

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

**O PAPEL DA MARÉ E DA DESCARGA FLUVIAL NA
CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ**

GUILHERME ALGEMIRO MANIQUE BARRETO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Bruner de Miranda

Prof. Dr. Eliane Cristina Truccolo

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título de
Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Guto, pela orientação e apoio ao longo da realização deste trabalho e por todo o conhecimento passado a mim, aos meus familiares, em especial minha Mãe e meus Avós, e aos meus amigos João, Carla, Marçal e Lourival pelas ajudas prestadas.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
SUMÁRIO.....	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
APRESENTAÇÃO.....	viii
INTRODUÇÃO	1
ÁREA DE ESTUDO.....	5
MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
Campanha amostral	7
Redução e Análise de dados	9
RESULTADOS	13
DISCUSSÃO	22
CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS.....	28
ANEXO I.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudos, contendo a localização das estações #1 e #2.....	6
Figura 2 – Valores diários de descarga do Rio Araranguá para o ano de 2008 e período amostral das estações #1 e #2.	9
Figura 3 – Histograma de ocorrência de direções de correntes das estações #1 e #2.	9
Figura 4 – Descarga referente ao período amostral da estação #2 identificando os intervalos de maior relevância: (A) período de pico de média vazão; (B) período de ausência de vazão e (C) período de pico de alta vazão.....	10
Figura 5 – Freqüência acumulada de ocorrência de vazão e as situações para os períodos A e C (vide Tabela 2).....	11
Figura 6 – Perfis longitudinais de salinidade: (A) 10 de junho, (B) 1 de agosto e (C) 30 de setembro.	13
Figura 7 – Variação dos parâmetros ao longo do período #A de vazão média: (A) Descarga ($m^3.s^{-1}$), (B) nível da água (m), (C,D) correntes residuais ($m.s^{-1}$) na estação #1 e #2, respectivamente.	14
Figura 8 – Vazões diárias do rio Araranguá e perfis médios diários de velocidade de correntes na estação #1 (centro) e estação #2 (em baixo).	16
Figura 9 – Variação da vazão (superior) e do nível (inferior) durante o período de ausência de vazão.	17
Figura 10 – Médias de velocidade de correntes em quadratura e sizígia. À esquerda as curvas referentes à estação #1 e à direita curvas referentes à estação #2.....	18
Figura 11 – Perfis médios da coluna de água comparados ao perfil teórico. Da esquerda para direita: média diária de sizígia, média diária de quadratura e média dos dias 194 a 201. Superior indica estação #1 e inferior indica estação #2.	19
Figura 12 – Variação dos parâmetros relacionados à estação #2 durante o período de pico de alta vazão. (A) Vazão, (B) Nível e (C) velocidade de correntes na coluna de água.	21
Figura 13 – Variação da razão de fluxo calculada para todo o período amostral.....	25
Figura 14 – Variação das médias de correntes residuais da coluna de água nas estações #1 (vermelho) e #2 (verde) durante o período comum de dados às duas estações e estão relacionados ao eixo das coordenadas da esquerda. A linha preta representa o nível e está relacionado ao eixo das coordenadas da direita.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de configuração utilizados para os PACDs nas estações #1 e #2.	8
Tabela 2 – Características dos períodos definidos para análise.	10
Tabela 3 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo nas estações #1 e #2 durante o evento de média vazão.	15
Tabela 4 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #1 durante os períodos de 24 horas de sizígia e quadratura.	17
Tabela 5 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #2 durante os períodos de 24 horas de sizígia e quadratura.	17
Tabela 6 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #2 durante o evento de alta vazão.	20

LISTA DE SÍMBOLOS

Az	Coeficiente de difusão turbulenta
DI	Parâmetro calculado a partir do gradiente de densidade
g	Aceleração da gravidade
G	Gradiente longitudinal de densidade média do estuário
H	Altura total da coluna de água de uma estação
L	Gradiente de declividade superficial do estuário
R	Descarga fluvial por unidade de largura do estuário
ρ	Densidade média da água superficial marinha
RI	Parâmetro calculado a partir da taxa de descarga por unidade de área
τ	Tensão de cisalhamento
WI	Parâmetro calculado a partir da tensão de cisalhamento
z	Profundidade de um ponto na coluna de água

RESUMO

Ao longo do litoral de Santa Catarina ocorrem diversos estuários do tipo cunha salina, sendo os mais expressivos os dos rios Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá, Itapocú, Tijucas e Mampituba, por ordem decrescente de área de bacia hidrográfica. Os estuários altamente estratificados são, em geral, encontrados em regiões de alta contribuição de descargas fluviais e de micromaré, onde a variação máxima de maré não ultrapassa dois metros. São identificados por apresentar uma interface pronunciada de densidade entre a camada inferior e superior da coluna de água. A bacia hidrográfica do rio Araranguá está localizada no extremo sul de Santa Catarina. Esta bacia abrange 16 municípios, totalizando uma área de drenagem de aproximadamente 3020 km² e o comprimento de seus cursos de água chega a 5.916 km. Uma campanha foi realizada no dia 10 de junho de 2008 na área de estudos. Durante esta campanha, foram instaladas duas estações de coleta de dados, a 7,5 km e 31 km da desembocadura e ambas localizadas no talvegue do canal visando obter dados de velocidade e direção de correntes, e variação do nível. Foram realizadas três perfilagens longitudinais com um CTD, as quais foram executadas em diferentes datas, tendo como início a desembocadura e realizando perfis pontuais a cada 1 km e estendido até 30 km. Para a complementação dos dados, foram obtidos ainda dados diários de descarga e cotas, entre os anos de 1943 e 2008 da estação fluviométrica Taquaruçú, localizada no Rio Itoupava a 16 km da junção com o Rio Mãe Luzia a qual da origem ao Rio Araranguá. Estes dados são disponibilizados pelo site da Agência Nacional de Água (ANA). Foram identificados ao longo dos períodos amostrais os principais eventos de alta e baixa descarga, visando identificar qual sua importância e a frequência com a qual ocorrem. A partir desta informação, foram definidos três períodos mais relevantes para análise: “pico de média vazão”, “ausência de vazão” e “pico de alta vazão”. Os perfis longitudinais de salinidade demonstram a variabilidade da espessura da cunha salina. Ao analisar os padrões de circulação do estuário durante os três períodos abordados, é possível observar uma grande semelhança com o estuário do rio Itajaí-Açu, o qual tende a se comportar de duas maneiras em relação ao transporte de sedimentos: exportar grandes quantidades de sólidos em suspensão durante eventos de alta vazão (modo de transporte fluvial), e reter ou importar sedimentos da plataforma adjacente durante períodos de baixa vazão (modo de transporte marinho), no entanto, com menor importância devido a rasa desembocadura e à deriva litorânea. Durante o período de ausência de vazão, quando os efeitos da maré podem ser observados com clareza, foram obtidos valores de velocidade de correntes muito baixos e também muito semelhantes, tanto em sizígia quanto em quadratura.

ABSTRACT

Along the coast side of Santa Catarina several salt wedge estuaries occur, the most expressive of them being the ones on rivers Itajaí-Açu, Tubarão, Araranguá, Itapocú, Tijucas and Mampituba, in a decreasing order of drainage basin area. The highly stratified estuaries are, in general, found in regions of high rate of river discharge and microtide, where the maximum variation of tide is below two meters. They are identified by a pronounced density interface between the lower and higher layer of the water column. The Araranguá river drainage basin is located in the southern extreme of Santa Catarina. Its basin covers 16 cities, with a total drainage area of approximately 3020 km² and the length of its water courses reaches 5916 km. In June 10th 2008, a campaign was performed within the studied area. During it, two data collection stations were installed, at 7.5 km and 31 km of the discharge and both located on the thalweg of the canal and equipped with an ADCP, aiming to obtain speed and current direction and level variation data. Three longitudinal profiling were performed with a CTD, all executed in different days, starting at the river mouth point and conducting spot profiling at every 1 km until 30 km. To complement the data, daily discharge and quota data from the Taquaruçú fluviometric station were obtained, from 1943 to 2008. The station is located on the Itoupava river at 16 km of the junction with Mãe Luiza river, which is the source of the Araranguá river. These data are available on the website of the National Water Agency – Agência Nacional de Águas (ANA). The main events of low and of high discharge were identified throughout the sampling periods, looking to discover its importance and the rate which they occur. Through this information, three periods were defined as having a greater relevance to the analysis. “Medium flow peak”, “absence of flow” and “high flow peak”. The salinity longitudinal profiles show the variation of salt wedge width. It was possible, analyzing the patterns of estuary circulation over the three periods addressed, to observe a great resemblance to the Itajaí-Açu River’s estuary, which tends to behave in two ways in regards to sediment transportation: exporting high amounts of solids in suspension during high flow occurrences (fluvial transport way), and retaining or importing sediments from the adjacent continental shelf during periods of low flow (marine transport way), however with less importance due to the shallow river mouth and the coastal drift. During the period of absence of flow, when the effects of the tide can be clearly observed, the values of current speed obtained were too low and too similar to each other, both in spring and neap tide periods.

APRESENTAÇÃO

A presente dissertação foi desenvolvida como parte da execução do projeto “Processos de Transporte e Retenção de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Araranguá, SC.” Realizado com recursos do CNPq através do Edital Universal de 2006 (Processo N.o 485373/2006-8). O objetivo geral do projeto é compreender melhor os processos que controlam o balanço de sedimentos finos no estuário, o qual apresenta como peculiaridade o efeito da drenagem ácida causada pela atividade de mineração na sub-bacia do rio Mãe Luzia (Couceiro & Schettini, 2010). Durante o projeto foram realizados levantamentos de dados hidrográficos na região estuarina para caracterizar a hidrodinâmica do sistema

Diversos levantamentos foram realizados para a execução do projeto, o qual resultou em três produções bibliográficas até o presente. “Fluvial modulation of hydrodynamics and salt transport in highly stratified estuary” por [D’Aquino et al. \(2010\)](#), o qual foi realizado através da observação de três dias de correntes, além de dois levantamentos ao longo do estuário para medições de salinidade. Este trabalho demonstrou a resposta do estuário a um evento de alta vazão precedido de um período de baixa descarga. A partir dos dados desta mesma campanha foi produzido o artigo “Transporte de sedimentos em suspensão em um estuário altamente estratificado sob condições de descarga fluvial transiente.”, por [Barreto et al. \(submetido\)](#), o qual realizou a calibração de um Perfilador Acústico de Correntes por Efeito Döppler para a obtenção de dados de material particulado em suspensão, resultando no cálculo do transporte para este período.

[Couceiro & Schettini \(2010\)](#) produziram “Estudo da dinâmica dos sedimentos em suspensão do estuário do rio Araranguá: Possíveis efeitos da drenagem ácida da atividade de mineração de carvão.” Através da coleta de grandes quantidades de água dos rios Mãe Luzia e Itoupava, os quais formam o rio Araranguá em seu encontro. Este estudo foi desenvolvido em laboratório através da utilização de um tanque anular, onde foram reproduzidas diversas combinações entre alíquotas de água dos dois rios, salinidade e velocidade de correntes. O presente trabalho complementa o de Couceiro & Schettini (2010), através do provimento de uma

análise da circulação no estuário baseando-se em longas séries de dados observacionais.

Para a obtenção dos dados deste trabalho em questão, foi realizada uma campanha para a instalação de dois Perfiladores Acústicos de Correntes por Efeito Döppler (PACD), que permaneceram durante o período aproximado de três meses coletando dados de direção e velocidade de correntes em dois pontos distintos do estuário. A partir destes dados, foram selecionados e analisados três períodos com condições distintas de vazão, buscando interpretar o comportamento do estuário frente a cada situação e, desta forma, compreender sua hidrodinâmica de um modo geral. Dados complementares de vazão foram obtidos através do website da ANA (Agência Nacional de Águas).

