

# **MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO SACO DO ARRAIAL, ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS, RS**

Priscila Bueno Giordano  
Orientador Elisa Helena Leão Fernandes

Rio Grande  
Abril 2008

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Comissão de Curso de Pós-Graduação em  
Oceanografia Física, Química e Geológica da  
Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
para obtenção do grau de Mestre em  
Oceanografia Física, Química e Geológica.

*Aos meus pais*  
*Eloina e João Bosco Giordano*

*"Nossa tecnologia passou a frente de nosso entendimento, e a nossa inteligência desenvolveu-se mais do que a nossa sabedoria." - Roger Revelle.*

*"A chance favorece a mente preparada." - Louis Pasteur.*

## **AGRADECIMENTOS**

### **AGRADECIMENTOS TÉCNICOS**

Gostaria de agradecer o empenho, o interesse e a ajuda prestados pela orientadora deste trabalho, sempre provida de boas sugestões e soluções objetivas.

Agradeço ao Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo financiamento parcial desta dissertação.

Este trabalho foi realizado com a ajuda do Instituto Interamericano para Pesquisas de Mudanças Globais (IAI) CRN 2076 que é suportado pela US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Agradeço a CAPES pela concessão da bolsa de demanda social durante o 2º período.

Ao Igor Monteiro por ter me ensinado os primeiros passos com o TELEMAT, assim como à Márcia Pearson e ao Wiliam Marques.

Ao Frederico Marcondes, Marcos, Manuel e Milico no cansativo trabalho de obtenção dos dados batimétricos. À Fabiane Furlan pela ajuda na digitação dos dados.

À Comissão de Curso de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Clabisnei e João Sarkis.

A incansável ajuda de Wiliam Marques na elaboração dessa dissertação, assim como, na publicação do paper. Ao Igor Monteiro pelas contribuições positivas no desenvolvimento dos mesmos. À Débora Cuchiara pela ajuda providencial na finalização do trabalho.

### **AGRADECIMENTOS PESSOAIS**

Aos meus pais. MUITO OBRIGADA! À Sheila, pelo interesse, mesmo à distancia.

Ao Mateus pelo incentivo, pela ajuda e pela torcida. Obrigada por caminhar ao meu lado.

À minha avó, Aida Furtado, que perguntou: “Esse compromisso não acaba nunca?” (Risos).

À Elisa pela ótima convivência durante este período.

Aos colegas de sala: André Vitta, Fernando Hirata, William Marques e Debóra Cuchiara.

Ao pessoal do laboratório: Ana Cristina Freitas, Rodrigo Kerr, Maria Mello, Vagner, Igor Monteiro, Carla Assef, Rafael Gonçalves, Paula Campos, José Luís Azevedo e José Francisco e ao professor Osmar Möller pela amizade.

Ao pessoal do Larus, principalmente, Renato e Cris, por acompanhar e vibrar por cada conquista pessoal e profissional.

A toda a minha família e amigos.

## ÍNDICE

RESUMO .....	I
ABSTRACT .....	II
LISTA DE FIGURAS .....	III
LISTA DE TABELAS .....	VI
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDO .....	10
2.1 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	10
2.2 ASPECTOS ECOLÓGICOS .....	14
2.3 ASPECTOS QUÍMICOS.....	16
2.4 ASPECTOS FÍSICOS.....	18
2.5 DINÂMICA ESTUARINA: INTERAÇÃO ENTRE AS FORÇANTES.....	21
2.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS .....	24
CAPÍTULO III - JUSTIFICATIVA .....	26
CAPÍTULO IV - OBJETIVOS.....	27
CAPÍTULO V – MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
5.1 O MODELO NUMÉRICO .....	28
5.2 O MODELO 2D.....	30
5.3 O MODELO 3D.....	37
5.4 OBTENÇÃO DOS DADOS BATIMÉTRICOS .....	40
5.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	42
5.6 DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL .....	45
5.7 ESCALAS DE TEMPO DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL .....	49
CAPÍTULO VI - RESULTADOS .....	52
6.1 HIDRODINÂMICA DO SACO DO ARRAIAL .....	52

6.2 DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL .....	55
6.3 ESCALAS DE TEMPO DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL .....	65
6.3.1 TEMPO DE RENOVAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA.....	65
6.3.2 TEMPO DE DESCARGA .....	65
6.3.3 TEMPO DE PERMANÊNCIA DE PARTICULAS INERTES DENTRO DO SACO DO ARRAIAL - TELEMAC 2D .....	65
6.4 SALINIZAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL DEVIDO AO VENTO – TELEMAC 3D.....	69
CAPÍTULO VII - DISCUSSÃO .....	71
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES .....	79
CAPÍTULO IX - BIBLIOGRAFIA.....	80
ANEXOS .....	93
ANEXO I - ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DO SUL DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS .....	94
ANEXO II - CLIMANÁLISE - BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA .....	97

## RESUMO

As enseadas rasas do estuário da Lagoa dos Patos são importantes ambientes para o desenvolvimento de diversas espécies marinhas. Estas áreas servem como berçários para muitas espécies comercialmente importantes e contribuem para muitas atividades econômicas relacionadas ao suporte industrial da cidade de Rio Grande, pesca artesanal de camarão, aquacultura e lazer. Embora estes ambientes tenham grande importância ecológica e econômica para a região, pouco se sabe sobre a sua dinâmica e a sua resposta às mudanças climáticas. Experimentos de modelagem numérica foram realizados para investigar a resposta do Saco do Arraial, a maior enseada rasa do estuário da Lagoa dos Patos, às principais forçantes da região: vento, maré e descarga fluvial com enfoque principal na resposta deste sistema às variações extremas da contribuição de descarga fluvial. O comportamento do sistema perante as situações extremas fornece um indicativo da sua resposta aos ciclos de El Niño/La Niña. Os resultados mostram que a dinâmica desta baía é dependente das variações de nível do estuário, do efeito local do vento e da intensidade da descarga fluvial. Quanto mais intensa a descarga fluvial, menor é o Tempo de Renovação do Volume de Água e o Tempo de Permanência de partículas dentro do Saco do Arraial, que podem variar de 27 a 45 dias e de 5 a 15 dias, respectivamente. Durante períodos de baixa descarga o vento é o principal fator que promove a entrada de sal no Saco do Arraial. Como a maioria dos ambientes costeiros, este ecossistema mostra-se sensível às possíveis consequências das mudanças climáticas.

## **ABSTRACT**

The Patos Lagoon estuarine shallow bays are important habitats for the initial stages of the life cycle of many marine species. They serve as nursery grounds for many commercially relevant fish and shrimp species, as well as contribute for several economic activities related to the support of Rio Grande city industries, shrimp artisanal fishery, aquaculture and leisure. Although these systems have significant ecological and economical importance for the region, little is known about their dynamics and response to climate change. Numerical modeling experiments were carried out in order to investigate the response of Arraial Bay, the largest estuarine shallow bay in the Patos Lagoon, to the main physical forcing, namely the wind, the tide and the river discharge. Attention will be given to the response of this system to extreme variations in river discharge contribution, which may be related to El Niño/La Niña cycles. Results show that the dynamics of the bay is dependent on the estuarine sea level variation and local wind effect, as well as on the river discharge intensity. The higher the river discharge the shorter the Arraial Bay turnover time and the particles permanency time inside the bay. Depending on the river discharge intensity the turnover time can vary from 27 to 45 days while the particles permanency time can vary 5 to 15 days approximately. During low river discharge the wind is the principal factor to promote the salt entrance in the bay. Arraial Bay seems to be susceptible to the climate changes effects like other coastal systems.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: A Lagoa dos Patos e seu estuário.....	12
Figura 2: Saco do Arraial.....	13
Figura 3: Representação esquemática dos níveis de elevação devido a resultante da ação local e remota do vento. Modificado de Moller <i>et al</i> (2001).....	20
Figura 4: Estrutura modular do modelo TELEMAC.....	29
Figura 5: Esquema de Coordenadas Sigma .....	39
Figura 6: Grade de elementos finitos do estuário da Lagoa dos Patos utilizada para as simulações numéricas .....	41
Figura 7: Batimetria do Saco do Arraial utilizada para as simulações numéricas. ....	42
Figura 8: Série de descarga ( $m^3/s$ ) dos anos de 2003 a 2005 obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA). A seta vermelha indica os baixos valores de descarga nos primeiros meses do ano de 2005.....	43
Figura 9: Condições de Contorno. A) Séries temporais de elevação do nível do mar prescritas nas fronteiras continental e oceânica do estuário da Lagoa dos Patos em 1999. B) Séries temporais de elevação do nível do mar prescritas nas fronteiras continental e oceânica do estuário da Lagoa dos Patos em 2005. C) Série temporal de direção e velocidade do vento em 1999. D) Série temporal de direção e velocidade do vento em 2005. ....	44
Figura 10. Batimetria da região de estudo e localização dos pontos (P1 ao P7) e dos perfis (A e B) utilizados para análise dos resultados do modelo.....	48
Figura 11: Séries de Velocidades de Correntes. Em azul componente longitudinal e em vermelho a componente transversal. A) Séries de velocidades de corrente em P2 em 1999. B) Séries de velocidades de corrente em P4 em 1999. C) Séries de velocidades de corrente em P2 em 2005. D) Séries de velocidades de corrente em P4 em 2005.....	53
Figura 12: Vetores de velocidade de corrente simulados pelo modelo. A) durante o período de alta descarga fluvial (1999). B) durante o período de baixa descarga fluvial (2005). ....	54
Figura 13: Séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Ponto 3 (vermelho) e no Ponto 5 (azul). A) baixa frequência em 1999; B) baixa frequência em 2005 .....	55
Figura 14: Séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Ponto 3 (vermelho) e no Ponto 5 (azul). A) alta frequência em 1999; B) alta frequência em 2005 .....	56

Figura 15: Correlação cruzada entre as séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Saco do Arraial (P3) e para o estuário (P5). A) Oscilações de baixa frequência com alta descarga; B) Oscilações de alta frequência com alta descarga; C) Oscilações de baixa frequência com baixa descarga; D) Oscilações de alta frequência com baixa descarga .....	57
Figura 16: A) Série temporal de baixa frequência do vento longitudinal (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante o período de alta descarga fluvial (1999). B) Série temporal de baixa frequência do vento longitudinal (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante o período de baixa descarga fluvial (2005) .....	60
Figura 17: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água no Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento de baixa frequência durante alta descarga fluvial (1999). A) Co-espectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .....	60
Figura 18: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água no Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento de baixa frequência durante alta descarga fluvial (2005). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .....	61
Figura 19: A) Série de vento em alta frequência (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante alta descarga fluvial em 1999. B) série temporal de vento em Baixa frequência (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante baixa descarga fluvial em 2005 .....	61
Figura 20: Análise espectral cruzada entre as diferenças de nível de água do Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento em alta frequência durante alta descarga fluvial (1999). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .....	62
Figura 21: Análise espectral cruzada entre as diferenças de nível de água do Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento em alta frequência durante alta descarga fluvial (2005). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .....	62
Figura 22: A) diferença de nível no saco do arraial (verde) no estuário (azul) durante alta descarga fluvial em 1999. B) diferença de nível no saco do arraial (verde) no estuário (azul) durante baixa descarga fluvial em 2005 .....	63
Figura 23: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água ao longo do eixo principal do estuário (longitudinal) e a diferença de nível de água no interior do Saco do Arraial durante o período de alta descarga fluvial (1999). A) Co-espectro. B) Espectro de coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Espectro de fase (em graus).....	64

Figura 24: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água ao longo do eixo principal do estuário (longitudinal) e a diferença de nível de água no interior do Saco do Arraial durante o período de baixa descarga fluvial (2005). A) Co-espectro. B) Espectro de coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Espectro de fase (em graus)..... 64

Figura 25: Trajetória das partículas (cada linha corresponde a uma trajetória) durante vazante e enchente. A) regime de vazante em 1999; B) regime de enchente de 1999.. 67

Figura 26: Trajetória das partículas (cada linha corresponde a uma trajetória) durante vazante e enchente. A) regime de vazante de 2005; B) regime de enchente de 2005... 67

Figura 27: Distribuição de sal no Saco do Arraial em 2005 sob eventos de NE. A) Perfil A. B) Perfil B. C) Perfil C D) Perfil D ..... 70

Figura 28: Distribuição de sal no Saco do Arraial em 2005 sob eventos de SO. A) Perfil A. B) Perfil B. C) Perfil C D) Perfil D ..... 70

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais parâmetros físicos utilizados nas simulações .....	45
Tabela 2: Coeficientes de correlação e defasagem temporal da elevação do nível do mar dentro do Saco do Arraial (P3) e no estuário (P5) em baixa e alta frequência para os anos de alta e baixa descarga fluvial .....	58
Tabela 3: Resultados da análise harmônica das séries temporais de nível dos Pontos 3, Ponto 5 e Ponto 6, para os períodos de alta (1999) e baixa (2005) descarga .....	58
Tabela 4: Estimativas da descarga, tempo de renovação do volume de água, fração de água doce, tempo de descarga e tempo de permanência das partículas dentro do Saco do Arraial durante o período de alta (1999) e de baixa (2005) descarga fluvial .....	68

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Um estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado, com ligação livre com o oceano aberto, que se estende ao longo de um rio até o limite de influência da maré, no interior do qual a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (Miranda *et al*, 2002). Esse ambiente é forçado por agentes locais e remotos gerados pela ação de eventos climáticos, oceanográficos, geológicos, hidrológicos, biológicos e químicos que ocorrem na bacia de drenagem e no oceano adjacente, muitas vezes a dezenas, centenas e até milhares de quilômetros de distância (Miranda *et al*, 2002). O que difere estes ambientes entre si é a sua resposta a estas forças, que está diretamente relacionada às suas características geomorfológicas (Kjerfve & Magill, 1989).

Estuários de planícies costeiras são caracterizados por canais principais profundos margeados por baixios e enseadas rasas. As zonas rasas servem como áreas de armazenamento de água e material, que são trocados com os canais principais conforme a dinâmica da região (Pritchard, 1969 e Fischer *et al*, 1979 em Kuo & Park, 1995). Além das marés, os estuários e lagoas costeiras podem também ser forçados pela descarga fluvial, pelo vento e pelo balanço de calor na superfície (Kjerfve & Magill, 1989).

Em lagoas estranguladas, cujos canais de comunicação com o mar são caracteristicamente longos e estreitos, o vento representa a principal força do sistema, e as trocas de água com a zona costeira adjacente dependem do ciclo hidrológico (Kjerfve & Magill, 1989). Estes canais servem como um filtro dinâmico que altera ou elimina as oscilações de alta frequência (maré) que ocorrem na costa adjacente (Kjerfve & Magill, 1989). Dentre os efeitos do vento sobre a circulação de lagoas costeiras estão o efeito local, resultante da ação direta do vento na superfície da água (mecanismo de *set-up* e *set-down*), e o efeito remoto, que está relacionado às oscilações de nível na costa devido ao transporte de Ekman (no hemisfério sul é 90° a esquerda do sentido do vento). Diversos estudos abordam a dinâmica de ambientes costeiros em função dos efeitos local e remoto do vento (Lee *et al*, 1990; Valle-Levinson, 1995; Paraso & Valle-Levinson, 1996; Geyer, 1997; Janzen & Wong, 1988; Möller *et al*, 2001; Wong, 2002, entre outros).

