rainfall in the period of 9 to 11 May was of the order of 80 mm. In terms of comparison, the long term mean precipitation rate for May is of 83 mm (source: <http://www.ana.gov.br>). The resulting river discharge was of $123 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, at 11 May, waning to 45 and $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in the following days (Figure 2.2).

The maximum water level was recorded in the beginning of the experiment, decreasing rapidly during the first hours (Figure 2.3B). The water level down 0.8 m during the first 6 hours, and varied of 0.4 m in the next 6 hours. During the rest of the experiment the water level variation was of 0.2 m and presented a tidal pattern. The tidal signal in the water level was asymmetric, with the flood lasting three to four hours, while the ebb lasting approximately 8 hours.

The currents in the beginning of the experiment were stronger and uni-directional down-estuary (ebbing), reaching $-0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 2.3A). This flow regime lasted for the next 8 hours, although less intense, until the next flood when upstream currents of $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ were observed. From this moment on, during the ebbing tidal phase, gravitational circulation was established in the estuary with down-estuary currents in the top layer and up-estuary in the lower layer during ebb tidal phase.

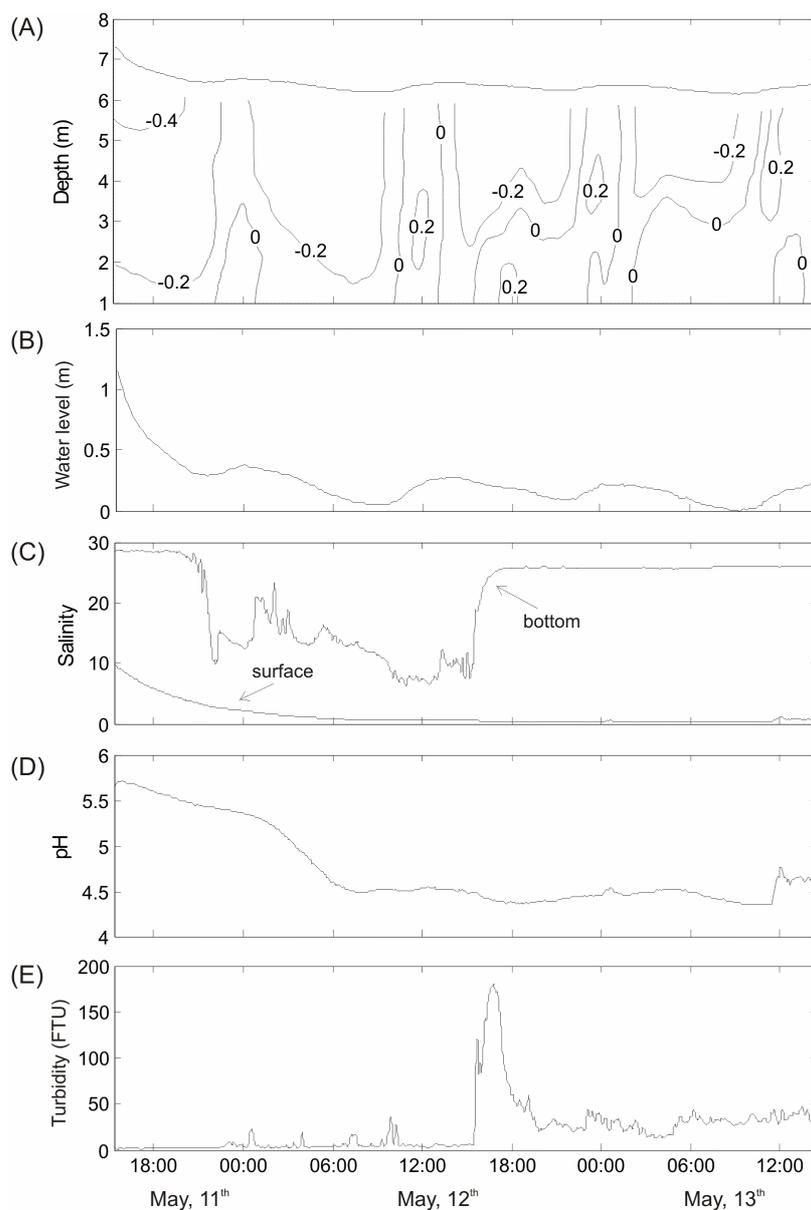


Figure 2.3. Temporal variation of the oceanographic data collected at the mooring position during the campaign; (A) vertical and temporal current velocity (+: flood; -: ebb, in ms^{-1}); (B) water level (m); (C) surface and near-bottom salinity; (D) surface pH and (E) near bottom turbidity (NTU).

The salinity time series showed strong stratification during the whole sampling period (Figure 2.3C). In the beginning of the experiment the surface salinity was of about 10 and down to zero as time went by. The near bottom salinity was around 28 in the beginning of the experiment. Within 6 hours of campaign the salinity decreased to 10, right after the tide inflow. The bottom salinity increased again at the slack-tide period and slowly decreased again during the ebb tide period, ranging from 22 to 9.

Within 18 hours of experiment, a new flood occurred and the salinity values varied between 10 and 12. During the following ebb, salinity increased to 22 and remained at this value until the end of experiment.

The pH during the entire sampling period ranged between 4.4 and 5.7 (Figure 2.3D). The pH presented a direct relationship with salinity, when the higher values were observed at the beginning of the campaign when the surface salinity was 10 and pH 5.7. The pH decreased as the water level and salinity did. When the salinity become smaller than 3, the largest pH variation was observed, with the pH values decreasing from 5.4 to 4.7. At the end of the experiment the surface salinity increased to 1, and there was also a response of the pH, which raised a little. These results indicated a strong relationship between the pH and the freshwater content in the estuary.

The turbidity near bottom was low during the first 24 hours of the experiment, below 10 FTU. There was a steep increase at the 24th hour, reaching 190 FTU (Figure 2.3E). The turbidity peak lasted for nearly three hours, and decreased and stabilized at approximately 30 FTU until the end of the experiment. The turbidity peak was synoptic to the first period of flooding currents.

Figure 2.4 presents the salinity distributions along the Araranguá river estuary during 11 and 13 May. At the 11 May the salt presence was observed until 22 km from the river mouth, and at 13 May, the salinity was observed up to 11 km. The maximum value of salinity in the first survey was 16 and the isohalines were tilted, meanwhile during the second survey the maximum salinity was of 32 and the isohalines were nearly horizontal, indicating higher stratification.

The time-averaged surface and near bottom current velocities were -0.27 and $-0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, and salinity were 1.2 and 15.1, respectively, for the first period of 25-hours. For the later 25-hour period the values of current velocities were -0.16 and $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, at surface and near bottom, respectively, and salinity were 1 and 13.2 at the same order. The salt transport mechanisms for the first and last 25-hours periods of the experiment, representing the two distinct conditions described above, are presented in Table 2.1. During the first period, the total salt transport was $-9.1 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (out of estuary), and during the second period, the total salt transport was of $0.8 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (into the estuary). The fluvial discharge mechanism decreased by half from the first period to the second. The tidal correlation, usually a dispersive up-estuary mechanism, was down-estuary during the first period. The gravitational circulation salt transport increased by 2.5x. The other mechanisms did not present significant values.

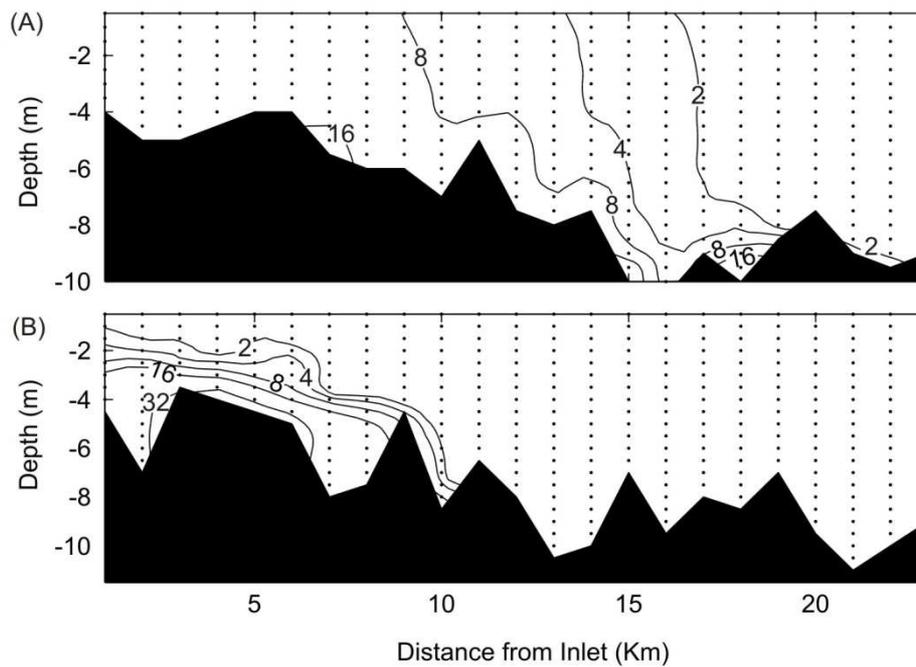


Figure 2.4. Longitudinal salinity distribution at (A) May, 11th and (B) May, 13th.

Table 2.1. Salt transport terms calculated for the first and last 25-hour periods of experiment, with comparative results from the Itajaí-Açu Estuary (Schettini et al., 2006). Values in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

TERMS	FIRST 25 h	LAST 25 h	Itajaí- Açu
Fluvial discharge	-11.2	-3.3	-10.3
Stokes drift	-0.1	0.0	2.1
Tidal correlation	-0.5	0.0	5.3
Gravitational circulation	2.6	3.8	16.3
Tidal pumping	0.0	-0.0	2.9
Tidal shear	-0.0	0.0	0.0
Wind fluctuation	-0.2	-0.0	-0.1
Sum	-9.1	0.7	16.2
Transport (Eq. 3)	-9.1	0.8	16.3

2.8 – DISCUSSION

The oceanographic campaign conducted in the Araranguá river estuary had an exploratory character, featuring the first survey on the physical processes of this system. However, taking into account the hydrological conditions during the campaign, it was possible to investigate the effects of the fluvial discharge on the estuarine hydrodynamics. The rainfall that preceded the measurements produced a flash-flood event and the wave of discharge affected the water level, currents, salinity and the pH.

The flow rate provides by simple means the relative importance between the tidal forcing and fluvial discharge, and can be used here to scale the changes observed during the experiment. The flow rate is calculated by the ratio between the integrated fluvial discharges for a tidal cycle period (12.4 hours) to the tidal prism volume. The latter is calculated by the product of the tidal height to the estuarine surface area (Dyer, 1997). Considering the historical average discharge for May, $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the estuarine area, of approximately 3.7 km^2 , and the mean tidal range of 0.26 m, the flow ratio is 1.1. What means that the river discharge volume contribution is equivalent to the tidal prism, and the estuary is highly stratified on averaged basis (Dyer, 1997). The flow ratio during the first 25-hours period was 5, reducing to 1 in the latter period, changing in 5-times fold.

The current and salinity time-series at surface and near-bottom permit to classify the estuary based on non-dimensional circulation and stratification parameters (Hansen and Rattray, 1966). The stratification parameter is calculated by the ratio of the difference between the bottom and surface salinity to the depth averaged salinity. The circulation parameter is calculated by the ratio of the surface current velocity to the depth averaged current velocity (Miranda *et al.*, 2002). The data averaged over the whole data set (~50 hours; ~4 semi-diurnal tidal cycles) resulted in circulation and stratification parameters of 1.8 and 2.5, respectively, what means type 4, salt wedge estuarine structure (e.g. Dyer, 1997; Miranda *et al.* 2002). This reinforces the flow ratio indication of a fluvial dominated regime.

The salinity distribution in a given estuary is a balance between diffusion and advection (Dyer, 1974). The salt content is an indicator of the mixing between fresh and marine waters, and its flux and transport can be used to infer the main physical mechanisms responsible for the transport of other scalars (Miranda & Castro Filho, 1996). The salinity distribution along the estuary presented a pattern that disagrees with

the discharges condition: the degree of stratification increased as the river discharge decreased (Figure 2.5). This result was interpreted as a response delay of the salinity structure to the flash flood event. During the period of about a month before the survey did not rain in the drainage and the river discharge was below the averaged values. Thus, tidal effects producing vertical mixing would prevail on the fluvial advection, reducing the stratification.

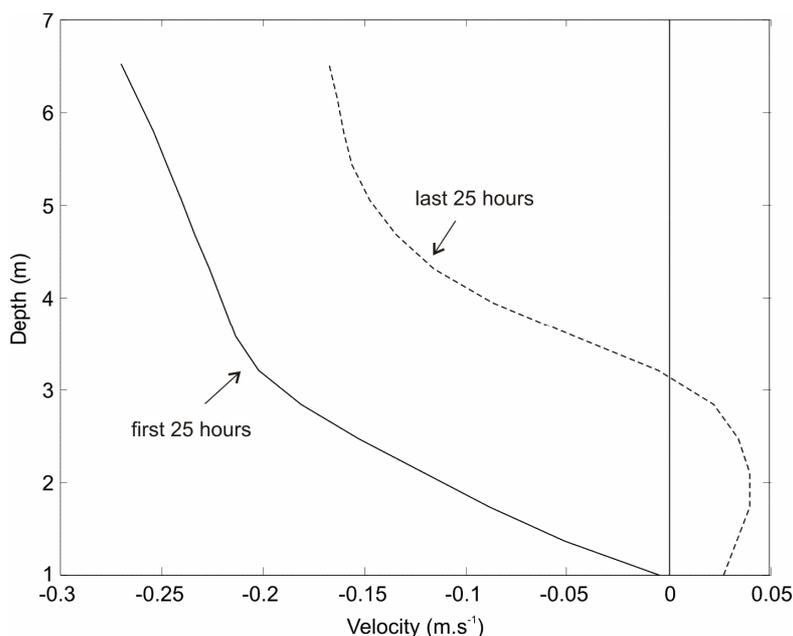


Figure 2.5. Time-averaged current velocity profiles for 2 tide cycles for the first and last 25-hour periods.

The Araranguá estuary shares common climatic, tidal and morphologic characteristics with the Itajaí-açu estuary, 300 km north. The latter has been more intensively studied, making it as a model for comparisons. The fine sediments transport regime in the Itajaí-açu estuary is defined as flash-flood dominated (Schettini & Toldo, 2006), presenting two main transport modes: a marine and a fluvial. The marine mode occurs during low discharge periods where the transport processes are controlled by tides; the riverine suspended particulate matter (SPM) inflow is reduced and mostly trapped in the estuary. The fluvial mode operates when the river discharge is above the average; the riverine SPM concentration increase; and the trapping decreases to zero. It is hypothesized that the Araranguá estuary behaviors like the Itajaí-Açu. What was observed in the Araranguá river estuary was a transitional condition during the evolution of a discharge flood passage, what was never related for the Itajaí-açu estuary.

The time variation of salinity presented a complex pattern. The rapid decrease of bottom salinity in the beginning of the experiment could be first thought of as being associated with advection of fresh bottom waters from upstream, however it happened when the bottom currents were up estuary during tidal floods. This phenomenon was observed during the 8th and 20th hours of experiment Figure (2.3B and C). This characteristic is probably due to water advection from lower estuary. From the mooring site towards the mouth, the estuary becomes wider and shallower (< 5 m) extending for 7.5 km before it debouches to the sea. Thus, vertical mixing caused by tides and/or tides in this stretch of the estuary would be more effective. The tidal excursion derived from the current measurements was of the order of 5 km, which means that a flooding water parcel that passes through the mooring site is originated from the lower estuarine basin instead coastal waters, being a mixture of river inflow from the recent river flood, and older brackish estuarine waters. During the next tide period the water volume was completely exchanged and the inflow of coastal waters was observed near the bottom, indicated by the higher salinity. The turbidity time series corroborated this hypothesis. Initial estuarine waters were less turbid, and when the advection of coastal waters effectively took place, it came with a front of turbidity moving up estuary.

Dyer (1977), assessing the salt transport in salt wedge, partially mixed and well mixed estuaries concluded that in the first ones the gravitational circulation was the main mechanism of transport up estuary. This was also verified in the present case, mainly in the last 25-hour period of the experiment. During the first 25 hours of the experiment the fluvial discharge overcome the gravitational circulation, with residual salt transport down estuary (Table 2.1). The negative salt transport in the first 25-hour period indicates the water volume replacement in the estuarine basin with new fresh water. During the second 25-hour period, buoyancy flux starts to take place generating the observed gravitational circulation indicated by the currents pattern. These effects are well demonstrated by the time-averaged vertical current profile (Figure 2.5). During the first period the residual current vertical profile is down estuary along the depth, while it becomes more 'estuarine-like-expected' during the second period, with direction inversion: down estuary at the top, and up estuary at the bottom layer.

The river discharge modulation of the salt transport terms is clearly observed by the evolution of fluvial discharge and gravitational circulation salt transport terms (Figure 2.6). The gravitational circulation is presented in module to improve the visualization. The staircase pattern along the time series is probably caused by

oscillations of the river discharge during the period. Therefore, the rate of change of fluvial discharge term down is much higher than the rate of change of gravitational circulation up. This result can be understood by the dilution of the water of the lower stretch of the estuary, which started to be advected up estuary by the tidal effect. Thus, the inflowing water was not new salty coastal waters rather brackish ones still strongly affected by the flash flood event. It is expected that the evolution of the scenario is the stabilization of the river discharge term, and the increase of the dispersive up-estuary terms, mainly of the gravitational circulation and the tidal correlation ones. This is suggested by the salt transport terms of Itajaí-Açu estuary, where they were calculated based on a 25-hour observation at spring tide and low river discharge condition (Schettini et al., 2006; Table 1).

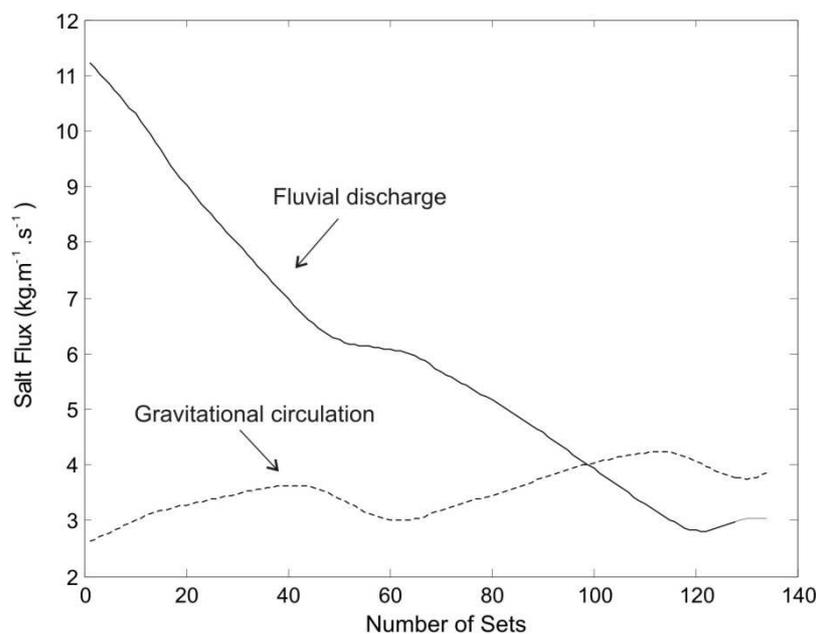


Figure 2.6. Temporal variation of Fluvial Discharge (in module) and Gravitational Circulation terms of advective salt transport (in $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

The tidal correlation term is a tide related dispersive term, which transport salt up estuary (Miranda e Castro Filho, 1996; Miranda *et al.*, 2002). The negative value found for the first 25-hour period was unexpected, at least if interpreted by means of tide modulation of water level only. This term is calculated by the triple correlation between depth averaged current, water depth and salinity. Its negative value for the first 25-hour period was attributed to the water level modulation by the flash flood and unidirectional ebb currents. The Figure 2.7 presents the water level / velocity diagram

for the both 25-hour periods, where the non-tidal flash flood pattern is a vertical line indicating the waning phase of the flood wave.

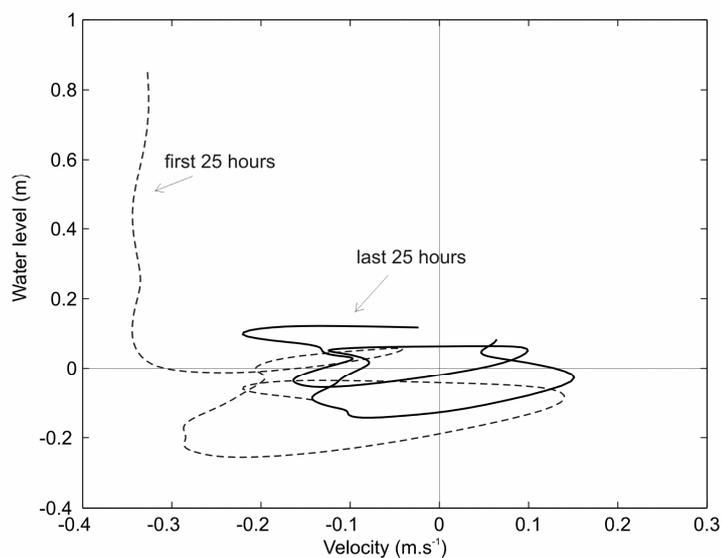
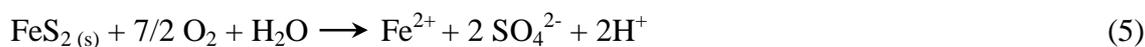


Figure 2.7. Water level and current velocity diagram for first and last 25 hours of experiment.

2.7.1 - Acid Waters

The pH presented values significantly low when compared with other regional estuarine systems (Schettini *et al.*, 2000; Rörig *et al.*, 2007), and was firstly attributed to the coal mining activity at the Araranguá river basin. A consequence of coal mining activity is the acid drainage, and the Araranguá drainage basin encompasses one of the major coal mining regions of Brazil. Values of pH below 3 have been reported for small streams in the Araranguá drainage basin (Gothe, 1989). The acidification occurs when the pyrite of abandoned mines or dumping sites is exposed to air and water generating sulfuric acid and dissolving iron. The iron can then be totally or partially precipitated forming red, orange or yellow sediment at the bottom of waterways (White *et al.*, 1997). The oxidation reactions involve the dissolution of solid pyrite into iron and sulphate according the equation (5):



The iron II produced in the equation 5 will oxidize into iron III that is hydrolyzed with more liberation of more acid according the equations 6 and 7:



If the pH of the environment is less than 4 iron III remains in solution and can oxidize pyrite directly (Equation 8) resulting in more acid production and starting a cyclical reaction involving iron II and III with strong environment acidification.



At pH above 4, the iron III precipitates as iron hydroxide or iron-hidride (FeOOH), resulting in the formation of red flocs (White *et al.*, 1997).

The Araranguá estuarine waters were acid even with marine waters influence. The highest pH values were observed in the beginning of the experiment, associated with the higher salinity. The pH decreased during de monitored period and only showed a small increasing in response to a small increasing in the salinity at the end of experiment (Fig. 3E). The temporal variation of pH reflects the influence of the buffer effect of the sea water. This behavior was already observed in other estuaries subjected to the influence of acid drainage from mining activities. In the cases of Ria del Tinto and Ria del Odiel, in Spain, the pH above 4 is observed for salinity higher than 20 (Braungard *et al.*, 2003).

An implication of the low pH in estuarine waters is the facilitation of the exportation of metal pollutants: the low pH keep them dissolved instead adsorbed to fine sediments (Achterberg *et al.*, 2003). Furthermore, low pH works as a flocculation agent and would play as a factor to removal suspended sediment from water column. This explains the low turbidity recorded. The highly stratified estuarine structure observed indicates the dominance of advection transport processes, and small mixing between river and marine waters. Dyer (1995) suggests that such condition favors the riverine materials transfer to the inner shelf, and low trapping efficiency. Thus, it is

expected that the Araranguá estuary is an exporter of dissolved contaminants to the coastal sea under moderated and high river discharge, therefore it may be an efficient fine sediment trap.

2.8 – CONCLUSIONS

The main findings of the short-term hydrographic experiment in the Araranguá estuary were:

1. the estuarine hydrodynamic structure responded rapidly to the flash-flood event;
2. the salt transport shifts from down-estuary dominated by river discharge to up-estuary dominated by gravitational circulation;
3. the low pH of estuarine waters and the low turbidity in the lower estuary suggest that the estuary acts as a source of dissolved pollutants for coastal waters, although it traps the fine sediments.

2.9 – ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their thanks to the Defesa Civil, Corpo de Bombeiros and Yate Clube of Araranguá city for the logistic support and especially to Lt. Kemper, Sgt. Djalma Santos Niles and Sds. Sebastião A. de Souza and Geovanne Teixeira of the fire brigade of Araranguá city, as also to Mariana Couceiro and Marçal Duarte. The campaign was conducted with the support of the CNPq through the project: 'Processes of transport and retention of fine sediment in river dominated estuaries – TRANSEST' (CNPq: 306217/2007-4). Carla de Abreu D'Aquino has a CNPq PhD scholarship; CNPq Grant 306217/2007-4.

2.10 – REFERENCES

- Achterberg, E.P., Herzl, V. M.C., Braugardt, C.B., Millward, G.E. 2003. Metal behavior in an estuary polluted by acid mine drainage: the role of particulate matter. *Environmental Pollution*, 121, 283-292.
- Althoff, D.A. 1990. Irrigação do arroz: salinidade da água dos mananciais do sul de SC. Florianópolis, EMPASC, 24p.
- Andrade, M.C. 1989. Mineração e Meio Ambiente. ENESMA, V.3. Florianópolis, p40-49.
- Araújo, C.E.S., Franco, D.; Melo, E.; Pimenta, F. 2003. Wave regime characteristics of southern brazilian coast. Proceedings of COPEDEC VI, Paper N.o 97, 15p. CD-ROM.
- Braungardt, C.B., Achterberg, E.P., Elbaz-Poulichet, F. and Morley, N.M. 2003. Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. *Applied Geochemistry*, 18, 1757-1771.
- Bowden, K. F. 1963. The mixing processes in a tidal estuary. *Journal Air Water Pollution*, 7:343-356.
- Cameron, W.N. & Pritchard, D.W. 1963. Estuaries. In: HILL, M.N. (Ed.) *The sea*. New York, Wiley Interscience, pp. 306-332.
- Dyer, K.R. 1974. The salt balance in stratified estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2:273-281.
- Dyer, K.R. 1977. Lateral circulation effects in estuaries. In: Estuaries, geophysics and the environment. National Academic Press, Washington, D.C. pp.22-29.
- Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G.M.E. (Ed.) *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. New York, Elsevier, pp. 423-449.
- Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: A physical introduction* (2nd Edition). New York, John Wiley and Sons, 195p.
- EPAGRI. 1998. Sistema de produção de arroz irrigado em Santa Catarina: (Pré-germinado). Florianópolis. 79p. (Epagri. Sistema de Produção, 32).
- Fischer, H. B. 1976. Mixing and dispersion in estuaries. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8:107-133.

Gaidizinski, M.C. 2001. A rizipiscicultura no município de Meleiro. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geociências, UFSC. 114p.

GAPLAN – GABINETE DE PLANEJAMENTO DE SANTA CATARINA 1986. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173 p.

Gothe, C.A.V. 1989. Diagnóstico Ambiental da região Carbonífera Catarinense. ENESMA, V.3. Florianópolis, p62-96.

Gothe, C.A.V. 1993. Avaliação dos impactos ambientais da indústria carbonífera nos recursos hídricos da região sul-catarinense. Florianópolis: UFSC. Dissertação de Mestrado em Geografia.

Hansen, D.V. & Rattray, M. 1966 New dimensions on estuarine classification. *Limnology and Oceanography*, 11:319-326.

Hille, E.; Schettini, C.A.F.; Ribeiro, M.R. 2008. Estrutura termohalina no litoral de Santa Catarina nos anos de 2005 e 2006. In: Braga, E.S. (Ed.) *Oceanografia e mudanças globais*. São Paulo, EDUSP, p371-382.