Através da amostragem de um longo período de dados de correntes em duas estações no estuário do rio Araranguá foi possível caracterizar as respostas deste estuário frente as diferentes condições de descarga ocorridas. Através dos resultados pôde-se observar que o regime de marés do local tem um efeito secundário como determinantes da hidrodinâmica do estuário, evidenciando que a descarga representa o fator de maior importância neste ambiente. Foi observada pouca variação entre condições de sizígia e quadratura, com as velocidades de correntes variando pouco.

INTRODUÇÃO

A maior parte das cidades costeiras mais desenvolvidas do mundo está situada em torno de estuários. Este desenvolvimento ocorreu em consequência de condições favoráveis ao acesso para o interior dos continentes, viabilizando a instalação de estaleiros, portos, tanto pesqueiros quanto comerciais, e ainda pela capacidade de renovação cíclica de suas águas. Devido uma série de características hidrodinâmicas da circulação de cada estuário, suas águas são biologicamente mais produtivas que as do oceano adjacente e as do rio. Tal característica faz com que estes ambientes constituam o habitat natural de muitas espécies peixes, aves e mamíferos, fazendo parte de rota de aves migratórias, e sendo berçário natural de diversas espécies de valor comercial.

Estuários são ambientes efêmeros no tempo geológico, sendo em geral de formação muito recente (Nichols & Biggs, 1985). Estes ambientes são formados em decorrência de variações absolutas ou relativas do nível do mar através de fenômenos de origem eustática ou isostática, respectivamente. Além destes fatores, as dimensões dos estuários são também afetadas por processos erosivos e deposicionais que resultam no seu balanço sedimentar. Atualmente muitos ambientes estuarinos estão sujeitos a fortes pressões antropogênicas como consequência da exploração das bacias de drenagem, das suas margens e do próprio corpo de água estuarino (Miranda *et al.*, 2002). As principais implicações são a alteração do regime hídrico, do fornecimento sedimentar, da geometria e profundidade do estuário, entre outras.

Segundo Cameron & Pritchard (1963), estuários são corpos de água costeiros semi-fechados com uma livre conexão com o mar aberto, dentro do qual ocorre a diluição mensurável da água marinha pela água doce proveniente da drenagem continental. Kjerfve (1987) define estuário como um ambiente costeiro com uma conexão restrita ao oceano adjacente, a qual permanece aberta pelo menos intermitentemente. Através desta definição, os estuários podem ser subdivididos em três setores distintos: (1) Zona Costeira – região adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina; (2) Zona de Mistura – onde ocorrem os fenômenos de mistura entre as águas de origem continental e marinha; e (3) Zona de Maré de Rio

– parte mais superior do estuário, onde a salinidade é praticamente igual à zero, mas ainda há influência da maré.

Etimologicamente a palavra estuário é derivada do latim do adjetivo *aestuarium* cujo significado é maré, ou onda abrupta de grande altura, o que faz referência a um ambiente de grande dinâmica, com constantes respostas às mudanças naturais. Os efeitos da propagação da maré para o interior do estuário, da vazão do rio com sentido ao mar e a diferença de densidade entre os dois tipos de água, juntamente com a morfologia do local, irão determinar o grau de mistura entre a água doce e a água marinha. A densidade da água marinha depende tanto da salinidade quanto da temperatura, porém o gradiente de salinidade é o fator de maior importância para os efeitos de estratificação. Os padrões de distribuição de sal resultantes distinguem-se em três tipos: (1) verticalmente homogêneos, (2) parcialmente misturados, (3) altamente estratificados (Dyer, 1997; Miranda et al., 2002).

O grau de estratificação de um estuário depende do nível de energia disponível para gerar mistura principalmente produzida pela fricção gerada pela propagação da onda de maré em macro turbulência. Além do aspecto de afetar a distribuição de sal, isto também traz importantes implicações nos processos de transporte e retenção de materiais em um estuário. Muitos estuários possuem um elevado grau de retenção de materiais, o que é definido como efeito filtrante (Schubel & Carter, 1984), estimado pelo balanço entre o aporte através da entrada fluvial e trocas através da desembocadura com a plataforma adjacente.

Os estuários altamente estratificados são, em geral, encontrados em regiões de alta contribuição de descargas fluviais e de micromaré, onde a variação máxima de maré não ultrapassa dois metros. São identificados por apresentar uma interface pronunciada de densidade entre a camada inferior e superior da coluna de água (Dyer, 1995). A água fluvial ao aportar no estuário se desloca sobre a água salgada. Por haver menos efeito de turbulência produzido pela maré há pouca mistura entre as águas resultando numa estratificação vertical da salinidade. Este tipo de estuário é caracterizado por apresentar uma feição chamada de cunha salina. As oscilações de maré e da descarga fluvial determinam a localização da cunha salina, a qual

sempre busca uma situação de equilíbrio em relação as variações do ambiente (Stommel, 1953).

Os gradientes de pressão formados por variações do nível da água são de natureza barotrópica, gerados tanto pelas marés quanto pela descarga fluvial. O gradiente de pressão gerado pela descarga fluvial é estuário abaixo, enquanto que o gradiente de pressão gerado pelas marés é bidirecional em função da fase da maré: estuário acima na enchente, estuário abaixo na vazante. A mistura parcial de águas produz gradientes longitudinais de densidade gerando um gradiente de pressão de natureza baroclínica. Este acelera o escoamento em direção a jusante na camada superficial e em direção a montante na camada de fundo, o que é denominado circulação gravitacional (Bowden, 1967; Miranda *et al.*, 2002; Dyer, 1997).

Estuários altamente estratificados apresentam menor eficiência filtrante (e.g. Shubel & Carter, 1984; Dyer, 1995), o que implica que são sistemas exportadores de materiais para a zona costeira. Existem inúmeras implicações ambientais relacionados à retenção ou exportação de materiais em estuários, desde o aumento da produtividade biológica pelo maior aporte de nutrientes, até o enriquecimento de contaminantes dos sedimentos de fundo do estuário. Desta forma, o conhecimento dos processos de um dado estuário permite a melhor interpretação do seu comportamento como fonte ou sumidouro de materiais oriundos da bacia de drenagem, benéficos ou nocivos.

Dentre a rica diversidade de sistemas estuarinos, os estuários do tipo altamente estratificados são os que apresentam um nível de conhecimento mais modesto quando comparados com sistemas parcialmente misturados ou verticalmente homogêneos. Estes sistemas estão associados com o baixo curso de rios em planícies costeiras, sendo relativamente estreitos quando comparados com outros tipos de estuários. Ao longo da costa de Santa Catarina ocorrem diversos deste tipo de estuário, sendo os mais expressivos os dos rios Itajaí-Açu (Schettini *et al.*, 2006), Tubarão (D'Aquino *et al.*, no prelo), Araranguá (D'Aquino *et al.*, 2010), Itapocú (Abreu *et al.*, 2010), Tijucas (Schettini & Carvalho, 1998b) e Mampituba, por ordem decrescente de área de bacia hidrográfica. O estuário do rio Itajaí-açu, devido às suas dimensões e importância econômica (e.g., Porto de Itajaí), é atualmente o mais estudado do estado de Santa Catarina. Existem diversos estudos publicados

sobre este estuário, destacando-se a hidrodinâmica (e. g. Schettini, 2002a) e o balanço de materiais (e. g. Schettini, 2002b; Schettini & Carvalho, 1998; Schettini & Toldo Jr., 2006; Pereira Filho, et al., 2010).

O estuário do rio Araranguá apresenta similaridade com o estuário do rio Itajaí-Açu, compartilhando um regime climático similar, com marés um pouco menores, morfologia simples, contudo sua desembocadura não é estabilizada por molhes. O regime hidrodinâmico do estuário do rio Araranguá foi previamente avaliado com bases em um experimento de curta duração (e.g. 2 dias; D'Aquino et al., 2010), onde foi observado que os efeitos de um pulso de descarga fluvial alteram significativamente a hidrodinâmica no baixo estuário. O presente trabalho tem como objetivo compreender melhor a hidrodinâmica estuarina através da análise de séries temporais longas de registros de correntes e nível da água no estuário. A partir destes dados, foram avaliados os efeitos das marés quando a vazão do rio está baixa, e as modulações que ocorrem durante os picos de descarga.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Araranguá (Figura 1) está localizada no extremo sul de Santa Catarina, entre as latitudes de 28° 40' S e 29° 10' S e as longitudes de 049° 20' W e 050° 00' W. Esta bacia abrange 16 municípios, totalizando uma área de drenagem de aproximadamente 3020 km² e o comprimento de seus cursos de água chega a 5.916 km (SANTA CATARINA, 1997).

Do ponto de vista ambiental, a bacia do rio Araranguá é uma das áreas mais críticas do estado de Santa Catarina, sendo que mais da metade de seus rios encontram-se consideravelmente poluídos. Isto ocorre, pois ao longo dos municípios desta bacia são desenvolvidas atividades como a mineração de carvão e o cultivo irrigado de arroz, as quais influenciam diretamente na disponibilidade e qualidade das águas desta bacia hidrográfica. De acordo com Alexandre & Krebs (1995), a drenagem ácida causada pela mineração é hoje a principal responsável pela acidez das águas desta bacia. Mesmo no estuário, onde há o efeito tamponante da água marinha, D'Aquino et al. (2010) observaram valores de pH da ordem de 5,5 no baixo estuário. O baixo pH desempenha papel de floculante, o que trás sérias implicações no balanço sedimentar (Couceiro & Schettini, 2010).

De acordo com o Atlas Climatológico do estado de Santa Catarina, a bacia do Araranguá insere-se em uma região que, segundo o sistema de classificação climático de Köeppen, se enquadra no grupo C – mesotérmico, com temperaturas médias abaixo dos 18°C nos meses mais frios, e próximos de 28°C nos meses mais quentes (Krebs, 2004). Além disso, é caracterizada por uma expressiva variação na altitude, sendo que em sua porção costeira é inferior a 100 metros e no sopé da escarpa varia de 200 a 1400 metros.

O Rio Araranguá é formado pela junção dos rios Itoupava e Mãe Luzia cujas áreas de drenagem são de 898 e 523 km², respectivamente. Este rio possui uma vazão média de 53 m³.s⁻¹, apresenta orientação geral leste-oeste, sinuosidades do tipo meandrante e na foz desloca-se para nordeste paralelamente a linha de costa por cerca de 7 Km antes de desaguar no mar. Próximo a foz a principal atividade

desenvolvida é a pesca. Esta atividade sofre influência direta do posicionamento e profundidade da desembocadura.

O canal apresenta um fundo irregular, sendo que ao longo do seu talvegue, o rio Araranguá apresenta uma profundidade média de aproximadamente 8 m, variando da mínima de 3 m próximo da desembocadura até a máxima de quase 12 m, localizado 30 km a montante. A barra do rio Araranguá não apresenta qualquer estrutura que mantenha sua posição, portanto, sofre constantes alterações em relação à sua posição e profundidade.

O estuário do rio Araranguá enquadra-se como de micro-maré de acordo com a classificação de [Davies \(1964\)](#), com variações que dificilmente ultrapassam 1 m, sofrendo aumento apenas em consequência de marés meteorológicas provocadas pela entrada de frentes frias.