O aporte de água doce é outra importante forçante física e ecológica em sistemas costeiros. A água doce chega às lagoas e aos estuários através da descarga fluvial, da precipitação ou do fluxo subterrâneo e é perdida por evaporação ou por fluxos gravitacionais para os oceanos (Kjerfve & Magill, 1989). Altas taxas de precipitação e intensos fluxos de água doce exercem enorme impacto nas lagoas costeiras. O nível de água da lagoa pode aumentar rapidamente e causar inundação nas áreas adjacentes. Este efeito é mais pronunciado em lagoas estranguladas, onde o nível de água pode aumentar um ou mais metros devido a tempestades ou ao regime sazonal (Kjerfve & Magill, 1989). Além disso, convém salientar que os rios também funcionam como integradores da precipitação sobre grandes áreas, sendo esta propriedade utilizada para verificar a correlação da ocorrência de eventos como “El Niño” e “La Niña” e anomalias de precipitação (Depetris, 1996).

A descarga fluvial é usualmente a fonte dominante da entrada de material proveniente da bacia de drenagem nas lagoas costeiras (Kjerfve & Magill, 1989). Em situações de descarga moderada, esta entrada de nutrientes e sedimentos nas lagoas aumenta a sua produtividade, mas em excesso causa assoreamento e eutrofização (Kjerfve & Magill, 1989). Segundo Lloret *et al* (2008) a eutrofização, neste caso, é resultante não só da maior entrada de nutrientes, mas também do efeito de sombreamento dos produtores primários pelas partículas em suspensão. Além dos sedimentos continentais trazidos pelos rios, os estuários também recebem sedimentos da região da plataforma interna e de áreas costeiras adjacentes, que são transportados pela deriva litorânea e ingressam no sistema durante regimes hidrológicos de enchente (Melo, 1998; Miranda *et al*, 2002).

Ainda sob o ponto de vista ecológico, a descarga continental está diretamente relacionada à taxa de renovação das águas, outra característica importante de sistemas costeiros semi-fechados. Estimativas do tempo de renovação das águas de um sistema podem ser usadas como indicadores do transporte de compostos, e podem auxiliar na determinação da capacidade suporte do corpo hídrico. Em linhas gerais, estuários com alto tempo de residência exportam menos rapidamente os nutrientes que estuários com baixo tempo de residência (Braunschweig *et al*, 2003) e, por isso, merecem maior atenção.

Esta breve análise das principais forçantes dos estuários indica que os mesmos são corpos de água não homogêneos, e que os fenômenos no seu interior variam em amplos intervalos de escala espacial (desde dimensões microscópicas até seus limites geométricos) e temporal (em intervalos de tempo de frações de segundo até o extremo das variações anuais e seculares) (Miranda *et al*, 2002).

Em adição à complexidade inerente a esta variabilidade espacial e temporal, no interior de alguns estuários são encontradas enseadas rasas na forma de baías internas, endentações, reentrâncias e embaiamentos, que desempenham importante papel na dinâmica e na ecologia dos sistemas estuarinos. Ambientes como estes são classificados como estuários tributários, pois são estuários localizados na parte interna de um grande sistema estuarino principal (Schroeder *et al*, 1992). O estudo da dinâmica de sistemas pequenos é facilitado pelo acesso relativamente mais simples e pelo curto tempo de resposta às forçantes físicas. A desvantagem é que os gradientes longitudinais são mais intensos e, como consequência, os efeitos advectivos são mais significantes e difíceis de serem medidos (Dyer, 1990).

Além de serem muito dinâmicos, os estuários e suas enseadas rasas estão entre os ambientes de maior taxa de produtividade dentre os ecossistemas aquáticos. Nestes ambientes ocorrem processos alternados de produção e consumo, que permitem uma certa estabilidade ecológica, apesar das grandes variações nos parâmetros ambientais. A combinação da alta produtividade e a presença de áreas rasas proporciona uma variedade de *habitats* favoráveis, que suportam diversas espécies de organismos (de origem marinha, dulcícola ou terrestre) em vários estágios do ciclo de vida, adaptados às pressões ambientais (Yanes-Arancibia, 1986).

Por outro lado, estas características estuarinas de alta produtividade biológica, confinamento e proteção, combinadas com aspectos morfológicos, físicos e químicos peculiares, tornam estas regiões locais privilegiados para a implantação de atividades urbanas, industriais, portuárias, pesqueiras, turísticas e de exploração mineral. Estas atividades conduzem a uma pressão urbanística bastante acentuada, que pode modificar as características originais destes ecossistemas (Knox, 1986; Kennish, 1997). Cenários prevêem que a população total atinja 11 bilhões de habitantes em um século, sendo que 95% desse crescimento devem ocorrer nos países em desenvolvimento, como o Brasil.

Dessa população que habita os países em desenvolvimento, estima-se que dois terços (3,7 bilhões) viverão ao longo das áreas costeiras (Muñoz, 2000).

Dentro dessas perspectivas, observa-se que o aumento populacional da zona costeira constitui-se num grande problema de gestão ambiental, pois segundo a AGENDA 21\* (1992), seis em cada dez pessoas vivem dentro de um raio de 60 km da orla litorânea e dois terços das cidades do mundo, com populações de 2,5 milhões de pessoas ou mais, localizam-se próximas dos estuários (Bezerra *et al*, 2002).

Os significativos impactos da atividade humana em regiões estuarinas são de dois tipos: primeiro, o consumo de recursos naturais em ritmo mais acelerado do que aquele no qual eles podem ser renovados pelo sistema ecológico; segundo, a liberação de contaminantes e geração de produtos residuais (esgotos domésticos e industriais estão entre os mais comuns) (Calmano, 1996), cujas concentrações finais são controladas pela mistura da água doce e água do mar, e pelos fluxos entre os diferentes componentes do sistema, tais como sedimento, coluna d'água e biota (Niencheski *et al*, 1999).

Outro fator preocupante, é que são somados aos impactos inerentes da explosão demográfica nas áreas costeiras os possíveis efeitos das mudanças climáticas (sejam elas de origem natural ou antrópica). O aquecimento do sistema climático é inequívoco, como está agora evidente nas observações de aumento das temperaturas médias globais do ar e do oceano, do derretimento generalizado da neve e do gelo e da elevação do nível global médio do mar (Alfredini *et al*, 2007). É esperado que as temperaturas médias globais aumentem de 1 a 3.5 °C até o final deste século (Watson *et al*, 1996). Os efeitos das mudanças climáticas na temperatura da água do mar são difíceis de inferir e dependerão das características particulares de cada área costeira, no entanto, é provável que as maiores mudanças ocorram nos corpos d'água semi-fechados (Lloret *et al*, 2008).

\*AGENDA 21 é um plano de ação para ser adotado global, nacional e localmente pelas Organizações do Sistema das Nações Unidas, pelos governos e pela sociedade civil em todas as áreas em que a ação humana impacta o meio ambiente. Foi um dos principais resultados da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro (Brasil) em 1992, também conhecida como ECO-92.



Estão previstas mudanças na quantidade de precipitação e na salinidade do oceano, nos padrões de vento e nos eventos climáticos extremos, como secas, precipitação forte, ondas de calor e intensidade dos ciclones tropicais, que por sua vez causariam inundações, intensificação da erosão e alteração no balanço hídrico (entre 1 e 3,2 bilhões de pessoas poderão sofrer com a falta de água, segundo o IPCC\*, 2001). Os ecossistemas sofrerão diretamente estes efeitos através da perda de biodiversidade e de recursos naturais, alterações das rotas migratórias, mudanças nos padrões reprodutivos das espécies, diminuição da capacidade de absorção de carbono pela vegetação, morte de recifes de corais e inundação de áreas costeiras (Alfredini *et al*, 2007).

Neste contexto, o estudo da dinâmica de fluidos em rios, lagos e estuários é de grande importância no entendimento de muitos problemas ambientais, pois os fenômenos de transporte são fortemente dependentes de uma descrição apropriada dos processos hidrodinâmicos (Cheng & Walters, 1982). Como a complexidade e os custos envolvidos em estudar os ambientes costeiros com base em amostragens discretas (ou contínuas) são muito altos, a utilização de técnicas de modelagem numérica figura como uma importante alternativa.

Modelos numéricos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica sinótica de algum fenômeno (Amaral *et al*, 2004). Através de modelos calibrados, capazes de reproduzir o comportamento de parâmetros físicos em pontos onde foram feitas medições, pode-se interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas para toda a área de interesse, o que permite uma melhor interpretação das medições isoladas (Rosman, 2001) e dos fenômenos de transporte associados.

*\*IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Órgão estabelecido em 1988 pela Organização Mundial de Meteorologia e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente para fornecer informações científicas, técnicas e sócio-econômicas relevantes para o entendimento das mudanças climáticas, seus impactos potenciais e opções de adaptação e mitigação.*

A principal vantagem da simulação é a obtenção de respostas com um custo significativamente menor do que o valor da própria informação (Porto, 1997). Na maioria das vezes, através da simulação é possível identificar as variáveis e os processos que realmente são relevantes em um estudo, permitindo desta forma a restrição do enfoque da pesquisa (Rosman, 2001). Outra vantagem do emprego de técnicas de simulação é a possibilidade de realização de treinamentos e de elaboração de previsões de modificações dos cenários e de variação controlada das grandezas consideradas (Porto, 1997). É fundamental, entretanto, o entendimento do fenômeno de interesse por parte do modelador, para que este possa fazer pleno uso das informações disponíveis e da qualidade dos resultados do modelo (Rosman, 2001).

Neste contexto, muitos estudos de modelagem numérica têm sido conduzidos com a finalidade de identificar os efeitos das principais forçantes físicas sobre a dinâmica de estuários ao redor do mundo (Oey *et al*, 1985; Giese & Jay, 1989; O'Connor, 1991; Kurup *et al*, 1998; Chen *et al*, 2003). Embora muitos dos programas de monitoramento e esforços de modelagem numérica foquem principalmente na dinâmica dos canais principais a inclusão das enseadas rasas na modelagem estuarina é essencial para uma simulação mais precisa da propagação da maré e das trocas de material com os canais principais pelos modelos de qualidade de água (Kuo & Park, 1995).

Ji *et al* (2001) realizaram experimentos numéricos forçados por aporte fluvial, marés e forçantes atmosféricas para estabelecer zonas de alagamento em Morro Bay (USA). Hearn & Robson (2002) estudaram o efeito do vento na hidrodinâmica das baías internas do estuário mediterrâneo Harvey (AUS) através de experimentos de modelagem numérica com o modelo POM (Princeton Ocean Model). Swain *et al* (2004) contribuíram para o plano interdisciplinar de recuperação dos ecossistemas do sul da Flórida com a modelagem numérica de pântanos de água doce, mangues rasos, zonas litorâneas de franjas, embaiamentos mareais e plataforma marinha rasa. Eles observaram que os fluxos reversos nos embaiamentos só são evidentes nas simulações quando o efeito do vento é incluído. Hellweger *et al* (2004) apontaram o efeito da geometria no transporte de traçadores no estuário Hudson (EUA). De acordo com esses autores, baías rasas largas e endentações de pequena escala que ocorrem em forma de enseadas atuam diretamente no destino e no transporte de traçadores aprisionando parcelas de água durante a passagem da pluma e liberando-os em ciclos de maré posteriores. Abdelrhman

(2005) desenvolveu um protocolo simplificado para suprir a necessidade de modelar confiavelmente a hidrodinâmica e o transporte em um vasto número de enseadas rasas.

Além da importância da inclusão de áreas rasas em estudos de modelagem, a correta representação da interação entre as áreas rasas e as áreas profundas (canais principais) é particularmente importante em estudos relacionados à distribuição de organismos (e.g. Churchill *et al*, 1999; Hammond *et al*, 2002), ao transporte de sedimentos para a região costeira (e.g. D'Alpaos *et al*, 2005; Teeter *et al*, 2001) e à ecologia (e.g. Huret *et al*, 2005). Mais recentemente, esta interação tem recebido mais atenção devido ao esforço empregado na modelagem de áreas rasas vegetadas (Deussfeld, 2003). Kuo & Park (1995) demonstraram que a inclusão das zonas rasas como áreas de armazenamento temporário na modelagem estuarina melhorou consideravelmente o desempenho do modelo utilizado.

No contexto nacional, a modelagem numérica aplicada ao estudo de processos hidrodinâmicos em estuários vem sendo cada vez mais difundida. Amaral *et al* (2004) modelaram o Rio Macaé (RJ), Andutta (2006) modelou o estuário do Rio Curimataú (RN), Möller *et al* (1996, 2001 e 2007) e Fernandes *et al* (2005) modelaram a Lagoa dos Patos, no sul do Brasil. No entanto, nestes estudos pouca atenção foi dada às zonas rasas. Trabalhos que levaram em consideração as áreas rasas se restringem a trabalhos como o de Rigo (2004), que aplicou um modelo numérico nas zonas rasas da Baía de Vitória (ES) vegetadas por mangues, e Monteiro *et al* (2006) e de Fernandes *et al* (2007), que explicaram os mecanismos que controlam a hidrodinâmica do Saco da Mangueira, uma importante enseada rasa do estuário da Lagoa dos Patos. Além destes, restam alguns outros estudos meramente descritivos baseados em dados de campo realizados nas lagoas costeiras do estado do Rio de Janeiro (Kjerfve *et al*, 1996; Kjerfve *et al*, 1997; Kjerfve & Knoppers, 1999; Knoppers & Kjerfve, 1999).

O estuário da Lagoa dos Patos é um importante sistema sobre o qual ainda há escassez de estudos integrados que abranjam as enseadas rasas. A necessidade de compreender e manejar o ecossistema estuarino da Lagoa dos Patos e águas adjacentes é tarefa prioritária porque, historicamente, as demandas socioeconômicas (atividades portuárias, industriais, agrícolas, pesqueiras e turísticas) tendem a colidir com os interesses ecológicos (produção biológica e biodiversidade) desta importante região costeira (Seeliger & Cordazzo, 2002).

Dentre as principais áreas rasas do estuário, o Saco do Arraial, também chamado de Saco do Rio Grande, destaca-se como uma das mais importantes. O Saco do Arraial é uma enseada rasa protegida, compreendida pela região de entorno da Ilha dos Marinheiros na margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos, sendo o sedimento caracterizado principalmente por areia fina, indicando dinâmica moderada (Colling & Benvenuti, 2004). Esta é a maior enseada do estuário, apresentando uma alta diversidade de habitats, como fundos de gramíneas, macroalgas e fundos não vegetados, sendo considerada uma área de criação, alimentação e proteção de variadas espécies de peixes e invertebrados de importância ecológica e econômica (Garcia & Vieira, 1997; Kapusta & Benvenuti, 1998).