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.

Krebes, A.S.J. 2004. Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

Medeiros, C. & Kjerfve, B. 2005. Longitudinal salt and sediment fluxes in a tropical estuary: Itamaracá, Brazil. *Jour. Coast. Res.*, 21(4):751-758.

Miranda, L.B. 1972. Propriedades e variáveis físicas das águas da plataforma continental do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, São Paulo, USP.

Miranda, L.B. & Castro Filho, B.M. 1996. On the salt transport in the Cananéia sea during a spring tide experiment. *Rev. Bras. Oceanogr.*, 44(2):123-133.

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.

Möller Jr., O.O.; Piola, A.R.; Freitas, A.C.; Campos, E.J.D. 2008. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental Shelf Research*, doi: 10.1016/j.csr.2008.03.012.

Nichols, M.M. & Biggs, R.B. 1985. Estuaries. In: DAVIS Jr., R.A. (Ed) *Coastal sedimentary environments*. New York, Springer Verlag, pp.77-186.

Pereira, M.D.; Schettini, C.A.F.; Omachi, C.Y. 2009. Caracterização de feições oceanográficas na plataforma de Santa Catarina através de imagens orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(1):81-93.

Pugh, D. 1987. Tides, surges and mean sea level: a handbook for engineers and scientists. New York, John Wiley and Sons.

Rörig, L. R.; Tundisi, J. G.; Schettini, C. A. F.; Pereira Filho, J.; Menezes, J. T.; Almeida, T. C. M.; Urban, S. R.; Radetski, C. M.; Sperb, R. C.; Stramosk, C. A.; Macedo, R. S.; Castro-Silva, M. A. & Perez, J. A. A. 2007. From a water resource to a point pollution source: the daily journey of a coastal urban stream. *Brazilian Journal of Biology*, v. 67, n. 1, p. 631-637.

SANTA CATARINA.1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica da bacia do rio Araranguá. Documento síntese. Florianópolis. v.1.

Scheibe, L.F. 2002. O carvão em Santa Catarina: mineração e conseqüências ambientais. *Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental*, n°2. FEPAM. Porto Alegre/RS.

Schettini, C.A.F. 2002a. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. *Rev. Bras. Rec. Hidric.*, 7(1):123-142.

Schettini C.A.F. 2002b Near bed sediment transport in the Itajaí-Açu River estuary, southern Brazil. In: Winterwerp JC and Kranenburg C (Eds). *Fine sediment dynamics in the marine environment*. Elsevier, New York, pp 499-512.

Schettini C.A.F., Carvalho J.L.B., Jabor P. 1996. Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State, Southern Brazil. *Bahia Blanca, Proceedings of Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries*, p 29-32.

Schettini, C.A.F. & Carvalho, J.L.B. 1998. Hidrodinâmica e distribuição de sólidos em suspensão no estuário do rio itajaí-açu (relatório). *Notas Tec. Facimar*, 2:131-140.

Schettini, C.A.F, Pereira Filho, J. & Spillere, L.C. 2000. Caracterização Oceanográfica e Biogeoquímica dos Estuários dos Rios Tavares e Defuntos, Reserva Extrativista de Pirajubaé, Florianópolis, SC. *Notas Técnicas da Facimar*, v.4, p.11-28.

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.

Schettini, C. A. F.; Ricklefs, K.; Truccolo, E. C.; Golbig, V. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. *Ocean Dynamics*. 56(3-4): 308.

Siegle, E. and Asp, N.E. 2007. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. *Braz. j. oceanogr.*, June 2007, vol.55, no.2, p.109-120.

Truccolo, E.C.; Franco, D.; Schettini, C.A.F. 2006. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *J. Coast. Res.* 39(SI):547-552.

Villela, R. 1989. Mineração de Carvão em Santa Catarina e o meio ambiente. ENESMA, V.3. Florianópolis, p50-61.

White, I., Melville, M.D, Wilson, B.P. and Sammut, J. 1997. Reducing acidic discharges from wetlands in eastern Australia. *Wetlands Ecology and Managements*, 5: 55-72.

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO MAMPITUBA, SC.

Artigo submetido a:

REVISTA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA

Revista da Sociedade Brasileira de Geofísica

Comitê Editorial: Ícaro Vitorello e Osvaldo Luiz Q. da Fonseca

Endereço: Av. Rio Branco, 156, sala 2510.

20043-900 Rio de Janeiro RJ – Brazil

Tel. / Fax: (55 21) 2533-0064

3.1 – RESUMO

O Rio Mampituba drena uma área de 1200 km², nasce na Serra Geral e desemboca no Atlântico junto a cidade de Torres, após percorrer cerca de 62 quilômetros. Apresenta vazão média de 18,6 m³.s⁻¹, profundidade média de 4 m e está sob regime de micro-marés. Em 17 de maio de 2008 foi realizada uma campanha durante dois ciclos de maré (25 horas), quando foram registrados dados de correntes, salinidade, e concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Durante a campanha o nível de água no estuário do rio Mampituba apresentou tendência de diminuição, e a altura da maré foi de 0,4 m, apresentando assimetria com predominância de enchente. O padrão de correntes no estuário foi bi-direcional, com velocidade média de vazante de 0,33 e enchente de 0,13 m.s⁻¹. A estratificação no estuário acompanhou a subida da maré, com um avanço da cunha salina até aproximadamente 5 km estuário adentro. O transporte de sal total no estuário foi de 1,11 kg.m⁻¹.s⁻¹ no sentido estuário afora. A componente da descarga fluvial foi responsável por 98% do transporte de sal para fora do estuário, enquanto o transporte estuário adentro teve participação de 52% da circulação gravitacional, 26,4% da correlação de maré e 19% do bombeamento da maré. O transporte de sedimentos em suspensão foi principalmente devido à circulação gravitacional, representando 83% do

transporte total. A hidrodinâmica do estuário do rio Mampituba responde como um estuário altamente estratificado dominado pelo rio.

Palavras-Chave: circulação, transporte advectivo, processos de transporte.

3.2 – ABSTRACT

The Mampituba River drains a 1200 km² area, with headwater in the Serra Geral and debouching to the sea at city of Torres, running through 62 km. It has mean discharge of 18.6 m³.s⁻¹, mean depth around 4 m and is under a microtidal regime. A oceanographic campaign was carried out at 17th of May, 2008, when water level, currents, salinity and suspended sediment concentration were recorded during two tidal cycles (25 hours). The water level presented a decrease trend during the campaign, and the mean tidal range was 0.4 m, with flood dominance asymmetry. The current pattern was bi-directional with mean ebb and flood velocity of 0.33 and 0.13 m.s⁻¹, respectively. The estuarine stratification followed the tide, with the salt wedge intrusion extending 5 km up-estuary. The total salt transport was 1.11 Kg.m⁻¹.s⁻¹ out to the estuary. The fluvial discharge component accounted with 98% of seaward transport, whereas the landward transport was 52% due to the gravitational circulation, 26.4% due to tidal correlation and 19% due to tidal pumping. The suspended sediments transport was mainly due to the gravitational circulation, which accounted with 83% of the total transport. The Mampituba River estuary hydrodynamics responds mainly to the river, presenting a highly stratified behavior.

Keywords: circulation; advective transport; transport processes.

3.3 – INTRODUÇÃO

Estuários são ambientes transicionais na interface continente-oceano que recebem os materiais provenientes da drenagem continental carreados pelos rios, atuando como filtros para os materiais particulados e dissolvidos no fluxo com sentido ao mar (Schubel & Carter, 1984; Dyer, 1995), desempenhando assim um papel

fundamental no transporte e distribuição de propriedades nas regiões costeiras. Os processos hidrodinâmicos são determinantes principais na distribuição de materiais ao longo do estuário, bem como na caracterização de um sistema como retentor ou exportador para a zona costeira (Dyer, 1995). A caracterização hidrodinâmica de um estuário em particular é fundamental para o entendimento dos processos físicos, geológicos, químicos e biológicos os quais dão bases para conservação e uso sustentável destes ambientes.

A hidrodinâmica de um estuário é o resultado da interação entre a morfologia da bacia estuarina, o aporte fluvial e o regime de marés. A grande variabilidade temporal e espacial destes forçantes e dos processos a eles associados, torna o estudo dos padrões de circulação e distribuição de propriedades nos sistemas estuarinos bastante complexo (Kjerfve *et al.*, 1982). Durante um ciclo de maré ocorre uma forte relação entre as velocidades das correntes, o transporte e as concentrações de sedimentos em suspensão (Nichols, 1986; Kjerfve & Wolaver, 1988; Dyer, 1988). O cálculo do balanço de massas para um ambiente estuarino fornece estimativas de valores de exportação e/ou importação de materiais em um ciclo de maré, com os quais é possível detectar variações no aporte de sedimentos, na ciclagem interna e nos padrões de erosão e sedimentação associados aos ciclos de maré (Kjerfve & McKellar, 1980; Dyer, 1988).

Dentre a rica diversidade de sistemas estuarinos (Fairbridge, 1980), os estuários do tipo altamente estratificados são os que apresentam um nível de conhecimento mais modesto quando comparado com sistemas parcialmente misturados ou verticalmente homogêneos (e.g., Schettini *et al.*, 2006). Os estuários altamente estratificados são aqueles que apresentam a advecção fluvial como principal mecanismo de transporte e apresentam potencialmente menor eficiência na retenção de material particulado em suspensão (Dyer, 1995). Estes sistemas estão associados com o baixo curso de rios em planícies costeiras, sendo relativamente estreitos quando comparados com outros tipos de estuários, configurando sistemas de frente deltaica, segundo a tipologia de Fairbridge (1980).

Ao longo da costa de Santa Catarina ocorrem diversos sistemas estuarinos, geograficamente denominados de baías (e.g., Baía da Babitonga, Schettini *et al.*, 2003), lagoas ou lagunas (e.g., Lagoa da Conceição, Knoppers *et al.*, 1984) e rios (e.g. Rio Itajaí-Açu, Schettini, 2002). Apesar de suas dimensões relativamente menores do que as baías e lagoas, os últimos concentram o influxo fluvial da maior parte da Vertente Atlântica Catarinense. Estes rios recebem o aporte de pequenas bacias, sendo

as mais representativas são as dos rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba. Para estes, estudos sobre circulação e transporte foram realizados nos estuários dos rios Itajaí-Açu (Schettini, 2002), Itapocu (Siegle, et al, 2005), Tijucas (Schettini et al, 1996) e Araranguá (D'Aquino, et al. No prelo). O objetivo do presente trabalho é o contribuir no entendimento dos processos hidrodinâmicos em estuários dominados por rios, através da caracterização preliminar da hidrodinâmica do estuário do Rio Mampituba.

3.4 – ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Mampituba está localizada a nordeste do estado do Rio Grande do Sul, situada entre as coordenadas geográficas de 29°11' a 29°26', de latitude Sul e 49°42' a 50°12' de longitude Oeste (SEMA, 2002). O baixo curso deste rio serve de limite político entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 3.1). A bacia de drenagem apresenta área de 1224 km², apresentando estruturas lineares na região mais a montante e meandros abandonados ou em processo de abandono junto à foz do rio (Reginato, 1996).

O rio Mampituba é um sistema de pequeno porte (e.g., Strahler, 1952) apresentando uma formação recente, nascendo nas escarpas basálticas da Serra Geral e desaguando no Oceano Atlântico após 62 km de oeste a leste. Em sua porção final, é caracterizado por um regime fluvial meandrante de baixa energia, apresentando terrenos sedimentares quaternários e aluvionares de Planície Costeira (Figueiredo, 2005). Com exceção do trecho mais alto do Rio Mampituba e do Município de Cambará do Sul, as zonas ciliares da sua bacia encontram-se altamente degradadas, principalmente nas áreas com maior aptidão agrícola, como nas regiões de produção de arroz (Souza, 2008). Na planície costeira destaca-se uma grande zona lacustre interconectada ao estuário (Inácio, 2004). De acordo com Guerra (1997), a porção final do rio consiste de um estuário, sentindo os efeitos da maré a quilômetros a montante da foz e tendo suas águas misturadas com as águas salgadas da plataforma adjacente.

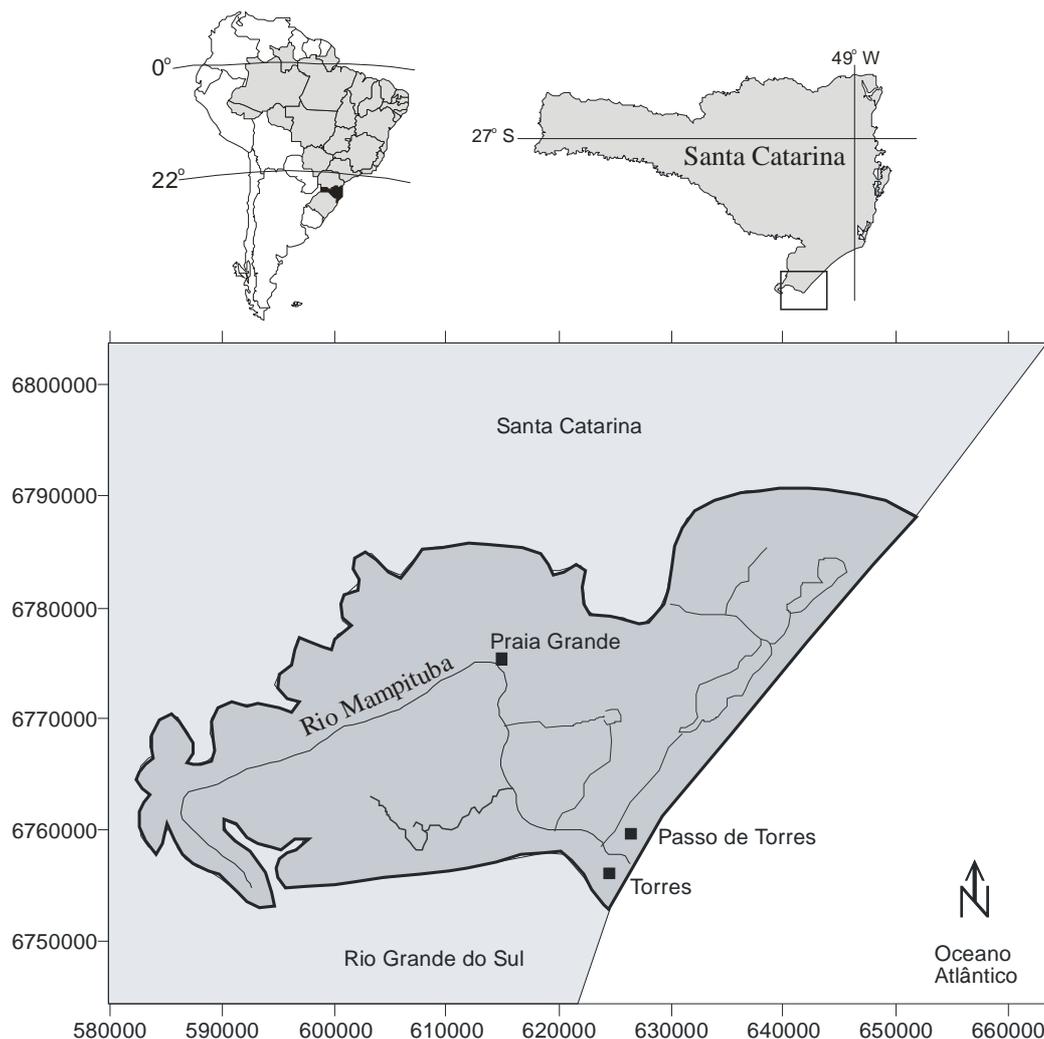


Figura 3.1. Localização da área de estudos. Bacia do Rio Mampituba, a escala em cinza representa as altitudes na região em metros.

O clima regional é do tipo sub-tropical úmido, com precipitação média anual é cerca de 1502 mm e a evapotranspiração média anual apresenta valores de 990 mm (SEMA, 2002). O rio Mampituba possui uma vazão média de $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, uma profundidade média de 4 m e está sob regime de micro-marés (D'Aquino, *et al.*, 2008). A desembocadura do rio Mampituba é fixa por molhes, desaguando em uma linha de praia arenosa, sob intensa dinâmica de ondas e correntes, e apresentando um regime de micromarés. Essa porção do litoral está sujeita às ondas mais intensas provenientes de S-SE, que geram um transporte longitudinal resultante ao longo da costa sul catarinense na direção NE (Siegle & Asp, 2007).

3.5 – MATERIAL E MÉTODOS

3.5.1 - Coleta de dados

Os dados utilizados neste trabalho para caracterizar a hidrodinâmica do estuário do rio Mampituba foram obtidos em três campanhas distintas: (1) dados de nível de água registrados próximo a desembocadura por um período de sete meses em 2005; (2) uma campanha para levantamento da distribuição longitudinal da salinidade em 2006; e (3) uma campanha com acompanhamento de dados correntes, salinidade e concentração de sedimentos em suspensão (CSS) ao longo de dois ciclos de maré em 2008.

Registros de dados de nível da água foram obtidos através de um marégrafo de pressão marca RBR™ TG-205, instalado em um píer cerca de 0,5 km da desembocadura (Figura 1). O marégrafo foi instalado em 21 de abril de 2005 e registrou dados em intervalos de 30 minutos até 3 de novembro de 2005.

A primeira campanha hidrográfica para coleta de dados de salinidade e temperatura ao longo do estuário foi realizada no dia 12 de maio de 2006. Perfis verticais de salinidade e temperatura da água foram realizados em estações em intervalos de 0,7 km, de jusante para montante, até cerca de 35 Km da desembocadura. Foi utilizada uma sonda tipo CTD da marca Saiv A/S modelo SD202, com taxa de amostragem de 1 Hz.

A segunda campanha hidrográfica foi realizada nos dias 17 e 18 de maio de 2008. Nesta campanha foram coletados dados de nível da água, velocidade e direção de correntes, salinidade, temperatura e CSS em uma estação fixa na desembocadura, durante um período de 25 horas. Também foram feitos dois levantamentos para coleta de dados de salinidade, temperatura e CSS ao longo do estuário similarmente ao realizado na primeira campanha hidrográfica, um no dia 17 em condição de baixamar, e outro no dia 18 em condição de preamar. Os dados de nível da água, velocidade e direção de correntes foram registrados com um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (PACD) da marca Nortek A/S™ de 1000 kHz, fundeado a 0,5 km da desembocadura, configurado para realizar células de medição em intervalos verticais de 0,3 m, a partir de médias de dois minutos à uma taxa de 2 Hz, e em intervalos de 10 minutos. Dados de salinidade, temperatura e turbidez foram registrados próximo da superfície com uma sonda CTD da marca RBR™ modelo XR-420. Dados de salinidade e temperatura foram registrados próximo do fundo com uma sonda CTD da marca Saiv

ASTM modelo SD200. Todos os instrumentos registraram dados em intervalos de 10 minutos. Adicionalmente, perfis verticais de salinidade, temperatura e turbidez foram coletados no local de fundeio com uma sonda CTD da marca JFE-Alec, em intervalos horários durante um período de 13 horas. Também foram coletadas amostras de água em sub-superfície para realizar o procedimento de calibração os sensores de turbidez para conversão dos dados em CSS.

Dados de vazão sobre o rio Mampituba foram obtidos junto ao site da Agencia Nacional de Água (ANA), através do programa Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>). O programa Hidroweb permite baixar séries históricas de estações fluviométricas de todo Brasil. Para o rio Mampituba, foram baixadas séries históricas da estação Praia Grande (84970000) referentes ao período de 1986 a 2006. A vazão média de longo termo (Q_{mlt}) e as vazões de permanência (Q_{10} , Q_{50} e Q_{90}) foram obtidas através do modulo de cálculo de funções do programa Hidroweb, ANA.

3.5.2 - Processamento dos dados

Os dados de nível da água foram analisados em termos de variância associada com oscilações em frequências mareal (FM), sub-mareal (FSubM) e supra-mareal (FSupM). Foram determinadas os constituintes harmônicos de maré para um período contínuo de 174 dias de dados (6 x 29 dias ~ 6 meses), utilizando análise harmônica de marés através de rotinas para ambiente Matlab (MathWorks Inc. TM) descritas em Pawlowicz *et al.* (2002). O padrão da maré astronômica foi classificado pelo seu numero de forma determinado, calculado pela razão entre a soma das amplitudes dos dois principais constituintes harmônicos diurnos pela soma dos dois principais constituintes harmônicos semi-diurnos: $N_f = [aO_1 + aK_1]/[aM_2 + aS_2]$ (Pugh, 1987). Foi gerada uma série temporal a partir dos constituintes harmônicos resultantes, sendo esta subtraída da série original para o período utilizado na análise. A série residual foi filtrada com um filtro numérico recursivo binomial, obtendo-se assim a oscilação em FSubM. A série em FSupM foi obtida pela subtração da série não-harmônica da série em FSubM.

Os dados de nível medidos durante o fundeio pelo PACD foram utilizados para identificar e confirmar os períodos de coleta dentro da água, e também na validação das células para o PACD. Através de análise gráfica da variação temporal do nível foram

observadas assimetrias nos padrões de enchente/vazante. Foi gerado o diagrama de nível de pela velocidade de correntes para um período de 25 horas.

O uso de correntógrafos acústicos para medir velocidade de escoamento refere-se a hipótese fundamental de que as partículas carregadas pelo fluido são movimentadas a mesma velocidade do fluido (Larrarte et al 2008). Um PACD mede a velocidade da coluna de água usando o princípio de deslocamento Doppler, o qual diz que se uma fonte de som é movida em relação ao receptor, a frequência do som no receptor é deslocada da frequência de transmissão (Kostaschuk, et al 2005), e é expressa como $F_D = 2F_S (V/c)$, onde V é a velocidade relativa entre a fonte e o receptor, c é a velocidade do som, F_D é a mudança na frequência do receptor e F_S é a frequência de transmissão do som.

A maioria dos PACD's utiliza três feixes com um determinado ângulo na vertical e igualmente espaçados na horizontal. Como a orientação dos três transdutores é conhecida, a velocidade tridimensional pode ser gerada através da combinação dos perfis de velocidade ao longo dos três feixes (Kostaschuk, et al 2005). Para cada célula o PACD utilizado na campanha forneceu valores nas componentes u (norte-sul), v (leste-oeste) e z (para cima e para baixo). Como o estuário estudado é relativamente estreito e raso, as componentes u e v foram utilizadas para obtenção da velocidade e direção, desprezando-se o movimento para cima e para baixo. Após esse procedimento, utilizando-se as informações de nível e amplitude acústica selecionou-se as células válidas (aquelas dentro da água).

A declinação magnética foi corrigida das direções. Posteriormente um diagrama das direções corrigidas foi confeccionado e a partir dele observou-se as direções de enchente e vazante, ajustando-se os dados de forma que os valores de velocidade que representam água saindo do estuário são negativos.

3.5.3 - Determinação da CSS

A CSS foi derivada a partir da conversão dos registros de turbidez por retro-espalhamento ótico (REO) e de retro-espalhamento acústico (REA) utilizando as amostras de água coletadas como referência para calibração.

Os sensores de turbidez por retro-espalhamento ótico apresentam uma resposta direta e linear com a CSS até concentrações de várias centenas de mg.L^{-1} (Kinneke &

Sternberg, 1992). A calibração do sensor consiste em obter medições sinóticas com a obtenção de amostras de água, a partir das quais a CSS pode ser determinada através de método gravimétrico. Este procedimento pode ser feito em laboratório ou *in situ*, desde que se obtenha uma variação razoável de CSS (Schettini et al., 2010). A análise gravimétrica consiste na filtragem de um volume determinado em um filtro de 0,45 μ m de poro, com massa pré-determinada. A razão da diferença do peso seco do filtro pós e pré filtragem pelo volume filtrado fornece a CSS. A Figura 2A apresenta as relações obtidas entre a turbidez mensurada pelos sensores de turbidez utilizados (SeaPoint @ RBR XR-420 – fundeio e JFE-Alec – perfis). A conversão da turbidez para CSS a partir do CTD RBR ($r^2=0,986$) foi obtida por

$$CSS(REO_{RBR}) = 18,672 + 2,039REO_{RBR} \quad (1)$$

E a conversão da turbidez para CSS a partir do CTD JFE-Alec ($r^2=0,999$) foi obtida por

$$CSS(REO_{JFE}) = 18,672 + 2,039REO_{JFE} \quad (2)$$

Os PACDs comerciais determinam a velocidade de corrente através do efeito Doppler mensurado a partir do eco produzido por partículas em suspensão na água, as quais se pressupõem representam a velocidade de deslocamento da água. A intensidade acústica é registrada nos instrumentos como medida da qualidade dos dados de correntes, sendo diretamente proporcional com a concentração de partículas refletoras. Desta forma, PACDs comerciais vem sendo utilizados não somente para obtenção de dados de correntes, mas também para medições da distribuição vertical de CSS (Lohrmann 2001; Alvarez & Jones, 2002; Gartner, 2004; Kostaschuk et al, 2005; Schettini & Zaleski, 2006; Zaleski & Schettini, 2006; Schettini et al., 2010)

O sinal de intensidade acústica registrado pelo PACD, em unidades de contagens (*counts*), deve primeiramente ser convertido em retro-espalhamento acústico (REA), em decibéis (dB), aplicando-se a equação do SONAR (Deines 1999; Lohrmann 2001; Gartner 2004)

$$REA = K_c(E - E_r) + 20 \log_{10}(R) + 2\alpha_w(R) + RA \quad (3)$$

onde E é a intensidade acústica registrada pelo instrumento, E_r é o ruído basal do instrumento, obtido quando este opera fora da água, K_c é um fator de escala para conversão para dB. O segundo e o terceiro termos do lado direito corrigem a perda de transmissão em duas vias: o segundo pelo espalhamento, o terceiro pela absorção. R é a distância a partir do transdutor. α_w é o coeficiente de absorção da água. RA é a resistência do alvo, que é função da densidade, tamanho e concentração das partículas. A RA é normalmente desconsiderada, pois é importante somente para partículas muito pequenas ou para concentrações muito elevadas (Gartner, 2004).

Os dados de REA obtidos pelo PACD foram então cruzados com os dados CSS determinados a partir do REO_{JFE} , abrangendo toda a coluna de água (Figura 3.2). A curva de calibração obtida ($r^2=0,958$) é descrita por

$$CSS(REA) = 0,559REA^2 - 5,578REA + 170,5 \quad (4)$$

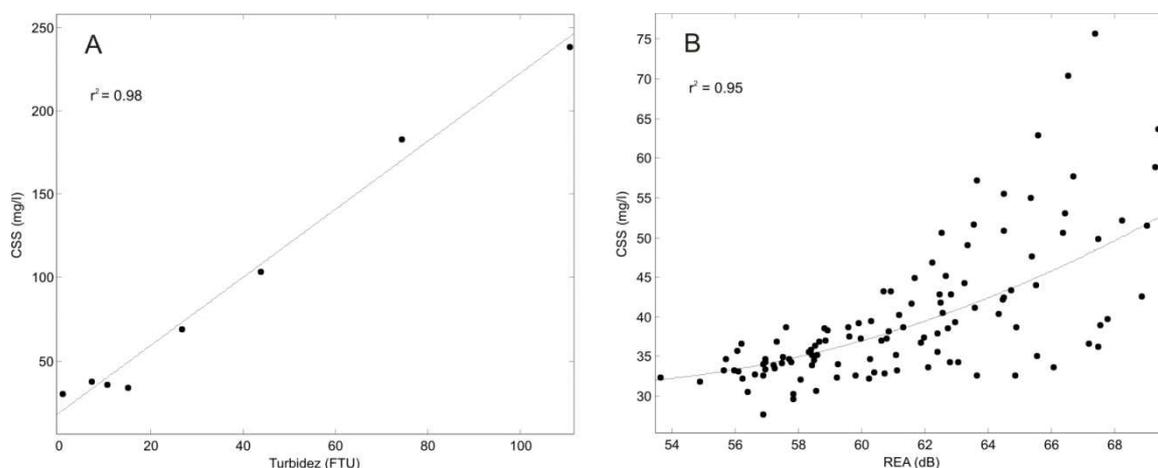


Figura 3.2. Calibração de REO para CSS e REA para REO para o estuário do rio Mampituba.