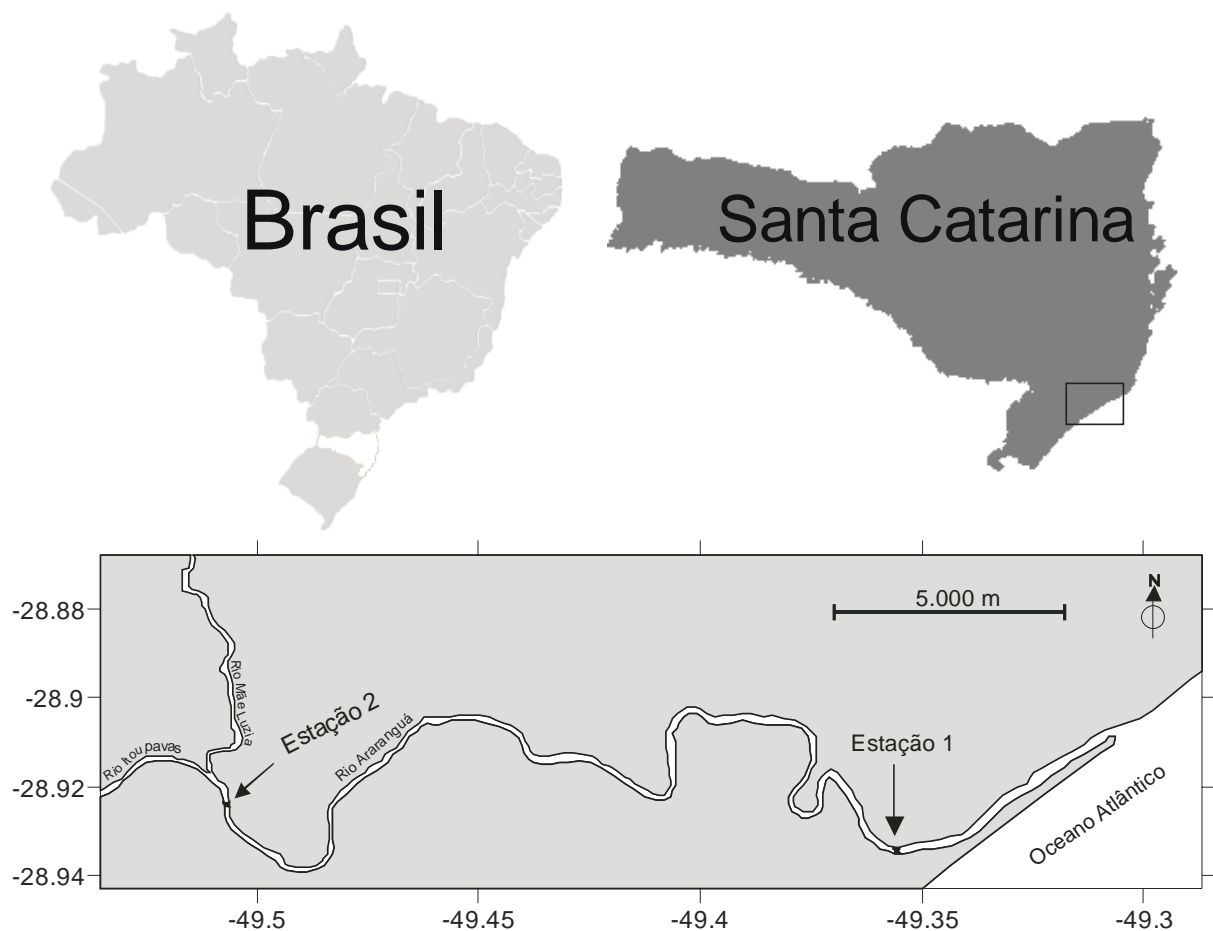


Figura 1 – Área de estudos, contendo a localização das estações #1 e #2.

MATERIAIS E MÉTODOS

Campanha amostral

Uma campanha foi realizada entre junho e setembro de 2008 visando obter séries temporais de dados de nível da água, velocidade de correntes, salinidade e temperatura da água. Foram instalados instrumentos em duas estações de coleta, ambas localizadas no talvegue do canal a 7,5 e a 31 quilômetros a partir da desembocadura.

A estação #1 (Figura 1) foi montada a cerca de 7,5 km de distância da desembocadura (28°55'41" S e 049°21'33" W), sendo equipada com um Perfilador Acústico de Correntes por efeito Doppler (PACD) da marca Nortek®, modelo Aquadopp Profiler de 1000 kHz, para registrar dados de nível da água (pressão), velocidade e direção de correntes. Um registrador de dados de condutividade e temperatura da água da marca JFE-Alec, modelo Compact-CT foi fixo na estrutura de proteção do PACD, fornecendo assim dados próximos ao fundo. Próximo a margem, em um píer, foi preso um registrador de dados de pressão-condutividade-temperatura (CTD, de *Conductivity-Temperature-Depth*) da marca RBR, modelo XR-420, com sensor extra de turbidez. A estação #2 (Figura 1) foi montada a 31 km à montante (28°54'31" S e 49°19'32" W), equipada com um PACD da marca Sontek modelo Argonaut® de 1500 kHz e um registrador de condutividade e temperatura igual ao da #1 no fundo junto ao PACD. Os equipamentos foram instalados no dia 10 de junho e removidos no dia 30 de setembro de 2008. O PACD da estação #1 interrompeu a aquisição de dados no dia 4 de setembro de 2008 devido a exaustão da bateria. O CTD de superfície na estação #1 registrou dados espúrios.

Os PACDs são utilizados para o monitoramento de parâmetros de correntes como velocidade e direção ao longo da coluna de água. Estes equipamentos utilizam o Efeito Döppler, que verifica a alteração da frequência sonora entre uma fonte e um receptor relacionada à aproximação ou afastamento entre os mesmos. Os dados são obtidos em escala temporal e espacial (estratos da coluna de água), desta forma se faz necessário uma configuração inicial estipulando alguns parâmetros. As configurações dos equipamentos utilizados, bem como o período em que permaneceram em operação, podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de configuração utilizados para os PACDs nas estações #1 e #2.

Parâmetro	Estação #1	Estação #2
Intervalo entre Perfis	3600 s	3600 s
Intervalo de Média	120 s	120 s
Número de Células	30	10
Tamanho de Célula	0,5 m	1 m
Distância de Branco	0,45 m	0,5 m
Frequência de Operação	1 MHz	1,5 MHz
Salinidade	30	0
Início de Aquisição	10/6/2008 06:00	10/6/2008 06:00
Término de Aquisição	30/9/2008 17:00	04/9/2008 17:00

Complementarmente, foram realizados ainda três perfilagens longitudinais com um CTD (*conductivity, temperature, depth*) da marca ALEC®. Estas perfilagens foram realizadas nos dias 10 de junho, 01 de agosto e 30 de setembro, tendo como início a desembocadura e realizando aquisições de dados a cada 1 km até a cabeceira do estuário, na confluência dos rios Itoupavas e Mãe Luzia, cerca de 35 km da desembocadura.

Dados diários de cotas e descarga fluvial para o rio Itoupavas foram obtidos junto a Agência Nacional de Águas através do sítio de internet <http://hidroweb.ana.gov.br/>, para a estação fluviométrica Taquaruçu, para o período de 1943 e 2008. Esta estação está localizada no Rio Itoupava a 16 km da junção com o rio Mãe Luzia a qual da origem ao rio (estuário) Araranguá. Esta estação representa 29,7% da área total de drenagem da Bacia do Rio Araranguá. Levando em consideração a baixa declividade e a homogeneidade espacial das chuvas na região, a descarga total foi extrapolada linearmente para a área total da bacia. A Figura 2 apresenta a variação diária de descarga fluvial do rio Araranguá para o ano de 2008, indicando o período de registro de dados de correntes.

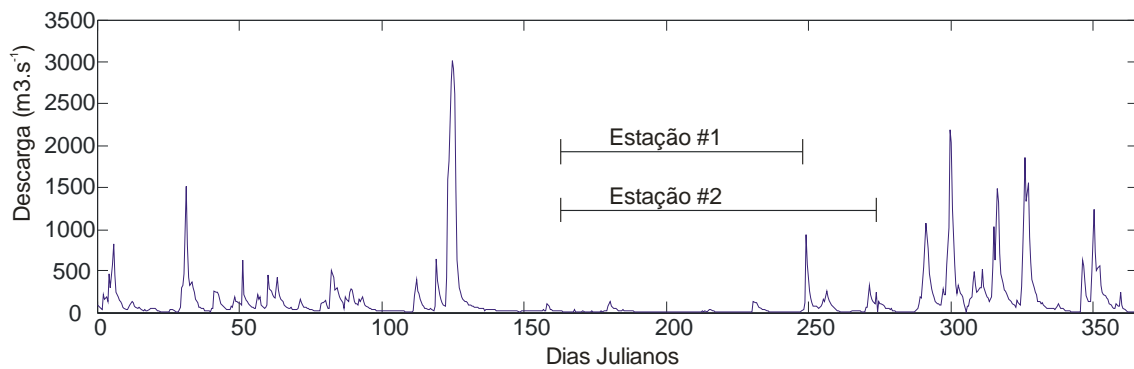


Figura 2 – Valores diários de descarga do Rio Araranguá para o ano de 2008 e período amostral das estações #1 e #2.

Redução e Análise de dados

Os dados de correntes, registrados em termos de componentes leste-oeste e norte-sul, foram reduzidos para componente longitudinal (enchente-vazante). Para isso, foram elaborados histogramas de ocorrências de direções com classes de 10 graus (Figura 3) e assim determinadas modas predominantes. Foram consideradas correntes de vazante aquelas com direções de $115 \pm 90^\circ$ para a estação #1 e $205 \pm 90^\circ$ para estação #2. Os valores de vazante e enchente representam saída e entrada de massa no estuário, respectivamente, e assim convencionou a adoção de sinal negativo para a vazante. Os dados obtidos através das perfilagens longitudinais de CTD foram interpolados a cada 0,25 m de profundidade. Todos os tratamentos de dados foram realizados através do programa MatLab®.

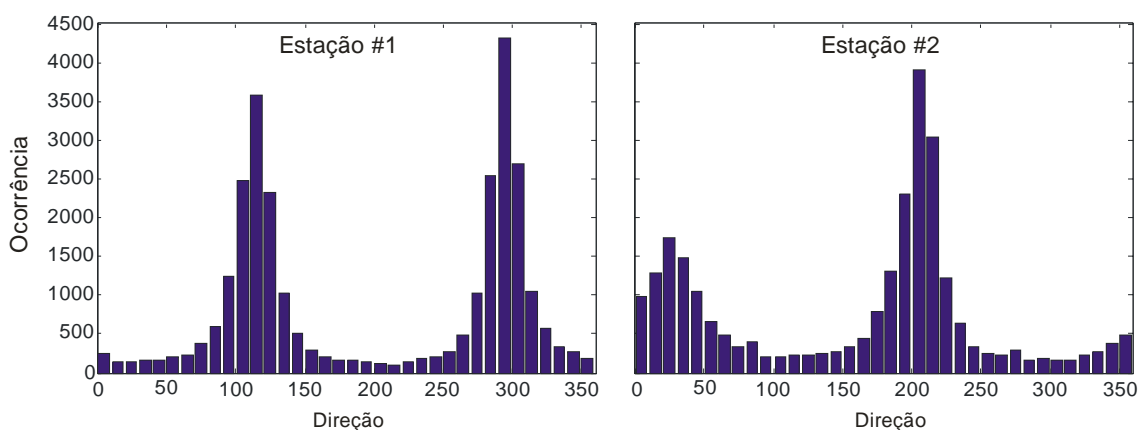


Figura 3 – Histograma de ocorrência de direções de correntes das estações #1 e #2.