Alterações profundas da descarga continental modificam os processos hidrodinâmicos no estuário da Lagoa dos Patos, levando a modificações das características físico-químicas da coluna de água, dinâmica dos sedimentos e estrutura e dinâmica do plâncton, nécton e comunidades bentônicas. De maneira similar, efeitos de longa duração de perturbações humanas persistentes no estuário causam modificações marcantes na qualidade da água, padrões de sedimentação e da biologia de populações e comunidades. Parece que ambos, perturbações naturais extremas e/ou perturbações humanas contínuas causam um deslocamento do "estado de equilíbrio dinâmico" para níveis mais altos de entropia com consequências significativas sobre a estrutura e o funcionamento ecológico do estuário e da integridade sócio-econômica da região. As perturbações de curta escala induzidas pela maré e ciclos sazonais de condições meteorológicas são sinais dominantes das séries temporais que justificam diferentes estados do "equilíbrio dinâmico" das populações residentes e comunidades. No Atlântico Sul-Occidental, perturbações episódicas e esporádicas de ambientes costeiros marinhos devido a modificações significativas nas taxas de precipitação e, subseqüentemente da descarga continental, tendem a estar associadas com o fenômeno El Niño e La Niña e com a passagem de frentes atmosféricas frias (Seeliger & Cordazzo, 2002).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo investigar a relação entre a dinâmica do Saco do Arraial e a dinâmica da região estuarina, bem como investigar os mecanismos que controlam a dinâmica desta enseada sob as suas forçantes físicas principais: maré, vento e descarga fluvial. O diagnóstico da resposta do sistema às variações de intensidade da descarga fluvial, através de simulações de períodos de alta e

baixa descarga, possibilita uma avaliação preliminar das conseqüências das mudanças climáticas, que implicam na alteração do regime de descarga continental na dinâmica desta enseada rasa. Posteriormente, modelos preditivos de perturbação deverão embasar tomadas de decisões para a exploração sustentável dos recursos pesqueiros e manutenção da biodiversidade no estuário.

## CAPÍTULO II - ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A Lagoa dos Patos, localizada no litoral do Rio Grande do Sul, entre os paralelos 30°S e 32°S e os meridianos 50°W e 52°W, é um grande corpo lagunar de 250 km de comprimento ao longo do eixo NE-SW e largura média de 40 km, que devido às suas dimensões (área em torno de 10.360 km<sup>2</sup>) é chamado de “mar de dentro” (Figura 1). A evolução da extremidade sul da Lagoa dos Patos durante o Holoceno foi detalhada por Godolphim (1976) e Long (1989). Segundo este, o estuário da Lagoa dos Patos, de planície costeira, possui a desembocadura característica de um delta interno.

Geologicamente, o sistema formado pela Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim é denominado Complexo Lagunar Patos-Mirim e foi influenciado pelo desenvolvimento de uma barreira múltipla resultante das mudanças eustáticas\* do nível do mar durante o Quaternário. Pelo menos quatro ciclos transgressivos-regressivos sucessivos depositaram barreiras arenosas descontínuas paralelas à costa. Estudos evidenciaram, que processos erosivos e deposicionais resultantes da ação morfodinâmica Holocênica foram responsáveis pela atual configuração geomorfológica do estuário da Lagoa dos Patos (Calliari, 1998).

As ondas possuem papel fundamental nos processos lagunares, classificando e transportando o sedimento, bem como, modificando as feições costeiras. A Lagoa dos Patos, por ser orientada paralelamente ao vento, sofre com intensidade o efeito das ondas, que formam bancos, erodem promontórios e constroem cúspides nas margens lagunares. O transporte sedimentar causado pelas ondas é ainda mais evidente nas zonas rasas, onde as ondas podem atuar com mais eficiência sobre o fundo (Almeida, 2000).

As barras transversais que caracterizam a Lagoa dos Patos são uma resposta às correntes produzidas pela refração das ondas e suas interferências (Niedoroda & Tanner, 1970 em Toldo Jr., 1994). Segundo Bruner & Smosna (1989 em Toldo Jr., 1994), estes bancos são o resultado da influência das ondas que induzem os sedimentos a se movimentarem em direção à costa.

\* Os movimentos eustáticos resultam de qualquer variação significativa do volume de água presente no oceano global ou nas bacias oceânicas, com a consequente variação do nível da água em relação à terra firme.

Há uma relevante diferença entre as duas margens da Lagoa dos Patos, onde na margem leste a granulometria é mais fina que na margem oeste devido à frequência diferenciada de ondas em cada margem (Toldo Jr., 1994).

Morfológicamente a área da desembocadura da Laguna dos Patos tem uma forma diferente daquelas consideradas normais aos demais estuários, os quais se abrem para o mar. Ao contrário, seu estreitamento se dá em direção ao mar (de 30 km de largura na sua parte límnica para 700 m no canal de acesso), com dois meandros, um leste e outro oeste, terminando como a boca de um funil, nos Molhes da Barra do Rio Grande (Hartmann, 1996). Estas características a tornam a maior lagoa costeira do tipo estrangulada do mundo (Kjerfve, 1986). A barra que separa a lagoa do oceano é construída naturalmente pela forte ação de ondas costeiras em combinação com a disponibilidade de sedimentos (Kjerfve, 1986).

No entanto, em 1911 o canal de entrada foi fixado artificialmente pela construção dos molhes da barra, o que, todavia, lhe proporcionou navegabilidade (Möller & Castaing, 1999). Desde então, esta região da desembocadura vem sofrendo modificações naturais (erosão, deposição, construção de pontais, bancos, deltas, entre outras) e artificiais (aterros, dragagens, enrocamentos, construções portuárias, entre outras), que afetam principalmente a circulação e indiretamente os processos de erosão e deposição, bem como a fauna e a flora acompanhante (Hartmann, 1996).

O estuário da Lagoa dos Patos ocupa aproximadamente 10% da superfície total da lagoa (Figura 1), sendo predominantemente (80%) composto por grandes bancos de areia com profundidades que variam entre 1 e 5 m. A profundidade máxima é de aproximadamente 18 m no canal que liga a laguna ao Oceano Atlântico. As enseadas rasas associadas às margens do estuário ocupam aproximadamente 28% de sua área. São definidas por um número elevado de bancos e esporões arenosos recurvados, que formam uma feição típica das áreas rasas, com profundidades menores do que 1 m (Calliari, 1998). Os sedimentos moles dos habitats sub- (1,5-5 m) e intermareais variam com a energia hidrodinâmica de arenolodosos em áreas rasas a lodosos nos canais profundos (>6 m) (Seeliger & Cordazzo, 2002).

O Saco do Arraial (Figura 2) é a maior enseada rasa do estuário da Lagoa dos Patos, sendo limitado ao sul pela península da cidade de Rio Grande, a leste pelo Canal

de Rio Grande, e a norte e oeste pela margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos. A principal orientação desta enseada corresponde ao eixo nordeste-sudoeste, e sua profundidade média segundo Baumgarten *et al* (1995) é de 1,5 m. Nela estão inseridas várias ilhas de diferentes tamanhos e morfologias (Souza, 2002). Dentre estas ilhas, destaca-se pela sua dimensão a Ilha dos Marinheiros, que ocupa a maior parte da enseada e apresenta erosão em todas as suas margens, independentemente de qual seja a orientação da linha de praia (Tagliani *et al*, 2006). Outras ilhas de menor proporção como a Ilha das Pombas, da Pólvora e dos Cavalos, localizam-se na região de ligação do saco com o estuário.



Figura 1: A Lagoa dos Patos e seu estuário.

Fonte: <http://www.popa.com.br/whereweare/whereweare.htm>





## 2.2 ASPECTOS ECOLÓGICOS

Asmus (1984) apresenta 11 tipos diferentes de ambientes que constituem a estrutura básica do sistema ecológico do estuário da Laguna dos Patos a partir da avaliação de elementos bióticos e abióticos e da maneira de como eles se distribuem: 1) plataforma proximal; 2) embocadura da laguna; 3) canais; 4) zona intermediária; 5) sacos protegidos; 6) ilhas; 7) marismas; 8) praias oceânicas; 9) dunas; 10) lagoas interiores e 11) terrenos elevados.

O Saco do Arraial é um dos sacos protegidos de maior relevância para o estuário da Lagoa dos Patos. O entorno das ilhas que o constituem é caracterizado por planícies lamosas de águas rasas e ambientes de marismas (Seeliger e Cordazzo, 2002). Os sedimentos moles que constituem o Saco do Arraial possuem baixa abundância e diversidade macrobentônica, mas são importantes rotas migratórias. Os fundos moles submareais oferecem nichos espaciais e tróficos para densas populações de pelecípodos, gastrópodes e tanaidáceos. Áreas rasas submareais (>1,5 m) são cobertas por microalgas epibentônicas, material detrítico e, ocasionalmente, agregações de macroalgas. Todos oferecem proteção para pequenos crustáceos peracáridos sedentários (Bemvenuti, 1997; 1998). Fanerógamas submersas funcionam como um importante substrato semi-permanente para organismos epifíticos e epifaunais (Ferreira & Seeliger, 1985), colonizam grandes áreas, oferecendo proteção e alimento para camarões, caranguejos de grande mobilidade assim como para alguns scianídeos e tainhas (Garcia & Vieira, 1997). Os fundos intermareais parecem faunisticamente pobres devido à dominância de organismos cavadores; entretanto, eles são importantes *habitats* para a infauna.

O Saco do Arraial é um sistema classificado entre oligo e mesotrófico de acordo com dois diferentes métodos, que utilizam a concentração de clorofila-a como parâmetro de classificação trófica (Persich *et al*, 1996).

No estuário da Lagoa dos Patos estão situados aproximadamente 92,7% (6.838 ha) de macrohabitats vegetados de marismas existentes na costa gaúcha (Colling & Bemvenuti, 2004). A maior expressão dessa comunidade vegetal encontra-se no município de Rio Grande, onde ocupa uma área de 59 km<sup>2</sup>. As marismas são importantes interfaces com o mar, desempenham importante papel na estabilidade do substrato e atuam como barreiras naturais contra tempestades, impedindo a erosão. A fisiografia

heterogênea das marismas sustenta a biodiversidade de plantas e animais, incluindo as teias tróficas estuarinas que determinam a disponibilidade dos recursos pesqueiros. Águas de baixa salinidade, proteção e abundância de alimento garantem locais ideais para criação e reprodução de invertebrados marinhos e peixes que visitam o estuário periodicamente, enquanto outros, como mamíferos marinhos e aves, encontram alimento, abrigo e locais de procriação (Seeliger & Cordazzo, 2002). Por outro lado, a falta de um substrato permanente, a reduzida oscilação de maré astronômica e a turbidez das águas estuarinas induzem a uma baixa diversidade da comunidade incrustante no estuário, que colonizam estacas de madeira e estruturas dos cais da área portuária (Seeliger & Cordazzo, 2002).

As imprevisíveis condições físico-químicas estuarinas influenciam fortemente os ciclos de produção primária. A exportação de organismos produtores durante a vazante é, em parte, responsável pelo enriquecimento da água costeira (Abreu & Castello, 1997). A baixa produção primária coincide com baixas temperaturas da água e irradiância no inverno, quando a produção líquida torna-se negativa e processos heterotróficos prevalecem. *Ruppia maritima* se estabelece na primavera e, após o verão, pode alcançar uma alta biomassa seguida por massiva mortalidade no outono, comum após a exposição da população a altas temperaturas (Koch & Seeliger, 1988). Os produtores primários dominantes nas marismas são as *Spartinas* (na primavera e outono) e *Scirpus* (na primavera e verão) e seus ciclos sazonais de produção são função da temperatura ótima do ar. As marismas estão entre os produtores primários responsáveis por mais de 86% do carbono autóctone no estuário (Costa, 1997).

O declínio dos recursos costeiros, bem como da estabilidade e diversidade podem também ser relacionados aos fenômenos globais de larga-escala. Enquanto os ciclos sazonais ou de curta duração estabilizam os processos e mantêm a produção secundária da região, eventos climáticos e oceanográficos podem perturbar, profundamente, a estabilidade ecológica no estuário e da região costeira adjacente. Altas precipitações na bacia hidrográfica e elevada descarga continental durante anos de El Niño causam velocidades extremas na desembocadura do estuário e eutrofização das águas costeiras. Sob essas condições, o recrutamento da maioria das importantes espécies marinhas dentro do estuário é dificultado, resultando numa relação negativa entre descarga de água doce e produção secundária no estuário (Castello & Möller 1978). Por outro lado,

anos secos de La Niña favorecem a intrusão de água salgada e a prolongada salinização do estuário (Costa *et al*, 1988), o que interfere nos ciclos reprodutivos de diversos crustáceos e peixes marinhos (Seeliger & Cordazzo, 2002).

### 2.3 ASPECTOS QUÍMICOS

A qualidade da água em estuários é o resultado complexo das inter-relações entre: dinâmica da água, descarga de nutrientes, processos químico-biológicos e aportes antropogênicos. A retenção de nutrientes nos estuários é o principal fator que contribui para a alta produtividade destes ambientes (Niencheski & Windom, 1994).

O estuário da Lagoa dos Patos apresenta variações diárias e até horárias dos constituintes químicos (Baptista, 1984). Muitas vezes não há mistura somente entre as águas da lagoa e as do oceano, mas também entre águas oriundas de misturas que ocorreram anteriormente no estuário. Além disso, a heterogeneidade fisiográfica do estuário, com canais profundos, zonas de águas rasas abertas, e diferentes tipos de baías semi-fechadas, determina que cada ambiente apresente características físico-químicas próprias com variações sazonais e inter-anuais (Baumgarten & Niencheski, 1998).

As conclusões de estudos de qualidade de água realizados no estuário da Lagoa dos Patos por pesquisadores do Laboratório de Hidroquímica da FURG sumarizados em Baumgarten & Pozza (2001) identificam 12 áreas rasas potencialmente comprometidas ao redor da cidade do Rio Grande, principalmente em termos de contaminação orgânica. Foram mapeados 76 pontos de lançamentos de efluentes domésticos, industriais e pluviais. Tanto ao norte como ao sul de Rio Grande, constatou-se riqueza de nutrientes dissolvidos (eutrofia) de origem antrópica (efluentes principalmente), o que proporciona intensas florações indesejáveis de cianobactérias, indicadoras de poluição orgânica (Matthiensen *et al*, 1999).

Atualmente, existe uma estação de tratamento de esgoto na cidade do Rio Grande, mas esta é responsável pelo tratamento de apenas cerca de 30 % do efluente urbano (Ribeiro, 2006). Estima-se que a descarga per capita relativa ao esgoto doméstico seja de 7 kg nitrogênio/ano e de 0.2 kg fósforo/ano (Wollast, 1983 em Ribeiro, 2006). Estes percentuais, considerando-se a população da cidade, justificam apenas 6% do nitrogênio

e 1% do fósforo encontrados por Ribeiro (2006). O restante é atribuído ao complexo industrial de fertilizantes que está instalado na cidade.