3.5.4 - Decomposição do transporte advectivo de sal e sedimentos em suspensão

O esquema de decomposição do transporte advectivo aplicado para o estuário do rio Mampituba é descrito por Miranda et al. (2002), baseado nos trabalhos de Bowden (1963), Fisher (1976), Hunkins (1981), Dyer (1974) e Kjerfve (1986). Considerando-se a homogeneidade lateral do estuário, a velocidade longitudinal em um dado instante, pode ser descrita por:

$$u(x, z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, z) + u'(x, z, t) \quad (5)$$

onde u_a é dada pela media vertical e temporal dos dados de velocidade de corrente, expresso por $\langle \bar{u} \rangle$. A operação de media na vertical é representada pela barra superior, e a media no tempo pelo sinal de maior/menor, as quais devem ser realizadas para um ou mais ciclos de maré. O termo u_t representa a variação instatanea da media na profundidade em um ciclo de maré em relação a u_a , dada por $u_t = \bar{u} - u_a$. O termo u_s diz respeito a variação da media da velocidade no tempo ao longo da coluna de água, e é dado por $u_s = \langle u \rangle - u_a$. O termo u' é a velocidade residual, que pode ser atribuída a processos físicos de pequena escala, é dado por $u' = u - u_a - u_t - u_s$. A decomposição para a salinidade é se dá da mesma maneira.

A altura da coluna de água é dada por h que varia com a maré e pode ser decomposto ao longo de um ciclo de maré como

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t) \quad (6)$$

onde h_a é a media da profundidade no tempo, dada por $\langle h \rangle$, e h_t é a variação da coluna de água em um ciclo de maré. O transporte de sal médio T_s para um ou mais ciclos de maré é dado por

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \rho u S \, dz \, dt \quad (7)$$

ρ é a densidade da água e S é a salinidade. A substituição da Eq. 5 é similar para a salinidade na Eq. 7 produzindo 32 termos, dos quais apenas 7 tem significado físico. De forma que, o transporte de sal médio total para um ou mais ciclos de maré pode ser escrito como

$$T_s = \overline{\rho}(u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \overline{u_s S_s} + \dots) \quad (8)$$

$$\dots + h_a \langle u' S' \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle$$

Onde, conforme Miranda et al. (2002), os sete termos podem ser descritos como (A) descarga fluvial, (B) deriva de Stokes, (C) correlação de maré, (D) circulação gravitacional, (E) bombeamento de maré, (F) cisalhamento de maré, e (G) transporte residual. O transporte de sedimentos em suspensão T_c pode ser decomposto da mesma forma da salinidade, eliminando-se a densidade e verificando a concentração de sedimentos em suspensão para que estejam com unidades concordantes com as da velocidade. Neste trabalho foi convencionado que os valores de velocidades negativos representam água saindo do estuário, relação esta mantida para o cálculo do transporte.

3.6 – RESULTADOS

A vazão do rio Mampituba na estação fluviométrica de Praia Grande entre os anos de 1996 e 2006 não apresenta nenhuma tendência clara de períodos de chuva ou estiagem, podendo ocorrer picos de vazão em qualquer época do ano, similarmente o que se observada nos rios Itajaí-açu (Schettini, 2002) e rio Araranguá (D'Aquino, et al. no prelo). A vazão média de longo termo (Q_{mlt}) calculada foi de $18,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com máxima nos últimos 10 anos de $910 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. As vazões de permanência Q_{90} , Q_{50} e Q_{10} para a série consistida, para 20 classes, foram 2,19, 11 e $41,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Na primeira campanha hidrográfica realizada em maio de 2006 a vazão média do mês foi de $4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, um pouco acima da vazão de permanência Q_{90} . No dia da coleta (12 de maio) a vazão foi de 9 e no dia anterior de $9,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A Figura 3.3 apresenta as séries temporais dos dados de nível de água observado e as decomposições do sinal para FSubM, FM e FSupM. As oscilações do nível da água local são fortemente moduladas por processos em FSubM, os quais contabilizaram 63,3% da variância do nível da água. A variabilidade associada com oscilações astronômicas contabilizou 31,7%, enquanto que a variabilidade em alta frequência contabilizou 4,6% da variância.

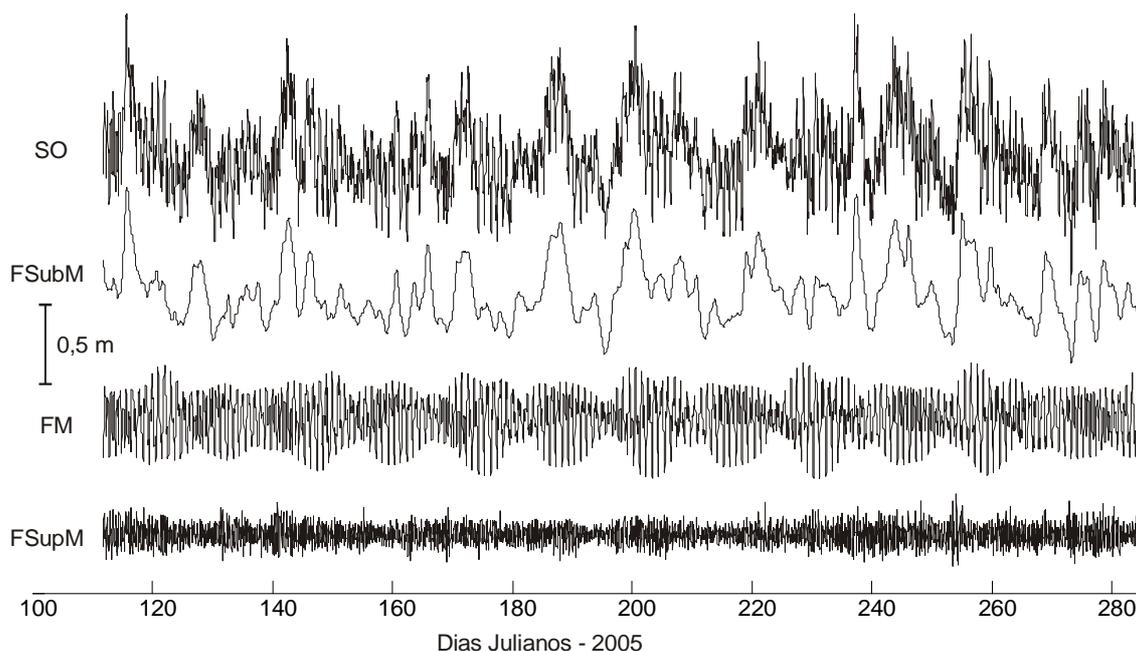


Figura 3.3. Series temporais do nível de água observado (SO), e as decomposições em freqüências sub-mareal (FSubM), maré (FM) e supra-mareal (FSupM).

A maré astronômica local foi caracterizada com 17 constituintes harmônicas de maré (Tabela 3.1), é de natureza mista com predominância semi-diurna, com razão de forma de 1,2. A altura média dos períodos de sizígia obtidos a partir da previsão apresentada na Figura 3.3 é de 0,58 m, com a máxima altura de sizígia de 0,71 m. As alturas de maré durante os períodos de quadratura ficaram na ordem de 0,20 m. Durante o período representado na Figura 3.2 ocorreram diversos eventos em FSubM com variação de nível maior do que 0,5 m, sendo que a maior oscilação foi registrada próximo do dia 200, cuja variação total foi de 0,92 m. As oscilações em FSupM apresentara uma variação média da ordem de 0,15 m.

Tabela 3.1. Constituintes harmônicos de maré para o baixo estuário do rio Mampituba.

Constituinte	Frequência (ciclos por hora)	Amplitude (cm)	Fase (graus)
Q1	0.037219	3,1	89
O1	0.038731	10,7	117
K1	0.041781	6,0	184
N2	0.078999	3,5	273
M2	0.080511	6,6	167
S2	0.083333	7,0	158
MO3	0.119242	0,4	96
M3	0.120767	0,8	286
MK3	0.122292	0,3	136
MN4	0.159511	1,8	113
M4	0.161023	4,0	162
MS4	0.163845	1,7	246
2MK5	0.202804	1,1	127
2SK5	0.208447	1,3	43
2MN6	0.240022	0,8	181
M6	0.241534	1,1	214
2MS6	0.244356	1,2	264

A Figura 3.4 mostra a distribuição longitudinal da salinidade no estuário do rio Mampituba durante as campanhas realizadas em 2006 e 2008. Observa-se que em 2006 (Figura 3.4A) a cunha salina estendia-se estuário acima até cerca de 34 km, e em 2008 (Figura 3.4B) a intrusão salina apresentava-se restrita aos primeiros 5 km. Entretanto, em ambas as condições a estrutura vertical apresenta elevado grau de estratificação, com uma variação de mais de 5 unidades de sal na coluna de água.

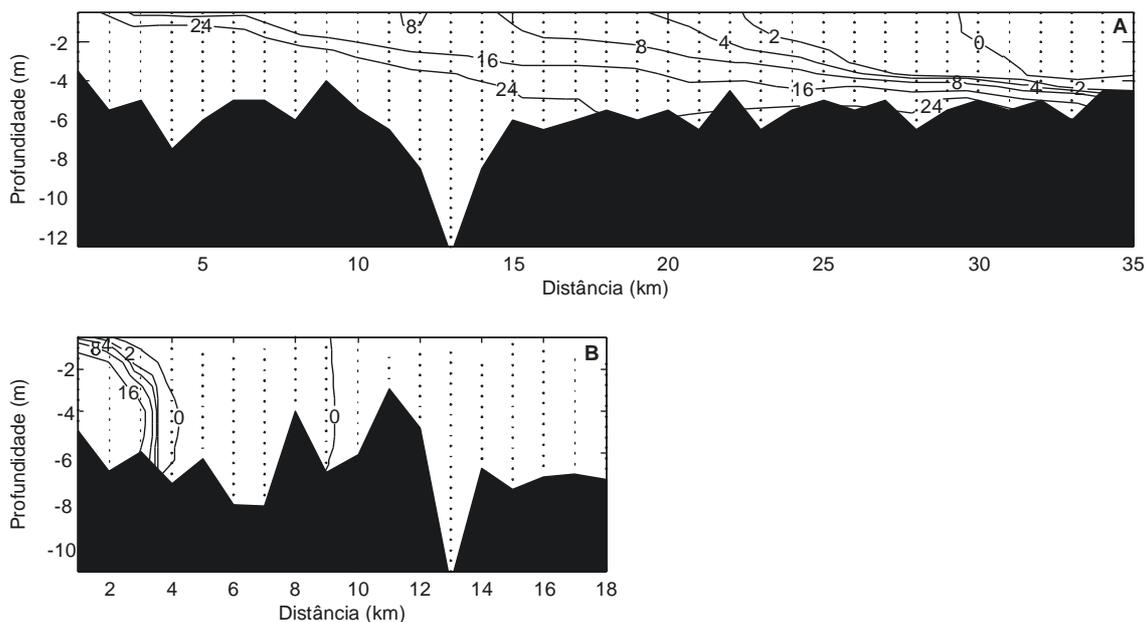


Figura 3.4. Distribuição longitudinal vertical da salinidade no estuário do rio Mampituba nas campanhas de 2006 (A) e 2008 (B).

A Figura 3.5 apresenta as séries temporais de nível de água, velocidade de corrente média da coluna de água, salinidade e CSS. A temperatura (não apresentada graficamente) de superfície e fundo apresentou uma variação em torno de um grau centígrado nos dois ciclos de maré registrados, com mínimo de 18,4 e máximo de 19,5 °C ambos no fundo. O nível de água apresentou duas baixamares e duas preamares durante o experimento, com a maior elevação registrada no início do período (0,9 m) e média de 0,44 m. A variação temporal indica uma tendência a assimetria de enchente (Figura 3.5A). Na Figura 3.5B observa-se a velocidade de correntes média na coluna de água ao longo do período de experimento. O valor médio de correntes para o período foi de $0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ no sentido de vazante. Os valores máximos para enchente e vazante foram $0,6$ e $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. A salinidade de superfície apresentou valor máximo de 2,7 após as horas iniciais de experimento, reduzindo para próximo de zero (Figura 3.5C). A salinidade de fundo apresentou grande amplitude de variação, com valores médio, máximo e mínimo de 16, 24,8 e 0,3 respectivamente. A Figura 3.5D mostra salinidades mais baixas nas baixamares indicando que cunha salina foi praticamente expulsa do estuário no período estudado. A concentração de sedimentos em suspensão (Figura 3.5E) apresentou valores variando entre 34 e $255 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, com média de $89 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. A linha contínua apresenta os valores de CSS próximo ao fundo obtidos através do

sensor de turbidez ótico (REO), e alinha pontilhada apresenta os valores de CSS médio da coluna de água obtidos pelo retro-espalhamento acústico (REA). Ambos os dados de CSS não apresentam nenhuma relação óbvia com a maré, correntes ou salinidade.

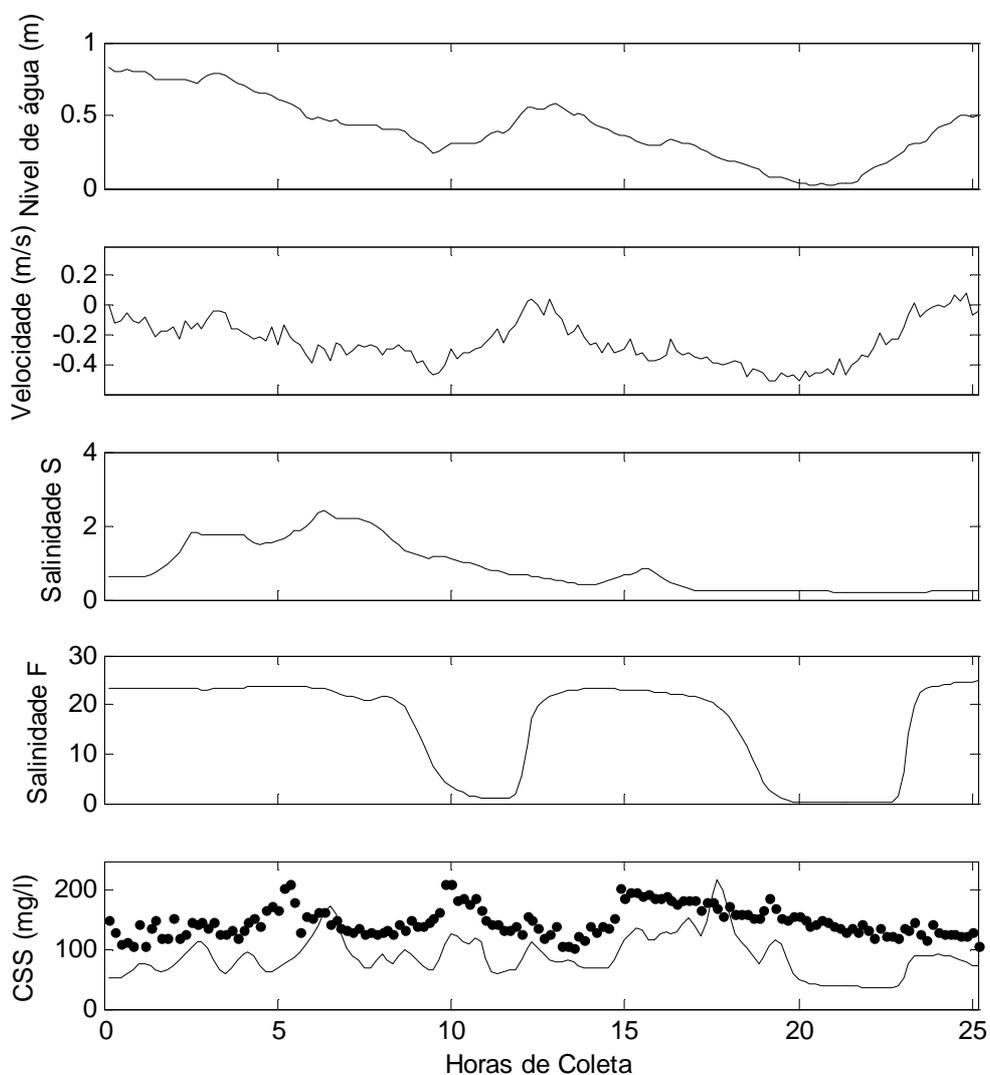


Figura 3.5. Variação temporal do nível de água (A), da salinidade de superfície (B) e de fundo (C), da velocidade média de correntes (D) e, variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão próximo ao fundo (linha contínua) e média na coluna de água (linha pontilhada) (E) no o estuário do rio Mampituba durante o período de 17 a 18 de maio de 2008.

A Figura 3.6 apresenta a distribuição temporal e vertical da velocidade de corrente e de CSS obtidos através do PACD, juntamente com a variação temporal do nível de água para melhor visualização. As correntes apresentam um padrão bidirecional

na maior parte do período, no entanto, nos momentos de estufa de maré vazante, toda coluna de água fica unidirecional (com água saindo do estuário).

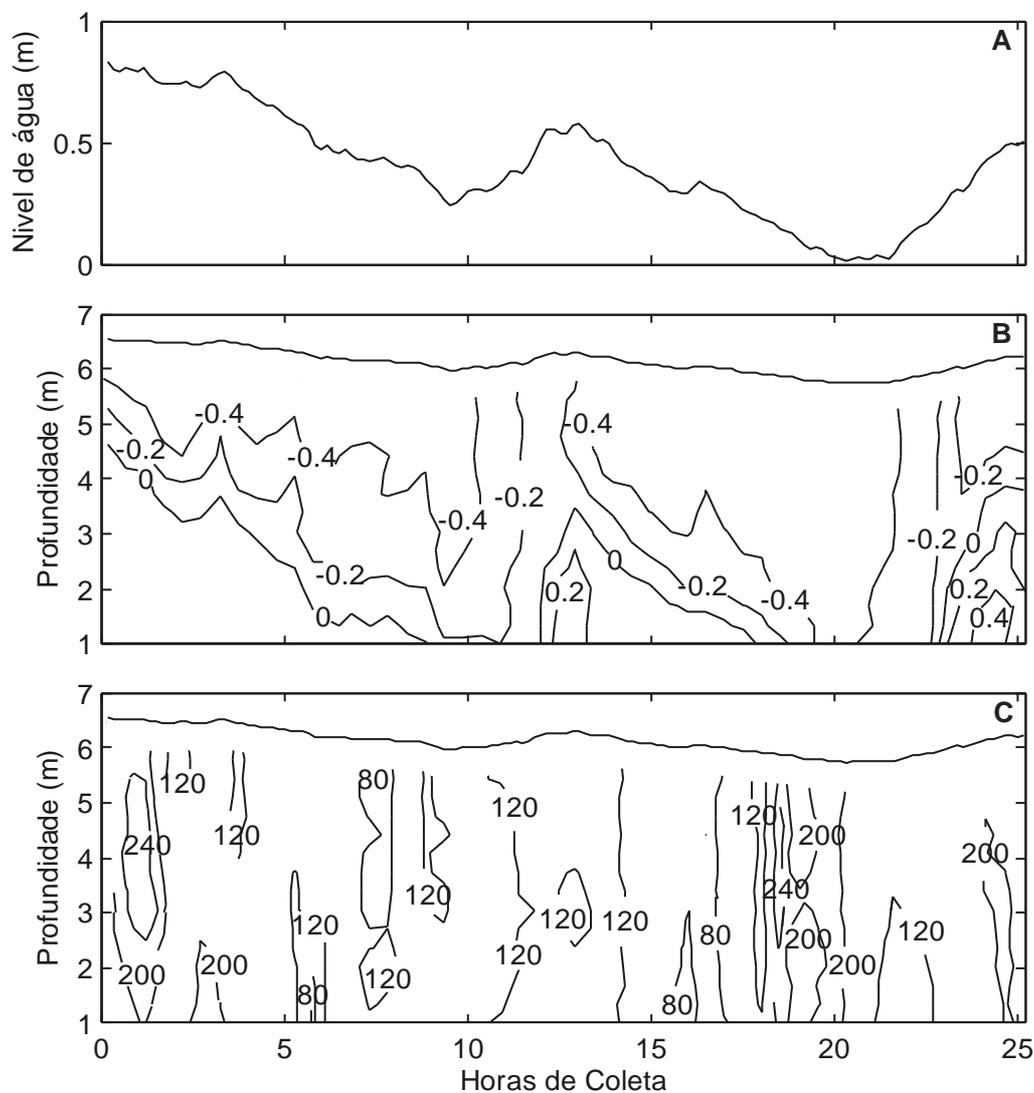


Figura 3.6. Distribuição vertical e temporal da velocidade de correntes (B) e concentração de sedimentos em suspensão (C) no estuário do rio Mampituba.

Os períodos de enchente são mais curtos do que os de vazante, com maiores velocidade de corrente, indicando assimetria de enchente nas marés (Figura 3.6A e B). Os maiores valores de CSS foram observados logo no início do experimento, aproximadamente no centro da coluna de água e, com aproximadamente 18 horas de campanha (Figura 3.6C), quase a mesma profundidade, pouco antes da estufa de maré vazante, quando também ocorreram as correntes de vazante mais intensas próximo do fundo. O comportamento da maré apresenta-se como mista entre uma onda progressiva

e estacionária (Figura 3.7) de forma que as maiores salinidades ocorrem quase no pico da maré mais elevada (Figura 3.6A e B).

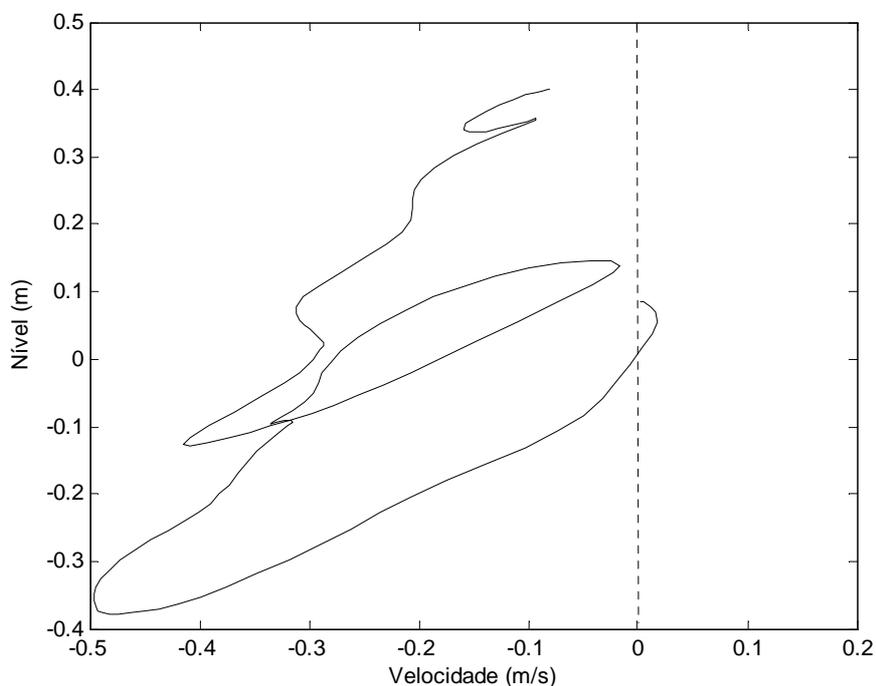


Figura 3.7. Diagrama do nível pela velocidade para o estuário do rio Mampituba.

Conforme proposto por Hanseý & Rattray (1966), um estuário pode ser classificado dinamicamente a partir do conhecimento das velocidades na coluna de água e da salinidade na superfície e no fundo, calculando os parâmetros adimensionais de circulação e estratificação. O parâmetro de circulação é obtido pela razão entre a velocidade superficial média ao longo de um ou mais ciclos de maré pela velocidade média vertical pelo mesmo período. O parâmetro de estratificação é obtido pela razão entre a diferença das salinidades médias temporais de fundo e superfície pela salinidade média temporal da coluna de água. Os dois parâmetros são inseridos no diagrama de circulação & estratificação (e.g. Miranda et al., 2002), a partir de onde a condição dinâmica do estuário é classificada. A Figura 3.8 mostra a posição do estuário do rio Mampituba no diagrama, onde se enquadra como tipo cunha salina.

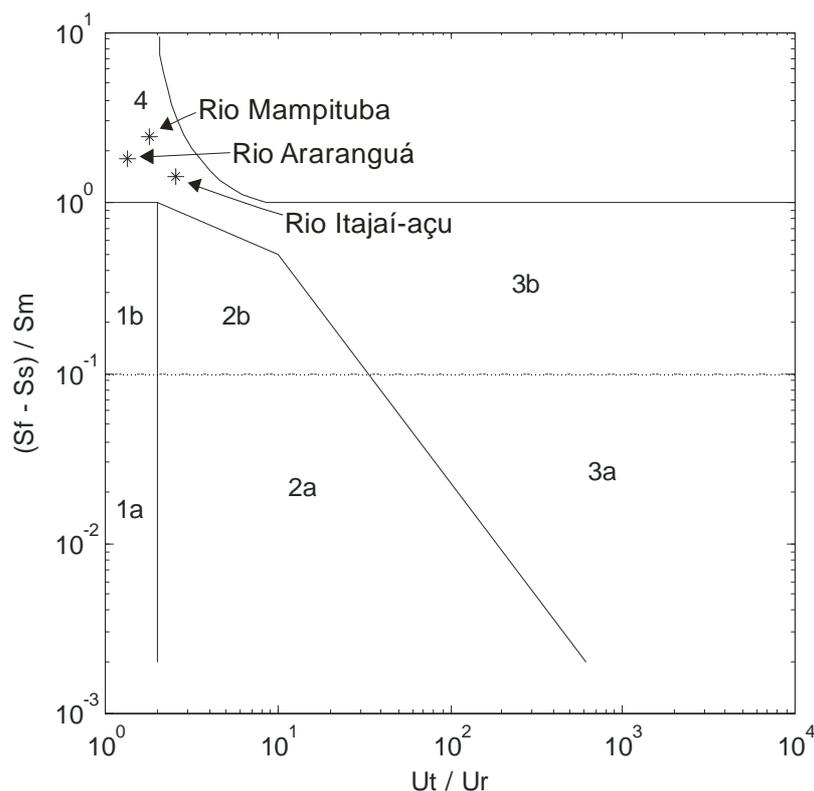


Figura 3.8. Diagrama de classificação de Hansen Rattray para os estuários do rio Mampituba durante a campanha de 25 h de maio de 2008, do rio Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e para o rio Itajaí-açu (Schettini, 2002).

O transporte de sal resultante foi de $1,11 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ no sentido estuário afora. As parcelas do transporte de sal mais significativas foram, respectivamente, a descarga fluvial (A), a circulação gravitacional (D), a correlação (C) e o bombeamento (E) de maré (Tabela 2). A componente da descarga fluvial foi responsável por 98% do transporte de sal para fora do estuário, enquanto o transporte estuário adentro teve participação de 51,5% da circulação gravitacional, 26,4% da correlação de maré e 19% do bombeamento da maré. A Tabela 3.2 apresenta o cálculo do transporte de material particulado em suspensão obtido através de medições ópticas e acústicas. Em ambos a descarga fluvial foi a componente mais importante, duas ordens de grandeza maior do que as demais que foram significativas. Uma das diferenças entre eles ocorreu nas parcelas referentes a correlação de maré e a circulação gravitacional, onde o cálculo através do MPS acústico apresentou maior importância, enquanto o MPS óptico foi a correlação de maré. Além disso, o transporte de Stokes e a correlação de maré apresentaram sentido estuário afora no MPS óptico. O transporte resultante para ambos foi estuário a fora, com a mesma ordem de grandeza, sendo aproximadamente 121 g. m^{-1}

$^1.s^{-1}$, para o MPS óptico e $149 g \cdot m^{-1}.s^{-1}$ para o acústico. A descarga fluvial representou 80% do transporte estuário a fora quando consideradas as concentrações de MPS óptico, e 98 % quando consideradas as concentrações acústicas.