Os dados de correntes foram analisados em termos de efeitos da descarga e das marés na estrutura vertical de correntes, e para a variação temporal média em baixa frequência. Os principais eventos de descarga fluvial foram destacados ao longo dos períodos amostrais, visando identificar qual sua importância e a frequência de ocorrência. Foram definidos três períodos para análise, indicados na Figura 4 e sumarizados na Tabela 2. Durante o período A, entre os dias 178 e 187, a descarga alcançou um pico de $137 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a qual possui uma ocorrência de 17,8% em termos históricos (Figura 5), baixando gradativamente até valores menores que $10 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Já no período B, entre os dias 194 e 201, a descarga é praticamente estável não atingindo valores maiores que $8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Este período foi selecionado pois abrange as fases de sizígia e quadratura. Durante o período C, entre os dias 247 e 257, ocorreu um pico de descarga de $938 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ o qual de acordo com dados históricos possui uma ocorrência de apenas 1,4%, porém este período foi registrado apenas na estação #2, pois o PACD da estação #1 já não estava mais registrando dados. A Figura 5 apresenta a distribuição de frequência acumulada da vazão com base nos dados históricos (1943-1948), indicando as condições dos eventos A e C.

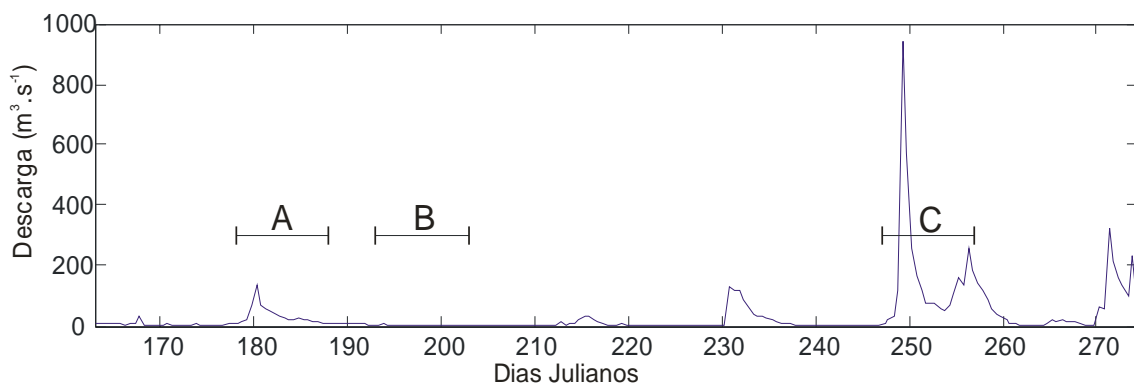


Figura 4 – Descarga referente ao período amostral da estação #2 identificando os intervalos de maior relevância: (A) período de pico de média vazão; (B) período de ausência de vazão e (C) período de pico de alta vazão.

Tabela 2 – Características dos períodos definidos para análise.

Evento	Tipo	Intervalo (dias)	Vazão Máxima	Registro
A	Baixa Vazão	194 a 201	$8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	Estações #1 e #2
B	Média Vazão	178 a 187	$137 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	Estações #1 e #2
C	Alta Vazão	247 a 257	$938 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	Estação #2

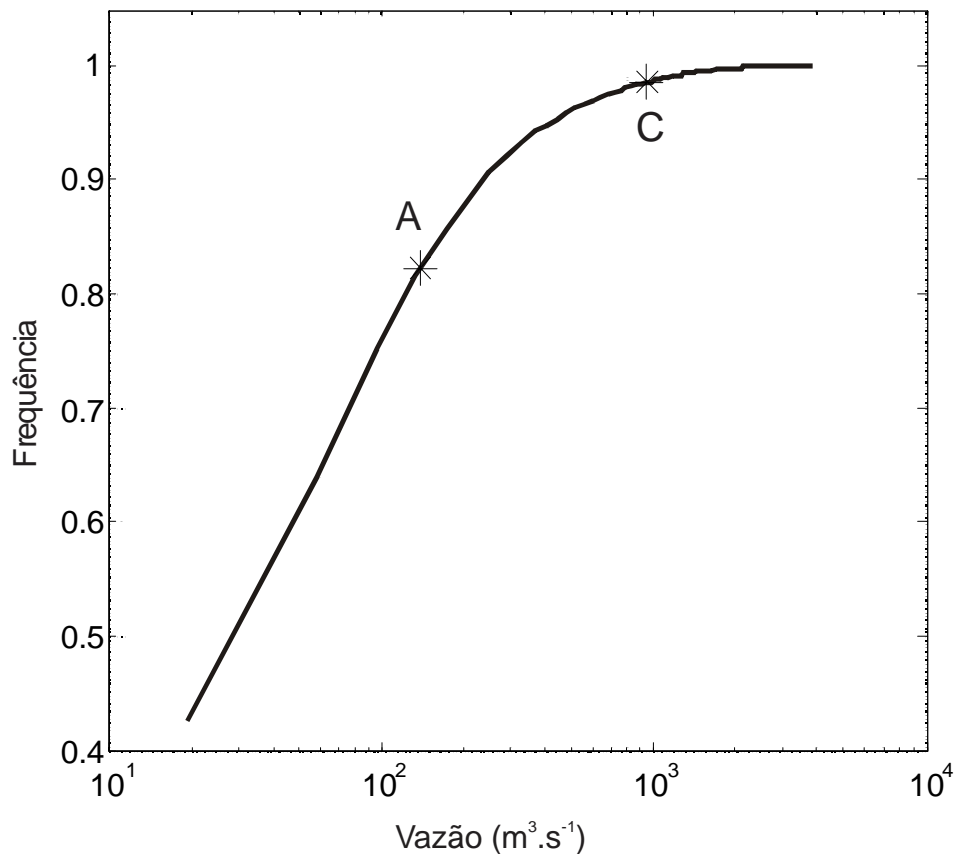


Figura 5 – Frequência acumulada de ocorrência de vazão e as situações para os períodos A e C (vide Tabela 2).

Para a análise dos períodos de média e alta vazão, os dados de correntes foram filtrados para eliminar os efeitos da maré. Foi utilizado um filtro binomial recursivo de três casas. O número de recursividade foi determinado por tentativa e erro, e seu efeito avaliado por inspeção visual sobre os registros. Desta forma foi possível visualizar as correntes residuais em baixa frequência. Visando observar as alterações do regime de correntes ao longo dos dias, perfis de média diária de velocidade em cada profundidade foram obtidos, bem como os valores das velocidades de corrente máxima, mínima e média, em superfície meio e fundo de cada dia deste período.

O período de baixa de vazão, #B, foi analisado para variações entre sizígia e quadratura, e comparados em relação ao perfil teórico para circulação estuarina. Foram selecionados dois períodos de 25 horas, a partir dos quais foi gerado um perfil vertical médio. Também foi feito o mesmo procedimento para o período todo de

7 dias, englobando tanto sizígia quanto quadratura. Segundo Pritchard (1955), a circulação vertical residual de um estuário pode ser descrita como o somatório linear dos efeitos do gradiente horizontal de densidade, DI , da contribuição da descarga fluvial, RI , e da fricção do vento sobre o estuário, WI . Estes efeitos são analiticamente descritos por

$$DI = \frac{gGH^3}{48\rho Az} \left(9\left(1 - \frac{z^2}{H^2}\right) - 8\left(1 + \frac{z^3}{H^3}\right) \right) \quad (1)$$

$$RI = \frac{3R}{2H} \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right); \quad (2)$$

$$WI = \frac{\tau H}{4\rho Az} \left(4\left(1 + \frac{z}{H}\right) - 3\left(1 - \frac{z^2}{H^2}\right) \right) \quad (3)$$

onde G é o gradiente de salinidade, R é taxa de vazão por unidade de largura e τ é a tensão de cisalhamento do vento (τ). Estes parâmetros são obtidos a partir de cada estrato da coluna de água z em relação a profundidade H . Az é o coeficiente de viscosidade turbulento. Os perfis teóricos são obtidos a partir do somatório destes três parâmetros, porém para o presente caso o efeito do vento foi ignorado, uma vez que o estuário é estreito e a maior parte está orientada no sentido L-O, enquanto que os ventos mais importantes são na orientação NE-SW.

RESULTADOS

A Figura 6 apresenta os perfis longitudinais de salinidade realizados em 10 de junho, primeiro de agosto e 30 de setembro de 2008, mostrando a natureza altamente estratificada do estuário do rio Araranguá. No dia 10 de junho o estuário apresentou com uma camada superficial de baixa salinidade variando entre 1 a 2 m de espessura. No dia primeiro de agosto o estuário apresentou uma camada de água de baixa salinidade mais rasa ($> 0,5$ m), devido ao longo período de estiagem e baixa vazão, fazendo com que haja um grande volume de água salgada no estuário. Já no dia 30 de setembro (Figura 6C) o estuário apresenta uma camada de água doce que varia de 2 m na desembocadura a até 6 metros a 30 km a montante. Nas três situações a salinidade foi observada até 30 km, sendo o limite para montante na campanha de setembro, mas não nas demais.

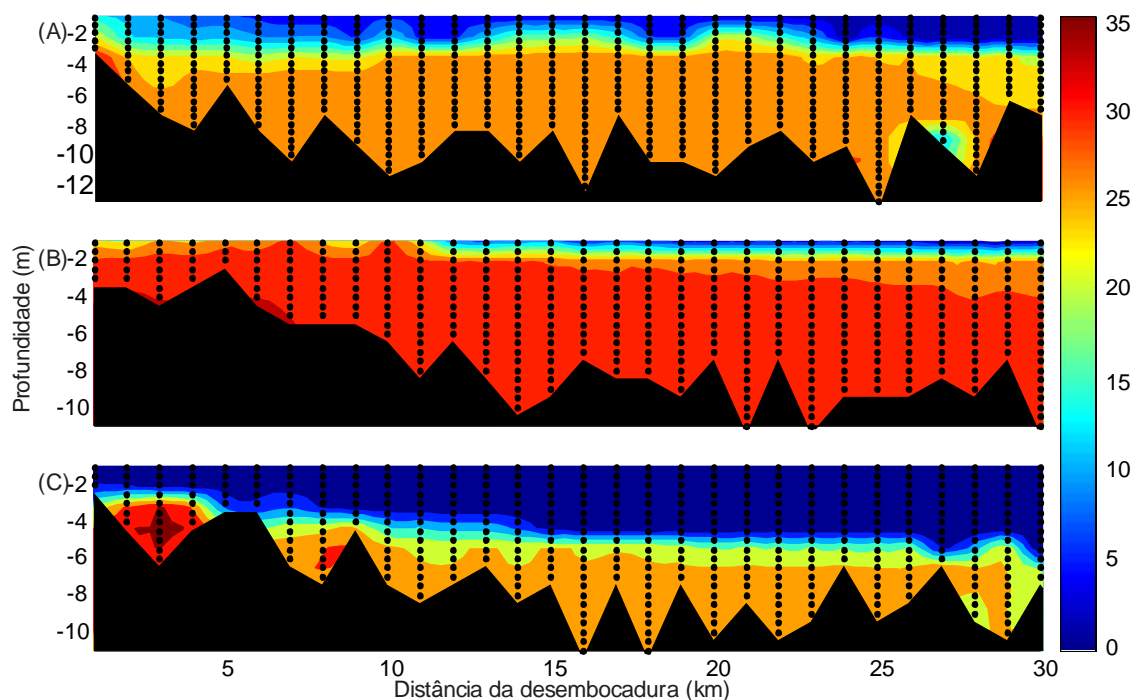


Figura 6 – Perfis longitudinais de salinidade: (A) 10 de junho, (B) 1 de agosto e (C) 30 de setembro.