A vazão em um dos pontos de lançamento de efluentes domésticos identificados no Saco do Arraial é de 15 L/s (Almeida *et al*, 1993). Não há rede de esgotos e o sistema de fossas predomina nas comunidades do entorno da enseada. Por causa disso, os esgotos domésticos se misturam com as águas das chuvas (Jorge & Baumgarten, 2006), o que pode aumentar os riscos de epidemias e doenças (Santos *et al*, 1997). O Saco do Arraial apresentou índices de balneabilidade (160.000 coliformes fecais/100ml) piores do que regiões poluídas por indústrias e esgotos domésticos (Santos *et al*, 1997). De acordo com Oliveira & Baumgarten (1998), 60% da população que vive nas redondezas da enseada acredita que a poluição hídrica prejudica sua qualidade de vida, uma vez que a água é utilizada para recreação e pesca artesanal. Além disso, 70% da população têm ou já teve problemas de pele ou verminoses relacionadas à poluição (Oliveira & Baumgarten, 1998).

Com relação às zonas de canal, as concentrações de nutrientes estão em conformidade com os padrões de estuários não contaminados, excetuando-se as altas concentrações de amônio e fosfato na área onde se situa o Porto Velho (Baumgarten & Pozza, 2001).

As concentrações de material em suspensão na superfície dependem do aporte de água doce do Canal do São Gonçalo (Figura 1) da Laguna dos Patos, bem como da ressuspensão por ondas nas partes mais rasas. Junto ao fundo, além dos fatores acima mencionados, a concentração de material em suspensão está relacionada à entrada de água salgada, que dependendo da sua intensidade, pode ressuspender material já depositado, e também precipitar por flocculação e agregação partículas coesivas, como as argilas. As maiores concentrações observadas são devidas à entrada da cunha salina, em cujo limite ocorre a turbidez máxima (Paim & Möller, 1986). Conseqüentemente, em função das condições hidrodinâmicas de cada região da lagoa, as concentrações do material em suspensão se comportam de maneira não uniforme no sistema. Além disso, em função da pequena declividade da bacia (2 m em 250 km), da distância do Complexo Guaíba e do atraso do defluxo as maiores concentrações encontradas na desembocadura não necessariamente coincidem com as épocas de maiores vazões (Hartmann & Schettini, 1991).

De acordo com o Enquadramento das águas segundo seu uso e qualidade (Anexo I), os parâmetros de qualidade de água ultrapassam os índices tolerados para as classes nas quais as águas do Saco do Arraial foram enquadradas.

## 2.4 ASPECTOS FÍSICOS

O clima da região é temperado, caracterizado pela passagem de frentes meteorológicas de origem polar. Estas frentes influenciam nas grandes variações de temperatura, no aumento nas taxas de precipitação e nas mudanças no regime de ventos (Möller & Castaing, 1999).

Esta região é influenciada por dois sistemas meteorológicos, o anticiclone do Atlântico Sul e anticiclones móveis de origem polar. O primeiro é um sistema de alta pressão permanente localizado sobre o Atlântico Sul, mais forte no verão e mais fraco no inverno quando se desloca para zonas de baixa latitude (Tchernia, 1980). Esse centro de divergência se constitui de uma fonte de massas de ar tropicais marítimas, gerando sobre a área uma circulação de ventos de nordeste (NE), que é a direção predominante durante a maior parte do ano, exceto no outono e inverno (Braga & Krusche, 2000; Krusche *et al*, 2002). Os anticiclones polares são sistemas com alta mobilidade e que se propagam para regiões de baixas latitudes transportando massas de ar de origem polar. Ventos de sul (S), sudoeste (SO) e sudeste (SE) estão associados a esses centros (Krusche *et al*, 2002). Um sistema sub-sinótico\* de importância na região é o sistema de brisas, estabelecido entre o oceano e a zona costeira. O sistema de brisas é caracterizado pela brisa marinha, que durante o dia sopra do mar para a terra, e pela brisa terrestre, que durante a noite sopra da terra para o mar.

As marés são mistas, principalmente diurnas, refletindo a proximidade de um ponto anfidrômico para a componente M2 (Vassie, 1982). A lagoa é caracteristicamente de micro-maré, com amplitude média de 0,47 m (Herz, 1977). O período natural de oscilação da lagoa, que se comporta como um sistema fechado é por volta de 24 horas e seiches têm este período atribuído à combinação dos efeitos de brisa e marés diurnas (Möller *et al*, 2007).

\* Sinótico (frequência de 1 a 10 dias) e Sub-sinótico (frequência < 1 dia).

Ventos do quadrante norte (NE) predominam ao longo do ano. Durante o verão e a primavera se observa a influência de ventos de leste, indicando o sinal da influência da brisa marinha. Ventos de sudoeste aumentam sua influência durante o outono e inverno quando os sistemas frontais tornam-se mais frequentes sobre a área. A escala de tempo associada à passagem destas frentes é de 3 a 16 dias. Segundo Tomazelli (1993) na cidade de Rio Grande, 22.3% das observações entre 1970 e 1982 indicaram a presença de ventos de nordeste e 13,5% de ventos de sudoeste. Velocidades de ventos típicas ficam em torno de 3 a 5 m/s (Tomazelli, 1993).

Diversos trabalhos como os de Motta (1969), Herz (1977), Costa *et al* (1988), Möller *et al* (1991), Möller *et al* (1996), Fernandes (1997) e Möller *et al* (2001) explicam o papel desempenhado pelo vento na dinâmica da lagoa. Möller *et al* (1996) estabeleceram que, quanto mais perto da desembocadura a circulação será mais influenciada pelo efeito remoto do vento enquanto as zonas à montante são gradativamente mais influenciadas pelo seu efeito local. Möller *et al* (2001) propuseram um esquema que define o efeito destas forçantes sob as condições predominantes de vento observadas na região (Figura 3). Em períodos de vento NE, a ação do vento local promove um aumento da elevação na região da Feitoria. O mesmo vento em seu efeito não-local provoca um rebaixamento do nível do mar próximo à linha de costa devido ao transporte de Ekman, que empurra a água em direção ao oceano aberto. O resultado da combinação destes dois efeitos é a geração de um gradiente de pressão barotrópico que força o sistema a exportar água para a plataforma continental. Sob a ação de um vento SO, a Lagoa dos Patos sofre um rebaixamento de seu nível em sua porção sul (região da Feitoria). Na região costeira, o vento SO gera um acúmulo de água junto à costa. A composição destes dois movimentos produz um gradiente de pressão barotrópico que tende a forçar a entrada de água salgada para o interior da laguna.

Segundo Toldo Jr. (1994) a Lagoa dos Patos pode ser classificada com um ambiente protegido, pois permanece calma a maior parte do ano, com ondas de energia moderada, exceto em eventos de tempestade e fortes ventos quando são geradas ondas de média energia e curto período. Ondas com alturas inferiores a 0,5 m e com incidência paralela à praia são observadas na Lagoa dos Patos (Toldo Jr., 1994). A frequência de ondas na margem leste é menor que na margem oeste, porém as ondas de tempestade

incidem nesta margem devido ao padrão de ventos associados à entrada de sistemas frontais (Toldo Jr., 1994).

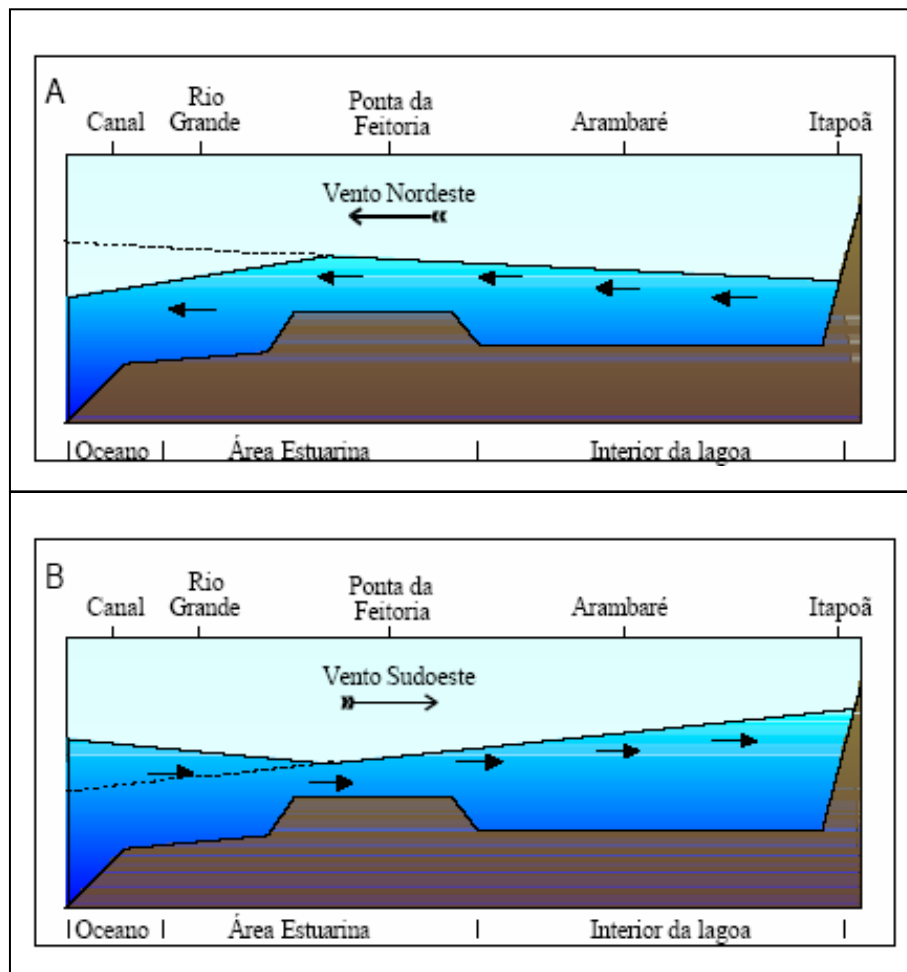


Figura 3: Representação esquemática dos níveis de elevação devido a resultante da ação local e remota do vento. Modificado de Möller *et al* (2001).

A bacia de drenagem da Lagoa dos Patos compreende uma área de aproximadamente 200.000 km<sup>2</sup>, sendo formada por rios típicos de médias latitudes. Os mesmos são caracterizados por períodos de altas descargas (no fim do inverno e início de primavera), seguidos por períodos de descargas moderadas (durante o verão e a primavera). A descarga fluvial média anual é de 2.000 m<sup>3</sup>/s (Bordas *et al*, 1984) com médias sazonais variando entre 700 m<sup>3</sup>/s durante o verão, até 3.000 m<sup>3</sup>/s na primavera. Picos de 25.000 e 12.000 m<sup>3</sup>/s foram observados por Rocheford (1958) e Möller *et al* (1991), respectivamente, em associação com o fenômeno El Niño. Durante estes períodos de intensa descarga, a lagoa pode permanecer predominantemente doce por



diversos meses (Paim & Möller, 1986), e a zona estuarina de mistura pode ser mover para a região costeira (Möller *et al*, 1991).

Diferentemente do efeito do vento, cujo papel na dinâmica da laguna vem sendo estudado há muitos anos, os efeitos da descarga fluvial no sistema continuam sendo pouco explorados. Uma das razões está ligada à falta de séries temporais de descarga fluvial longas o suficiente para análises que englobem períodos sazonais e inter-anuais característicos desta variável (Vaz, 2003). Marques (2005) analisou a escala de variabilidade temporal dos ciclos dominantes nas forçantes da circulação; assim como sua interação com os níveis de água e salinidade dentro da Lagoa dos Patos, destacando a importância de ciclos anuais, inter-anuais e decadais.

## 2.5 DINÂMICA ESTUARINA: INTERAÇÃO ENTRE AS FORÇANTES

A hidrodinâmica do estuário é controlada pela combinação dos efeitos causados pela ação do vento local sobre a superfície da lagoa (mecanismo de *elevação/rebaixamento*), pela ação do vento não-local agindo na região costeira (transporte de Ekman agindo a 90° para a esquerda da direção do vento), e pela descarga dos rios na região norte da laguna (Möller *et al*, 1996; 2001; Fernandes *et al*, 2001; 2002).

Na maior parte do ano, sob descarga fluvial de baixa a moderada (até 4000 m<sup>3</sup>/s segundo Schiller, 2004), a circulação é dominada pelo vento (Möller *et al*, 2001). Ventos de SO determinam a entrada de água salgada no interior da laguna. O limite interior teórico para a penetração da água salgada é a 80 km à montante da barra da boca do estuário, definida por uma linha imaginária que une a Ponta dos Lençóis à Ponta da Feitoria (Closs, 1962; Calliari, 1980). Esta linha pode se estender para o interior da laguna (até 200 km a partir da desembocadura) em condições de estiagem prolongada, associada com ventos daquele quadrante (Hartmann & Schettini, 1991). Já o vento NE é responsável pela saída de água salgada do interior do estuário em direção à zona costeira. Parte da massa de água transferida para a costa durante eventos de NE pode retornar ao estuário no próximo ciclo de ventos de SO (Möller *et al*, 2001).

Sob altas descargas (acima de 4000 m<sup>3</sup>/s), principalmente no final do inverno, a descarga fluvial é a principal forçante do sistema, podendo produzir uma sobre elevação do nível da água (Mehta, 1990) que o vento de SO só consegue vencer em condições de tempestades (Möller *et al*, 2001). Nestes períodos, a ação do vento SO é extremamente restrita, pois o gradiente barotrópico gerado pelo desnível entre a Lagoa dos Patos e o oceano praticamente anula o gradiente de pressão gerado pela ação do vento. Neste caso, a zona de mistura do estuário pode ficar restrita à região da desembocadura ou pode ser deslocada para a região costeira adjacente (Möller & Castaing, 1999), formando assim uma pluma estuarina de dimensões consideráveis (Fernandes *et al*, 2002).

A média anual de salinidade no estuário é 13, com valores instantâneos variando de 0 a 34 (Castello, 1985). Os mesmos fatores que controlam a hidrodinâmica do estuário determinam a distribuição de salinidade. Esta tem fraca relação com a variabilidade da maré, mas correlaciona-se com a intensidade e direção do vento, taxa de precipitação e descarga de água doce, em uma escala de horas a semanas (Castello & Möller, 1978; Möller & Castaing, 1999). Ventos de nordeste combinados com alta descarga reduzem a salinidade estuarina (Fernandes *et al*, 2004). Gradientes verticais e horizontais de salinidade são observados (Fernandes *et al*, 2005; Odebrecht *et al*, 2005).