Tabela 3.2. Parcelas do transporte de sal, material particulado em suspensão (MPS) e material particulado em suspensão calculado pelo método acústico (MPS AC) para o estuário do rio Mampituba nas 25 horas de campanha entre os dias 17 e 18 de maio de 2008.

Componentes	Transporte de Sal ($kg \cdot m^{-1}.s^{-1}$)	Transporte de MPS * ($g \cdot m^{-1}.s^{-1}$)	Transporte de MPS AC* ($g \cdot m^{-1}.s^{-1}$)
A	-11,47	-98.63	-152.94
B	0,22	-1.66	1.96
C	2,79	-18.00	0.13
D	5,44	0.82	5.12
E	2,11	-4.88	-3.71
F	-0,05	0.31	0.17
G	-0,17	0.47	-0.24
Somatório	-1,11	-121.58	-149.51
Resultante	-0,96	-121.53	-149.49

3.7 – DISCUSSÃO

A variabilidade do nível da água na região costeira ao estuário apresenta uma forte componente não-astronômica, e uma significativa diminuição da altura da maré astronômica em relação às condições observadas na porção mais setentrional do estado de Santa Catarina. Considerando registros obtidos no baixo estuário do Rio Itajaí-Açu (e.g. Schettini, 2002), localizado cerca de 350 km ao norte, observa-se uma diminuição da altura da maré de sizígia em 40%, de cerca de 1 m para 0,6 m. Entretanto, considerando somente o principal constituinte harmônico semi-diurno M_2 , a diminuição é de 23,2 para 6,6 cm (70%). Este fenômeno é explicado pela presença de um ponto anfidrômico para o M_2 localizado próximo a costa justo defronte a região do estuário do Mampituba (Palma et al., 2004). A diminuição da componente astronômica permite o aumento relativo do papel da forçante meteorológica no nível da água. No litoral centro-

norte de Santa Catarina os fenômenos meteorológicos são responsáveis por 30% da variância do nível da água (Truccolo et al., 2006), embora as variações do nível sejam da mesma ordem de magnitude.

A distribuição espacial de salinidade é um indicador da interação dinâmica entre as forças produzidas pela descarga fluvial, estuário afora, e pela maré, tanto para fora quanto para dentro, produzindo o gradiente horizontal da densidade dito baroclínico. Em termos conceituais, uma situação altamente estratificada é indicadora de um predomínio fluvial sobre os demais, com pouca interação entre a massa de água doce e salgada. A variabilidade observada da cunha salina no estuário do rio Mampituba foi significativa, variando de 5 a 35 km estuário acima, certamente em função do ajuste hidráulico forçado pela descarga fluvial. Utilizando as vazões de permanência como referência podemos supor que durante a campanha de 2008 temos uma vazão bastante mais intensa do que na campanha de 2006, quando a cunha alcançou uma distância 7 vezes maior, com valores entre 18,6 (Q_{mlt}) e 41,7 $m^3.s^{-1}$ (Q_{10}).

A relação entre a razão de fluxo (R) e o prisma de maré (P) estabelece a importância relativa entre as forçantes de maré e descarga fluvial (Miranda et al., 2002):

$$R = Q_{mlt} \times T \quad (9)$$

$$P = h \times A_s \quad (10)$$

onde T é o período de um ciclo de maré, h é a altura da maré e A_s a área superficial do estuário. No estuário do rio Mampituba a razão R/P foi igual a 1,1 indicando contribuições praticamente equilibradas entre as forças de maré e descarga fluvial. Segundo Dyer (1997) um estuário é classificado como altamente estratificado quando a razão de fluxo é superior a unidade. O número de Richardson de camada (Ri_L) fornece uma comparação entre as forças estabilizadoras da estratificação e a fricção vertical que produz mistura e homogeneização:

$$Ri_L = \frac{gH\Delta S}{u^2} \quad (11)$$

onde g é gravidade, H a profundidade local, ΔS a diferença entre a salinidade de fundo e superfície e u a velocidade média na coluna de água integrada no tempo em um ciclo de

maré. Quando $Ri_L < 1/4$ os efeitos friccionais prevalecem causando mistura, enquanto que para $Ri_L > 1/4$ a estratificação é estável (Dyer, 1997; Miranda et al., 2002). No presente caso, Ri_L foi em torno de 1 indicando uma maior atuação das forças estabilizadoras da coluna de água, que mantem a estratificação.

A circulação gravitacional apresentou como principal mecanismo atuante no transporte de sedimentos em suspensão, representando 83% do transporte total. A hidrodinâmica do estuário do rio Mampituba responde como um estuário altamente estratificado, dominado pelo rio. O transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Itajaí-açu também é principalmente devido à circulação gravitacional, a qual contabiliza com 55% do transporte (Schettini et al, 2006). O estuário do rio Mampituba responde de forma bastante similar, porém em menor escala. O transporte de sal também é dominado pela circulação gravitacional em ambos os estuários, com participação de 61% no estuário do rio Itajaí-açu (Schettini et al, 2006) e 51% no Mampituba.

O estuário do rio Mampituba, como os outros estuários geomorfologicamente similares na costa de Santa Catarina, tem sua hidrodinâmica respondendo primeiramente a força fluvial. Assim como o rio Araranguá (D'Aquino et al, no prelo), o rio Mampituba por ser comparado com o estuário do Rio Itajaí-Açu quanto a sua condição hidrodinâmica e ao transporte de sedimentos em suspensão. A Figura 8 apresenta a situação do estuário do rio Mampituba no diagrama de classificação de Hansen & Rattray (1966), comparado com os estuários dos rios Araranguá e Itajaí-Açu. Os três estuários enquadram-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).

Segundo Schettini & Toldo (2006), o funcionamento do estuário do rio Itajaí-açu distingue-se em dois modos: um modo marinho, quando sob condições de baixa vazão, o estuário se torna um importador de sedimentos em suspensão, e um modo fluvial quando o estuário apresenta condições de alta vazão, tornando-se um exportador de sedimentos em suspensão. Contudo, a altura de maré é consideravelmente menor na região sul do estado. Assim, ainda que haja a similaridade da modulação do transporte de sedimentos finos, o modo marinho será um papel menor. Por outro lado, oscilações do nível do mar em baixa frequência causadas por eventos meteorológicos podem apresentar papel importante, como observado pela tendência geral do nível da água diminuir ao longo de toda a campanha.

3.8 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sr. José Carlos pelo apoio logístico durante as campanhas. 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 do CNPq. CAFS é bolsista do CNPq 306217/2007-4.

3.9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, L.G. & Jones, S.E. 2002. Factors influencing suspended sediment fluxes in the Upper Gulf of California. *Estuar. Coast. Shelf Sci*, 54, 747-759.

D'Aquino, C.A.; Schettini, C.A.F & Pereira Filho, J. Fluvial modulation of salt transport in a highly stratified estuary. *ACEITO. Braz. j. oceanogr.*

D'Aquino, C.A.; Schettini, C.A.F; Barreto, G.A.M. & Andrade Neto, J.S. 2008. Hidrodinâmica do Estuário do rio Mampituba, SC. In: Anais, Simpósio Brasileiro de Oceanografia, IO-USP, São Paulo. Mídia digital.

Deines, K.L. 1999. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. In: *Proceedings of the IEEE Sixth Working conference on Current Measurements, San Diego, CA, 13-16 September 1999*, p 249-253.

Dyer, K.R. 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: *Physical Processes in Estuaries*. J. DRONKERS & W.V. LEUSSEN (Eds). Spring-Verlag, New York, p: 295-310.

Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: PERILLO, G.M.E. (Ed.) *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries: Developments in Sedimentology*. New York, Elsevier Science B.V., pp. 423–449.

Fairbridge, R.W. 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E. & CATO, I. (Eds.). *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. New York, John Wiley and Sons, pp.1-35.

Figueiredo, S. A. 2005. Sedimentologia e suas implicações na morfodinâmica das praias arenosas adjacentes às desembocaduras lagunares e fluviais as Costa do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. FURG. 177p.

Gartner, J.W. 2004. Estimating suspended solid concentrations from backscatter intensity measured by Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Mar. Geol.*, 211:169-187.

Guerra, A. J. T. 1997. *Novo dicionário geológico e geomorfológico*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 652p.

Inácio, L.G. 2004. Bacia do Mampituba. Disponível em: www.clicengenharia.com.br/praiagrande/historias/raulino_reitz_4.htm. Acessado em: abril 2009.

Kineke, G.C. & Sternberg, R.W. 1992. Measurements of high concentrated suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Mar. Geol.*, 108(3-4):253-258.

Kjerfve, B. & Mckellar, Jr., H.N. 1980. Time series measurements of estuarine material fluxes. In: *Estuarine Perspectives*. V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, p: 341-357.

Kjerfve, B.; Proehl, J.A.; Schwing, F.B.; Seim, H.E. & Marozas, M. 1982. Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: *Estuarine comparations*. V.S. Kennedy (Ed.), Academic Press, New York, p: 37-51.

Kjerfve, B. & Wolander,. 1988. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. *American Fisheries Society Symposium*, vol. 3, p: 26-33

Knoppers, B.A., Opitz, S.S., Souza, M.P. & Miguez, C.F. 1984. The spatial distribution of particulate organic matter and some physical and chemical water properties in Conceição Lagoon; Santa Catarina, Brazil (July 19, 1982). *Braz. arch. biol. technol.*, 27 (1): 59-77.

Kostaschuk, R.; Best, J.; Villard, P.; Peakall, J. & Franklin, M. 2005. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68, 25-37.

Larrarte, F.; Bardiaux, J.B.; Battaglia, P. & Joannis, C. 2008. Acoustical Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters. *Flow meas.instrum.*, 19: 261-267.

Lohrmann, A. 2001. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. Nortek AS, Rud, Norway, Nortek Technical Note No 03, 5 p.

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.

Nichols, M.M., 1986. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. A.J. Mehta (Ed.), Springer-Verlag, New York, vol. 14, p: 5-42.

Palma, E.D.; Matano, R.P.; Piola, A.R. 2004. A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: barotropic response to tidal and wind forcing. *J. Geophys. Res.* 109:1:17 doi 10.1029/2004JC002315.

Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S. 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.*, 28, 929-937.

Pugh, D.T. 1987. Tides, surges and mean sea-level. New York: John Wiley and Sons.

Reginato, P.A.R., 1996. Geologia e Evolução Holocênica da região Norte da Planície Costeira do Sul. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências da UFRGS; Porto Alegre.

Schettini, C.A.F. 2002. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. *Rev. Bras. Rec. Hidric.*, 7(1):123-142.

Schettini, C.A., Carvalho, J.L.B. & Jabor, P. 1996. Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State – Southern Brazil. Workshop on Comparative Studies of Temperate Estuaries, Bahia Blanca. Proceedings, IADO, p29-32.

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.

Schettini, C.A.F. & Zaleski, A. R. 2006. A Utilização de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Doppler na Determinação do Material Particulado em Suspensão na Água: Aplicações. *Revista Rev. Bras. Rec. Hidric.*, 11: 201-208.

Schettini, C.A.F.; Almeida, D.C.; Siegle, E.; Alencar, A.C.B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. *Geo-Marine Letters*, 30:47-62.

Schettini, C.A.F.; Ricklefs, K.; Truccolo, E. C.; Golbig, Volker. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. *Ocean Dynamics*, Germany, v. 56, p. 308-319.

Schettini, C.A.F. ; Truccolo, E.C.; Resgalla Jr, C.; Rörig, L.R. ; Kuroshima, K. N. 2003. O sistema estuarino da baía da Babitonga.. In: Joachim L.W. Knie. (Org.). Atlas ambiental da região de Joinville: complexo hídrico da baía da Babitonga. (2 ed). Florianópolis: FATMA/GTZ, v. 1, p.113-118.

Schubel, J.R. & Carter, H.H. 1984. Fine-grained suspended sediment. In: KENNEDY, V.S. (Ed.). The estuary as a filter. Orlando, Academic Press, INC., pp.81-105.

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. - 2002 - Relatório Anual sobre a situação dos Recursos Hídricos no estado do Rio Grande do Sul. Região Hidrográfica das bacias Litorâneas. Porto Alegre, RS.

Siegle, E. & Asp, N.E. 2007. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55(2):109-120.

Siegle, E., Schettini, CAF & Klein, AHF. 2005. The balance between wave and river forces on inlet morphodynamics. In: *Coastal Dynamics*. Barcelona, v.1. p 4-5.

Souza, L.F. 2008. Relatório: estudo acerca da cobertura vegetal e uso do solo nas zonas ciliares dos principais corpos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Mampituba. Ministério Público do Rio Grande do Sul, Divisão de Assessoramento.

Strahler, A. N. 1952. Hypsometric analysis of erosional of topography. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63, 1117-1142.

Truccolo, E.C.; Franco, D.; Schettini, C.A.F. 2006. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *J. Coast. Res.* 39(SI):547-552.

Zaleski, A. R.; Schettini, C.A.F. 2006. Procedimentos para Calibração de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Döppler para a Determinação da Concentração de Material Particulado em Suspensão na Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 11, p. 191-200.

CAPÍTULO 4 - TRANSPORTE DE SAL E HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO TUBARÃO – SC, BRASIL.

Artigo submetido a:

REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS

Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)

Presidente da Comissão Editorial: Prof. Dr. Carlos Tucci

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal 15029

CEP 91501-970 Porto Alegre/RS - BRASIL

Fone:(51) 493.2233 / 3316.6652 - Fax:(51) 493.2233

4.1 – RESUMO

Este trabalho consiste de uma campanha oceanográfica no estuário do rio Tubarão, com o intuito de estimar o transporte de sal e caracterizar as principais forçantes físicas 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 transecto longitudinal de cerca de 33 km foi efetuado, 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 de cunha salina.

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

4.2 – ABSTRACT

This work consists of an oceanographic campaign in the Tubarão river estuary, to estimate the transport of salt and characterize the main physical forcings that control the hydrodynamics in the lower estuary. On the 3rd and May 4th was accomplished a campaign to acquire hydrographic data over two full tidal cycles (25 hours) under spring tide conditions. Speed and direction information of currents, temperature and salinity were obtained through the mooring of a PACD and two CTD's (surface and bottom). A longitudinal transect of about 33 km was made, along which were performed with CTD vertical profiles every 1 km and bottom sediments were collected every 2 Km. hydrologic and hypsometrics studies also be conducted. In general ebb currents were predominant in the estuary and had the highest intensities. The vertical distribution of salinity along the estuary showed the presence of a well-defined salt wedge that penetrated about 27 km inside the estuary. Through the decomposition of the advective salt transport mechanisms was possible to verify the river discharge and gravitational circulation as major physical mechanisms that influence the characteristics of the transport of salt in the estuary. The estuary has been classified as salt wedge type.

Key words: salt transport, hydrodynamics, estuary, Tubarão river

4.3 – 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 influencia das condicionantes 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 forçantes 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 escoar 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 dinamicamente se ajustar a dominância de determinada variável sendo que, a 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 haloclinas 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 haloclinas 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) 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).

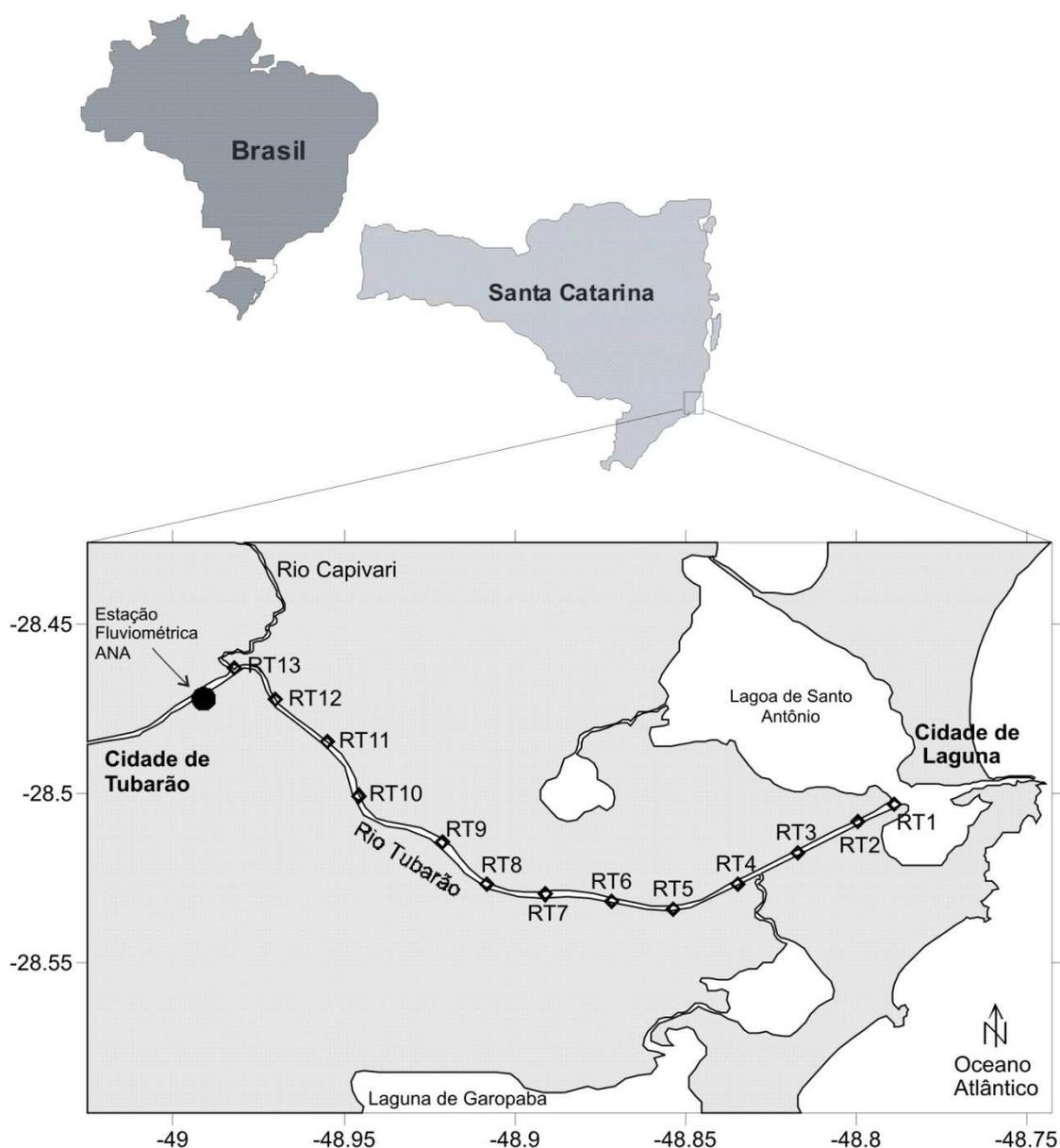


Figura 4.1. Estuário do Rio Tubarão. As estações de coleta de sedimento estão indicadas pelos losangos (◇) e a localização da estação fluviométrica (ANA) está indicada pelo círculo cheio (●).

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 regionais. Beltrame (2003) foi o primeiro a relatar e verificar características mais oceanográficas na região, porém com enfoque na atividade de cultivo de camarões. Este trabalho consiste de uma campanha oceanográfica no estuário do rio Tubarão (Figura 4.1), com o intuito de estimar o transporte de sal e caracterizar as principais forçantes físicas que controlam a hidrodinâmica no baixo estuário.

4.4 – MATERIAS E METODOS

4.3.1 - Levantamento de dados Hidrológicos

Dados históricos de vazão foram obtidos através da Agência Nacional das Águas (ANA), disponibilizados livre e eletronicamente (<http://hidroweb.ana.gov.br>), para a estação do Rio Tubarão (84580500) compreendendo o período de 1991 a 2004. Esta estação representa uma área de drenagem de 2840 km² sendo a estação mais a jusante monitorada neste rio. A análise dos dados foi realizada com auxílio do programa HIDRO (Sistema de Informações Hidrológicas da ANA, 2003) e consistiu do cálculo da vazão média de longo termo (Q_{mlt} , ou vazão média histórica), das vazões de permanência, para o período 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.

4.3.2 – Hipsometria

As informações de elevação utilizadas correspondem aos dados de altimetria por satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizados livre e eletronicamente pelo Serviço Nacional de Geólogos dos EUA (USGS/EROS). Estes dados apresentam uma resolução vertical de 1 m, com espaçamento de cerca de 90 m. O cálculo hipsométrico consiste da determinação de quanto de cada altitude compõe a bacia hidrográfica, e foi realizado no programa SURFER™ (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., (no prelo), 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 foi realizada no também no programa SURFER™ a partir da base hidrológica fornecida pela ANA.

4.3.3 - 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 fundeio de um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (PACD) da marca Nortek™ modelo Aquadopp Profiler® com frequência de trabalho de 1 MHz. A salinidade e temperatura no ponto de fundeio foram obtidas com um CTD SensorData modelo sd204 em superfície e um CTD modelo sd200 junto ao fundo. A oscilação do nível da água foi monitorada com um marégrafo de influência marca RBR modelo XR-420-TG, acoplado ao correntógrafo. Foi realizado um transecto longitudinal no estuário, que percorreu cerca de 33 Km, ao longo do qual foram efetuados perfis verticais a cada

1 km com CTD Sd200. Também foram coletadas amostras de sedimento a cada 2 km no estuário com auxílio de 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 realizada com base nas células válidas aquisitadas pelo correntógrafo, de forma que a coluna de água varia de 1 metro, acima da superfície do fundo, até os 3,5 metros, enquanto o local de fundeio 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), pipetagem (finos) e queima (matéria orgânica). Neste artigo serão apresentados os resultados dos percentuais de areia, silte e argila conforme diagrama proposto por Flemming (2000).

4.3.4 - 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 por meio da seguinte equação:

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

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 calculo 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 (baroclínico). Para indicar os processos físicos responsáveis pelo movimento estuário acima (dispersivo) e estuário abaixo (advectivo), decompondo-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.

Onde o termo 1 representa o transporte gerado pela descarga fluvial e com seu valor sempre estuário abaixo, de natureza advectiva. 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, normalmente gerencia o transporte de sal estuário acima. O termo 4 é o transporte da circulação estacionária (diferença entre a corrente de gravidade pelo componente gerado pela descarga fluvial ou residual). O resultado do cisalhamento oscilatório e o movimento gerado pelo vento e flutuações turbulentas de velocidade, com escala de tempo inferior ao período de maré, está representado no termo 5. 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.

4.3.5 - Índices estuarinos

Foram calculados os parâmetros de Circulação e Estratificação segundo proposto por Hansen & Rattray (1966). O parâmetro de circulação relaciona o a corrente de 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 pela média vertical de salinidade ($(S_f - S_s/S_m)$).

O número de Richardson de camada (Ri_L) 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 superfície e u a velocidade média na coluna de água integrada no tempo em um ciclo de maré. Quando $Ri_L < 1/4$ os efeitos friccionais prevalecem causando mistura, enquanto que para $Ri_L > 1/4$ a estratificação é estável (Dyer, 1997; Miranda et al., 2002).

O Prisma de maré (P) representa o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente, juntamente com o fluxo de água doce (R) a cada período de maré estabelece a importância relativa entre as forçantes de maré e descarga fluvial em um estuário (Miranda et al., 2002):

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

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

onde T é o período de um ciclo de maré, h é a altura da maré e A_s a área superficial do estuário. Segundo Dyer (1997) um estuário é classificado como altamente estratificado quando a razão de fluxo é superior a unidade.

4.4 – RESULTADOS

4.4.1 - 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 4.2 - estação 84580500) compreendendo o período entre 1 de outubro de 1991 a 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 $146 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Para o mês de maio (mês da coleta) a media histórica é de $181 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com valores médios máximo e mínimo de 694 e $50,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. As vazões de permanência Q_{10} , Q_{50} e Q_{90} foram 420 , $83,6$ e $29,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

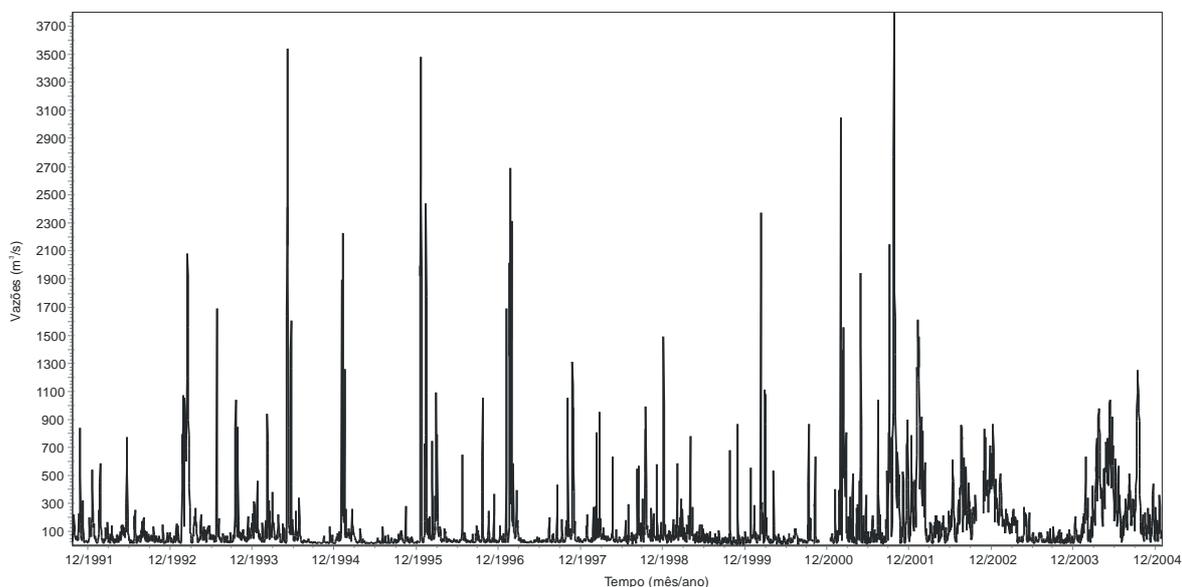


Figura 4.2. Série histórica de vazão para o rio Tubarão na estação (84580500), período de 1 de outubro de 1991 a 1 de dezembro de 2004.

4.4.2 - Hipsometria

A área da bacia hidrográfica do rio Tubarão, seus principais afluentes e as alturas da bacia, bem como a hipsometria da mesma são apresentadas na Figura 4.3. A bacia do rio Tubarão apresenta 77,4% de sua 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 1766 m incluída no 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.