A descarga fluvial alcançou o valor máximo de $137 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ durante o pico de média vazão do dia 180, e o nível chegou a 0,5 m. Ao longo deste período foi observado o aumento de velocidade de saída de água do estuário na camada superficial (Figura 7; Tabela 3). Na estação #2 há uma camada de água superficial

de 2 m que flui constantemente em direção à desembocadura com velocidade de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 7D). Durante o aumento do nível, entre os dias 179 e 181 esta camada aumenta em espessura chegando a 4 m, aumentando o fluxo de água estuário a fora e voltando à espessura normal de 2 m após a passagem da onda de cheia.

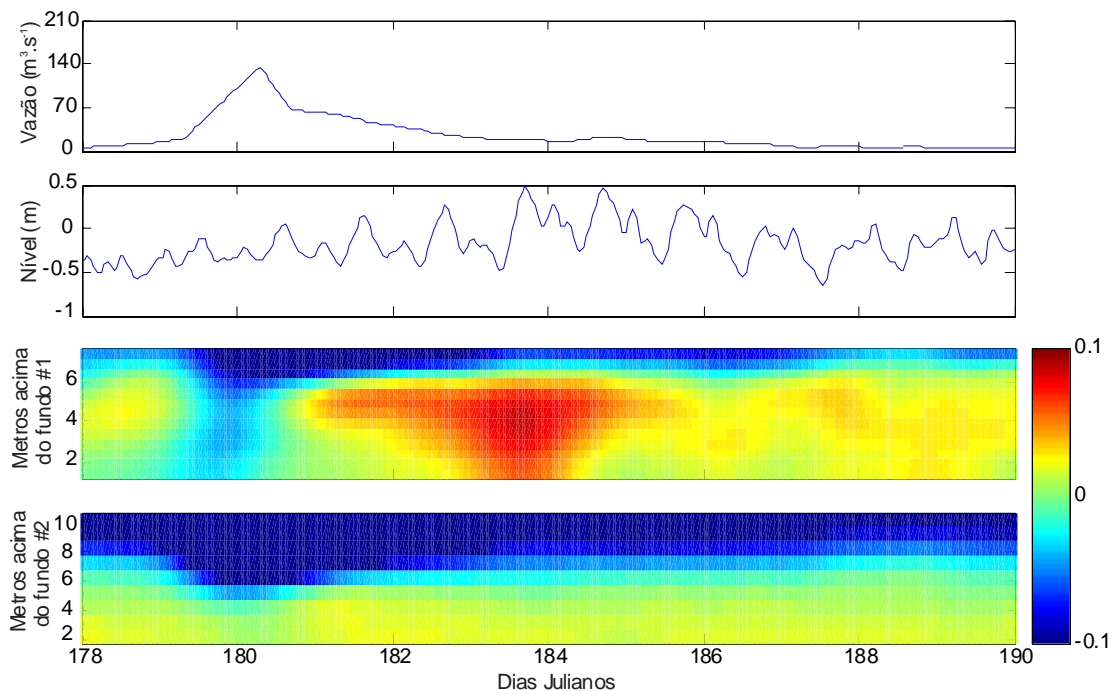


Figura 7 – Variação dos parâmetros ao longo do período #A de vazão média: (A) Descarga ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), (B) nível da água (m), (C,D) correntes residuais ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na estação #1 e #2, respectivamente.

Na estação #1 entre os dias 179 e 181 as velocidades tornam-se negativas ao longo de toda a coluna de água provocando um fluxo unidirecional em direção à desembocadura (Figura 7C). Nesta estação, diferentemente da estação #2, após a passagem da onda de cheia, quando ocorre a diminuição da vazão, o estuário não volta a apresentar as condições prévias ao evento de descarga, ao invés disso ocorre a intensificação da corrente para o interior do estuário nas camadas de meia água e fundo, o qual é evidenciado entre os dias 181 e 186 (Figura 8 centro). Isto ocorre como meio de restabelecer o equilíbrio baroclínico, uma vez que a água costeira adjacente possui maior salinidade e, conseqüentemente, maior densidade.

Tabela 3 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo nas estações #1 e #2 durante o evento de média vazão.

Dia Juliano	Estrato da coluna de água	Estação #1			Estação #2		
		Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.
178	Superfície	-0.27	0.09	-0.08	-0.34	0.22	-0.15
	Meio	-0.17	0.19	0.03	-0.22	0.09	-0.01
	Fundo	-0.14	0.14	-0.01	-0.08	0.13	0.02
179	Superfície	-0.24	0.05	-0.09	-0.52	-0.08	-0.29
	Meio	-0.18	0.14	-0.03	-0.25	0.13	-0.05
	Fundo	-0.16	0.12	-0.04	-0.07	0.11	0.02
180	Superfície	-0.30	-0.11	-0.20	-0.55	0.18	-0.34
	Meio	-0.18	0.20	-0.01	-0.23	0.07	-0.09
	Fundo	-0.14	0.12	0.01	-0.09	0.07	0.00
181	Superfície	-0.32	0.11	-0.13	-0.41	-0.03	-0.23
	Meio	-0.12	0.29	0.07	-0.10	0.13	0.01
	Fundo	-0.09	0.13	0.01	-0.07	0.10	0.02
182	Superfície	-0.36	0.15	-0.16	-0.36	0.06	-0.16
	Meio	-0.15	0.32	0.07	-0.15	0.10	-0.01
	Fundo	-0.15	0.14	0.02	-0.05	0.10	0.03
183	Superfície	-0.29	0.23	-0.08	-0.34	0.38	-0.09
	Meio	-0.14	0.39	0.09	-0.13	0.14	-0.01
	Fundo	-0.07	0.32	0.07	-0.10	0.17	0.02
184	Superfície	-0.30	0.18	-0.13	-0.38	0.17	-0.15
	Meio	-0.18	0.33	0.07	-0.20	0.17	-0.01
	Fundo	-0.21	0.23	0.01	-0.10	0.14	0.02
185	Superfície	-0.28	0.23	-0.11	-0.46	0.16	-0.16
	Meio	-0.19	0.31	0.05	-0.17	0.14	0.01
	Fundo	-0.17	0.23	0.01	-0.18	0.13	0.02
186	Superfície	-0.26	0.21	-0.10	-0.45	0.14	-0.16
	Meio	-0.22	0.30	0.02	-0.24	0.16	0.00
	Fundo	-0.21	0.23	0.01	-0.10	0.14	0.02
187	Superfície	-0.25	0.25	-0.07	-0.41	0.17	-0.16
	Meio	-0.21	0.29	0.04	-0.22	0.16	0.00
	Fundo	-0.17	0.15	0.02	-0.14	0.13	0.02
188	Superfície	-0.25	0.36	-0.05	-0.41	0.22	-0.13
	Meio	-0.28	0.18	0.01	-0.21	0.19	0.00
	Fundo	-0.18	0.20	0.02	-0.13	0.18	0.02

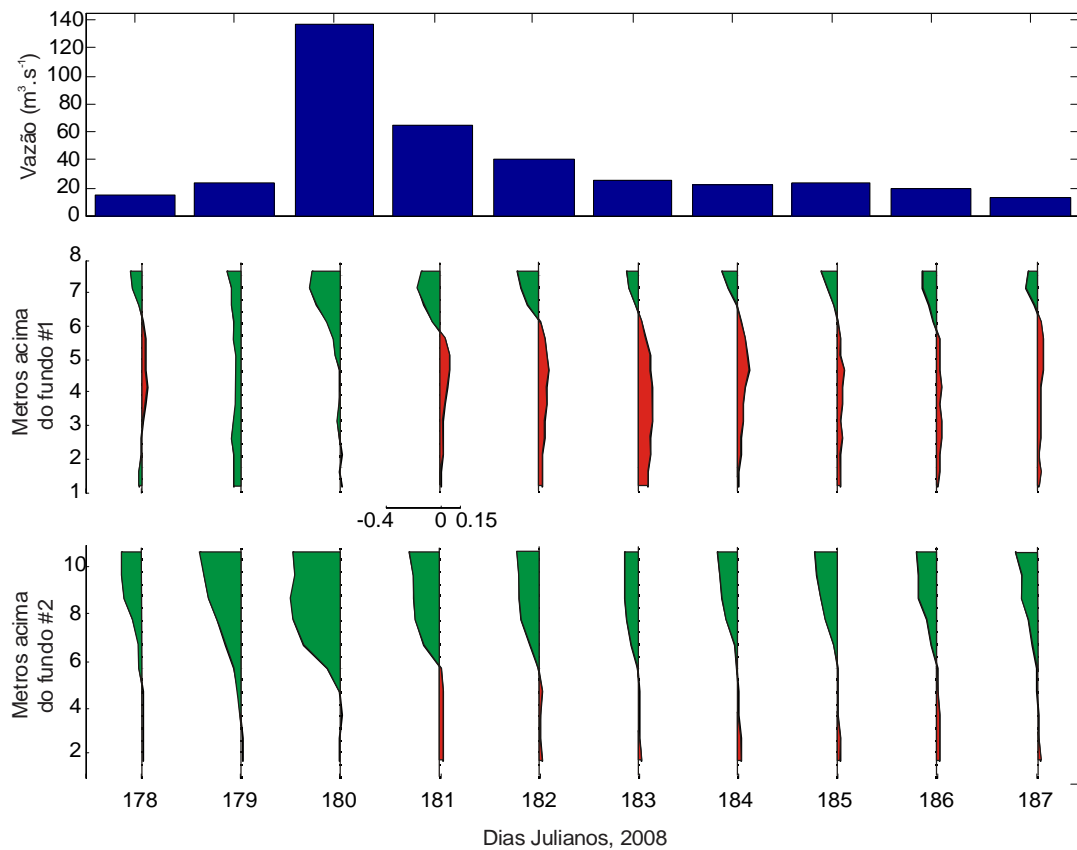


Figura 8 – Vazões diárias do rio Araranguá e perfis médios diários de velocidade de correntes na estação #1 (centro) e estação #2 (em baixo).

Durante o período de baixa de vazão a descarga fluvial alcançou um valor máximo de $13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ao longo deste intervalo (Figura 9) foram identificados o dia de menor variação de maré de quadratura (dia 194) e o de maior variação de maré de sizígia (dia 201). Analisando os valores de correntes das duas estações nos dias de sizígia e quadratura (Tabelas 4 e 5) verifica-se que não há uma diferença significativa entre as mesmas. Além disso, ao observar o comportamento da velocidade média de correntes ao longo de toda a coluna de água nos dias de sizígia e quadratura (Figura 10), pode-se constatar uma grande similaridade entre sizígia e quadratura, levando a crer que as variações de maré possuem pouquíssima influência em relação à hidrodinâmica do estuário.