Nas zonas rasas, o gradiente de pressão lateral resultante da interação entre gradiente de pressão barotrópico longitudinal e a morfologia parece controlar o fluxo transversal (Fernandes *et al*, 2004). Nas zonas mais profundas, sujeitas à estratificação de densidade, o fluxo transversal resulta da interação entre forças baroclínicas, barotrópicas e a batimetria (Fernandes *et al*, 2004). Em estudos prévios realizados no Saco da Mangueira, Fernandes *et al* (2007) verificaram que existe estratificação horizontal de salinidade nesta enseada, onde o gradiente muda de direção em função dos fluxos de vazante e enchente. A presença de gradientes de densidade transversais pode reduzir o momento vertical e inibir a mistura em muitas áreas devido à diminuição da difusão turbulenta e fricção interna (Fernandes *et al*, 2004).

Considerando todas estas variações, são identificados na desembocadura da Lagoa dos Patos os quatro modelos básicos de circulação estuarina, desde o tipo cunha salina até o bem misturado (Möller & Castaing, 1999), descritos por Cameron & Pritchard (1963) e por Pritchard (1967). Segundo Hartmann & Schettini (1991) os tipos de estuários encontrados na região de desembocadura da Lagoa dos Patos apresentam

comportamento sazonal. Na primavera podem ocorrer as seguintes situações: ausência de estuário, estuário de cunha salina, estuário parcialmente estratificado. No verão ocorre o estuário verticalmente misturado. Além deste tipo no outono também pode ocorrer o estuário parcialmente estratificado. No inverno, ocorrem o estuário altamente estratificado e ausência de estuário. Entenda-se ausência de estuário, a situação de vazão excepcional, quando os totais de precipitação estão acima do normal nas bacias versantes, conjuntamente com ventos do quadrante norte, acarretando uma perda de identidade estuarina na desembocadura, sendo encontrado, então, um deslocamento unidirecional em sentido de jusante, tipicamente fluvial (Hartmann & Schettini, 1991). Estas situações, entretanto, podem mudar rapidamente (questão de horas), decorrentes das condições meteorológicas na região da desembocadura (Hartmann & Schettini, 1991).

Eventos de intensa descarga fluvial podem produzir importantes conseqüências para o ambiente. Os poucos estudos que abordam o efeito do aporte de água doce neste sistema dizem respeito, sobretudo, às relações com compartimentos bióticos. Castelo & Möller (1978) encontraram uma significativa correlação negativa, de 95%, entre períodos de chuvas e a captura de camarão, pois a alta descarga fluvial dificulta a entrada de larvas de camarão no estuário. A intensidade da descarga fluvial controla também o transporte do plâncton para dentro do estuário, resultando numa marcada mudança sazonal e anual na composição da comunidade planctônica (Seeliger & Cordazzo, 2002). Durante o inverno, devido ao intenso aporte de água doce, predominam as espécies límnicas. A diminuição da descarga continental no verão permite a entrada de água salgada e introduz organismos marinhos. Garcia *et al* (2001) comentam que altas descargas associadas ao fenômeno El Niño influenciam o funcionamento ecológico do sistema e produzem variações significativas na comunidade de peixes da Lagoa dos Patos. Castello & Möller (1977), Ciotti *et al* (1995) e Odebrech *et al* (2005) comentam ainda que altas descargas na Lagoa dos Patos são um fator fundamental para o enriquecimento e a alta produtividade da região costeira do sul do Brasil.

Niencheski & Windom (1994) e Niencheski *et al* (1999) comentam que variações na descarga fluvial também afetam o processo de eutrofização do sistema, pois determinam as trocas entre a lagoa e a região costeira. Enquanto baixas descargas

tendem a acumular no interior do sistema as contribuições de esgotos domésticos e industriais, altas descargas podem rapidamente conduzir para a região costeira os poluentes dissolvidos e em suspensão. Calliari & Facchin (1993) mostraram que partículas de sedimento fino em suspensão tendem a se depositar na região costeira em períodos de elevada descarga, contribuindo para a formação de depósitos de lama.

## 2.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A Lagoa dos Patos representa uma das mais importantes fontes de recursos hídricos para o estado do Rio Grande do Sul. Serve de via navegável para o transporte de diversos produtos e de ligação entre os dois portos mais importantes do estado, Rio Grande e Porto Alegre. Em suas margens desenvolvem-se inúmeras cidades onde, sem contar a população de Porto Alegre, chega-se à casa dos 700.000 habitantes (Hartmann, 1996).

Das três cidades que se encontram nas proximidades do estuário da Lagoa dos Patos, duas se localizam nas suas margens e dele dependem diretamente devido à sua base econômica: Rio Grande e São José do Norte. A terceira cidade é Pelotas, cuja economia está baseada nos agronegócios e no comércio. A cidade de Rio Grande encontra-se em uma península localizada na margem oeste do estuário, à aproximadamente 10 km da desembocadura para o Oceano Atlântico (população estimada em 2005 de 195.392 habitantes segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2006). O município apresenta um terminal marítimo e um conjunto portuário, que é o terceiro em importância no Brasil, com várias indústrias de médio e grande porte, representando um dos três maiores pólos de fertilizantes da América Latina, com uma produção média em torno de 900.000 toneladas/ano de fertilizantes dos tipos NPK (Neves, 1980). São José do Norte (população total de 26.618 habitantes de acordo com a Fundação de Economia e Estatística- FEE 2007), localizada na margem leste do estuário, é um dos municípios mais pobres do estado e possui economia primária, baseada na pesca e no cultivo de arroz e cebola (Noguez, 2005).

Durante as últimas décadas, o crescimento da demanda de água para uso doméstico, industrial e para a irrigação do cultivo de arroz tem modificado

significativamente a qualidade da água doce que compõe o fluxo médio anual através do estuário. Lançamentos de esgotos sem tratamentos e atividades agrícolas de larga escala adicionam altas cargas de nutrientes, periodicamente conduzindo a Lagoa dos Patos à eutrofização e mudanças na composição fitoplanctônica com florações de algas cianófitas potencialmente tóxicas (Abreu & Castello, 1997).

Os padrões de circulação e os processos de deposição natural de sedimentos, por outro lado, têm sido alterados ao longo do tempo em função de atividades antrópicas, como, por exemplo, a perda de 11% da área aquática do estuário devido ao aterramento realizado para a expansão do porto, à realização de dragagens de manutenção e expansão do calado do porto além da alteração dos molhes da Barra de Rio Grande. Estas alterações na dinâmica do sistema se refletem também na pesca artesanal, que constitui a base sócio-econômica para os pescadores da região há mais de um século (Seeliger & Cordazzo, 2002).

Neste contexto, os corpos hídricos que margeiam estas cidades sofrem diretamente as conseqüências do desenvolvimento urbano. O problema é mais grave no caso da cidade de Rio Grande, margeada pelo Saco da Mangueira e o Saco do Arraial, que são enseadas de baixa profundidade e, portanto, de moderada hidrodinâmica. Excetuam-se os limites leste (Canal do Rio Grande) e nordeste (Canal do Norte) da cidade, onde existem canais de navegação com intensa atividade portuária.

### CAPÍTULO III - JUSTIFICATIVA

Estudos de hidrodinâmica estuarina são sempre importantes devido à taxa de ocupação populacional que se verifica nos estuários e a crescente demanda das atividades por estes proporcionadas. À medida que as áreas costeiras se tornam mais desenvolvidas, a vulnerabilidade dos assentamentos humanos a fenômenos naturais também aumenta.

As lagoas costeiras são consideradas uma das mais frágeis regiões marinhas frente às mudanças climáticas e seus efeitos, que podem incluir aumento na temperatura da água do mar, aumento do nível do mar, mudanças hidrodinâmicas nas massas d'água, mudanças na salinidade da água, entre outros (Lloret *et al*, 2008). Existe uma expectativa de que o efeito das mudanças climáticas sobre as regiões costeiras seja acelerado ao longo do século 21, trazendo importantes alterações a estes sistemas.

Apesar de estudos mundiais terem demonstrado que o planejamento de estratégias de proteção ou contenção do desenvolvimento costeiro pode substancialmente reduzir os impactos econômicos das mudanças climáticas globais nas zonas costeiras, pouca atenção tem sido dada a este tópico no Brasil. Com raras exceções, as consequências das mudanças globais não estão sendo consideradas dentro do contexto de manejo das zonas costeiras brasileiras, o que pode representar um significativo despreparo das comunidades que vivem nestas regiões para lidar com as inegáveis consequências das mudanças previstas para este século.

Dentro deste contexto, o entendimento da dinâmica de ambientes costeiros, principalmente aqueles que representam uma comprovada contribuição para a manutenção dos padrões de produtividade, representa um passo inicial importante na previsão do comportamento destes sistemas perante alterações causadas pelas mudanças climáticas. Especificamente no caso do estuário da Lagoa dos Patos, um importante sítio ecológico, a carência de dados relativos às enseadas rasas torna o gerenciamento destas áreas preocupante, e evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados.

## CAPÍTULO IV - OBJETIVOS

A fim de gerar subsídios para o gerenciamento integrado do estuário da Lagoa dos Patos perante as possíveis conseqüências das mudanças climáticas, este estudo possui os seguintes objetivos:

### OBJETIVO GERAL

Avaliar através da modelagem numérica os fatores que controlam a hidrodinâmica do Saco do Arraial, a maior enseada estuarina do estuário da Lagoa dos Patos, de forma a fornecer subsídios para o entendimento da dinâmica desta região.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o efeito da descarga fluvial, do vento e da maré na dinâmica do Saco do Arraial.
- Avaliar a influência da variação da descarga fluvial na hidrodinâmica da enseada.
- Determinar a taxa de renovação de água na enseada.
- Determinar as condicionantes que definem a penetração de sal no Saco do Arraial.

## CAPÍTULO V – MATERIAIS E MÉTODOS

A complexidade envolvida em estudar a dinâmica de fluidos em rios, lagos e estuários com base em amostragens discretas é, normalmente, muito alta. As dificuldades práticas provêm da necessidade de se obter dados de forma contínua, tridimensional e em escalas de espaço e tempo de acordo com o processo que se deseja estudar. Por melhor que seja o esforço de amostragem, a região de estudo é sempre sub-amostrada e a existência de séries temporais longas (da ordem de meses a anos) de dados ininterruptos é bastante rara.

A grande variabilidade temporal e espacial do estuário da Lagoa dos Patos sugere que um estudo mais detalhado da sua hidrodinâmica não pode ser realizado baseado somente em estudos de campo, pois para tal seria necessário um grande número de observações, e o custo associado à coleta de dados é geralmente alto. Uma possível solução para a carência de dados seria o uso conjunto de dados de campo e de modelos numéricos como sofisticadas técnicas de interpolação e extrapolação de informações tanto no domínio espacial como temporal. Esta metodologia possibilita a realização de estudos com alta resolução e a construção de séries temporais consistentes de dados oceanográficos, limnológicos, ecológicos, geológicos, químicos que permitem um melhor entendimento da dinâmica do sistema estudado.

Möller *et al* (1996), Möller *et al* (2001), Fernandes (2001) e Fernandes *et al* (2005) demonstraram a necessidade do uso de modelos numéricos, bi e tridimensionais, para o estudo da dinâmica do estuário da Lagoa dos Patos. Com base nesta constatação, o presente trabalho utiliza a modelagem numérica como principal ferramenta.

### 5.1 O MODELO NUMÉRICO

As simulações numéricas apresentadas neste trabalho foram realizadas utilizando o modelo TELEMAC, que foi desenvolvido pelo *Laboratoire National d'Hydraulique (LNH)* da companhia *Electricité de France (EDF)*, na França. O modelo apresenta uma estrutura modular (Figura 4) e baseia-se na técnica dos elementos finitos. As equações são resolvidas em grades não estruturadas, com elementos triangulares. A natureza da malha de elementos finitos possibilita o ajuste de elementos de diferentes tamanhos



dentro do domínio, o que permite alta resolução em áreas de acentuado declive ou de estreitos canais e baixa resolução onde o detalhamento não é necessário.

Os módulos de pré-processamento estão relacionados com a digitalização dos dados batimétricos (SINUSX) e a geração da grade de elementos finitos para discretizar o domínio no espaço e estabelecer as condições de contorno (MATISSE), além da especificação dos parâmetros físicos utilizados (EDAMOX). O modelo TELEMAC oferece a opção de resolver as equações para águas rasas integradas verticalmente em duas dimensões (TELEMAC-2D) ou em três dimensões (TELEMAC-3D). Os resultados obtidos com os módulos hidrodinâmicos podem ser utilizados nos módulos de transporte de sedimento (SUBIEF-2D, SEDI-3D e SISYPHE), qualidade de água (SUBIEF-3D), e também no estudo de ondas (ARTEMIS e TOMAWAC). Os módulos de pós-processamento (RUBENS E POSTEL-3D) possibilitam a geração de gráficos dos resultados obtidos.

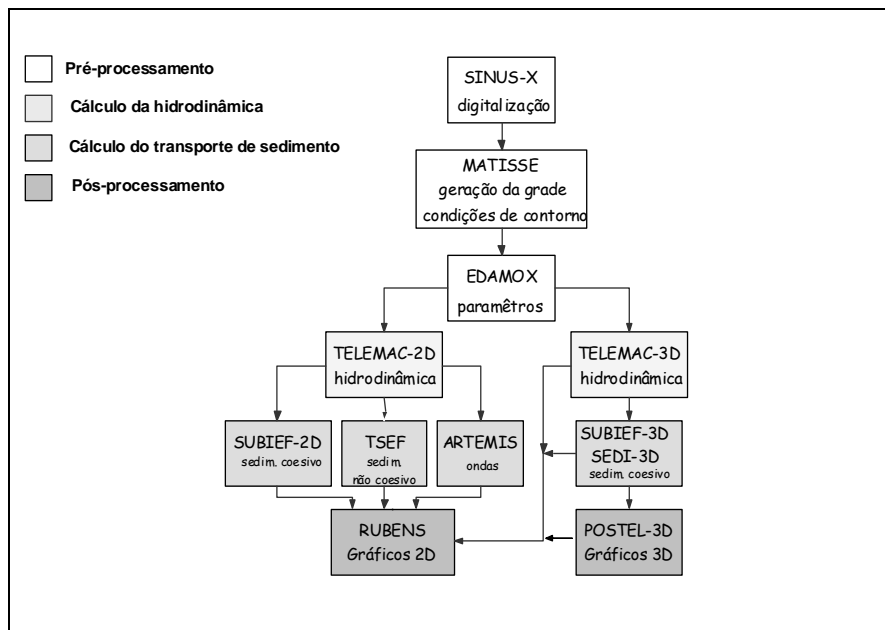


Figura 4: Estrutura modular do modelo TELEMAC.

## 5.2 O MODELO 2D

O TELEMAC-2D utiliza um sistema cartesiano (x,y,z) como referência, no qual os eixos x e y formam um plano horizontal e a gravidade atua na direção negativa de z. Seu código resolve as equações parciais de segunda ordem para fluxos integrados verticalmente, as quais são derivadas das equações tridimensionais de Navier-Stokes. Os termos de Coriolis, fricção com o fundo e fricção do vento, são adicionados como termos fonte (F). Assumindo que a densidade do fluido é constante (fluido Newtoniano), são usadas as equações da conservação da continuidade e duas equações de conservação de momentum.