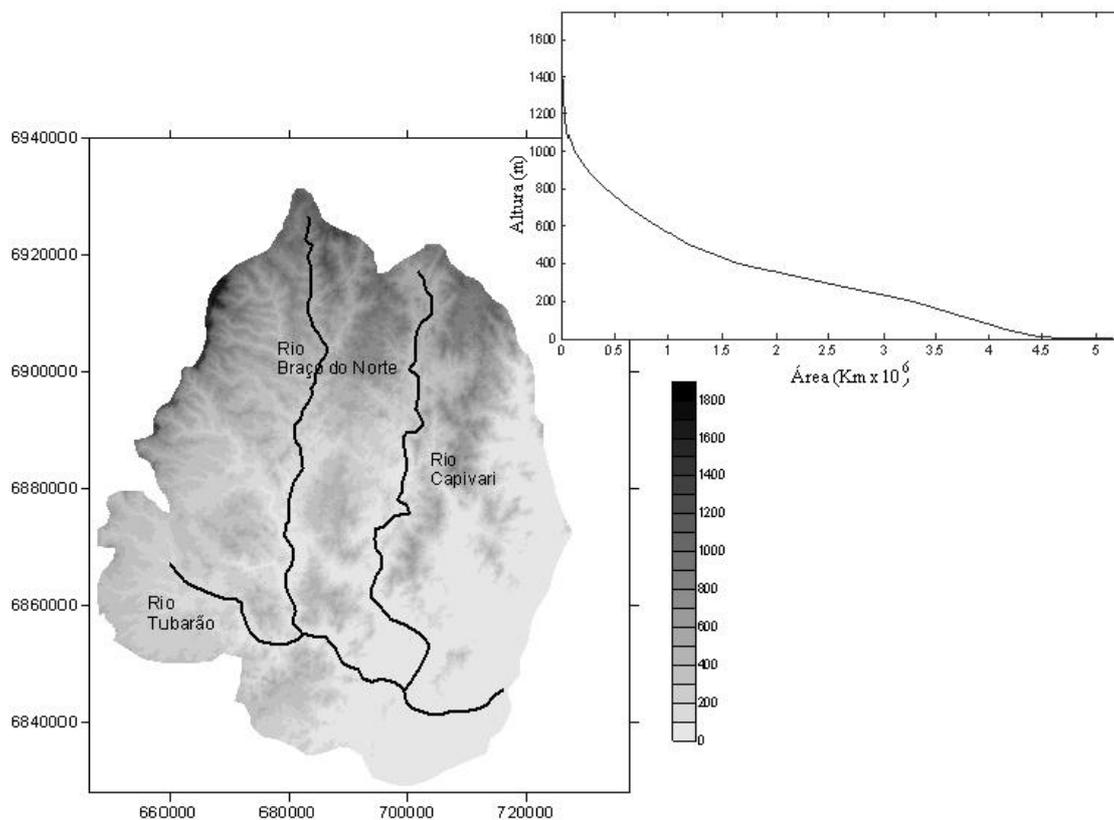


Figura 4.3. Altimetria do bacia hidrográfica do rio Tubarão e curva hipsométrica.

4.4.3 - Oceanografia

Durante o experimento de 25 horas foram observados dois períodos de enchente e dois de vazante. A Figura 4.4 apresenta a variação temporal e vertical da velocidade de correntes, temporal da salinidade e temperatura de superfície e de fundo. O nível de água no estuário foi mais alto no primeiro período de enchente, mostrando um padrão geral de decréscimo ao longo do tempo. Nas primeiras horas de observação o estuário apresentou o período de enchente mais intenso, com correntes de enchente ocupando toda coluna de água juntamente com o maior nível observado. O segundo período de enchente não foi tão intensa, porém foi seguido por forte vazante, ainda com o nível em decréscimo, fato que favoreceu os valores de velocidade de vazante mais intensos observados na 19 hora de experimento. O nível apresentou leve assimetria de enchente, levando maior tempo para vazante do que para enchente (Figura 4.4A).

Na Figura 4.4B percebe-se a estratificação de salinidade presente em todo o período. A salinidade média de superfície foi de 6,7 enquanto a de fundo foi de 33,4 indicando um forte gradiente de densidade vertical, acentuado pela temperatura. A qual

variou na média cerca de 1°C entre superfície e fundo (Figura 4.4C). No momento em que o estuário apresentou seu maior nível de água, observa-se as maiores variações na salinidade e temperatura de fundo, a maior velocidade de enchente próximo ao fundo.

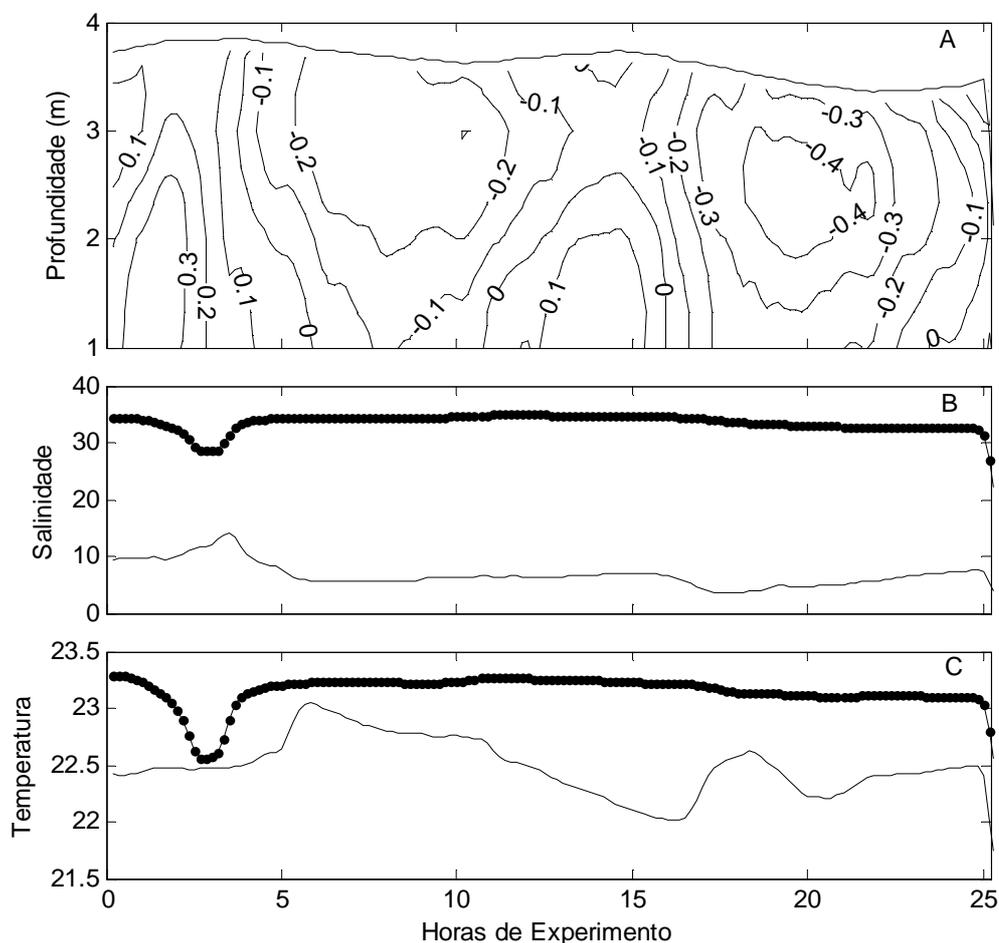


Figura 4.4: A - distribuição vertical e temporal das correntes e variação temporal do nível de água. B – variação temporal da salinidade de superfície e fundo. C – variação temporal da temperatura de superfície e fundo (linha com pontos). Estuário do rio Tubarão, campanha 25 entre os dias 3 e 4 de maio de 2007.

A Tabela 4.1 mostra os valores médios, máximos e mínimos de correntes, salinidade e temperatura para superfície e fundo, e valores máximos de velocidade enchente e vazante durante as 25 horas de experimento. A 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 as máxima velocidade de correntes de superfície e de fundo, observa-se que ambas tem sentido vazante. A Figura 4.5 apresenta a média vertical de

corrente no tempo, o valor de corrente na porção mais superficial da coluna de água foi de -0,14 e na porção mais próxima do fundo foi de 0,03. Pode-se observar também que o estuário apresentou-se na média do período um padrão de correntes bidirecional, porem com a coluna de água predominantemente vazando. A maior velocidade média de vazante ocorreu a 3 metros acima do fundo.

Tabela 4.1. Valores médio, máximo e mínimos de superfície e fundo para velocidade ($m.s^{-1}$), salinidade e temperatura ($^{\circ}C$). Valor máximo de corrente de enchente e vazante. Os valores negativos de velocidade de correntes representam água saindo do estuário (vazante).

Parâmetros	Média	Máximo	Mínimo
Corrente superfície	-0,11	-0,17	-0,03
Corrente fundo	-0,05	-0,14	0
Corrente vazante	----	-0,48	----
Corrente enchente	----	0,40	----
Salinidade superfície	6,7	14,8	0
Salinidade fundo	33,4	35,1	28,3
Temperatura superfície	22,5	23	21
Temperatura fundo	23,1	23,3	21,5

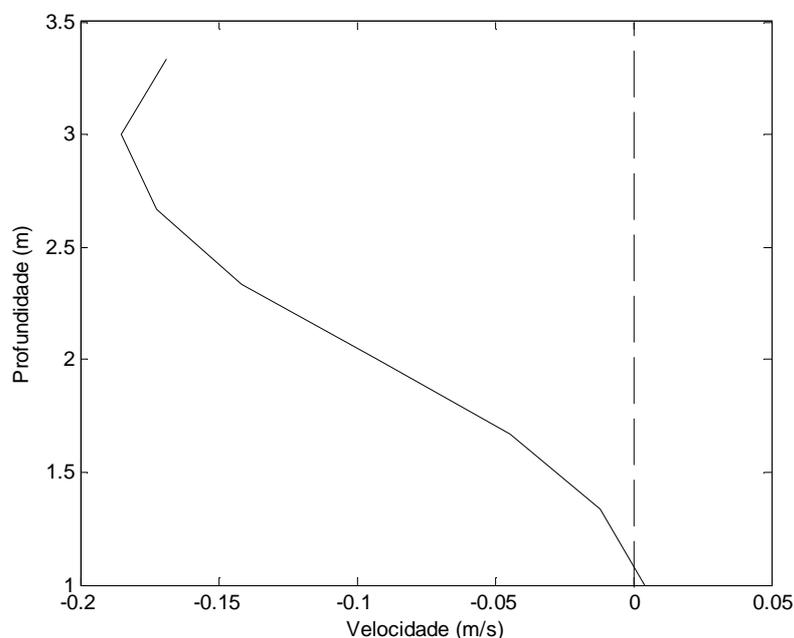


Figura 4.5: Perfil vertical da velocidade média na coluna de água durante as 25 horas de campanha no estuário do rio Tubarão.

A distribuição longitudinal e vertical da salinidade e da temperatura está representada na Figura 4.6. Observa-se o estuário bastante estratificado com um cunha salina penetrando cerca de 28 km e um gradiente de salinidade de 25 ocorrendo entre os 2 e os 4 m de profundidade. A Temperatura aparece homogênea no estuário, com exceção de um ponto, 25 km estuário adentro, onde mostra temperatura de 25°C próximo dos 2 m de profundidade, local onde desemboca o rio Capivari.

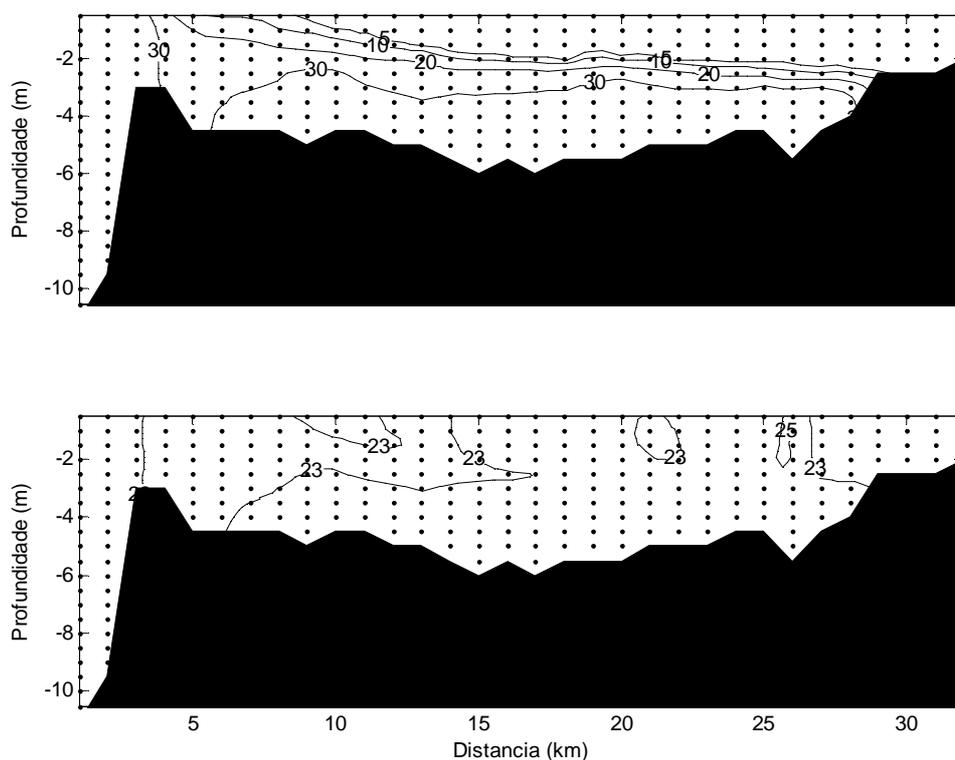


Figura 4.6. Distribuição longitudinal e vertical da salinidade (acima) e temperatura (abaixo) no estuário do rio Tubarão realizada dia 03 de maio de 2007 na preamar.

Os pontos de coleta de sedimentos compreenderam os 24 km iniciais do estuário (Figura 4.1), 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 e silte, e de M.O (Figura 4.7). O mesmo padrão é observado nos quilômetros 10, 14 e 22 (RT 6, 8 e 12). Nas amostras RT5, 7, 9 a 11 (correspondentes a 8, 12, 16 a 20 km) ocorre um domínio da fração arenosa superior a 90 %. A estação mais próxima ao rio Capivari (mais a montante) apresenta um padrão distinto, com uma melhor distribuição entre os percentuais de

areia, silte, argila e com pouquíssima M.O.. No Diagrama de Flemming (Figura 4.8) onde o percentual de M.O. não é considerado, também se observa esses dois grupos distintos de amostras, com uma estação isolada no centro do diagrama (RT13).

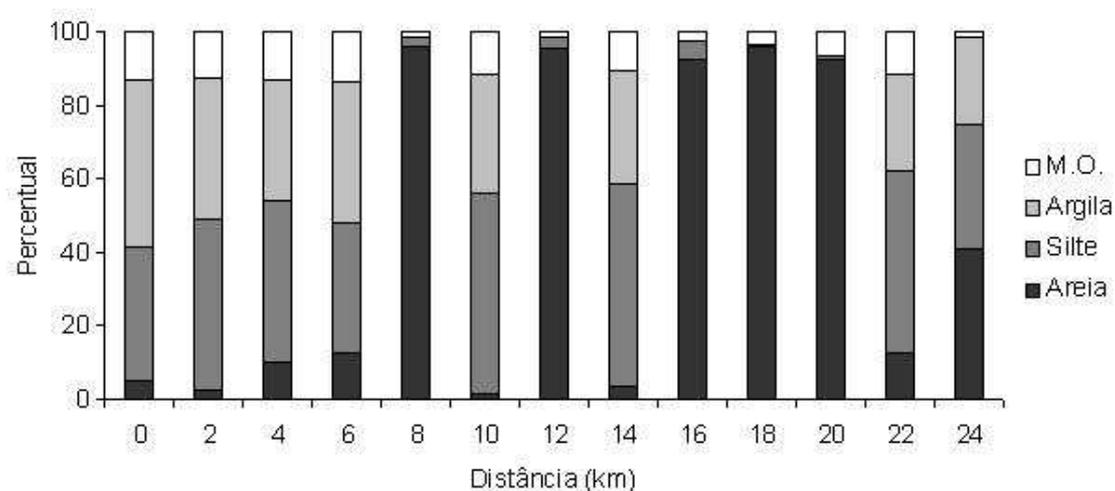


Figura 4.7. Distribuição dos percentuais de areia, silte, argila e matéria orgânica (M.O.) nas estações RT1 a 13 para o estuário do rio Tubarão. A estação RT1 foi coletada na desembocadura (km 0) e a RT13 no km 24 (estação mais a montante).

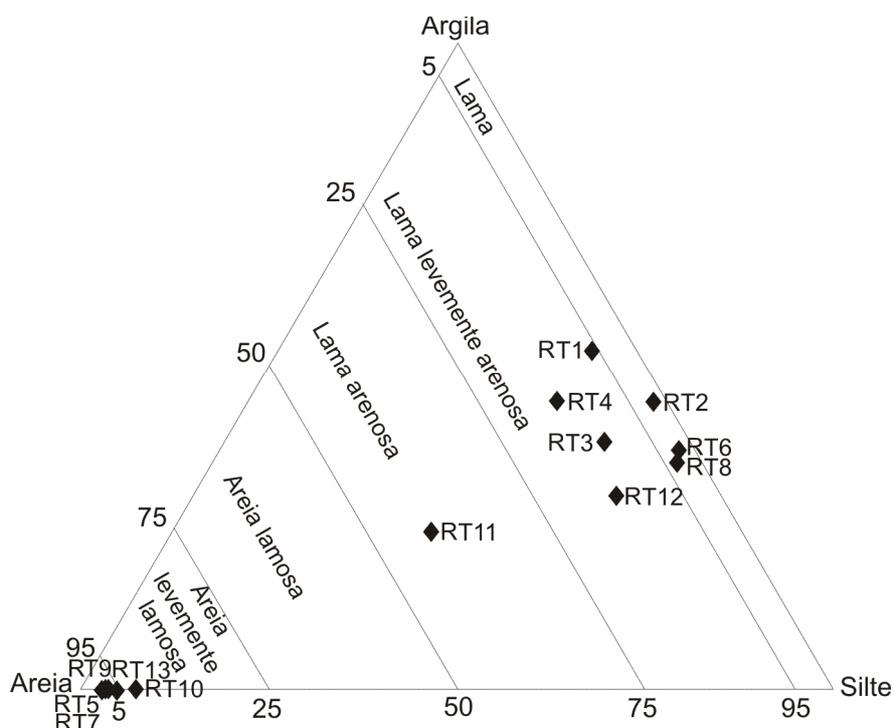


Figura 4.8. Diagrama de Flemming para as amostras coletadas no estuário do rio Tubarão no dia 03 de maio de 2007.

4.4.4 - Transporte de Sal

A Tabela 4.2 apresenta os 7 termos do Transporte de Sal representados em ordem alfabética de A a G, o somatório dos termos e o transporte resultante. Os termos mais significativos foram Descarga fluvial (A) seguido da Circulação Gravitacional (D) com $-5,97$ e $4,2 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Dos termos com 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 de sal resultante foi estuário afora com valor de $-0,91 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Tabela 4.2. Termos do transporte advectivo de sal para o estuário do rio Tubarão, referente a campanha 25 horas de maio de 2007. Os termos negativos representam fluxo saindo do estuário.

Termos	Fluxo ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
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

4.4.5 - 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 circulação (1,33) no diagrama proposto por Hansen & Rattray (1966, Figura 4.9). O número de Richardson (Eq. 2) que compara capacidade estabilizadora do gradiente vertical de densidade com aquela desestabilizadora do cisalhamento da velocidade (Miranda, et AL., 2002) para o estuário do rio Tubarão foi de 5,7 indicando condições que favorecem uma estratificação estável. A relação entre o prisma de maré e a razão de fluxo para o estuário do rio Tubarão foi de 7,1 indicando uma dominância dos processos relacionados a descarga fluvial no estuário. Esse valor indica que o volume de água doce que escoar pelo rio é 7 vezes maior do que aquele que é trocado a cada ciclo de maré.

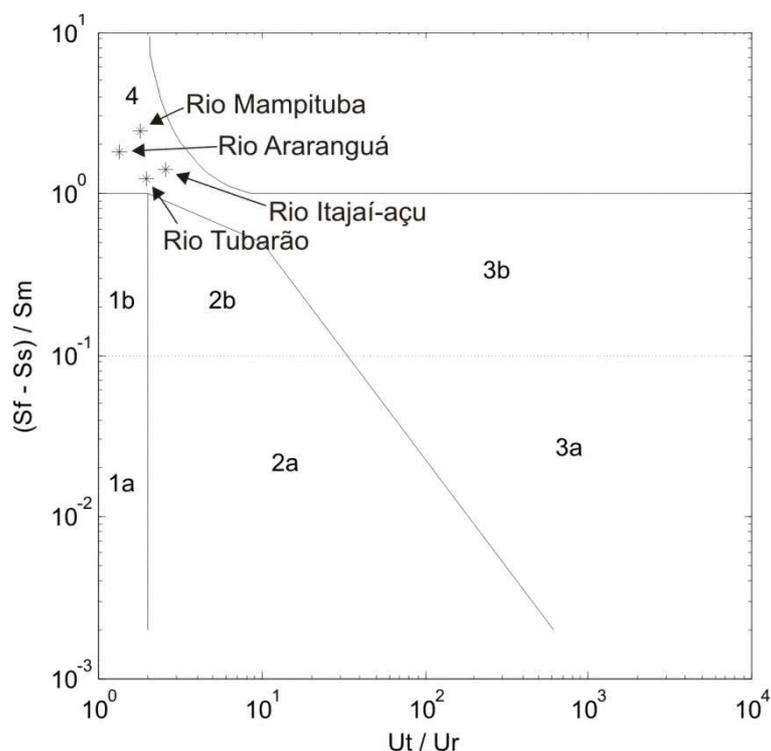


Figura 4.9. Diagrama de classificação proposto por Hansen & Rattray (1966), com os índices dos estuários dos rios Tubarão, Itajaí (Schettini, 2002), Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e Mampituba (D'Aquino, et al., SUBMETIDO).

4.5 – DISCUSSÃO

4.5.1 - 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 porem utilizando uma série que foi de janeiro de 1975 a dezembro de 1997, o autor encontrou de uma vazão de permanência Q_{50} de $66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Valor inferior ao observado na série mais recente ($83,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). O que pode representar uma maior disponibilidade hídrica atualmente, já que está estação é a mais a jusante no rio Tubarão, 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 capitação 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 refletir que a série representa um período de maior concentração de chuvas.

4.5.2 - 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) que observou que cerca de 33% da região ocorre em topografia plana e/ou suavemente ondulada, sem problemas evidentes de erosão. Porém, o autor observou que a cobertura vegetal é insignificante ocupando apenas 1% da bacia. Isso contribui significativamente com a disponibilidade de sedimentos. Segundo Bertoluzzi (2003) na Bacia do rio Tubarão o material transportado proveniente da encosta é do desmonte de rocha sedimentar, o material do centro da bacia é do desmonte do granito e apresenta intenso resíduo de areia quartzosa, enquanto a parte planar e sedimentar da bacia é menos contribuidora e mais área de deposição.

4.5.3 - Oceanografia

O estuário apresentou maior nível de água no início 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 conseqüentemente 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 floculação, 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 escoia sob a cunha, favorecendo a exportação desse material para fora do sistema.

4.5.4 - 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.

4.5.5 - Classificações do estuário do rio Tubarão

D'Aquino et al, (SUBMETIDO) relacionaram estuários geomorfologicamente similares na costa de Santa Catarina (Itajaí, Araranguá e Mampituba), com sua hidrodinâmica e perceberam que estes estuários respondem primeiramente a forçante fluvial. A Figura 10 mostra o diagrama de classificação de Hansen & Rattray (1966) apresentado no trabalho de D'Aquino et al, (SUBMETIDO) com a adição do estuário do rio Tubarão. Observa-se que todos os estuários enquadram-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 esta 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 comportamento hidrodinâmico e do transporte de sal se inferir de forma qualitativa sobre o transporte de MPS. Os fatores observados no estuário do rio Tubarão: a) ser classificado como do tipo cunha salina; b) de ter conforme o número de Richardson, condições que favorecem uma estratificação estável; c) relação entre o prisma de maré e a razão de fluxo indicando dominância dos processos fluviais e; d) os principais termos responsáveis pelo transporte de sal indicam dominância advectiva; permitem encaixar o este estuário na classificação de transporte de sedimentos proposta por Schettini & Toldo (2006). Na qual dois modos de transporte de sedimento foram exposto para o estuário do rio Itajaí-açu: um modo marinho, quando sob condições de baixa vazão, o estuário se torna um importador de sedimentos em suspensão, e um modo fluvial quando o estuário apresenta condições de alta vazão, tornando-se um exportador de sedimentos em suspensão.

4.6 – CONCLUSÕES

O estuário do rio tubarão apresenta-se com 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. O estuário foi classificado como de cunha salina e seu transporte de sedimentos parece ocorrer de acordo com a descarga fluvial, porém merece ser tema de estudos aprofundados e direcionados, envolvendo não só o estuário do rio Tubarão, mas o sistema lagunar que recebe suas águas. Além disso, a variável meteorológica parece ter grande influencia sob os processos oceanográficos locais e não pode deixar de ser estimada e relacionada em estudos futuros.

4.7 – 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 do CNPq. CAFS é bolsista do CNPq 306217/2007-4.

4.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASP, N. E. ; SIEGLE, E. ; SCHETTINI, C. A. F. ; LOSSO, A.P. ; KLEIN, A. H. F. 2009. Hipsometria de bacias de drenagem do centro-norte catarinense e implicações para a zona costeira. Boletim Paranaense de Geociências, ACEITO.

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. Fluvial modulation of salt transport in a highly stratified estuary. NO PRELO. Braz. j. oceanogr.

D'Aquino, C.A., Andrade Neto,J.S.; Barreto, G.A.M & Schettini, C.A.F. Caracterização oceanográfica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. SUBMETIDO. 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.

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.

Flemmin, B.W. 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Cont. Shelf Res.* 20:1125–1137.

Hobbie, J. 2000. Estuarine science: the key to progress in coastal ecological research. In: HOBBIIE, 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 pHyysical 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. Especificação 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 palnta 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.

Officer, C.B. 1976. Physical Oceanography of estuaries (and associated coastal waters). New York, Wiley-Interscience, 465p.

Schettini, C.A.F. 2002. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. Rev. Bras. Rec. Hidric., 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.

SDM. 1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. *Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: diagnóstico geral*. Florianópolis.

CAPÍTULO 5 – ESTUDO COMPARATIVO SOBRE OS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NOS ESTUÁRIOS DOS RIOS TUBARÃO, ARARANGUÁ E MAMPITUBA, SC - BRASIL.

ARTIGO AINDA NÃO SUBMETIDO

5.1 – RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a comparação integrada do material particulado em suspensão (MPS) dos estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba e sua relação com o modelo hidrodinâmico e sedimentológico já proposto para o estuário do rio Itajaí-açu. A comparação de ambientes estuarinos mostra-se uma tarefa complexa devido a especificidade de cada ambiente, o que os torna únicos, ao mesmo tempo em que se observa características hidrodinâmicas comuns. O principal fator favorável a comparação entre os estuários do Sul de Santa Catarina e o estuário do rio Itajaí-açu é a semelhança geomorfológica, sendo todos estuários relativamente rasos e de planície costeira. Outro fator importante é o regime climático, que traz semelhanças no regime fluvial, sendo de domínio mesotérmico úmido, no qual podem ocorrer chuvas a qualquer época do ano. A metodologia empregada consistiu de quatro etapas principais: 1) Investigação das propriedades físicas e hidrodinâmicas; 2) Aquisição de dados batimétricos e de sedimentos de fundo; 3) Levantamento da entrada de MPS no estuário; e 4) Levantamento de dados complementares. Neste trabalho a estimação do MPS através do retroespalhamento acústico permitiu observar a resposta do MPS a hidrodinâmica de cada estuário. Estando ela mais associada aos períodos de entrada da maré, as correntes de enchente, nos estuários dos rios Tubarão e Araranguá, enquanto que no Mampituba, mostra grande associação com o encontro da água doce com a salgada, indicando influencia dos processos de floculação. Os estuários do sul de Santa Catarina respondem oceanograficamente aos padrões já bem conhecidos para o estuário do rio Itajaí-açu. Favorecendo o entendimento dos processos básicos de transporte de sal e sedimentos em estuários cunha salina dominados por enchentes relâmpago.

Palavras-Chave: Estuários, material particulado em suspensão, enchentes relâmpago

5.2 – INTRODUÇÃO

Estuários são ambientes costeiros onde ocorre a mistura da água doce do rio e a água salina do mar, as quais atuam como fontes ou sumidouros para poluentes dependendo (i) das fontes geográficas de contaminantes (marinho, fluvial, interno e atmosférico), (ii) da sua natureza química e biológica e (iii) das variações temporais na amplitude da maré, fluxo do rio, estações do ano, ventos e ondas (Prandle, 2009). As águas, doce ou marinha, podem ser também fontes ou sumidouros de sedimentos finos transportados em suspensão, e os estuários desempenham um papel importante no fluxo destes materiais atuando como filtros (Schubel & Carter, 1984), desempenhando um papel fundamental no transporte e distribuição de propriedades.