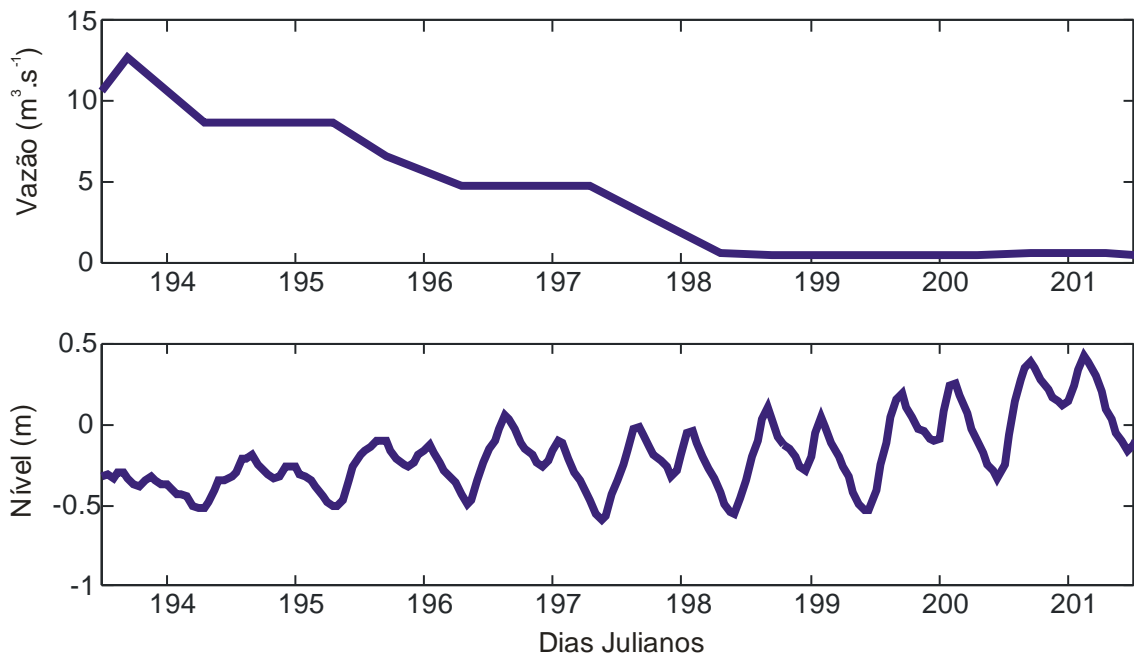


Figura 9 – Variação da vazão (superior) e do nível (inferior) durante o período de ausência de vazão.

Tabela 4 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #1 durante os períodos de 24 horas de sizígia e quadratura.

	Estação #1 - Sizígia			Estação #1 - Quadratura		
	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.
Superfície	-0.13	0.21	0.02	-0.12	0.10	-0.02
Meio	-0.15	0.32	0.04	-0.08	0.18	0.03
Fundo	-0.24	0.30	-0.05	-0.15	0.06	-0.05

Tabela 5 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #2 durante os períodos de 24 horas de sizígia e quadratura.

	Estação #2 - Sizígia			Estação #2 - Quadratura		
	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Méd.
Superfície	-0.06	0.14	0.04	-0.08	0.07	0.02
Meio	-0.16	0.22	-0.01	-0.12	0.08	0.00
Fundo	-0.34	0.28	-0.11	-0.22	0.04	-0.12

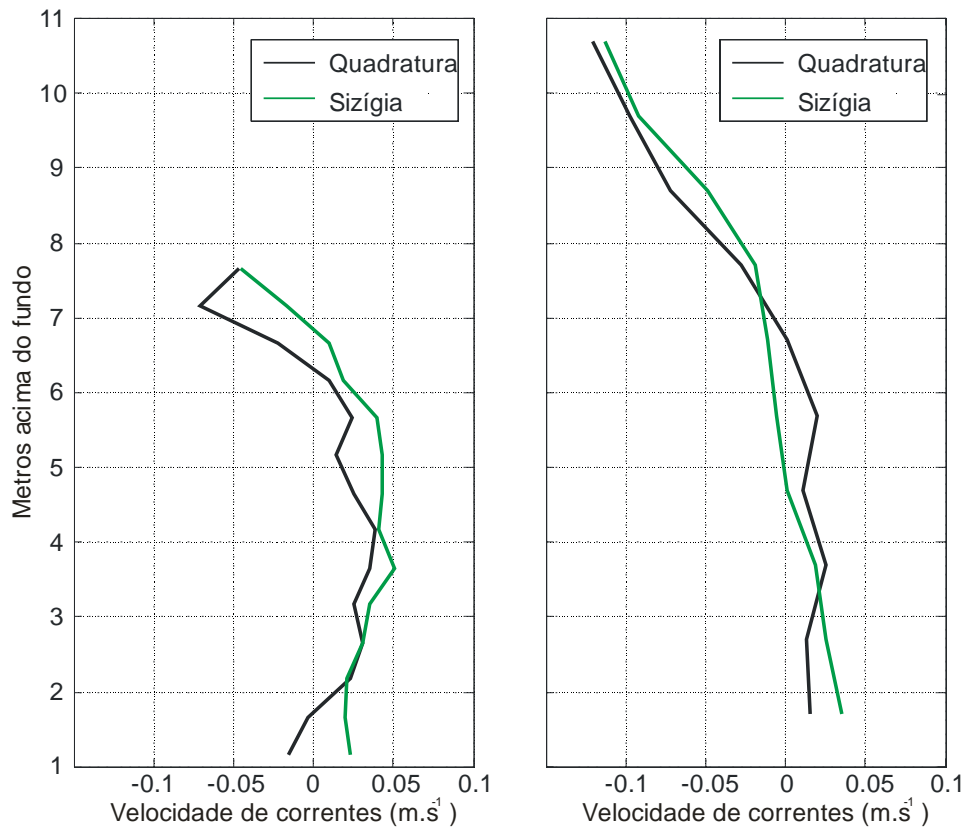


Figura 10 – Médias de velocidade de correntes em quadratura e sizígia. À esquerda as curvas referentes à estação #1 e à direita curvas referentes à estação #2.

A Figura 11 apresenta a comparação entre os perfis observados em relação aos perfis teóricos. Para termos de avaliação, foi feita a comparação em relação aos perfis para as condições extremas de maré de sizígia e quadratura (Figura 10), e também para as velocidades médias temporais para todo o período de baixa descarga, entre os dias 194 e 201, abrangendo meio ciclo sinodical. Existe grande semelhança para os perfis de uma mesma estação, porém há uma considerável dessemelhança entre estações, e, de modo geral, a comparação com o perfil teórico não ficou bom. Na estação #1 há uma sub-estimativa do fluxo superficial, e a camada de maior velocidade para montante está deslocada para cima em relação ao perfil teórico. Ainda na quadratura ocorre uma segunda inversão de sentido próximo ao fundo. Na estação #2 há uma boa concordância no escoamento da camada superficial, contudo a camada de fundo é sub-estimada em torno de 50%.

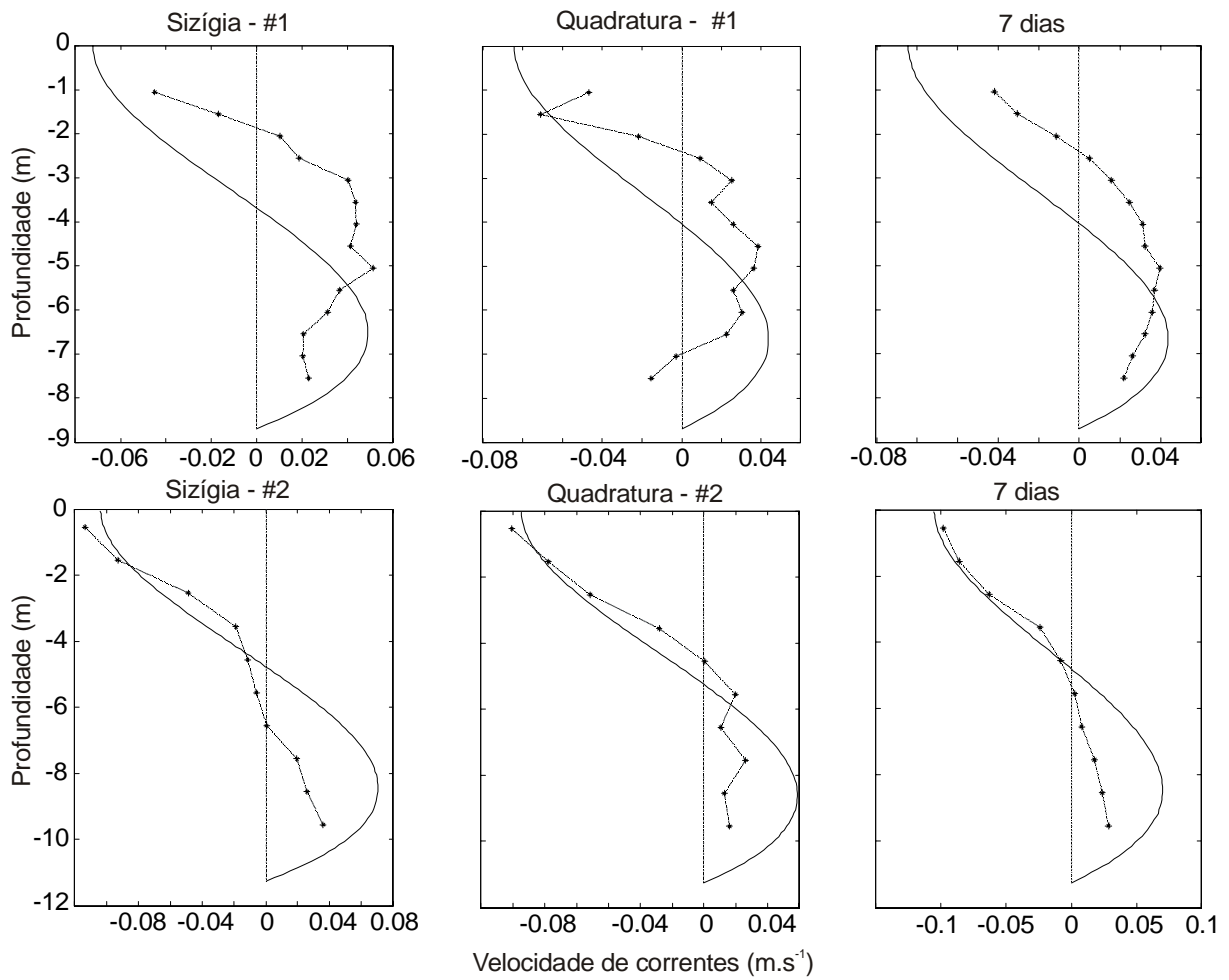


Figura 11 – Perfis médios da coluna de água comparados ao perfil teórico. Da esquerda para direita: média diária de sizígia, média diária de quadratura e média dos dias 194 a 201. Superior indica estação #1 e inferior indica estação #2.

A condição hidrodinâmica durante o período de alta vazão foi registrada apenas na estação #2. Durante o pico de vazão deste evento (dia 249) as velocidades máximas de vazante (Tabela 6) chegaram a $-1,13 \text{ m.s}^{-1}$ (superfície), $-0,87 \text{ m.s}^{-1}$ (meio) e $-0,71 \text{ m.s}^{-1}$ (fundo) e as médias a $-0,66 \text{ m.s}^{-1}$ (superfície), $-0,53 \text{ m.s}^{-1}$ (meio) e $-0,41 \text{ m.s}^{-1}$ (fundo), configurando o movimento de um grande volume de água em direção à desembocadura. Comparando este período com o período de pico de média vazão, poder-se-ia esperar um comportamento similar do estuário em relação à estação #1 após o término da passagem da onda de enchente, provavelmente recebendo água salgada em sua porção inferior ao longo do período que precede ao evento de alta vazão, porém este foi seguido de um outro evento de alta pluviosidade, impedindo que a água salgada fosse novamente bombeada estuário a cima na camada inferior.

Tabela 6 – Valores de velocidade mínima, máxima e média de superfície meio e fundo na estação #2 durante o evento de alta vazão.