Equações:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad (\text{eq. 01})$$

$$\frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hUU)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hv_e \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv_e \frac{\partial U}{\partial y} \right) + hF_x \quad (\text{eq. 02})$$

$$\frac{\partial(hV)}{\partial t} + \frac{\partial(hUV)}{\partial x} + \frac{\partial(hVV)}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hv_e \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv_e \frac{\partial V}{\partial y} \right) + hF_y \quad (\text{eq. 03})$$

Onde:

$F_x$  Termos fonte da equação do momentum em U

$F_y$  Termos fonte da equação do momentum em V

$g$  Aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ )

$h$  Profundidade (m)

$t$  Tempo (s)

$U$  Primeira componente da velocidade integrada na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ )

$V$  Segunda componente da velocidade integrada na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ )

**Z** Elevação da superfície livre (m)

**$V_e$**  Coeficiente de difusão

Aos termos fonte são adicionados os termos de Coriolis, fricção com o fundo e fricção do vento. A força de Coriolis em um ponto de latitude  $\phi$  é igual à:

$$F_x = 2\omega v \sin \phi = fv \quad (\text{eq. 04})$$

$$F_y = -2\omega u \sin \phi = -fu \quad (\text{eq. 05})$$

Onde:

**$F_x$**  Termo fonte na direção x

**$F_y$**  Termo fonte na direção y

**$\omega$**  Velocidade angular de rotação da terra ( $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ )

**$f$**  Coeficiente de Coriolis (negativo no Hemisfério Sul)

A fricção com o fundo é representada através da lei quadrática de velocidade:

$$\tau = \rho C_f |U|U \quad (\text{eq. 06})$$

Onde:

**$\rho$**  Densidade da água ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ )

**$C_f$**  Coeficiente de Fricção

**$U$**  Velocidade de fluxo integrada na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ )

O modelo permite escolher uma entre três leis diferentes para a parametrização do coeficiente de fricção: Chezy, Manning, ou Nikuradse. Para este trabalho foi utilizada a lei de Manning:

$$C_f = \frac{gm^2}{h^{1/3}} \quad (\text{eq. 07})$$

Onde:

$C_f$  Coeficiente de fricção

$g$  Aceleração gravitacional (9,81 m s<sup>-2</sup>)

$h$  Profundidade (m)

$m$  Coeficiente de fricção de Manning (m<sup>1/3</sup> s<sup>-1</sup>)

Para a fricção com o vento são utilizadas as seguintes equações.

$$F_x = \frac{1}{h} \frac{\rho_{air}}{\rho} a_{wind} U_{wind} \sqrt{U_{wind}^2 + V_{wind}^2} \quad (\text{eq. 08})$$

$$F_y = \frac{1}{h} \frac{\rho_{air}}{\rho} a_{wind} V_{wind} \sqrt{U_{wind}^2 + V_{wind}^2} \quad (\text{eq. 09})$$

Onde:

$F_x$  Termos fonte na direção x

$F_y$  Termos fonte na direção y

$P$  Densidade da água (1000 kg m<sup>-3</sup>)

$\rho_{air}$  Densidade do ar (1,023 Kg m<sup>-3</sup>)

$a_{wind}$  Coeficiente de resistência do vento

$U_{wind}$  Componente da velocidade do vento na direção x

$V_{wind}$  Componente da velocidade do vento na direção y

Para o cálculo de  $a_{wind}$ , o TELEMAC-2D usa uma fórmula proposta pelo Instituto de Ciências Oceanográficas do Reino Unido (*Institute of Oceanographic Sciences, UK*):

$$\text{Se } \left| \bar{U}_{wind} \right| < 5 \text{ms}^{-1}, a_{wind} = 0.565 \times 10^{-3} \quad (\text{eq. 10})$$

$$\text{Se } 5 < \left| \bar{U}_{wind} \right| < 19,22 \text{ms}^{-1}, a_{wind} = \left( -0,12 + 0,137 \left| \bar{U}_{wind} \right| \right) \times 10^{-3} \quad (\text{eq. 11})$$

$$\text{Se } \left| \bar{U}_{wind} \right| > 19,22 \text{ms}^{-1}, a_{wind} = 2,513 \times 10^{-3} \quad (\text{eq. 12})$$

### TRAÇADORES

O TELEMAC-2D permite ao usuário incluir um ou mais traçadores (como a salinidade ou o sedimento em suspensão), que estão sujeitos aos processos de advecção e difusão, e podem ou não levar em conta efeitos de densidade. Estes obedecem à seguinte lei de conservação:

$$\frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(hUT)}{\partial x} + \frac{\partial(hVT)}{\partial y} = + \frac{\partial}{\partial x} \left( hv_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + hF_T \quad (\text{eq. 13})$$

Onde:

$F_t$	Termo fonte de traçador ( $\text{g l}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
$h$	Profundidade (m)
$T$	Traçador
$U$	Componente da velocidade integrada na direção X ( $\text{m s}^{-1}$ )
$V$	Componente da velocidade integrada na direção Y ( $\text{m s}^{-1}$ )
$v_e$	Coefficiente de difusão turbulenta ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

## PARTÍCULAS

O modelo oferece ao usuário a possibilidade de liberação de partículas lagrangeanas inertes no resultado das simulações. O acompanhamento da trajetória destas partículas representa mais uma ferramenta para estudos de hidrodinâmica de estuários. Deve-se escolher o ponto ou o segmento de origem das partículas, o passo de tempo inicial do deslocamento e o tempo de integração, ou seja, o intervalo de tempo de deslocamento das mesmas.

## CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para os contornos fechados o TELEMAC considera que:

- Não há fluxo de massa através das faces laterais fechadas e do fundo ( $\vec{u} \cdot \vec{h} = 0$ ), onde  $\vec{n}$  é o vetor normal ao contorno;
- Uma condição de livre deslizamento para todos os vetores tangentes às paredes  $\left( \frac{\partial(\vec{u} \cdot \vec{t})}{\partial n} \right) = 0$ ;
- A condição de atrito no fundo é variável, uma vez que o usuário pode determinar o coeficiente de atrito  $\left( \frac{\partial(\vec{u} \cdot \vec{t})}{\partial n} = \alpha(\vec{u} \cdot \vec{t}) \right)$ , onde  $\alpha$  é o coeficiente de fricção que pode ser modificado.
- A superfície é livre, e a condição de contorno de superfície é a tensão calculada a partir da velocidade do vento e do coeficiente da influência do vento.

Para os contornos abertos pode-se definir para cada variável principal ( $h$ ,  $U$ ,  $V$  e  $T$ ), se há um valor prescrito ou se os valores são livres em cada ponto da grade do referido contorno. Nestes contornos é então aplicada a condição radiativa de Thompson (Thompson, 1987). O modelo poderá calcular as velocidades para um contorno aberto com valores de elevação prescritos.

## APROXIMAÇÕES

Os resultados de um modelo numérico determinístico compreendem soluções numéricas nas quais foram aplicadas aproximações aceitáveis para o gerenciamento das equações do fluido. Entretanto a falta de conhecimento torna necessária a adoção de algumas aproximações conceituais para que o sistema matemático possa ser fechado (Dyke, 1996).

As aproximações utilizadas nas equações do TELEMAC-2D são:

- Incompressibilidade do fluido: As variações de densidade causadas pela compressão do fluido são desprezíveis. Em outras palavras, a variação local e a advectiva de  $\rho$  são nulas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{eq. 14})$$

- Impermeabilidade da superfície e do fundo: O modelo assume que não há transferência de água tanto através do fundo e da superfície, de acordo com as seguintes equações,

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + U_s \cdot n = 0 \quad (\text{eq. 15})$$

$$\frac{\partial Z_f}{\partial t} + U_f \cdot n = 0 \quad (\text{eq. 16})$$

Onde:

$U_f$       Velocidade de fundo ( $\text{m s}^{-1}$ )

$U_s$       Velocidade da superfície livre ( $\text{m s}^{-1}$ )

$n$         Vetor normal à superfície

$Z_f$       Elevação do fundo (m)

$Z$         Elevação da superfície livre (m)

- Parametrização dos processos turbulentos, através do conceito de viscosidade turbulenta de Boussinesq, o qual expressa os tensores de Reynolds em função do gradiente local de velocidade.

## MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

O TELEMAC-2D resolve as equações (1), (2) e (3) para três variáveis  $h$ ,  $U$  e  $V$ . O modelo emprega um conceito de fluxo médio para tratar os fluxos turbulentos, medidas instantâneas de velocidades. São adicionados os termos de atrito de Reynolds, que representam o atrito interno provocado por flutuações na velocidade sobre sua média (Hervouet & Van Haren, 1996). Isso faz com que o sistema de equações obtido seja não-resolvível (não é fechado), gerando a necessidade de um esquema de fechamento turbulento. Para resolver este problema, o TELEMAC-2D usa o conceito de viscosidade turbulenta de Boussinesq (Hervouet & Van Haren, 1996; Bates *et al*, 1997).

O modelo possibilita que sejam utilizadas quatro formas para o cálculo da turbulência.

- Coeficientes de viscosidade (velocidades) e difusão (traçadores) turbulenta constantes.

- Modelo de Elder
- Modelo de Smagorinski
- Modelo K- $\epsilon$

## SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

As equações de Navier-Stokes são resolvidas através do método de separação de operações proposto por Marchuk (1975) e Zienkiewics & Ortis (1995). Seu princípio é tal que as partes parabólica e hiperbólica das equações governantes são tratadas separadamente, de modo que se use o método numérico mais adequado para cada parte. A solução envolve duas etapas:



1ª- a solução dos termos de advecção (cálculo da parte hiperbólica) aplicando o Método de Características (Galland *et al*, 1991; Bates *et al*, 1997;1998);

2ª- a solução dos termos de propagação, difusão e fonte das equações de conservação de momentum (cálculo da parte parabólica) aplicando a técnica de elementos finitos (Hervouet & Van Haren, 1994).

### 5.3 O MODELO 3D

O TELEMAC-3D resolve as equações tridimensionais de Navier-Stokes para fluxo livre aceitando a hipótese do equilíbrio hidrostático, assumindo um fluxo com superfície livre com condição de contorno gerada a partir da tensão do vento, e considerando que não há fluxo através do fundo e nem dos contornos fechados. Estas aproximações médias resultam em equações convenientes para cálculos onde as velocidades verticais são muito menores do que as velocidades horizontais. Esta opção é muito utilizada porque torna possível a visualização das estruturas de fluxo verticais e as variações verticais de densidade (Hervouet & Van Haren, 1996). Embora algumas características sejam semelhantes entre o TELEMAC-2D e o TELEMAC-3D, especial atenção deve ser dada a algumas características específicas da versão 3D, como coeficientes de dispersão vertical, e a utilização de coordenadas sigma na representação 3D da malha. As equações utilizadas para esta versão são: as equações do movimento (17, 18, 19), a equação da continuidade (20) e a equação do estado (21).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\tilde{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x \quad (\text{eq. 17})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\tilde{\rho}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y \quad (\text{eq. 18})$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z - z) + \tilde{\rho} g \int_0^z \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (\text{eq. 19})$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial(hw)}{\partial z} = 0 \quad (\text{eq. 20})$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \beta \quad (\text{eq. 21})$$

Onde:

$U$  Primeira componente da velocidade na direção X ( $\text{m s}^{-1}$ )

$V$  Segunda componente da velocidade na direção Y ( $\text{m s}^{-1}$ )

$W$  Terceira componente da velocidade na direção Z ( $\text{m s}^{-1}$ )

$g$  Aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ )

$h$  Profundidade (m)

$t$  Tempo (s)

$Z$  Elevação da superfície livre (m)

$p$  Pressão

$T$  Traçador (salinidade, temperatura)

$F_x$  Termos fonte da equação do momentum em U

$F_y$  Termos fonte da equação do momentum em V

$Q$  Termos fonte da equação do traçador

$\rho$  Densidade da água ( $\text{Kg m}^{-3}$ )

$\rho_0$  Densidade de referência ( $\text{Kg m}^{-3}$ )

$V_e, V_z$  Coeficiente de difusão turbulenta ( $\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$ )

$V_{eT}, V_{zT}$  Coeficiente de difusão do traçador ( $\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$ )

$\beta$  Coeficiente de expansão térmica

## APROXIMAÇÕES

No módulo 3D, o modelo TELEMAC considera as aproximações de Boussinesq para as equações de Navier-Stokes, considerando que as velocidades verticais são muito pequenas e os termos difusivos e advectivos são desprezíveis, de forma que apenas os termos que consideram as variações de pressão hidrostática e gravidade são mantidos na equação vertical do momentum.

## SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

As equações tridimensionais governantes são resolvidas através do método de separação de operações, assim como no TELEMAC-2D. Para o modelo 3D há ainda uma terceira etapa após o cálculo das partes hiperbólica e parabólica:

3ª - Cálculo da superfície livre usando o TELEMAC-2D (Galland *et al*, 1991).

Uma vez que as velocidades horizontais, a pressão e a superfície livre são conhecidas, as velocidades verticais podem ser calculadas através da equação da continuidade.

No módulo 3D, o sistema de coordenadas verticais é alterado para o chamado Sistema de Coordenadas Sigma, onde a espessura das camadas depende da profundidade. Esta aproximação é especialmente útil para reproduzir as camadas de Ekman de fundo e superfície em locais com grande variação batimétrica (Figura 5).

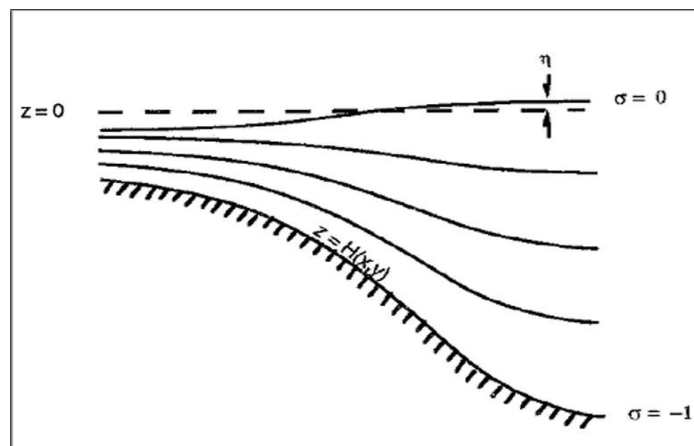


Figura 5: Esquema de Coordenadas Sigma.