No litoral de Santa Catarina ocorrem diversos estuários os quais recebem a drenagem da Vertente Atlântica do estado. Os estuários ao norte de Florianópolis foram até o momento mais investigados em respeito a suas características hidrodinâmicas e sedimentos em suspensão, e.g., estuários dos rios Itajaí-Açu (Schettini, 2002a; Schettini et al., 2006), Cubatão (Schettini & Carvalho, 1999), Camboriú (Siegle et al., 2009), Tavares (Schettini, et al., 2000), e baías da Babitonga (Truccolo & Schettini, 1999), e Tijucas (Schettini et al., 2010), enquanto que os estuários ao sul de Florianópolis, como dos rios Araranguá (D'Aquino et al., no prelo), Tubarão (D'Aquino et al., submetido a) e Mampituba (D'Aquino et al., submetido b) somente recentemente foram avaliados a este respeito, embora existam algumas caracterizações ambientais gerais (Marcomin, 1996; Bertoluzzi, 2003; Beltrame, 2003).

Embora os estuários que ocorrem ao longo do litoral catarinense apresentem uma grande diversidade morfológica, estuários de frente deltaica, segundo os tipos fisiográficos de Fairbridge (1980), representam um tipo freqüente. Estes estuários estão associados com pequenas e médias bacias hidrográficas, e cujas porções terminais são denominadas geograficamente de rios. Os principais estuários desta categoria são os dos rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá, Itapocu, Tijucas e Mampituba. Estes sistemas apresentam características geomorfológicas similares, sendo longos, estreitos e relativamente rasos.

A comparação de ambientes estuarinos mostra-se uma tarefa complexa devido a especificidade de cada ambiente, o que os torna únicos, ao mesmo tempo em que se observa características hidrodinâmicas comuns. O principal fator favorável a comparação entre os estuários Sul Catarinenses e o estuário do rio Itajaí-açu é a

semelhança geomorfológica. Outro fator importante é o regime climático, que traz semelhanças no regime fluvial, sendo de domínio mesotérmico úmido, com chuvas distribuídas ao longo do ano. Quando se propõe comparar os sedimentos em suspensão de cada estuário, há de se levar em conta mais as especificidades, como a composição da área fonte, a presença ou ausência de matas ciliares, os usos das bacias, que refletem a disponibilidade de sedimentos finos. Também a presença de cunha salina e o tipo de estratificação que remetem a hidrodinâmica do estuário e aos processos de floculação, sedimentação, erosão e transporte. O objetivo do presente trabalho é o de apresentar um estudo comparativo entre os três maiores estuários de frente deltaica do litoral Sul de Santa Catarina, os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba, em relação as suas características morfológicas, hidrodinâmicas e de distribuição de sedimentos em suspensão, tendo como referência o estuário do rio Itajaí-Açu, mais intensamente investigado.

5.2.1 Área de Estudo

A Figura 5.1 apresenta as bacias hidrográficas dos rios Tubarão (ao Norte), do rio Araranguá (centro) e do rio Mampituba (ao sul), com suas respectivas altitudes e os principais cursos dos rios. A Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão é a maior bacia hidrográfica da Região Sul de Santa Catarina da Vertente Atlântica. As águas desta bacia são consideradas bastante impactadas 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) 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).

A Bacia Hidrográfica do rio Araranguá esta inserida na Região Hidrográfica Catarinense do Extremo Sul (RH10), abrange uma área de 3020 km² (SANTA CATARINA, 1997). Possui nascentes localizadas na Serra Geral, com cerca de 15

cursos de água principais compondo seu sistema hídrico (Krebes, 2004). O Rio Araranguá é formado pela junção dos rios Itoupava e Mãe Luzia, e após se tornar o Araranguá apresenta um único afluente, o rio dos Porcos. Com orientação geral leste-oeste, sinuosidades do tipo meandrante, sua foz desloca-se para nordeste paralelamente a linha de costa por cerca de 7 Km antes de desaguar no mar. A região é marcada por um regime de micromarés e sofre com a influência de frentes frias provenientes de sul ao longo do ano. As principais atividades econômicas desenvolvidas nesta bacia hidrográfica são o cultivo de arroz, a mineração, a suinocultura, abastecimento humano e demais atividades de turismo e lazer.

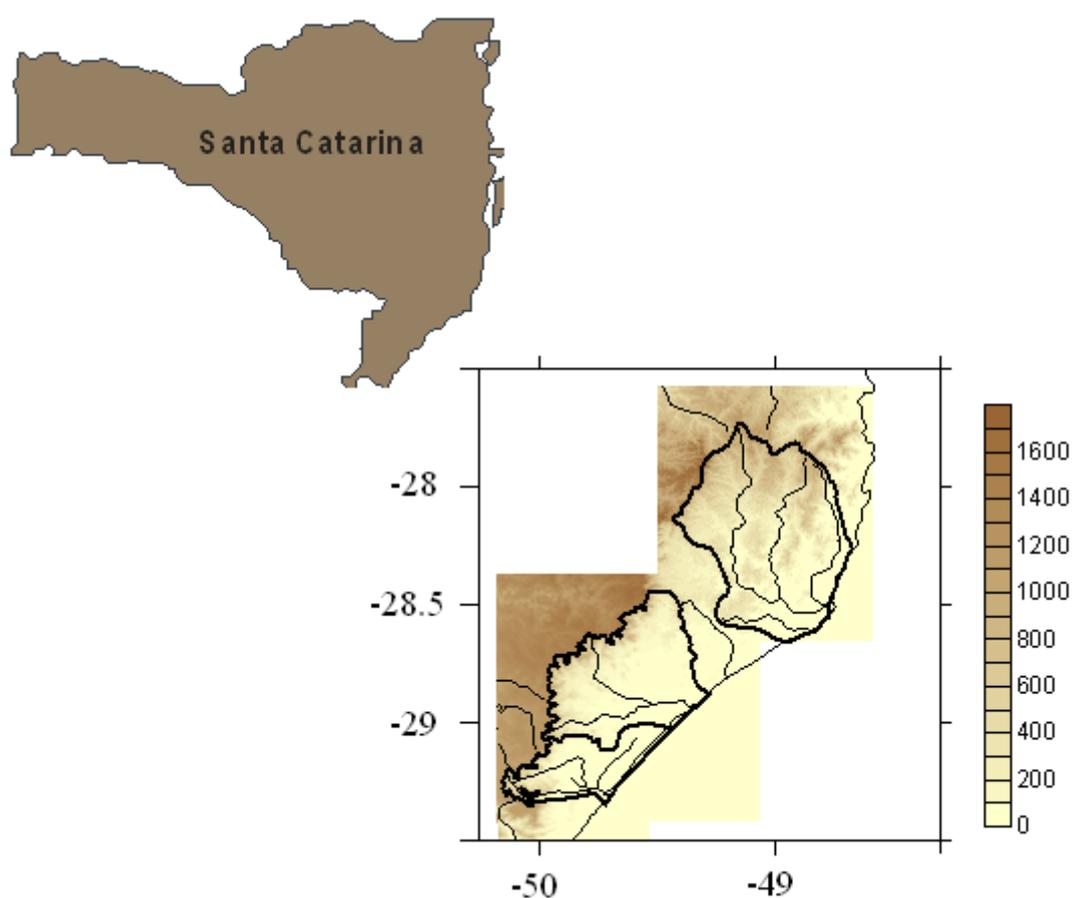


Figura 5.1. Área estuda na região Sul de Santa Catarina. Bacias hidrográficas dos rios Tubarão (ao Norte), Araranguá (no centro) e Mampituba (ao Sul). Base hidrográfica fornecida pela Agência Nacional de Águas (ANA, www.ana.gov.br).

A bacia hidrográfica do rio Mampituba está localizada a nordeste do estado do Rio Grande do Sul, o baixo curso deste rio serve de limite político entre os estados de

Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A bacia de drenagem apresenta área de 1224 km², apresentando estruturas lineares na região mais a montante e meandros abandonados junto à foz do rio (Reginato, 1996). O rio Mampituba possui uma vazão média de 19 m³.s⁻¹, uma profundidade média de 4 m e está sob regime de micro-marés (D'Aquino, *et al.*, 2008). A desembocadura do rio Mampituba é fixa por molhes, desaguando em uma linha de praia arenosa, sob intensa dinâmica de ondas e correntes. Essa porção do litoral está sujeita às ondas mais intensas provenientes de S-SE, que geram um transporte longitudinal resultante ao longo da costa sul catarinense na direção NE (Siegler & Asp, 2007).

5.3 – MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 - Campanhas de Campo

A metodologia utilizada para as medições em campo foi comum aos estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba, tendo como objetivo a medição de correntes, nível de água, salinidade, temperatura e turbidez próximo a desembocadura por pelo menos dois ciclos completos de maré (~25 horas). Durante este período um perfil longitudinal foi realizado em cada estuário, através de aquisições de salinidade e temperatura na coluna de água a cada quilômetro. A descrição detalhada das medições realizadas em cada um dos estuários será descrita a seguir conforme a ordem de execução.

O estuário do Rio Araranguá foi o primeiro a ser estudado. A campanha de coleta de dados ocorreu nos dias 11 a 13 de maio de 2006. O fundeio foi realizado a 7,5 Km da desembocadura visando à obtenção de dados de correntes através do perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (PACD), marca Nortek-AS modelo Aquadopp Profiler[®], instalado junto ao fundo em uma coluna de água de aproximadamente 8,5 m de profundidade. Acoplado ao correntógrafo foi instalado um CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), marca SAIV, e na mesma linha de fundeio uma sonda multiparâmetro, marca YSI, foi fixada a 1,5 m abaixo da superfície. As campanhas longitudinais para perfilagem vertical foram realizadas com um CTD, marca SAIV,

cada perfil distante 1 km em relação ao anterior, iniciando-se na foz até aproximadamente 32 km em direção a montante.

A campanha para aquisição de dados hidro-oceanográficos no estuário do rio Tubarão 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 fundeio de um PACD da marca Nortek-AS modelo Aquadopp Profiler[®] com frequência de trabalho de 1 MHz. A salinidade e temperatura no ponto de fundeio foram obtidas com um CTD SensorData modelo sd204 em superfície e um CTD modelo sd200 junto ao fundo. A oscilação do nível da água foi monitorada com um marégrafo de influência marca RBR modelo XR-420-TG, acoplado ao correntógrafo. Foi realizada uma campanha para medições de salinidade e temperatura ao longo do estuário, que percorreu cerca de 33 Km, com perfis verticais efetuados a cada 1 km com CTD Sd200, iniciando-se na desembocadura.

No dia 17 de maio de 2008 foi realizado um fundeio no estuário do rio Mampituba, onde foram posicionados um PACD da marca Nortek-AS, junto ao fundo, anexo a ele um CTD, marca RBR, e na superfície um CTD, marca SAIV. Os equipamentos permaneceram por 25 horas fazendo a aquisição de dados, com um intervalo amostral de 10 minutos. No dia 18 de maio de 2008 foi realizada uma campanha de perfilagem longitudinal e vertical com CTD, marca ALEC a cada quilômetro por cerca de 25 km estuário a dentro. Neste estuário foi possível uma medição especial para calibração do material particulado em suspensão, a qual consistiu da realização de perfis verticais a cada hora ao lado do local de fundeio com CTD, marca ALEC, que possui turbidímetro óptico acoplado. Juntamente aos perfis, água em sub-superfície foi coletada. Este procedimento foi realizado por 13 horas consecutivas.

5.3.2 - Intercalibração de Sensores

Durante as campanhas de coleta de dados foram utilizados sensores óticos e acústicos para determinação da concentração do MPS. Os sensores óticos que funcionam a partir do princípio de retro-espalhamento ótico (REO, turbidímetros) apresentam-se como muito eficazes na determinação do MPS, sendo pouco sensíveis a transmitância ótica da água. Contudo, a natureza do MPS pode influenciar nas medições em função do tamanho, cor e concentração (e.g. Kineke & Sternberg, 1992). Neste

sentido, foi realizado um experimento para avaliar a resposta do turbidímetro utilizado, da marca SeaPoint, com os sedimentos de cada estuário.

Sedimento de superfície de fundo foram coletados com auxílio de busca fundo do tipo “ponar” nos estuários dos rios Itajaí-açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba. As amostras coletadas foram na porção do baixo estuário, consistindo principalmente de material lamoso. Em laboratório, uma quantidade de amostra foi diluída em água e mantida em aeração por 3 horas. Sedimentos de fundo lamosos apresentam uma fina camada em estado oxidado (avermelhada), estando abaixo desta em estado reduzido (cinza escuro a preta). O MPS, por sua vez, na coluna de água encontra-se sempre em estado oxidado. E esse procedimento objetivou garantir que o material para a medição com o turbidímetro retratasse tanto quanto possível o material quando em suspensão.

O turbidímetro foi fixo em um recipiente com água limpa mantida em constante agitação por bombas, onde foram acrescentadas alíquotas da solução de sedimentos concentrados previamente preparada. A cada acréscimo foram realizadas leituras com o turbidímetro e retiradas amostras do recipiente em triplicada para determinação da concentração do MPS através de gravimetria. As amostras foram filtradas através de filtros Whatman GFC de 0,45 µm de poro, cujo peso seco foi previamente conhecido. Após a filtragem, os filtros foram secos a 50 °C por 24 horas, e pesados novamente. A concentração de MPS foi então determinada pela razão entre a diferença de peso após e antes da filtragem pelo volume filtrado.

A Figura 5.2 apresenta as relações da concentração de MPS em função do REO para os quatro estuários. Nos estuários dos rios Itajaí-açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba as relações encontradas são expressas pelas Equações de 1 a 4 respectivamente:

$$\text{MPS} = 0,458 \cdot \text{REO} - 0,004 \quad (1)$$

$$\text{MPS} = 0,538 \cdot \text{REO} - 0,002 \quad (2)$$

$$\text{MPS} = 0,588 \cdot \text{REO} - 0,006 \quad (3)$$

$$\text{MPS} = 1,093 \cdot \text{REO} - 0,021 \quad (4)$$

Os estuários apresentaram relação linear entre o MPS e o REO. O estuário do rio Mampituba apresentou o menor coeficiente de determinação com r^2 de 0,988. Para os demais estuários o ajuste linear apresentou coeficientes de 0,999 mostrando-se ainda melhor.

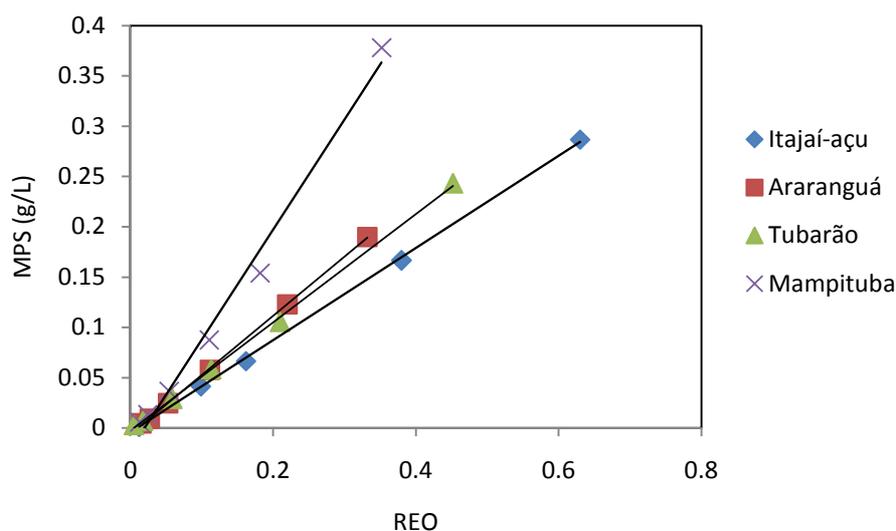


Figura 5.2. Relação entre MPS e REO para os estuários dos rios Itajaí-açu (A), Araranguá (B), Tubarão (C) e Mampituba (D).

5.3.3 – Conversão de REA para MPS

Seguindo o procedimento de calibração proposto e aplicado por Schettini & Zaleski (2006) no estuário do rio Itajaí-açu o PACD utilizado no fundeio teve seus valores de amplitude acústica transformados em Retro Espalhamento Acústico (REA) e o REA transformado em MPS. Um resumo do procedimento de para utilização dos PACD's na obtenção do CSS será apresentado a seguir com base na metodologia descrita por Zaleski & Schettini (2006).

A primeira etapa consiste em transformar a amplitude acústica (Amp) em REA através das correções da unidade de contagens para dB e do desconto do ruído (r) obtendo-se a amplitude corrigida (Amp_c) conforme a equação que segue:

$$Amp_c = 0,43(Amp - r) \quad (5)$$

Onde “ Amp ” é o parâmetro gravado na memória do PACD e “ r ” a intensidade de ruído do mesmo, sendo r o valor de Amp enquanto o equipamento opera no ar. 0,43 é o fator escalar para transformar os dados de “contagens” para dB.

O segundo passo é a normalização dos dados, deixando-os independentes da profundidade que foram coletados, para isso é necessário adicionar os termos de

dispersão geométrica à amplitude corrigida. Deste modo, a amplitude acústica corrigida, ou Retro Espalhamento Acústico (REA) fica:

$$REA = Amp_c + 20 \log_{10}(R) + 2\alpha_w(R) + 20R \int \alpha_p dr \quad (6)$$

Onde R é a distancia ao longo do feixe acústico ($z/\cos 25$), sendo 25 a inclinação do feixe acústico, α_w é a absorção pela água em $dB.m^{-1}$ e α_p é a atenuação por partículas em $dB.m^{-1}$. O segundo termo a esquerda da igualdade é a correção geométrica da forma cônica do feixe acústico. O terceiro corrige o efeito da absorção da energia acústica na água, e é função da frequência do som, salinidade e pressão. O quarto termo é a correção pela absorção pelas partículas, sendo normalmente ignorado (Nortek, 2001).

Para obter-se a MPS segundo Zaleski & Schettini (2006) duas calibrações são necessárias, 1) do sensor ótico (turbidímetro), que mede o Retro Espalhamento Ótico (REO) em FTU (*Formazin Turbidity Units*) para MPS em $mg.l^{-1}$ (Eq. 7, $r^2 = 0,9869$) e, 2) a calibração que estabelece a relação entre REA e MPS através do REO (Eq. 8., $r^2 = 0,8624$), ambas equações referentes ao estuário do rio Itajaí-açu..

$$MPS = 3,2410 + 2,38469 * (REO) \quad (7)$$

$$REO = 148,2374 - 7,6152 * (REA) + 0,0999 * (REA)^2 \quad (8)$$

5.3.4 – Transporte Advectivo de MPS

O esquema de decomposição do transporte advectivo aplicado para os estuários deste estudo é descrito em detalhes por Miranda et al. (2002). O transporte de sedimentos em suspensão T_c é decomposto da mesma forma que a salinidade, eliminando-se a densidade e verificando a concentração de sedimentos em suspensão para que estejam com unidades concordantes com as da velocidade. Considerando-se a homogeneidade lateral do estuário, o transporte de MPS médio T_C para um ou mais ciclos de maré é representado por:

$$T_C = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h uC dz dt \quad (9)$$

Onde o fluxo de volume de material particulado em suspensão integrado no tempo e no espaço. Ainda, conforme Miranda et al. (2002), esta equação pode ser decomposta em termos dispersivos e advectivos dos quais, sete são os termos principais e podem ser descritos como (A) descarga fluvial, (B) deriva de Stokes, (C) correlação de maré, (D) circulação gravitacional, (E) bombeamento de maré, (F) cisalhamento de maré, e (G) flutuações por vento.

Neste trabalho foi convencionado que os valores de velocidades negativos representam água saindo do estuário, relação esta mantida para o cálculo do transporte.

5.3.5 – Aporte Fluvial de MPS

A concentração de MPS na porção fluvial dos estuários foi calculada através da coleta de água a montante junto a estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Durante um período aproximado de 50 dias os observadores das estações fluviométricas da ANA coletaram 1 garrafa de água por dia com volume aproximado de 500 ml no final do ano de 2006, em cada um dos rios estudados: Itajaí, Tubarão, Araranguá (rio Itoupavas, é apresenta maior contribuição de vazão para o Araranguá) e Mampituba. A Tabela 5.1 apresenta o rio estudado com a respectiva estação fluviométrica e o período exato de amostragem.

Após o período de coleta, as amostras foram recolhidas, em laboratório tiveram seu volume aferido, para então serem filtradas em filtros pré-pesados, secas em estufa por 24 horas a 50 °C e pesadas novamente. A concentração de MPS na porção fluvial de cada estuário em g/L foi dada pela diferença de massa entre o filtro sujo e o limpo dividida pelo volume filtrado.

Tabela 5.1. Estações fluviométricas da ANA utilizadas como referencia para coleta de água e obtenção de dados de vazão.

Rio	Estação Fluviométrica	Período de coleta
Itajaí-açu	83690000	23/11 a 21/12/2006
Tubarão	84580500	01/11 a 18/12/2006
Itoupavas	84950000	31/10 a 19/12/2006
Mampituba	84970000	30/10 a 18/12/2006

Dados de vazão para o mesmo período de coleta de MPS a montante para os rios Itajaí-açu e Mampituba foram obtidos junto a Agência Nacional de Águas (ANA). Os rios Itoupavas (formador do Araranguá) e Tubarão não apresentavam dados de vazão disponíveis para o período de coleta no banco de dados da ANA, de forma que foi necessário o cálculo indireto da vazão através da relação entre cota e vazão obtida pelas séries históricas. Para executar tal procedimento foi solicitado junto ao Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM/Epagri) dados de cota do período de outubro a dezembro de 2006 para os rios Tubarão e Itoupavas.

As Equações 10 e 11 mostram a relação entre cota e vazão para os rios Itoupavas e Tubarão, respectivamente. Os coeficientes de determinação foram iguais para as duas equações, sendo de 0,99. Os dados de cota fornecidos pelo CIRAM/Epagri foram então aplicados as respectivas equações obtendo-se a vazão para o período de coleta de dados para observação da descarga sólida.

$$\text{Vazão}_{\text{itoup}} = 0,001215 \text{ cota}^2 + 0,3796 \text{ cota} + (-13,56) \quad (10)$$

$$\text{Vazão}_{\text{tubarão}} = 0,006698 \text{ cota}^2 + 2,317 \text{ cota} + (-358,1) \quad (11)$$

5.5 – RESULTADOS

A relação entre o parâmetro de circulação (U_s/U_m) e o parâmetro de estratificação ($S_f - S_s/S_m$) foi proposto por Hansen & Rattray (1966) e permite uma classificação hidrodinâmica comparativa entre diferentes estuários. A Figura 5.4 mostra o diagrama de classificação com a posição dos estuários dos rios Itajaí-açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba. Ambos estão posicionados na região do diagrama correspondente a estuários do tipo 4, que são aqueles de cunha salina, altamente estratificados. A similaridade de comportamento hidrodinâmico favorece a comparação dos processos a que o MPS está sujeito, já que nos estuários altamente estratificados o escoamento de água doce flui acima da cunha salina carregando consigo o MPS proveniente da porção fluvial do sistema.

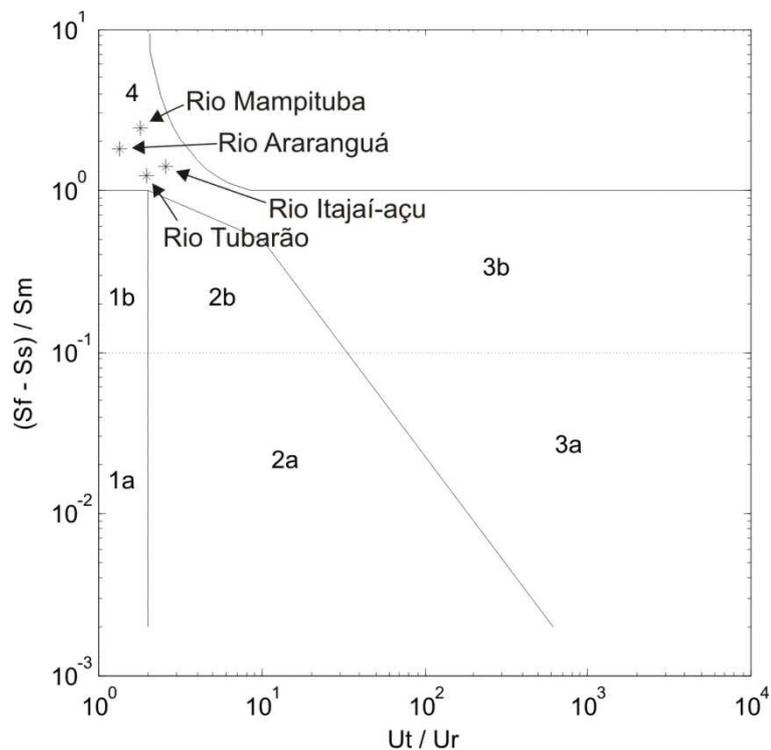


Figura 5.4. Diagrama de classificação proposto por Hansen & Rattray (1966), com os índices dos estuários dos rios Tubarão (D'Aquino, et al., SUBMETIDOb), Itajaí (Schettini, 2002), Araranguá (D'Aquino, et al, no prelo) e Mampituba (D'Aquino, et al., SUBMETIDOa).

Todas as campanhas oceanográficas foram realizadas sob condições de maré de sizígia, o comportamento hidrodinâmico das correntes, o REA e o MPS é apresentado nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 para os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba, respectivamente. O gráfico A representa o padrão de correntes, com valores positivos indicando água entrando no estuário (representados nas cores quentes) e os valores de vazante, são negativos (cores frias). Nos gráficos B (REA) e C (MPS) o vermelho indica maior valor.

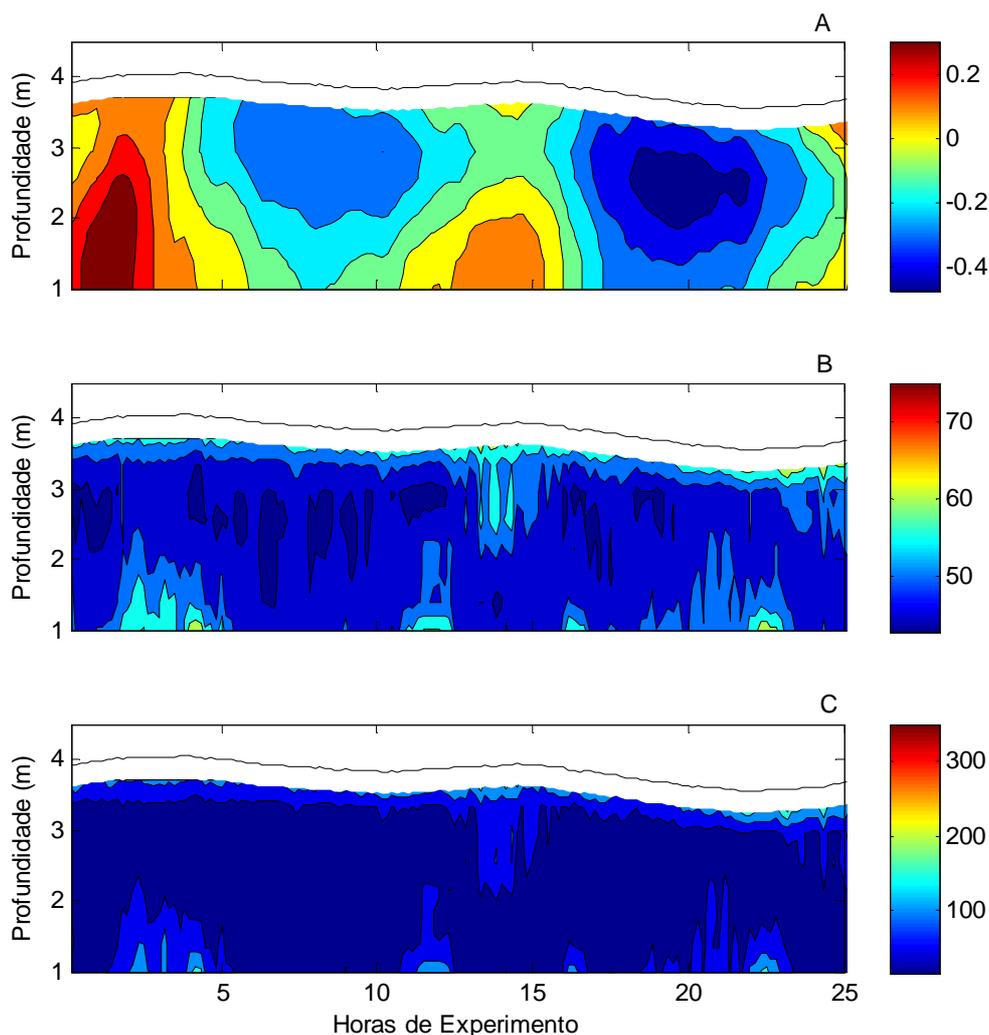


Figura 5.5. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B), e MPS (C) para o estuário do rio Tubarão no período de realização da campanha oceanográfica em maio de 2007.