Dia Juliano	Estrato da coluna de água	Estação #1		
		Velocidade Mínima	Velocidade Máxima	Velocidade Média
247	Superfície	-0.33	0.38	-0.01
	Meio	-0.26	0.22	0.02
	Fundo	-0.17	0.20	0.04
248	Superfície	-0.40	0.23	-0.08
	Meio	-0.28	0.17	0.00
	Fundo	-0.21	0.15	0.02
249	Superfície	-1.13	-0.08	-0.66
	Meio	-0.87	0.10	-0.53
	Fundo	-0.71	0.08	-0.41
250	Superfície	-0.61	-0.05	-0.33
	Meio	-0.56	-0.11	-0.34
	Fundo	-0.57	-0.05	-0.30
251	Superfície	-0.35	0.04	-0.15
	Meio	-0.32	0.02	-0.14
	Fundo	-0.26	0.04	-0.12
252	Superfície	-0.24	0.03	-0.11
	Meio	-0.31	0.05	-0.09
	Fundo	-0.25	0.08	-0.09
253	Superfície	-0.27	0.04	-0.11
	Meio	-0.23	0.05	-0.10
	Fundo	-0.19	0.09	-0.08
254	Superfície	-0.35	0.29	-0.15
	Meio	-0.35	0.05	-0.18
	Fundo	-0.31	-0.05	-0.15
255	Superfície	-0.37	0.22	-0.19
	Meio	-0.46	-0.05	-0.28
	Fundo	-0.37	-0.04	-0.22
256	Superfície	-0.46	-0.04	-0.29
	Meio	-0.49	-0.02	-0.34
	Fundo	-0.45	-0.03	-0.30
257	Superfície	-0.42	0.21	-0.16
	Meio	-0.36	0.17	-0.18
	Fundo	-0.31	0.13	-0.15

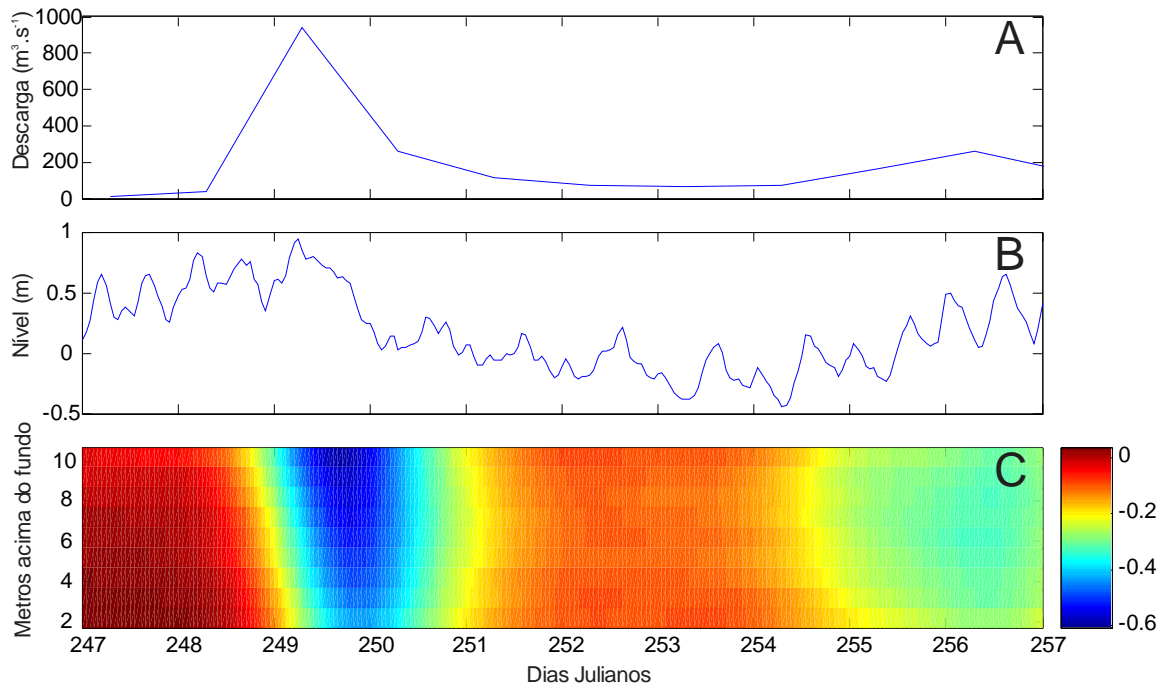


Figura 12 – Variação dos parâmetros relacionados à estação #2 durante o período de pico de alta vazão. (A) Vazão, (B) Nível e (C) velocidade de correntes na coluna de água.

DISCUSSÃO

Ao longo do litoral de Santa Catarina ocorrem seis principais estuários formadores de deltas. Até o momento, o mais estudado em termos hidrodinâmicos e sedimentológicos é o estuário do rio Itajaí-Açu (e.g. Schettini, 2002a; Schettini, 2002b; Schettini & Carvalho, 1998; Schettini & Toldo Jr., 2006; Asp et al., 2009), embora o nível de conhecimento nos demais venha sendo gradativamente ampliado. De norte para sul destacam-se os estuários dos rios: Itapocú (e.g. Abreu et al., 2010), Itajaí-Açu Tijucas (e.g. Schettini et al., 2010), Tubarão (e.g. D'Aquino, submetido a), Araranguá (e.g. D'Aquino et al., 2010; Couceiro & Schettini, 2010) e Mampituba (e.g. D'Aquino et al., submetido b). Devido à ampla planície costeira catarinense, os rios seguem em direção ao Oceano Atlântico em baixo curso. Este fator, aliado às condições de micromaré originam sistemas fortemente estratificados, ou de cunha salina (Dyer, 1995).

O padrão de circulação geral do estuário do rio Araranguá apresenta semelhança com o padrão descrito para o estuário do rio Itajaí-Açu (e.g. Schettini et al., 2006). De acordo com Schettini & Toldo Jr. (2006) o estuário de rio Itajaí-Açu tende a se comportar de duas maneiras em relação à hidrodinâmica e ao transporte de sedimentos em suspensão: exportar grandes quantidades de sólidos em suspensão durante eventos de alta vazão (modo de transporte fluvial), e reter ou importar sedimentos da plataforma adjacente durante períodos de baixa vazão (modo de transporte marinho). Este padrão é também observado no estuário do rio Araranguá no que diz respeito ao modo de transporte fluvial. Porém, diferentemente do estuário do rio Itajaí-Açu, o estuário do rio Araranguá não apresenta uma barra fixa por molhes, não é constantemente dragado e as alturas de maré astronômica são consideravelmente menores (0,8 m para Itajaí, e.g. Schettini, 2002, e 0,3 m para Araranguá, presente trabalho), não proporcionando correntes de maré de altas velocidades nem mesmo em períodos de sizígia e fazendo com que a profundidade na barra seja relativamente baixa durante a maior parte do tempo devido ao acúmulo de sedimentos. Tais forçantes fazem com que o modo de transporte marinho deste estuário apresente menor importância. Este mesmo padrão de transporte foi observado por D'Aquino et al. (submetido b) em um estudo sobre o transporte de sedimentos do rio Mampituba, onde a altura de maré é da ordem de 0,3 m, o que também sugere uma menor importância para o transporte no modo marinho.

Cooper (2001), em um estudo em estuários dominados por rios na África do Sul, sugeriu que em sistemas dominados por rios os sedimentos do baixo estuário são expulsos durante eventos de alta vazão, os quais formam deltas efêmeros que são rapidamente re-trabalhados e transportados de diferentes maneiras. Este mesmo autor sugere que em desembocaduras livres, os sedimentos arenosos advindos da deriva litorânea são logo depositados, fazendo com que estas desembocaduras voltem a ser rasas após os eventos de alta vazão. Este padrão pode ser aplicado ao estuário do rio Araranguá, onde a deriva litorânea apresenta um transporte líquido de sedimentos arenosos de sudoeste para nordeste (Siegle & Asp, 2007) e a desembocadura apresenta-se rasa em períodos de baixa vazão (Figura 6). Também é importante ressaltar que o baixo curso do estuário do rio Araranguá corre paralelo à linha de costa, sendo mais raso que a região mais interior, e com dominância de sedimentos arenosos possivelmente de origem marinha (D'Aquino et al., 2010).

O médio estuário do rio Araranguá apresenta profundidades relativamente altas (Figura 6) quando se leva em conta sua dimensão, um fator incomum em relação aos demais estuários deste tipo ao longo do litoral de Santa Catarina. O rio Itajaí-Açu, por exemplo, apresenta uma profundidade média de 7 m mesmo sendo dragado periodicamente, enquanto no rio Araranguá este valor é de 8 m. As águas do rio Mãe Luzia apresentam um baixo pH, proveniente de drenagem ácida de minas de carvão. O rio Itoupavas, por outro lado, drena uma área de plantio de arroz, fazendo com que ocorra uma boa carga de sedimentos finos em suspensão. De acordo com Couceiro & Schettini (2010), no encontro entre os dois corpos de água, o qual da origem ao rio Araranguá, ocorre a floculação instantânea do material particulado. Tal fator faz com que haja a sedimentação destes flocos já no alto estuário, e na parte média do estuário ocorre uma concentração muito baixa de sedimentos, os quais dificilmente decantam neste local. Este fenômeno aliado aos eventos periódicos de alta vazão explica a profundidade do médio estuário.

Durante o período de baixa vazão, quando os efeitos da maré podem ser observados mais nitidamente, os valores de velocidade de correntes são bem inferiores aos períodos de maior descarga. Adicionalmente, os valores são muito semelhantes entre as fases de maré de sizígia e quadratura. Isto sugere que os

processos de importação de sedimentos da plataforma continental ocorrem em apenas duas situações: (1) após um evento de alta vazão, através do restabelecimento do equilíbrio baroclínico, o qual provoca uma corrente de fundo em direção à montante e (2) durante a passagem de frentes frias, quando de acordo com Araújo *et al.*, (2003) ocorrem ventos vindos do sul, os quais provocam o empilhamento de água na costa, e conseqüentemente uma maré meteorológica. O aumento de volume de água salgada no oceano adjacente provocaria também a quebra do equilíbrio baroclínico, o qual quando restabelecido provocaria também uma corrente de fundo.

O regime baroclínico foi claramente observado na estação #1, e em menor grau na estação #2, embora em ambos os casos a comparação com o perfil teórico foi ruim. Isto está relacionado com a localização de cada estação. A estação #2 encontra-se próxima a cabeceira do estuário, e as condições da camada de fundo ali são praticamente estáticas. Por outro lado, a #2 está na área baixa/média do estuário, onde permite maior transito bi-direcional de águas. O ajuste teórico considera um coeficiente de difusão turbulenta (A_z) constante, o que não se aplica em estuários altamente estratificados. Porém, ainda assim, o ajuste foi bastante bom para a camada superficial da estação #2. Outros fatores que possivelmente afastam as condições físicas do estuário do Araranguá do perfil teórico é sua morfologia 'inversa', com a desembocadura mais rasa do que o corpo estuarino.

A razão de fluxo de um estuário expressa a taxa de contribuição entre os volumes de água oriundos de maré ou vazão através de,

$$RF = \frac{\int_0^{6.2} Q dt}{Ah} \quad (4)$$

(e.g. Abreu *et al.*, 2010), onde Q representa a descarga em $m^3.s^{-1}$, integrado no tempo de meio ciclo de maré semi-diurno (6,2 horas). Esta integração é dividida pelo prisma de maré, calculado pelo produto da área de superfície do estuário (A) em m^2 pela altura de maré (h) em m . Valores de RF maiores do que um representa maior importância da vazão em relação à maré, e valores menores do que um indica maior importância da maré. A variação da razão de fluxo do rio Araranguá ao longo do período amostral (Figura 13) demonstra que durante a maior parte do tempo as o RF é inferior a unidade, indicando que a maré apresenta maior importância. Contudo, é

durante os curtos períodos de dominância de vazão que ocorrem as alterações mais significativas neste ambiente. Por este padrão periódico, estes estuários são acertadamente chamados de “dominados por enchente relâmpago”.