#### 5.4 OBTENÇÃO DOS DADOS BATIMÉTRICOS

A primeira etapa de um trabalho de modelagem numérica compreende a obtenção de dados batimétricos da região a ser estudada. Para o estuário da Lagoa dos Patos, foram utilizadas as seguintes cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN - Marinha do Brasil):

- N° 2101: Costa Sul – Porto do Rio Grande;
- N° 2102: Lagoa dos Patos – São José do Norte ao Canal da Setia;
- N° 2103: Lagoa dos Patos – Barra do Canal São Gonçalo às Porteiras;
- N° 2106: Lagoa dos Patos – Saco do Rincão e Proximidades;
- N° 2112: Lagoa dos Patos – Rio Grande à ponta da Feitoria.

Estas cartas já haviam sido digitalizadas, georeferenciadas e unidas para formar uma única imagem do estuário da Lagoa dos Patos, a qual serviu de base para a extração dos dados de batimetria e contorno do estuário (margem e ilhas) em trabalhos anteriores. O produto deste processo foi um conjunto de arquivos texto ASCII com dados de latitude, longitude e profundidade para todos os pontos batimétricos e de contorno utilizados.

Sobre estas cartas, foram adicionados novos pontos batimétricos obtidos com ecobatímetro de precisão (10 cm) marca Honeywell-ELAC com 125 kHz de frequência, de duas campanhas realizadas em dezembro de 2005 e fevereiro de 2006 no Saco do Arraial. Estes pontos totalizaram aproximadamente 12.000 novos pontos batimétricos.

Todos os arquivos foram transformados para um formato capaz de ser reconhecido pelo MATISSE (módulo gerador de malhas do TELEMAC).

Para a geração das grades batimétricas, definiu-se como domínio de estudo a região do estuário da Lagoa dos Patos, compreendida entre a Ponta da Feitoria e a boca do estuário, se estendendo para a região costeira através da inclusão de uma caixa de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> (Schiller, 2004; Cecílio, 2004). A expansão do domínio em direção ao oceano faz-se necessária para evitar que os resultados obtidos para a região do canal de acesso ao estuário sejam afetados por instabilidades nas proximidades da fronteira aberta oceânica.

Optou-se então pela criação de uma grade com aproximadamente 16.000 elementos, com maior resolução nas conexões das enseadas rasas com o estuário e na desembocadura da lagoa (Figura 6).

A figura 7 mostra a batimetria do Saco do Arraial utilizada nas simulações. Esta região é caracteristicamente muito rasa, com profundidades que podem atingir até 3m, mas a maior parte da enseada possui profundidades em torno de 1 m.

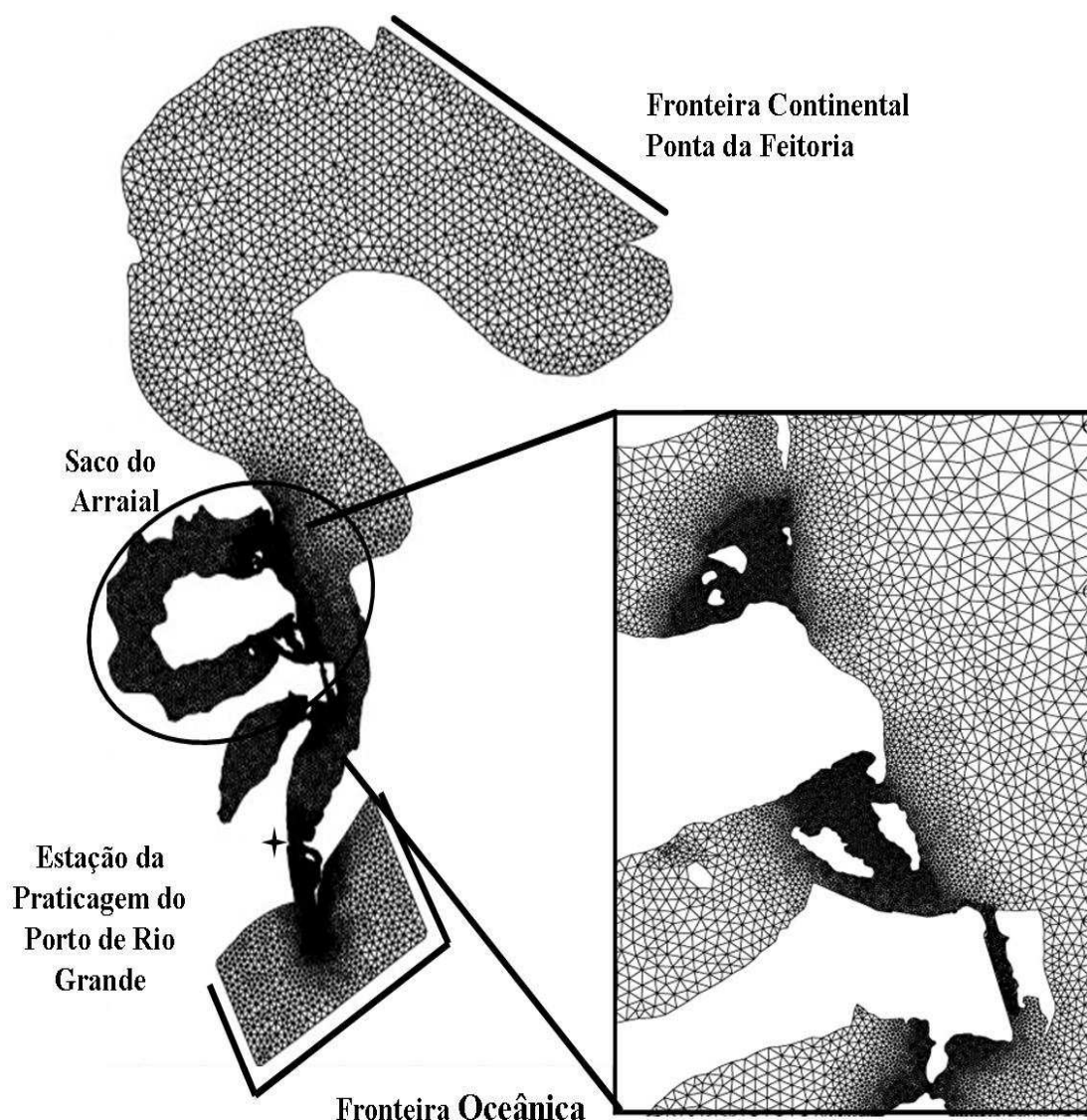


Figura 6: Grade de elementos finitos do estuário da Lagoa dos Patos utilizada para as simulações numéricas. Em destaque a maior resolução da grade nas enseadas rasas do estuário.

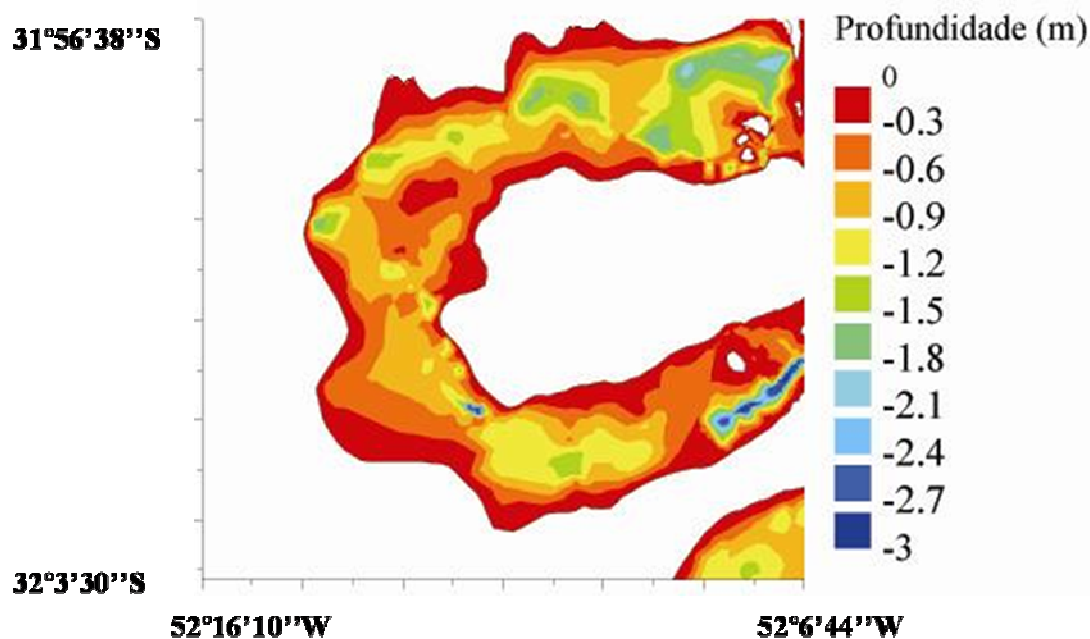


Figura 7: Batimetria do Saco do Arraial utilizada para as simulações numéricas.

## 5.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno utilizadas nas simulações estão baseadas nos dados coletados em Agosto de 1999 e Janeiro de 2005. A Figura 8 mostra a série temporal de descarga fluvial na Lagoa dos Patos de 2003 a 2005 baseada nos dados obtidos da Agencia Nacional de Águas (ANA). Nitidamente se observa o padrão regional sazonal: baixa vazão nos meses de verão, principalmente em janeiro e fevereiro, e alta vazão nos meses de inverno com pico máximo de descarga próximo a  $14000 \text{ m}^3/\text{s}$  observado no ano de 2005. O ano de 1999, cujo mês de agosto também foi utilizado como condição de contorno no presente trabalho, não está compreendido nesta série. O mês de janeiro de 2005 (indicado pela seta vermelha) mostra claramente baixos valores de descarga fluvial durante o período escolhido para as simulações.

As fronteiras abertas foram forçadas com séries de elevação do nível do mar (Figura 9). Na fronteira oceânica foram usados dados obtidos pela Estação da Praticagem do Porto de Rio Grande, enquanto na fronteira norte as séries foram obtidas de uma simulação anterior para toda a lagoa (ano de 1999) e da Agência Nacional de Águas (ano de 2005). Esta aérea se comporta como um ponto de inflexão (área anti-

nodal), com deslocamento horizontal máximo (velocidades) e deslocamento vertical mínimo (elevação).

A Figura 9 mostra que os níveis nas duas fronteiras abertas do domínio são maiores em 1999 (Figura 9A) do que em 2005 (Figura 9B). O valor médio do nível na fronteira continental é 0.66 m em 1999 enquanto em 2005 é 0.27 m. Na fronteira oceânica, o valor médio em 1999 é 0.38 m e em 2005 é 0.22 m. As Figuras 9C e 9D mostram que o período de 1999 não só apresenta maiores intensidades de vento, como também, apresenta períodos mais longos de ventos soprando da mesma direção. Maiores informações sobre as condições climáticas referentes a estes períodos estão sumarizadas na compilação do boletim de monitoramento e análise climática do Centro de Previsão de Tempo e Clima disponibilizados ao domínio público pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Anexo II).

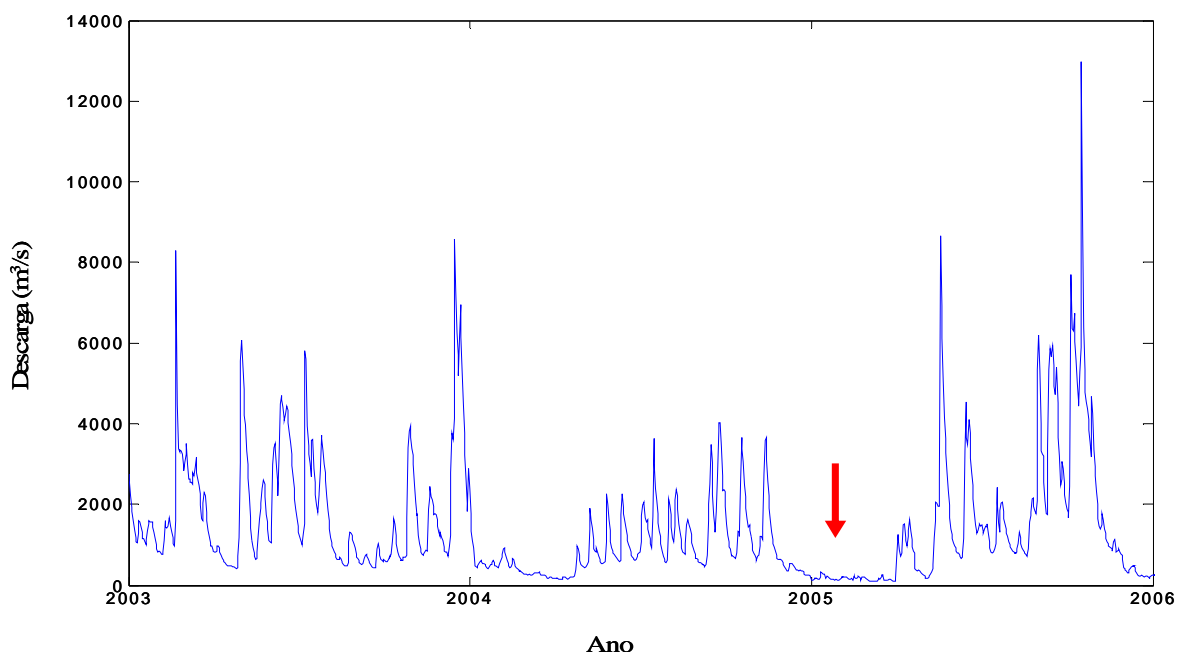


Figura 8: Série de descarga ( $m^3/s$ ) dos anos de 2003 a 2005 obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA). A seta vermelha indica os baixos valores de descarga nos primeiros meses do ano de 2005.