No estuário do rio Tubarão a campanha amostral abrangeu dois períodos de marés enchente e dois de maré vazante (Figura 5.5). O primeiro período de enchente foi mais intenso, associado a ele observa-se um aumento na REA e certa elevação na concentração de MPS junto ao fundo. A mesma resposta é observada no início do período de enchente. Quando o estuário atinge o nível máximo da enchente observa-se elevação nos valores de REA e aumento na concentração de material particulado em suspensão na porção superior da coluna de água. O período de vazante seguinte é mais intenso que o anterior e provoca aumento de REA e concentração de MPS. A concentração de material particulado em suspensão junto ao fundo está associada aos períodos de maiores intensidade de corrente tanto enchente quanto vazante.

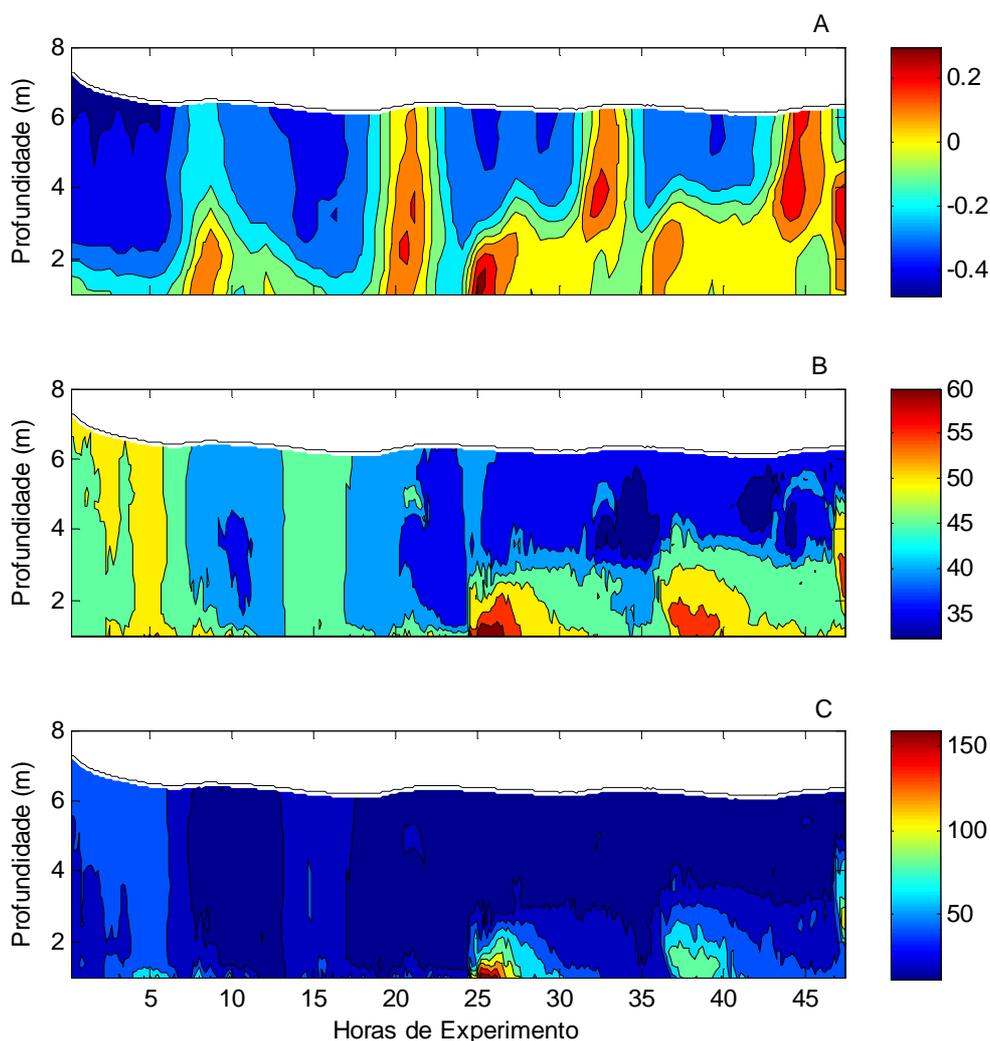


Figura 5.6. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B), e MPS (C) para o estuário do rio Araranguá no período de realização da campanha oceanográfica em maio de 2006.

O período amostral para o estuário do rio Araranguá foi de 50 horas (Figura 5.6) favorecendo a observação de mais ciclo de maré do que nos demais estuários. Até 20 horas de experimento nota-se um grande domínio fluvial no estuário marcado pelas intensas correntes de vazante. Neste período os valores de REA estão acima da média e ocorre pequeno aumento na concentração de MPS em toda coluna de água. O final deste período é marcado por uma enchente que domina toda coluna de água, com posterior estabelecimento da circulação gravitacional no estuário. Com isso, a partir da 25 hora de medição, há um incremento nos valores de REA e concentração de MPS junto ao fundo acompanhando os períodos de maior velocidade de enchente. A porção superior da

coluna de água nesse período apresenta concentrações material particulado em suspensão baixas e sem variações.

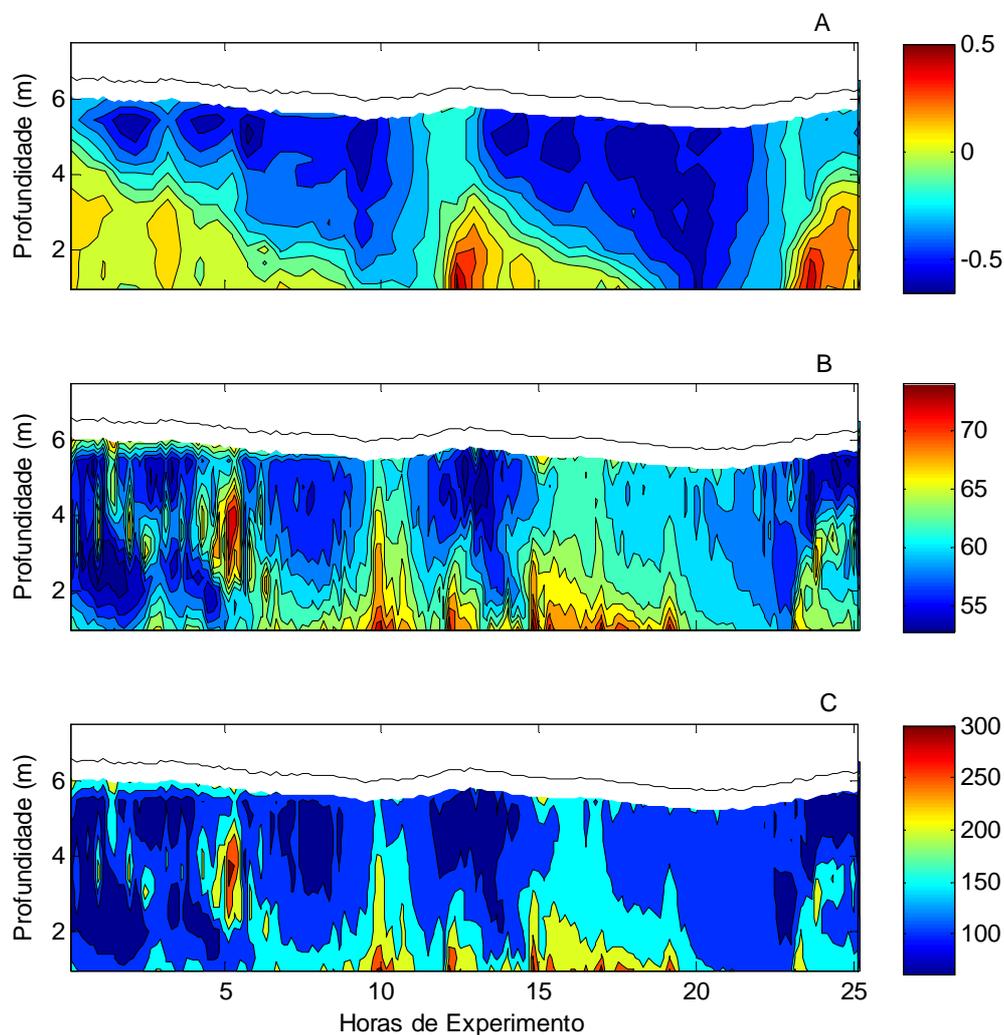


Figura 5.7. Distribuições temporal e vertical de correntes (A), REA (B) e MPS (C) para o estuário do rio Mampituba no período de realização da campanha exploratória em maio de 2008.

No estuário do rio Mampituba o experimento compreendeu 25 horas e foi marcado por três períodos de enchente e dois de vazante (Figura 5.7) com presença de circulação gravitacional. Neste estuário ocorre uma elevação dos valores de REA e da concentração de MPS no meio da coluna de água, associada com o final do período de enchente, início da vazante, na quinta hora de experimento aproximadamente. Um pico de concentração de MPS é observado antes do início da próxima enchente, quando toda coluna de água está vazando, as concentrações de material particulado em suspensão junto ao fundo se mantem elevadas até a vigésima hora de experimento, atravessando

um período inteiro de enchente. Posteriormente, antes da entrada da maré, quando toda coluna de água está vazando, as concentrações de MPS diminuem em toda coluna de água, para então, no último período de enchente registrado, ocorrer novo aumento nas concentrações de MPS. Neste estuário foi registrada a maior “movimentação” de MPS na coluna de água, com atuação das correntes na concentração atuando na maior parte do período observado e em toda coluna de água, não junto ao fundo.

Os estuários do rio Tubarão e Araranguá apresentaram valores máximos de enchente e vazante bastante próximos, de 0,4 e 0,3 m.s^{-1} para Tubarão e Araranguá respectivamente, -0,49 e -0,48 m.s^{-1} também respectivamente (Quadro 5.1). A velocidade média foi com sentido de vazante para todos os estuários, porém o Mampituba apresentou o maior valor, -0,24 m.s^{-1} , o dobro dos outros estuários. Em função de apresentarem praticamente os mesmos extremos de correntes, os estuários do Tubarão e do Araranguá apresentaram valores de REA variando entre 32 e 65, e valores de MPS entre 26 e 178 g.L^{-1} . No estuário do rio Mampituba os valores de REA variam entre 52 e 75, e o MPS entre 31 e 66 g.L^{-1} , com média superior a dos outros estuários, de 39 contra 26 g.L^{-1} .

Os mecanismos de transporte de material particulado em suspensão integrados para um ciclo de maré mostram a contribuição de cada forçante hidrodinâmica no processo de transporte. A Tabela 5.2 apresenta os termos do transporte de MPS calculados segundo metodologia proposta por Miranda, et al. (2002), para os três estuários estudados e para o baixo e médio estuário do rio Itajaí-açu, conforme trabalho de Schettini, et al (2006). Para o estuário do rio Araranguá o transporte foi calculado separadamente para as primeiras 25 horas de campanha e para as últimas 25 horas, em função do regime fluvial diferenciado.

Nos estuários do Tubarão, Araranguá e Mampituba o termo da descarga fluvial (A) foi o termo mais significativo no transporte de MPS estuário abaixo, seguido da correlação de maré (C). O termo referente a circulação gravitacional (D) apresentou sentido estuário afora apenas para o estuário do rio Tubarão. O termo da descarga fluvial representa um mecanismo exportador e foi o mais importante nos estuários do Tubarão, Araranguá e Mampituba, refletindo o escoamento de água doce sobre a cunha. O transporte resultante nos estuários foi sentido vazante (negativo), com valores de 56,2 $\text{kg. m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ para o Tubarão, 24,6 e 9,8 $\text{kg. m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ para as primeiras e últimas 25 horas no Araranguá e de 121,5 $\text{kg. m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ para o Mampituba, que apesar de ter menores dimensões apresentou o maior transporte resultante.

Considerando o transporte no sentido estuário adentro a parcela referente ao transporte de Stokes (B) foi o termo mais significativo no Tubarão, enquanto no Mampituba e Araranguá (para os dois períodos) foi a circulação gravitacional (D). O Araranguá apresenta o termo do bombeamento de maré (E), com sentido estuário adentro, significativo, crescendo de importância no período das últimas 25 horas, após a passagem da onda de cheia. No estuário do rio Mampituba, este termo tem sentido estuário afora, e é o terceiro em importância no transporte.

Tabela 5.2 Termos do transporte de MPS ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) calculados segundo metodologia proposta por Miranda, et al. (2002), para os estuários dos rios Tubarão, Araranguá (dividido nas primeiras e últimas 25 horas de campanha) e Mampituba, e para o baixo e médio estuário do rio Itajaí-açu conforme Schettini, et al. (2006).

Parcelas do transporte	ITAJAÍ Baixo Médio	TUBARAO	ARARANGUÁ 1-25 h 2-25 h	MAMPITUBA
A - Descarga fluvial	-10,0 -36,6	-35,0	-27,0 -15,0	-98,6
B - Transporte de Stokes	2,1 1,1	2,1	-0,4 -0,05	-1,6
C - Correlação de maré	12,5 -6,4	-5,8	-4,9 -2,0	-18,0
D - Circulação gravitacional	21,5 -0,2	-17,5	5,1 0,8	0,8
E - Bombeamento de maré	2,9 0,1	-0,8	3,1 6,4	-4,8
F - Cisalhamento de maré	0,0 0,0	0,07	-0,1 0,0	0,3
G - Flutuações do vento	0,0 0,2	0,3	-0,08 0,02	0,4
Somatório	--	-56,6	-24,3 -9,8	-121,6
Transporte Resultante	28,9 -41,8	-56,2	-24,6 -9,8	-121,5

O monitoramento da descarga sólida teve como objetivo quantificar o material que chega ao estuário vindo da porção fluvial, e a resposta nas concentrações de MPS em relação às variações de vazão. A Figura 5.8 apresenta a vazão para os estuários

estudados e suas concentrações de material particulado em suspensão em g/L. No início de novembro observa-se em todos os rios um período de vazões aproximadamente constantes (Figura 5.8A) e relativamente baixas, no final de novembro (dia Juliano 320) início de dezembro ocorre um pico com maiores vazões, seguido de picos menores.

A concentração de MPS (Figura 5.8B) nos rios Itajaí-açu, Tubarão e Mampituba aumenta próximo aos períodos de maior vazão, porém a resposta não ocorre de forma semelhante para todos. No Araranguá observa-se um pico de concentração no início da série amostral, aparentemente sem relação com a vazão.

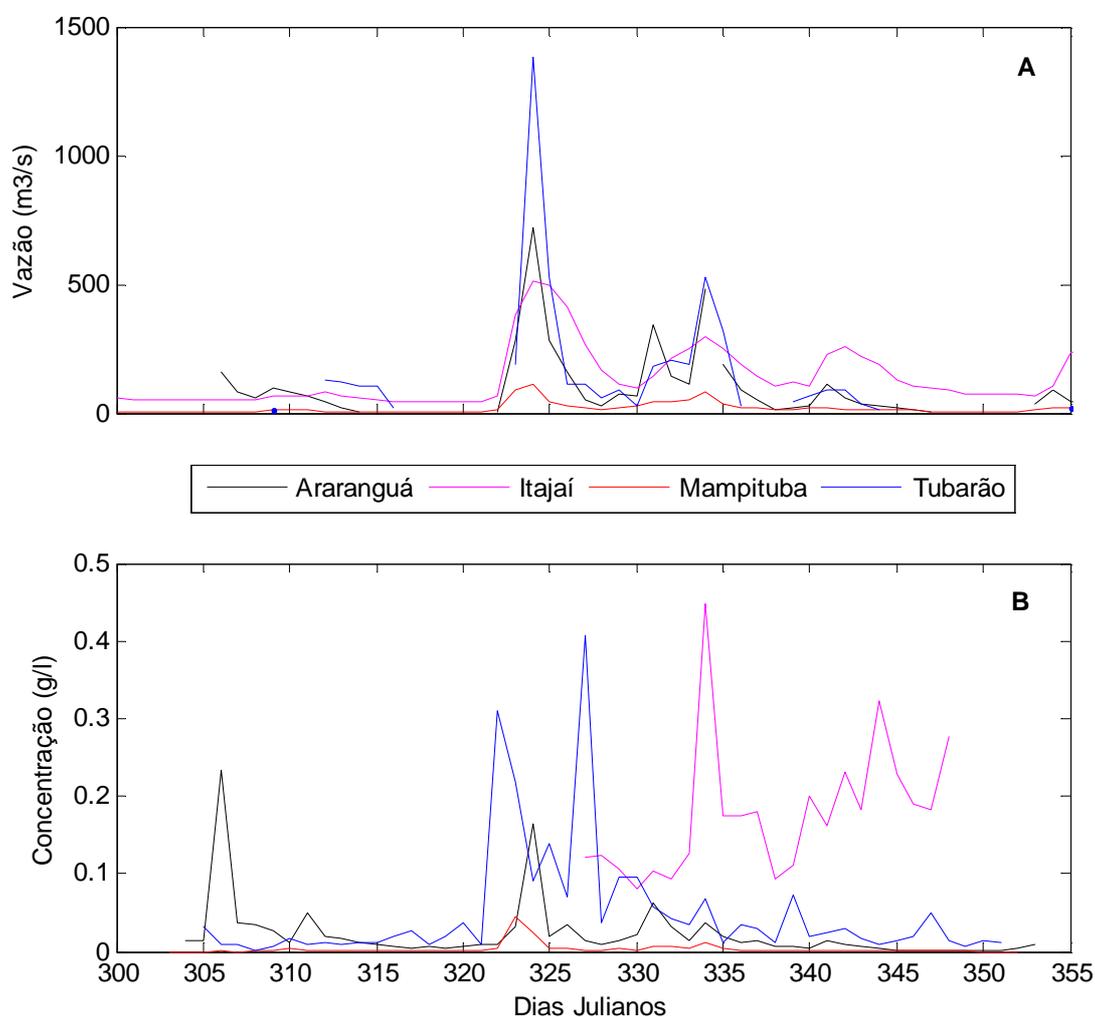


Figura 5.8. Concentração de material particulado em suspensão a montante nos rio Itajaí, Tubarão, Araranguá (rio Itoupavas) e Mampituba para os meses de novembro e dezembro de 2006. O dia Juliano 305 é o dia 1 de novembro de 2006 e o dia 350 é o dia 16 de dezembro de 2006.

Observa-se que cada estuário tem padrão bastante aleatório e que responde ao percentual de bacia hidrográfica representado pelo local de observação, relacionando-o ao tempo que leva para receber as águas da chuva que cai na bacia. No rio Tubarão a estação utilizada é a mais próxima do local de coleta em termos relativos, já se encontrando na porção de planície costeira daquela bacia hidrográfica, ocorre um aumento na concentração de MPS nesse estuário mesmo sem um incremento de vazão, podendo ser atribuído a presença da cidade de Tubarão, na estação de coleta. No rio Mampituba, a estação mais a montante, fica no sopé da Serra Geral, de forma que a água ali quase não recebe contribuição de MPS. No rio Itajaí e Araranguá os locais de coleta foram bastante satisfatórios, porém como o estuário do rio Araranguá se forma pela junção de dois rios (Itoupavas e Mãe Luzia) a contribuição a montante ficou restrita as observações no rio Itoupavas, que possui maior vazão.

O estudo comparativo resultou na confecção do Quadro 5.1, o qual apresenta um resumo dos parâmetros hidrológicos, físicos e oceanográficos dos estuários estudados e do Itajaí-açu em ordem de importância da Bacia Hidrográfica, parâmetros organizados em dois setores, bacia hidrográfica e estuário. Os dados resumidos no Quadro 5.1 serão discutidos no próximo item.

Quadro 5.1. Parâmetros hidrológicos, físicos e oceanográficos dos estuários estudados e do rio Itajaí-açu (Q_{mlt} – vazão média de longo termo; Q_{90} , Q_{50} e Q_{10} – vazões de permanência mínimas esperadas a 90, 50 e 10% do período; R/P – razão de fluxo pelo prisma de maré; Comp. – comprimento; Temp – temperatura; Vel. – velocidade).

PARAMETROS	ITAJAI	TUBARÃO	ARARANGUÁ	MAMPITUBA
BACIA HIDROGRÁFICA				
Bacia Hidrográfica (km ²) ¹	15500	5100	3020	1220
Elevação máxima	1672	1766	1430	997
Elevação média	508	768	660	414
Soma do comp. dos cursos (km) ¹	24171	7172	5916	1864
Densidade de drenagem (km/km ²) ¹	1,55	1,41	1,95	1,52
Geologia topo bacia ¹	Serra Geral	Grupo Brusque	Serra Geral	Serra Geral
Clima ¹	Subtropical mesotérmico	Subtropical mesotérmico	Subtropical mesotérmico	Subtropical mesotérmico
Temp. do ar média anual (°C) ¹	21,4	19,5	18,9	18,3
Evapotranspiração (mm) ¹	1080	911	886	990
Precipitação média anual (mm) ¹	1415	1387,5	1219,4	1200
Q_{mlt}	226	146	33,9*	18,6
Q_{90}	51,2	29,9	5,09*	2,19
Q_{50}	176	83,6	27,4*	11
Q_{10}	443	420	73*	41,7
MPS (mg/l)	178	48,7	31,8	2,8
Transporte (Kg/s)	24,3	6,8	1,7	0,03
ESTUÁRIO				
Comprimento (km)	70	34	32	15
Profundidade média (m) ⁴	7	5	8	4
Largura média (m)	225	104	125	73
Desembocadura	fixa	livre	livre	fixa
Largura da barra (m)	180	246	145	92
Profundidade barra (m)	11,5	3	8	6,5
Altura da maré (m) ⁴	0,8	0,2	0,3	0,5
Vel. média (m/s) ³	-0,4	-0,12	-0,13	-0,24
Vel. vazante (m/s) ³	-0,8	-0,48	-0,48	-0,65
Vel. enchente (m/s) ³	0,6	0,4	0,33	0,5
Salinidade média ³	20,7	20	11	7,8
Temp. media água	---	22,7	18	19
MPS (mg/l)	40	56	25	40
Transporte (kg/s)	34,6	-4,0	-3,0	-3,8
Intrusão salina (km) ⁴	30	28	22	33
Parâmetro estratificação ⁴	1,2	1,3	2,4	1,8
Parâmetro circulação ⁴	2,2	1,7	1,8	1,4
R/P	0,8	9,2	1,1	1,1

1 – Gaplan, (1986); 2 – Schettini, et al. (2006); 3 – Schettini & Carvalho (1998); 4 – Schettini, (2002a); As referencias 2, 3 e 4 fazem menção apenas ao estuário do rio Itajaí-açu. *Rio Itoupavas.

5.6 – DISCUSSÃO

Os estuários dos rios Itajaí e Tubarão recebem águas das duas maiores bacias hidrográficas catarinenses, são também os estuários que possuem as maiores elevações. Uma grande diferença entre eles é que o Itajaí é bastante meandrante na planície costeira e chega até o mar através de uma desembocadura fixa, enquanto o estuário do rio Tubarão possui seu curso final retificado e desemboca livremente em sistema de lagunas costeiras. Os estuários do Araranguá e do Mampituba apresentam-se meandrantés na planície costeira, com desembocaduras livre e fixa, respectivamente.

Comparando a disponibilidade hídrica (Quadro 5.1), através da relação da precipitação menos a evaporação (P-E) temos um saldo hídrico que variou entre 446,5 mm na bacia do Araranguá e 210 mm na bacia do Mampituba. O que está de acordo com a Q_{90} apesar de pequena sempre positiva. A intrusão salina nos estuários varia entre 22 a 33 nos estuários e a variação de maré é maior em Itajaí e menor no estuário do rio Tubarão.

A razão entre a Razão de fluxo (R) e o Prisma de maré (P) relaciona a importância relativa entre as forçantes de maré e a descarga fluvial. No estuário do rio Tubarão essa razão é 9 vezes maior do que nos demais estuários (Quadro 5.1), que possuem maiores alturas de maré, entretanto nestes ela é bem próxima de 1, o que indica um certo equilíbrio entre as forçantes. Isso quer dizer que a cada ciclo de maré o volume de água doce que escoar no estuário do rio tubarão é 9 vezes maior que aquele que é trocado a cada ciclo de maré (Miranda, et al., 2002), enquanto que nos estuário do Araranguá, Mampituba e Itajaí, o volume trocado é 1 vez maior. Essa razão permite uma visão geral da situação, considerando-se se a largura e a profundidade exercem algum controle sobre a quantidade de mistura que cada elevação e diminuição de maré irá produzir na coluna de água (Dyer, 1997).

Aplicando-se a equação de REO para MPS do rio Itajaí-açu e comparando-se com a de cada estuário observou-se um erro menor que 2% para os estuários do rio Tubarão e Araranguá para concentrações inferiores a $0,3 \text{ g.L}^{-1}$, e quase 7% para concentrações superiores a $0,5 \text{ g.L}^{-1}$. Para o estuário do rio Mampituba, o erro para concentrações menores que $0,3 \text{ g.L}^{-1}$ foi de 5% aproximadamente, porém para concentrações maiores que $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ foi de 36%. Essa análise simplificada indica grande similaridade entre os estuários dos rios Itajaí, Tubarão e Araranguá, e uma maior

diferença em relação ao estuário do rio Mampituba, não ficando recomendada a aplicação da equação do rio Itajaí-açu para este estuário.

No estuário do rio Mampituba, no entanto foi possível realizar uma calibração completa, estabelecendo a relação entre o REO, o REA e o MPS, conforme detalhado por D'Aquino, et al (submetido b). Enquanto nos demais estuários, onde não foi possível uma calibração satisfatória para REO, REA e MPS foi utilizada a equação do rio Itajaí-açu, o que se justifica em função dos baixos percentuais de erro.

A circulação do material particulado em suspensão ocorre devido as característica do movimento das águas nos estuários (Postma, 1967), de forma que a observação da concentração de MPS nos estuários do rio Tubarão, Araranguá e Mampituba associado a velocidade de corrente durante alguns ciclos de maré, todos em período de maré de sizígia, de forma a realizar as observações em condições hidrodinâmicas mais marcantes. A pesar de não serem campanhas sinópticas, foi possível verificar em todos eles a associação da elevação na concentração de material particulado em suspensão com os períodos de maiores intensidades de correntes, estando mais associada a porção da coluna de água mais próxima do fundo na maior parte do tempo. Indicando o processo de ressuspensão como um fator contribuinte para a concentração de MPS observada na porção estuarina (e.g. Nichols, 1984; Siegle et al., 2009).

A participação de cada forçante hidrodinâmica no processo de transporte de MPS foi realizada em função da sua contribuição como um termo advectivo, que representa processos no sentido estuário afora, ou como um termo dispersivo, com sentido estuário adentro. Apesar das diferentes condições de descarga fluvial e clima em que os estuários foram amostrados, de forma geral observa-se uma semelhança entre eles em termos mecanismos de transporte de material particulado em suspensão, em todos os estuários o termo da descarga fluvial (A) foi o mais significativo no transporte estuário afora, assim como no Itajaí-açu, conforme verificado por Schettini, et al (2006).