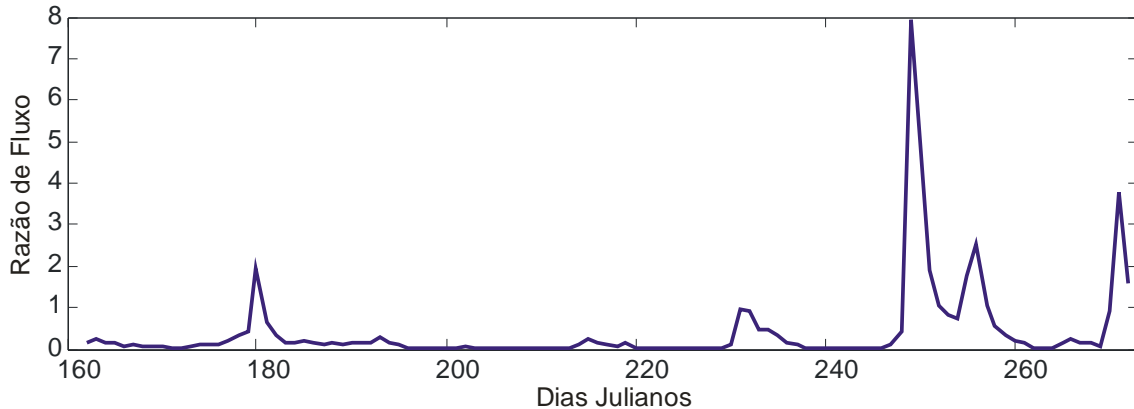


Figura 13 – Variação da razão de fluxo calculada para todo o período amostral.

Durante o período de amostragem comum às duas estações é possível observar que a corrente em baixa frequência, média para a coluna de água, na estação #1, oscila entre enchente e vazante ao longo de todo o período. Estas oscilações apresentam relativa coerência com a oscilação do nível da água. Já na estação #2 os valores de corrente média da coluna de água, em baixa frequência, são de vazante em praticamente todo o período, e com relação muito fraca com o nível da água. Oscilações meteorológicas no nível do mar contabilizam 30% da variância na porção norte do litoral catarinense (Truccolo et al., 2006), e possivelmente mais na porção sul onde a maré astronômica é menor. Assim, é esperado que oscilações de baixa frequência também sejam observadas na circulação do estuário do rio Araranguá.

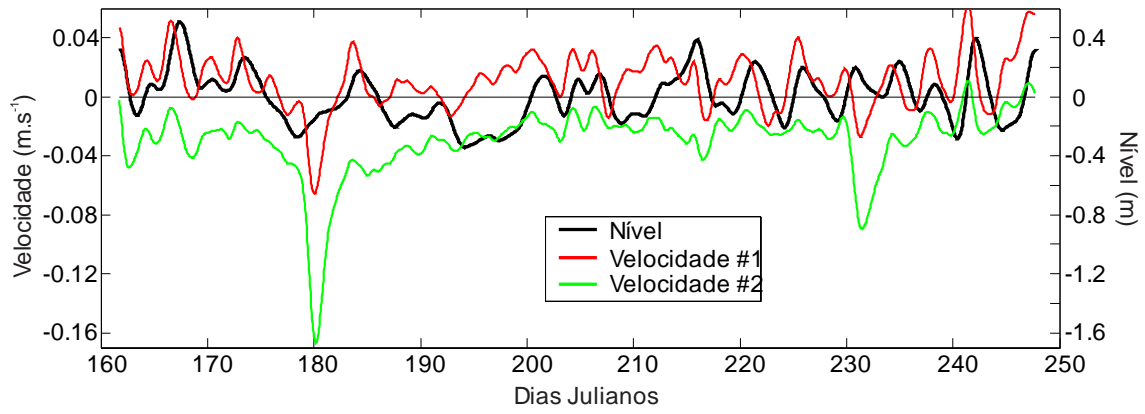


Figura 14 – Variação das médias de correntes residuais da coluna de água nas estações #1 (vermelho) e #2 (verde) durante o período comum de dados às duas estações e estão relacionados ao eixo das coordenadas da esquerda. A linha preta representa o nível e está relacionado ao eixo das coordenadas da direita.

CONCLUSÕES

Através da amostragem de um longo período de dados de correntes em duas estações no estuário do rio Araranguá foi possível caracterizar as respostas deste estuário frente as diferentes condições de descarga ocorridas. Através dos resultados pôde-se observar que o regime de marés do local tem um efeito praticamente nulo no que diz respeito à hidrodinâmica do estuário, evidenciando que a descarga representa o fator de maior importância neste ambiente. Além disso, mesmo em períodos de sizígia, as velocidades de correntes são pouco alteradas, não apresentando uma diferença significativa em relação às correntes de quadratura.

No que diz respeito ao estudo de estuários, modelos e classificações servem para comparações entre estes ambientes, com intuito de auxiliar a compreensão dos processos dominantes nos mesmos. A partir deste estudo, pode-se concluir que neste estuário a descarga fluvial apresenta-se como fator de maior importância em relação à hidrodinâmica e circulação, mais pela magnitude dos eventos do que pela frequência. Variações de maré meteorológica podem apresentar alguma relevância.

Estudos com séries temporais de salinidade e turbidez em superfície e fundo podem produzir resultados ainda mais esclarecedores sobre a hidrodinâmica e circulação deste estuário.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. F., SIEGLE, E., TRUCCOLO, E. C., SCHETTINI, C. A. F. 2010. Hydrodynamics of the Itapocu river and the Barra Velha Lagoon estuarine system, SC, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 28(3) p. 321-329.
- ALEXANDRE, N. Z. e KREBS, A. S. J. 1995. Qualidade das Águas Superficiais do Município de Criciúma, SC. Porto Alegre: CPRM, 1995. Série Recursos Hídricos, v.6. (Programa de Informações Básicas para Gestão Territorial de Santa Catarina – PROGESC).
- ARAÚJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. 2003. Wave regime characteristics of southern brazilian coast. *COPEDEC*, 6., 2003. Proceedings. Paper n. 97, 15 p. CD-ROM.
- ASP, N.E.; SIEGLE, E.; SCHETTINI, C.A.F.; LOSSO, A.P.; KLEIN, A.H.F. 2009. Geologia e hipsometria de bacias de drenagem do centro-norte catarinense (Brasil): implicações para a zona costeira. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 1(2):98-108.
- BARRETO, G. A. M.; D'AQUINO, C. A.; SCHETTINI, C. A. F. submetido. *Pesquisas em Geociências*.
- BOWDEN, K. F. 1967. Circulation and Diffusion. In: *Estuaries*. Washington: A.A.A.S., p. 15-36.
- CAMERON, W. M. & PRITCHARD, D. W. 1963. "Estuaries". In Hill, M. N. (ed). *The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. New York, Interscience, pp. 306-324.
- COOPER, J. A. G. 2001. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. *Geomorphology*, 40, 99-122.
- COUCEIRO, M. A. A. & SCHETTINI, C. A. F. 2010. Estudo da dinâmica de sedimentos em suspensão do estuário do rio Araranguá (SC): Possíveis

efeitos da drenagem ácida da atividade de mineração de carvão. São Paulo, Geociências. v. 29 p. 251-266.

DAVIES, J. L., 1964. Morphogenic approach to world shorelines. *Ann. Geomorph.*, 8: 127 – 142.

D'AQUINO, C. A.; 2010. Pereira Filho, Jurandir ; Schettini, C. A. F. . Fluvial modulation of hydrodynamics and salt transport in highly stratified estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, p. 165-175.

D'AQUINO, C. A.; FRANKLIN DA SILVA, L.; COUCEIRO, M.A.A.; PEREIRA, M.D.; SCHETTINI, C.A.F. (no prelo) Transporte de sal e hidrodinâmica do rio Tubarão – SC, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.

D'AQUINO, C. A.; submetido b. Caracterização oceanográfica e transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. *Revista Brasileira de Geofísica*.

DYER, K. R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. New York: Elsevier, cap. 14, p. 423-449.

DYER, K. D. 1997. *Estuaries - A physical introduction*. Chichester, J Wiley & Sons, 195p.

KJERFVE, B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY Jr.; HALL, C.H.A.S.; KEMP, W.M.; YÁNEZ-ARANCIBA, A. (eds.). *Estuarine Ecology*. New York, Wiley, pp. 47-78.

KREBS, 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.

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. & BIGGS, R.B. 1985. Estuaries. In: DAVIS Jr., R.A. (Ed.) Coastal sedimentary environments. New York, Springer Verlag, pp.77-186.
- PEREIRA FILHO, J.; RÖRIG, L.R.; SCHETTINI, C.A.F.; SOPPA, M.A.; SANTANA, B.L.; SANTOS, J.E. 2010. Spatial changes in the water quality of Itajaí-Açu fluvial-estuarine system, Santa Catarina, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82(4):963-982.
- PRITCHARD, D. W. 1955. Estuarine Circulation Patterns. *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 81 (717).
- 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. 2002a. Caracterização física do estuário do Rio Itajaí-Açu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 123-142.
- SCHETTINI, C. A. F. 2002b. Near bed sediment transport in the Itajaí-Açu River estuary. Southern Brazil. In: Winterwerp JC and Kranenburg (Eds). *Fine sediment dynamics in the marine environment*. Elsevier, New York, pp 499-512.
- SCHETTINI, C. A. F. & CARVALHO, J. L. B. 1998a. Hidrodinâmica e distribuição de sólidos em suspensão no estuário do rio Itajaí-Açu (relatório). *Notas Técnicas da Facimar*, 2:131-140.
- SCHETTINI, C. A. F. & CARVALHO, J. L. B. 1998b. Hidrodinâmica e distribuição de sólidos em suspensão nos estuários dos rios Itapocú, Tijucas e Camboriú (relatório). *Notas Técnicas da Facimar*, 2:141-153.
- 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.; GOBIG, V. 2006. Synoptic hydrography of a highly stratified estuary. *Ocean Dynamics*, 56:308-319.
- SCHETTINI, C. A. F., ALMEIDA, D. C., SIEGLE, E., ALENCAR, A. C. B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. *Geo-Mar Lett.* v.30 p. 47-62.
- SCHUBEL, J. R. & CARTER, H. H. 1984. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: KENNEDY, V.S. (Ed.) *The estuary as a filter*. New York, Academic Press, 81-105 pp.
- SIEGLE, E.; ASP, N. E. 2007. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. *Braz. J. Oceanogr.*, vol. 55, no. 2, p.109 – 120, 2007.
- STOMMEL, H. 1953. The role of density currents in estuaries. In: *Estuaries: a physical introduction*. New York: John Wiley and Sons, p.78-87.
- TRUCCOLO, E.C.; FRANCO, D.; SCHETTINI, C.A.F. 2006. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39:547-552.

ANEXO I


SISTEMA DE REVISÃO DE ARTIGOS

login
esqueci minha senha
cadastro
ajuda
sair

MENU AUTOR

Cadastrar Artigo

Meus Artigos

Alterar Meus Dados

Trocar Senha

Normas de Publicação

DETALHE REVISÕES

Título	O PAPEL DA MARÉ E DA DESCARGA FLUVIAL NA CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO ARARANGUÁ
Autor	Carlos Augusto França Schettini
Tipo	Artigo Científico
Area do Conhecimento	Hidráulica Marítima e Engenharia Costeira
Data de Envio	5/5/2011 13:28:25
Documento	Artigo606.doc
	2866176
Status Artigo	Novo

Revisões