O termo da correlação de maré (C) é normalmente observado em um termo dispersivo (Miranda et al., 2002), porém apresentou-se para todos os estuários como um termo com sentido estuário afora. A significância deste mecanismo está relacionada a diferença de fase entre a estufa de maré e as maiores concentrações de MPS. Nos estuários estudados sua participação variou entre 10 a 15 %. Segundo Siegle et al., (2009) em condições em que há assimetria do regime de correntes em termos de tempo ou intensidade este mecanismo pode assumir grande importância no transporte. Com

isso, explica-se a importância desta componente, sendo dada pela assimetria de correntes e seu sentido estuário afora, dado pela dominância da componente fluvial em todos os processos estuarinos. Em estuários como o do rio Caravelas na Bahia, que é um estuário bem misturado e fracamente estratificado (Pereira, 2009; Schettini & Miranda, 2010), o qual tem sua hidrodinâmica e balanço sedimentar modulado pela maré, sendo o aporte de água doce irrelevante, apresenta como principal mecanismo de transporte de MPS dispersivo a correlação de maré (Pereira, 2009).

Dos mecanismos dispersivos, a circulação gravitacional foi o termo mais significativo para os estuários do Araranguá, principalmente nas primeiras 25 horas, no Mampituba e no baixo estuário do rio Itajaí-açu com 62, 51 e 55%, respectivamente. O bombeamento de maré (E) foi o segundo termo mais significativo no transporte estuário adentro, sua participação nas últimas 25 horas de medições no Araranguá foi de 88%, superando a circulação gravitacional. Este período reflete o reestabelecimento da circulação gravitacional neste estuário e a presença de cunha salina após a passagem da onda de cheia.

No estuário do rio Tubarão o termo do transporte de Stokes (B) apresentou sentido de enchente, assim como no Itajaí-açu, com 84% do transporte estuário adentro, enquanto no médio e baixo Itajaí-açu foi de 5 e 78%, respectivamente. Os estuários do Tubarão, Mampituba e médio Itajaí-açu apresentaram ainda um termo dispersivo referente as flutuações por vento (G), com grande importância e sentido estuário adentro, participando com 12, 25 e 14%, respectivamente.

Os estuários do sul de Santa Catarina mostram-se semelhantes no aspecto da importância da forçante fluvial na hidrodinâmica estuarina. Fato esse que os classifica conforme o diagrama de circulação-estratificação (Figura 5.4) como estuários de cunha salina. A dominância fluvial nestes estuários é favorecida pela maré astronômica, que na região costeira em questão se classifica como micro-maré (variação < 2 m). O regime de micromarés também favorece as forçantes meteorológicas, de forma que a variação no nível de água causada pelo vento força o gradiente de pressão, e tempestades ganham significância, este tipo de processo influencia os mecanismos de transporte advectivo nos estuários.

Como já verificado por Beltrame (2003), Truccolo, et al. (2006), entre outros, o vento NE atuando na costa de Santa Catarina provoca retirada de água da costa devido ao transporte de Ekman, podendo levar a fenômenos de ressurgência costeira e forçando o gradiente de pressão do estuário em direção ao mar. Em casos de predominância de

vento S-SW, ocorre o empilhamento de água na costa, elevando o nível na região costeira e muitas vezes fazendo “barreira” para o fluxo estuário afora, podendo aumentar a importância dos processos dispersivos no transporte por flutuações por vento.

Além dos ventos e sistemas de alta e baixa pressão que atuam na região, a precipitação é uma forçante meteorológica muito importante, pois gera o incremento na vazão dos rios. O aumento deste fluxo estuário afora pode favorecer a formação de uma cunha salina que avança estuário adentro com a preamar, de modo que o material particulado em suspensão transportado pelo fluxo de água doce escoar sob a cunha e é exportado diretamente para a plataforma interna adjacente. Neste caso o estuário estaria “funcionando” no modo fluvial (Schettini & Toldo, 2006). Caso a precipitação se intensifique e persista, elevando a vazão a níveis máximos, dificilmente a cunha salina consegue avançar estuário adentro, e processos de erosão de sedimentos de fundo ficam favorecidos (Schettini, 2002b), o estuário continua no modo fluvial.

Quando ocorrem períodos de chuvas pouco expressivas, a maré ganhará importância, a cunha salina avança no estuário podendo trazer consigo material particulado em suspensão da plataforma continental adjacente estuário adentro, enquanto a água doce flui estuário a fora com pouquíssima quantidade de MPS, de forma que o estuário se torna um importador de sedimentos finos, atuando no modo marinho (Schettini & Toldo, 2006). Caso ocorram períodos significativos de estiagem, a maré ganha importância tal que pode gerar mistura no estuário, deixando-o parcialmente homogêneo. O sal atua como floculador favorecendo a sedimentação de material particulado em suspensão no estuário.

O modo de transporte de material particulado em suspensão pode ser previsto através da relação entre as vazões de permanência e a presença da cunha salina:

$VAZÃO \geq Q_{mlt} = \text{cunha} + \text{MPS} \rightarrow \text{exportador de MPS (MODO FLUVIAL)};$

$VAZÃO \geq 2 * Q_{10} = \text{sem cunha} + \text{MPS} \rightarrow \text{exportador de MPS (MODO FLUVIAL)};$

$VAZÃO < Q_{mlt} = \text{cunha intensa} \rightarrow \text{importador de MPS (MODO MARINHO)};$

$VAZÃO \leq Q_{90} = \text{mistura} \rightarrow \text{importador de MPS (MODO MARINHO)}$

Comparando com os valores de MPS a montante (Quadro 5.1), pode-se dizer que o mesmo não sofreu grande perda ou incremento em relação ao que entra a montante, para os estuários do Tubarão e do Araranguá, já que nestes estuários a concentração

média mantém a mesma magnitude. Enquanto para o estuário do rio Mampituba, ocorre um incremento significativo de MPS, crescendo em uma ordem de grandeza da montante para jusante.

O transporte de material particulado em suspensão a montante, na porção fluvial dos estuários foi calculado através da concentração média de MPS observada concomitantemente nos rios Itajaí-açu, Tubarão, Araranguá e Mampituba, multiplicada pela vazão média no mesmo período. O transporte fluvial foi de 24,3 e 1,7 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ para os rios Itajaí-açu e Tubarão, e 6,8 e 0,03 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ para o Araranguá e Mampituba, respectivamente (Quadra 5.1). Na porção estuarina, o transporte foi obtido através da concentração média de MPS na coluna de água durante as campanhas oceanográficas, multiplicada pela área da seção transversal e pela velocidade média na coluna de água durante o mesmo período amostral.

O transporte para o estuário do rio Araranguá foi calculado para as primeiras e as últimas 25 horas de campanha em 4,5 e 1,5 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. No Tubarão e Mampituba foi respectivamente 4 e 3,8 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Todos apresentando sentido estuário afora, indicando exportação de MPS. No estuário do rio Itajaí-açu segundo o trabalho de Schettini, et al. (2006), o transporte médio foi de 34,6 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, estuário adentro. O estuário do Rio Hudson possui cunha salina, uma vazão média de 550 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, e está sujeito ao regime de micro-marés (Hunkins, 1981), apresentado condicionantes hidrodinâmicas bastante semelhantes a do estuário do rio Itajaí-açu. Apesar de que, segundo Dyer, (1995), estuários altamente estratificados apresentam a advecção fluvial como principal mecanismo de transporte e tem menor eficiência na retenção de material particulado em suspensão. O estuário do rio Hudson é um importador de sedimentos, segundo o trabalho de Geyer, et al. (2001), a direção do fluxo de sedimentos é controlado pela descarga fluvial, enquanto a magnitude do fluxo é controlada preamar e baixamar na amplitude da maré. O mesmo tipo de mecanismo pode atuar no estuário do rio Itajaí-açu.

No caso dos estuários do sul de Santa Catarina, os mecanismos de transporte atuantes, bem como a exportação de material particulado em suspensão durante o período observado, reforçam a dominância fluvial dos processos hidrodinâmicos característicos de estuário de cunha salina, estando de acordo com a classificação através de diagrama de Hassen & Rattray (1966). Com isso, e através dos levantamentos oceanográficos realizados pode-se afirmar que os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba respondem como estuários dominados pela descarga fluvial podendo ser

enquadrados no modelo de transporte de material particulado em suspensão proposto por Schettini & Toldo (2006) para o estuário do rio Itajaí-açu.

5.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função da variabilidade climática, do ciclo do material particulado em suspensão na bacia hidrográfica e no estuário, uma avaliação genuína dos processos de transporte e retenção de MPS num estuário deve ser realizada com base em um monitoramento de longo período das variáveis hidrológicas e meteorológicas concomitante ao controle sinóptico entre as concentrações de MPS a montante e jusante. Porém os mecanismos de transporte dão relevância aos processos fluviais sob os de maré, favorecendo o modelo proposto, bem como o transporte médio calculado para todos os estuários no período das campanhas oceanográficas caracterizou esses sistemas como exportadores de sedimentos.

O método acústico se mostra bastante eficiente para o monitoramento de MPS por garantir resolução espacial e temporal bastante alta, porém se limita a calibração, que deve ser realizada para cada estuário em especial. Neste trabalho a estimação do MPS através do retroespalhamento acústico permitiu observar a resposta do MPS a hidrodinâmica de cada estuário. Estando ela mais associada aos períodos mais intensos de correntes. Nos estuários dos rios Tubarão e Araranguá a concentração de material particulado em suspensão responde mais aos períodos de entrada da maré, correntes de enchente, enquanto que no Mampituba, mostra grande associação com o encontro da água doce com a salgada, indicando influencia dos processos de floculação.

O conhecimento sócio-econômico da região e o grau de preservação das bacias hidrográficas, bem como o uso do solo devem ser fatores monitorados durante um estudo mais amplo e relacionados com o MPS monitorado a montante.

Pelo que foi abordado neste trabalho, o entendimento geral dos estuários do sul de Santa Catarina responde oceanograficamente aos padrões já bem conhecidos para o estuário do rio Itajaí-açu, como processos básicos de transporte de sedimentos finos em estuários cunha salina dominados por enchentes relâmpago. Porém as particularidades de cada estuário são fatores decisivos no conhecimento pleno do ambiente e completam o entendimento necessário para a gestão, uso e tomada de decisões.

Os processos que controlam os ciclos do MPS na bacia hidrográfica e no estuário, bem como os processos hidrodinâmicos variam ao longo do tempo e a combinação entre essas variáveis se ajusta dinamicamente, de forma que os estuários não podem ser entendidos e nem classificados de forma estática e simplista.

5.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asp, N. E. ; Siegle, E. ; Schettini, C. A. F.; Losso, A.P. ; Klein, A. H. F. 2009. Hipsometria de bacias de drenagem do centro-norte catarinense e implicações para a zona costeira. Boletim Paranaense de Geociências, ACEITO.

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.

D'Aquino, C.A.; Schettini, C.A.F; Barreto, G.A.M. & Andrade Neto, J.S. 2008. Hidrodinâmica do Estuário do rio Mampituba, SC. In: Anais, Simpósio Brasileiro de Oceanografia, IO-USP, São Paulo. Mídia digital.

D'Aquino, C.A.; Schettini, C.A.F & Pereira Filho, J. Fluvial modulation of salt transport in a highly stratified estuary. Braz. J. Oceanogr.

D'Aquino, C.A., Andrade Neto, J.S.; Barreto, G.A.M & Schettini, C.A.F. Caracterização oceanográfica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. SUBMETIDOa. Res. Bras. Geof.

D'Aquino, C.A., Franklin da Silva, L, Couceiro, M.A.A., Pereira, M.D. & Schettini, C.A.F. Transporte de sal e hidrodinâmica do estuário do rio Tubarão – SC, Brasil. SUBMETIDO b. Res. Bras. Rec. Hid.

Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: PERILLO, G.M.E. (Ed.) *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries Developments in Sedimentology*. New York, Elsevier Science B.V., pp. 423–449.

Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: A physical introduction* (2nd Edition). New York, John Wiley and Sons, 195p.

ELETROSUL. DET. DEAT. 1990. Monitoramento ambiental na região de Tubarão 1987/1988. Florianópolis: ELETROSUL.

GAPLAN – GABINETE DE PLANEJAMENTO DE SANTA CATARINA. 1986. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 173 p.

Geyer, W.R., Woodruff, J.D. & Traykovski, P. 2001. Sediment transport and trapping in the Hudson river estuary. *Estuaries*, v. 24(5): 670-679.

Hunkins, K. 1981. Salt dispersion in the Hudson estuary. American meteorological society. *Journal of physical oceanography*, v. 11, p.729-738.

Krebes, A.S.J. 2004. Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

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.

Nichols, M. M. 1984. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: Mehta, A. J. (Ed.). *Estuarine cohesive sediment dynamics*. Berlin/New York: Springer Verlag, p. 5-42. *Lecture Notes on Coastal Estuarine Studies*.

Nortek Technical Notes. 2001. Monitoring Sediment Concentration with Acoustic Backscattering Instruments. *Nortek technical note* No. 003. 5p.

Postma, H. 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In, *Estuaries*, edited by G.H. Lauff, AAAS, Washington, pp. 158-179.

Prandle, D. 2009. *Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation and morphology*. Cambridge University Press, New York.

Reginato, P.A.R. 1996. Geologia e Evolução Holocênica da região Norte da Planície Costeira do Sul. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências da UFRGS; Porto Alegre.

SANTA CATARINA. 1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica da bacia do rio Araranguá. Documento síntese. Florianópolis. v.1.

Schettini, C.A.F. & Carvalho, J.L.B. 1998. Hidrodinâmica e distribuição de sólidos em suspensão no estuário do rio Itajaí-açu (Relatório). Notas Tec. Facimar, 2:131-140.

Schettini, C.A.F. 2002a. Caracterização física do estuário do rio Itajaí-Açu. Rev. Bras. Rec. Hidric., 7(1):123-142.

Schettini, C.A.F. 2002b. Near bed sediment transport in the Itajaí-Açu River estuary, southern Brazil. In: Winterwerp, J.C., Kranenburg, C. (eds). Fine sediment dynamics in the marine environment. Elsevier, New York, pp 499–512.

Schettini, C.A.F, & Toldo, E.E. Jr. 2006. Fine sediment transport modes in the Itajaí-Açu estuary, Southern Brazil. J Coastal Res, SI, 39:515–519.

Schettini, C.A.F. & Zaleski, A. R. 2006. A Utilização de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Doppler na Determinação do Material Particulado em Suspensão na Água: Aplicações. Rev. Bras. Rec. Hidric., 11: 201-208.

Schettini, C.A.F, Ricklefs, K., Truccolo, E.C. & Golbig, V. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. Ocean Dynamics, 56(3-4): 308.

Siegle, E. & Asp, N.E. 2007. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. Braz. J. Oceanogr., 55(2):109-120.

Siegle, E.; Schettini, C.A.F.; Klein, A.H.F.; Toldo Jr., E.E. 2009. Hydrodynamics and suspended sediment transport in the Camboriú estuary - Brazil: pre-jetty conditions. Braz. J. Oceanogr., 57(2)123-135.

Truccolo, E.C.; Franco, D.; Schettini, C.A.F. 2006. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. J. Coast. Res. 39(SI):547-552.

Zaleski, A. R.; Schettini, C.A.F.. 2006. Procedimentos para Calibração de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Döppler para a Determinação da Concentração de Material Particulado em Suspensão na Água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 11, p. 191-200.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco da presente Tese foi o estudo dos estuários da região Sul de Santa Catarina, Tubarão, Araranguá e Mampituba, praticamente inexplorados em termos oceanográficos. E sua comparação com o conhecido estuário do rio Itajaí-açu. Os capítulos de 2, 3 e 4 contemplam este objetivo para cada estuário separadamente. A como hipótese de que todos são sistemas dominados pelo rio, e respondem segundo o modelo de transporte de sedimentos finos proposto para o estuário do rio Itajaí-Açu, ainda que apresentem particularidades, é verificada no capítulo 5. Abaixo são colocadas as principais considerações deste estudo com um todo.

O estuário do rio Araranguá apresenta uma estrutura hidrodinâmica que responde rapidamente a eventos de enchente relâmpago, com transporte de sal dominado pelas componentes estuário abaixo (descarga fluvial e circulação gravitacional). O baixo pH de suas águas estuarinas juntamente com a baixa turbidez sugere que este estuário atua como fonte de poluentes dissolvidos para as águas costeiras bem como aprisiona os sedimentos finos.

No estuário do rio Mampituba foi verificada a importância da componente meteorológica nos processos hidrodinâmicos. O comportamento geral do estuário em relação ao transporte de sal e sedimentos em suspensão responde bastante bem ao modelo proposto para o rio Itajaí-açu.

O estuário do rio tubarão apresenta-se com um estuário dominado por processos fluviais, no qual ocorre presença de cunha salina e o transporte de sal ocorre primariamente como função das forçantes advectivas. O seu transporte de sedimentos parece ocorrer de acordo com a descarga fluvial, porém merece ser tema de estudos aprofundados e direcionados, envolvendo não só o estuário do rio Tubarão, mas o sistema lagunar que recebe suas águas. Além disso, a variável meteorológica parece ter grande influencia sob os processos oceanográficos locais e não pode deixar de ser estimada e relacionada em estudos futuros.

Os estuários sul catarinenses, conforme apresentado nos capítulos 2, 3 e 4, mostram-se semelhantes no aspecto da importância da forçante fluvial na hidrodinâmica estuarina. Classificam-se conforme o diagrama de circulação-estratificação como estuários de cunha salina. A dominância fluvial nestes estuários é também favorecida pelo regime de micromarés.

Os estuários do rio Itajaí-açu e Mampituba foram os que apresentaram maiores semelhanças em relação aos mecanismos de transporte de sal. São ambos estuários de desembocaduras fixas por molhes, meandantes na sua porção terminal tendo como principal diferença a forçante de maré, que é apresenta maior amplitude em Itajaí, e em suas proporções de tamanho, sendo o estuário do rio Itajaí maior, mais largo e profundo. Os estuários do Tubarão e do Araranguá apresentaram-se parecidos, tendo em comum a desembocadura livre e atuante como um filtro, cada um a sua maneira. No Araranguá, a desembocadura é bastante rasa e tende a migrar, e no Tubarão ela deságua em sistema de lagunas costeiras.

Em função da variabilidade climática, do ciclo do material particulado em suspensão na bacia hidrográfica e no estuário, uma avaliação genuína dos processos de transporte e retenção de MPS num estuário deve ser realizada com base em um monitoramento de longo período das variáveis hidrológicas e meteorológicas concomitante ao controle sinóptico entre as concentrações de MPS a montante e jusante. No presente estudo, os estuários se apresentaram como exportadores de sedimentos finos em suspensão.

O método acústico se mostra bastante eficiente para o monitoramento de MPS por garantir resolução espacial e temporal bastante alta, porém se limita a calibração, que deve ser realizada para cada estuário em especial. Neste trabalho a estimacão do MPS através do retroespalhamento acústico permitiu observar a resposta do MPS a hidrodinâmica de cada estuário. Estando ela mais associada aos períodos de entrada da maré, as correntes de enchente, nos estuários dos rios Tubarão e Araranguá, enquanto que no Mampituba, mostra grande associação com o encontro da água doce com a salgada, indicando influencia dos processos de floculação.

Os valores de concentração de MPS a montante não sofreram grande perda ou incremento em relação ao que entra a chega para os estuários do Tubarão e do Araranguá, já que nestes estuários a concentração média mantém a mesma unidade. Enquanto para o estuário do rio Mampituba, ocorre um incremento significativo de MPS, crescendo em uma unidade da montante para jusante. A relação entre o fornecimento de MPS, o tamanho da bacia e os fatores contribuintes para sua concentração não foram determinados de forma expressiva neste estudo, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

O principal mecanismo de transporte de MPS estuário afora é a descarga fluvial e estuário adentro a circulação gravitacional, com exceção do estuário do rio Tubarão,

que apresentou a deriva de Stokes como termo mais significativo. Os mecanismos de transporte estão condicionados também ao fluxo de água doce que altera a importância das forçantes de maré (termos dispersivos) e pode variar temporalmente e espacialmente no estuário.

A exportação de material particulado em suspensão durante o período observado, reforça a dominância fluvial dos processos hidrodinâmicos característicos de estuário de cunha salina, estando de acordo com a classificação através de diagrama de Hassen & Rattray (1966). Com isso, e através dos levantamentos oceanográficos realizados pode-se afirmar que os estuários dos rios Tubarão, Araranguá e Mampituba respondem como estuários dominados pela descarga fluvial podendo ser enquadrados no modelo de transporte de material particulado em suspensão proposto por Schettini & Toldo (2006) para o estuário do rio Itajaí-açu.

Pelo que foi abordado neste trabalho, o entendimento geral dos estuários do sul de Santa Catarina responde oceanograficamente aos padrões já bem conhecidos para o estuário do rio Itajaí-açu, como processos básicos de transporte de sedimentos finos em estuários cunha salina dominados por enchentes relâmpago. Porém as particularidades de cada estuário são fatores decisivos no conhecimento pleno do ambiente e completam o entendimento necessário para a gestão, uso e tomada de decisões.

Apesar do que foi conquistado durante a execução deste estudo em termos de conhecimento da hidrodinâmica dos estuários do sul de Santa Catarina e seus processos de transporte e retenção de sedimentos finos muito há ainda a ser desvendado. Como por exemplo, a determinação do avanço da cunha salina estuário adentro como resposta a componente fluvial, seus impactos nas atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica e no consumo de água nos estuários do Tubarão, Araranguá e Mampituba. O estudo da circulação e mistura no médio estuário em busca da possível existência de uma região de turbidez máxima e suas implicações no balanço sedimentar.

ANEXOS

Anexo 1 – E-mail de encaminhamento da versão final e primeira página do artigo.

De: <tgonzalez@usp.br>

Data: 11 de maio de 2010 14:59

Assunto: Brazilian Journal of Oceanography – Final

Para: guto.schettini@gmail.com

Prezado Prof.

Encaminho em anexo o trabalho "FLUVIAL MODULATION OF HYDRODYNAMICS ...", para correção final.

Grata

Cristina

BRAZILIAN JOURNAL OF OCEANOGRAPHY, 58(3): 2010

FLUVIAL MODULATION OF HYDRODYNAMICS AND SALT TRANSPORT IN A HIGHLY STRATIFIED ESTUARY

Carla de Abreu D'Aquino¹, Jurandir Pereira Filho² and Carlos Augusto França Schettini^{3,}*

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Geociências – PPGGEO
(Av. Bento Gonçalves, 9500. Bl. 1. Prédio 43113, Campus do Vale Agronomia, 91509-900 POA, RS, Brasil)
cadaquino@gmail.com

²Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI
Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – CTTMar
(Ru Uruguai, 458. Bl. 19. Sala 116, 88302-202 Itajaí, SC, Brasil)
jurandir@univali.br

³Universidade Federal do Ceará - UFC
Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR
(Av. da Abolição, 3207, 60165-081 Meireles, Fortaleza, CE, Brasil)

*Corresponding author: guto.schettini@gmail.com

ABSTRACT

An oceanographic campaign was conducted in the Araranguá river estuary during the period from May 11th to 13th of 2006 in order to produce a first hydrographic characterization of this system. The campaign was carried out during the spring tide period, and coincidentally after an intense rain event in the region which produced a peak in river discharge. Water level, currents and salinity time series were recorded hourly during a 50-hour period, at a site nearly 7 km upstream from the estuarine mouth. Two longitudinal distributions of salinity along the estuary were also recorded. The hydrographic data time-series were used to compute the advective salt flux in order to investigate the changes in the transport terms as a function of the change in discharge. The results showed that the estuarine structure was strongly modulated by the river discharge. The drop in water level of about 0.5 m during the first 24 hours was directly related to the ebb phase of the river flood. The water column was highly stratified throughout the period, therefore the stratification increased during the last 24 hours. The currents were stronger, ebbing and uni-directional at the beginning and became weaker and bidirectional as the water level went down, assuming a tidal pattern. The total salt transport in the first 25 hours was of $-13.6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (seawards), decreasing to $3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ during the last 25 hours (landwards). It was also noticeable that the pH in the estuary, recorded together with the salinity, was around 5, showing that the water quality in the estuary is affected by the coal mining activity in the hydrographic basin.

RESUMO

Uma campanha oceanográfica foi realizada no estuário do rio Araranguá durante o período de 11 e 13 de maio de 2006, objetivando fazer uma primeira caracterização hidrográfica do sistema. A campanha foi realizada em condição de maré de sizígia, e coincidentemente após um evento de chuvas intensas na região que produziu um pico de descarga fluvial. Séries temporais de nível da água, correntes e salinidade foram registradas durante 50 horas, em um local aproximadamente 7 km da desembocadura. Dois levantamentos de salinidade longitudinais também foram realizados. Os dados hidrográficos foram utilizados para calcular o fluxo advectivo de sal para investigar os termos do transporte em função da mudança da descarga fluvial. Os resultados mostram que a estrutura estuarina foi fortemente modulada pela vazão fluvial. O nível da água baixou em torno de 0,5 m durante as primeiras 25 horas em relação direta com o decaimento da enchente do rio. A coluna de água foi altamente estratificada durante todo o período, entretanto a estratificação aumentou durante as últimas 25 horas. As correntes foram mais intensas, de vazante e uni-direcionais no início, tornando mais fracas, bidirecionais a medida que o nível da água baixou, adquirindo um padrão de maré. O transporte total de sal nas primeiras 25 horas foi de $-13,6 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (sentido do mar), mudando para $3 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ nas últimas 25 horas (sentido de terra). Foi também notável que o pH no estuário, registrado junto com a salinidade, foi em torno de 5, indicando que a qualidade da água no estuário é afetada pela atividade de mineração de carvão que ocorre na bacia hidrográfica.

Descriptors: Estuarine circulation; Salt wedge, Flash flood.

Descritores: Circulação estuarina, Cunha salina, Enchente relâmpago.

Anexo 2 – E-mail de recebimento do artigo submetido a Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

De: **ABRH - Sistema Revisão de Artigos** <rbrh@abrh.org.br>
Data: 14 de maio de 2010 16:14
Assunto: RBRH - Enviado para Revisão
Para: guto.schettini@gmail.com

Sistema de Apoio à RBRH

ACUSANDO RECEBIMENTO

Prezado Senhor:

Recebemos o artigo enviado por Vossa Senhoria, intitulado "TRANSPORTE DE SAL E HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO TUBARÃO – SC, BRASIL." submetido a RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

Este artigo foi enviado a dois revisores para avaliação. Assim que recebermos as análises comunicaremos o resultado a Vossa Senhoria.

Informamos, outrossim, que de acordo com as novas normas adotadas pela Associação, os artigos deverão ter no máximo 10 páginas editadas no padrão da revista. As páginas excedentes terão um custo de R\$ 150,00 (cento e cinquenta reais) por página. Sendo que o máximo de páginas aceitas será de 20 (vinte).

Agradecemos o envio do trabalho e estamos a disposição para qualquer esclarecimento necessário.

Atenciosamente,

Comitê Editorial da RBRH

Anexo 3 – E-mail de recebimento do artigo submetido a Revista Brasileira de Geofísica

De: **Editor RBGf** <editor@sbgf.org.br>
Data: 14 de maio de 2010 19:42
Assunto: Ref.: Artigo submetido à RBGf 482
Para: guto.schettini@gmail.com

Prezado Sr. Carlos Augusto França Schettini,

Acusamos o recebimento do artigo intitulado “Caracterização oceanográfica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC” da autoria de Carla de Abreu D’Aquino, João Silva de Andrade Neto, Guilherme Algemiro Manique Barreto e Carlos Augusto França Schettini.

Para controle o trabalho recebeu o número: 482.

Somos gratos por considerarem a RBGf para sua publicação.

Atenciosamente,

Cleverson Guizan Silva
Editor-chefe da RBGf