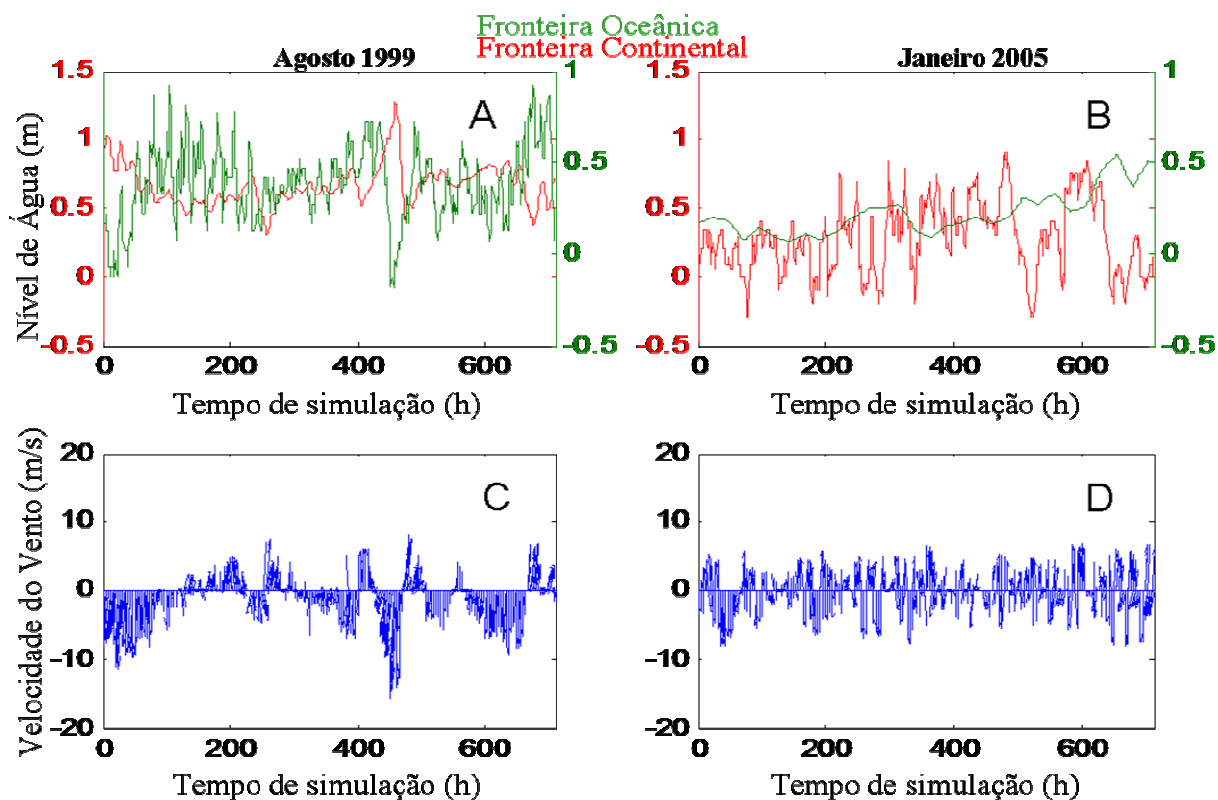


Figura 9: Condições de Contorno. A) Séries temporais de elevação do nível do mar prescritas nas fronteiras continental e oceânica do estuário da Lagoa dos Patos em 1999. B) Séries temporais de elevação do nível do mar prescritas nas fronteiras continental e oceânica do estuário da Lagoa dos Patos em 2005. C) Série temporal de direção e velocidade do vento em 1999. D) Série temporal de direção e velocidade do vento em 2005.

A condição de contorno superficial é a tensão do vento calculado pela velocidade e direção da série temporal de dados obtidos pela Estação da Praticagem. O domínio foi inicializado com zero de salinidade dentro da lagoa e 35 na zona costeira, e com um campo de velocidade nula e elevação do nível do mar de 0.2 m estabelecidos para todo o domínio. Os principais parâmetros das simulações numéricas estão sumarizados na Tabela 1.

Detalhes sobre a calibração e validação hidrodinâmica do TELEMAC para a Lagoa dos Patos podem ser encontrados em Fernandes *et al* (2001; 2002), Schiller (2004) e Cecilio (2004). Estes resultados indicam que o modelo TELEMAC é uma



ferramenta apropriada para estudar a dinâmica da região. Especificamente para as áreas rasas deste estuário, o modelo foi calibrado e validado por Monteiro *et al* (2005).

Tabela 1: Principais parâmetros físicos utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo	10 s
Numero de passos de tempo	259200
Coriolis	Sim
Coefficiente de Coriolis	$-7,7 \cdot 10^{-5}$ rad/s
Modelo de Turbulência	Viscosidade constante
Coefficiente de Viscosidade Turbulenta	$10 \text{ m}^2/\text{s}$
Traçador de difusividade	$1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Lei de fricção de fundo	Manning
Coefficiente de Fricção	$2 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente do vento	$2 \cdot 10^{-6}$
Salinidade prescrita na zona costeira	35

## 5.6 DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL

Para identificar as forças principais que controlam a hidrodinâmica das enseadas estuarinas rasas, foram extraídas dos resultados das simulações de 1999 e 2005 séries temporais de elevação do nível do mar em alguns pontos no estuário da Lagoa dos Patos (Figura 10). A localização e profundidade destes pontos são listadas a seguir:

P1: 31°57'27''S, 52°05'26''W, -0.96 m

P2: 31°58'26''S, 52°12'09''W, -1.09 m

P3: 32°00'43''S, 52°12'57''W, -0.60 m

P4: 32°02'36''S, 52°09'26''W, -0.33 m

P5: 32°00'21''S, 52°04'04''W, -1.89 m

P6: 31°07'44''S, 52°05'02''W, -13 m

P7: 31°42'16''S, 51°58'42''W, - 5 m

As séries temporais foram processadas aplicando-se técnicas nos domínios do tempo e frequência. As séries foram filtradas com um filtro de Lanczos passa-baixa com janela de 30 horas (Emery & Thomson, 1998) para separar as oscilações de nível do mar causadas por oscilações de submaré (Valle-Levinson, 1995; Paraso & Valle-Levinson, 1996; Janzen & Wong, 1998; Wong, 2002; Fernandes *et al*, 2004).

A série de elevação do nível no ponto P3 foi comparada com a série do ponto P5 em alta e baixa frequência nos dois períodos estudados (1999 e 2005). Nestas séries foram aplicadas técnicas de correlação cruzada para identificar a correlação e possíveis defasagens entre elas. Se as séries são completamente independentes, o coeficiente de correlação, indicado pelo eixo y, é zero, e se elas são idênticas o resultado é 1. O eixo x indica o tempo de defasagem entre as séries, assim, organizando as duas informações sabe-se o momento em que ocorre a maior correlação entre as duas séries (indicada pelo maior valor de y).

Às series originais de nível dos pontos P3, P5 e P6 foi aplicada a análise harmônica clássica respeitando o critério de Nyquist (Emery & Thomson, 1998) para determinação do comportamento das diferentes componentes harmônicas no estuário. Esta técnica permite a avaliação do comportamento das diferentes constituintes do sinal na entrada do estuário da Lagoa dos Patos. O ponto P3 foi escolhido por representar o Saco do Arraial; o ponto P5 representa a região estuarina adjacente a este e o ponto P6 representa o ponto de maior influência do oceano.

As séries temporais de alta e baixa frequência dos pontos extremos do Saco do Arraial (P3 e P5) foram utilizadas para calcular a diferença de nível da enseada para os dois anos. Valores positivos indicam que água é empurrada em direção à área estuarina adjacente à desembocadura, enquanto valores negativos indicam que a água está sendo empurrada para dentro da enseada. As séries temporais resultantes de diferença de nível da enseada foram então comparadas com a componente longitudinal do vento também em alta e baixa frequência. A estas séries foram aplicadas técnicas de correlação espectral cruzada a fim de identificar em quais frequências se dá a correlação entre as séries (resultado nulo se as séries são independentes), qual a coerência entre elas (quão bem correlacionadas são as séries em função da frequência) e o espectro de fase. O mesmo procedimento foi adotado para as séries temporais de alta frequência.

Dos pontos P2 e P4 também foram extraídas séries de velocidade de corrente simuladas pelo modelo nas suas componentes zonais e meridionais. A análise destas séries fornece informações sobre a dinâmica da região de estudo.

A resposta do Saco do Arraial às variações de descarga fluvial foi também avaliada. Para esta análise se utilizaram as séries temporais originais dos extremos da enseada sem aplicação de filtros para calcular a diferença de nível do Saco do Arraial (P3 – P5), em 1999 e 2005. Séries temporais de nível também foram extraídas das fronteiras abertas do domínio (norte do estuário e fronteira oceânica), e a diferença longitudinal de nível foi calculada pela diferença entre a fronteira continental e a oceânica (P7 – P5). A diferença de nível da enseada foi contraposta à diferença de nível estuarina em 1999 e 2005. A estas séries também se aplicou a técnica de correlação espectral cruzada.

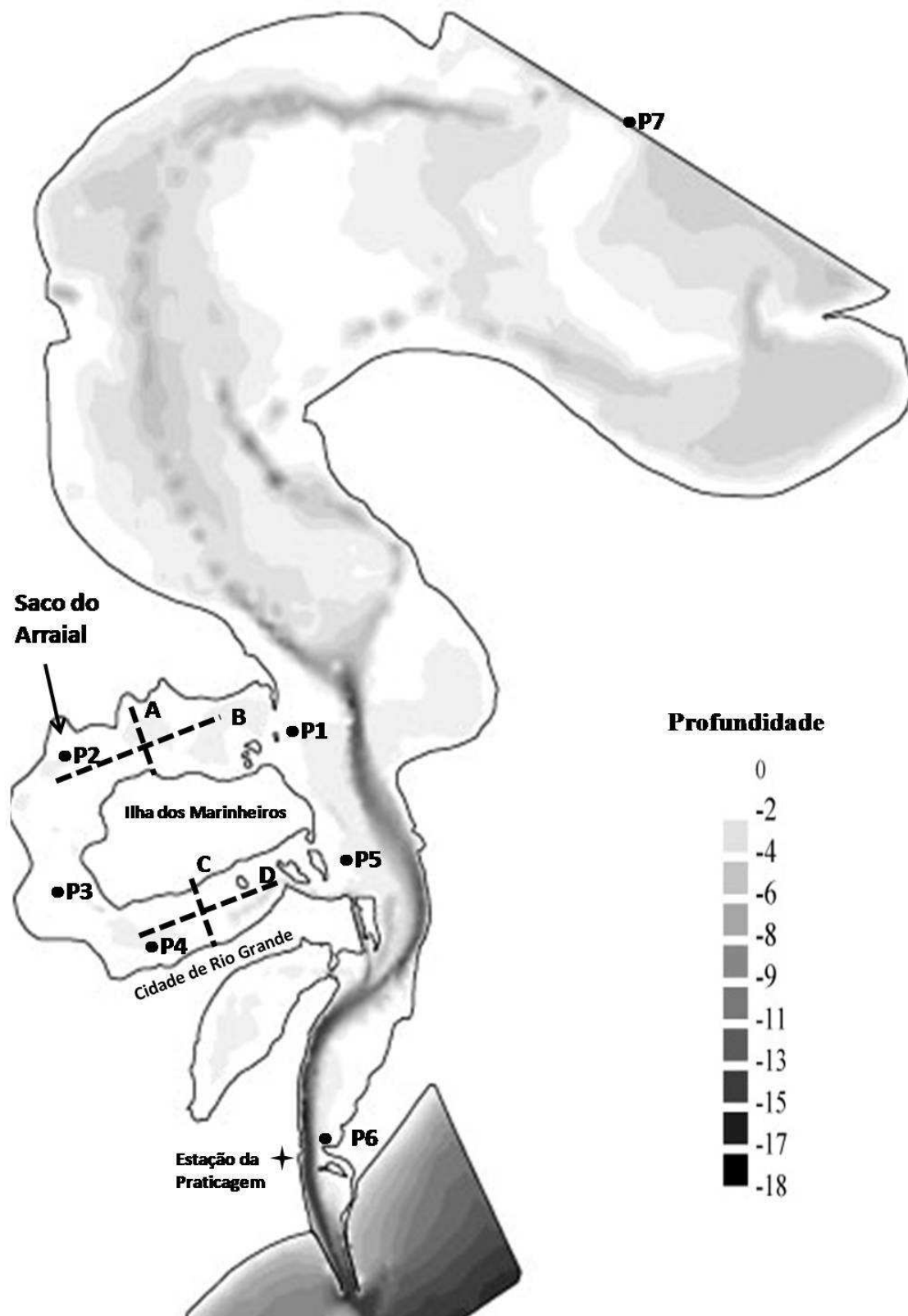


Figura 10. Batimetria da região de estudo e localização dos pontos (P1 ao P7) e dos perfis (A e B) utilizados para análise dos resultados do modelo.

## 5.7 ESCALAS DE TEMPO DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL

O volume da enseada foi calculado a partir da profundidade média dos pontos da região (0.6 m) e da área superficial de  $109 \times 10^8 \text{ m}^2$ . A área superficial foi obtida através do cálculo da superfície do polígono resultante da união dos pontos de contorno da enseada georeferenciados. O volume obtido para o Saco do Arraial foi  $65.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Este valor representa a melhor aproximação do volume desta enseada já realizada, uma vez que está baseado numa alta resolução espacial batimétrica. Este volume foi, então, utilizado para os cálculos subseqüentes.

A descarga fluvial efetiva dentro do Saco do Arraial utilizando as médias da velocidade ( $0.0142 \text{ m s}^{-1}$  para 1999 e  $0.008 \text{ m s}^{-1}$  para 2005) e a área da seção transversal  $3 \times 10^3 \text{ m}^2$  da abertura norte do Saco do Arraial foram:  $42,6$  e  $24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em 1999 e 2005, respectivamente. É importante lembrar que não há como garantir que a água que entra na enseada é de fato de origem fluvial, podendo esta também ser de origem marinha ou de misturas estuarinas anteriores. Por isso, optou-se por realizar os cálculos de descarga fluvial efetiva na abertura norte, pois esta é considerada mais fortemente influenciada pela água doce do que a abertura sul. As vazões foram convertidas para  $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$  para serem utilizadas nos cálculos do Tempo de Renovação do volume de água e do Tempo de Descarga da enseada de acordo com a metodologia utilizada por Möller (1996).

Considerando que o Saco do Arraial comporta-se como um estuário tributário, as médias dos perfis de salinidade do Ponto 4 e do Ponto 5 foram utilizadas nos cálculos do tempo de descarga (FT) a partir da seguinte equação:

$$FT = \frac{fV}{Q}$$

Onde V é o volume da baía, Q é a descarga fluvial em  $\text{m}^3/\text{dia}$ , e f é a fração de água doce na enseada considerada igual a:

$$f = \frac{S_e - S_a}{S_e}$$

Onde  $S_e$  e  $S_a$ , são a salinidade média do estuário (Ponto 5) e do Saco do Arraial (Ponto 4), respectivamente.

O tempo de renovação de água (TT) do Saco do Arraial é dado por:

$$TT = \frac{V}{\frac{dV}{dt}}$$

Onde V representa o volume da enseada durante a maré alta e  $dV/dt$  é a taxa de mudança deste volume no tempo, que pode ser aproximada para o valor da própria descarga fluvial.

Como já mencionado, fontes potenciais de erro na utilização desta formulação podem estar relacionadas ao fato que o cálculo da descarga fluvial efetiva dentro do Saco do Arraial da forma como é feito não garante que a água que entra na enseada seja doce, podendo haver mistura com água marinha. Além disso, o volume do Saco do Arraial, a descarga fluvial efetiva dentro da enseada e a fração de água doce, aqui consideradas constantes, são, na realidade, variáveis dinâmicas, cujos valores variam ao longo do tempo.

Na tentativa de estimar o tempo de permanência de partículas inertes dentro do Saco do Arraial em função da variação da descarga, experimentos com liberação de partículas foram conduzidos no estuário com os resultados das simulações de 1999 e 2005. Nas situações de vazante, as partículas foram liberadas a partir de um segmento localizado ao norte do Saco do Arraial, enquanto que durante as enchentes, elas foram liberadas num segmento localizado ao sul da entrada da enseada. Em cada situação 15 partículas foram liberadas ao longo de cada um destes segmentos e o percentual de partículas que entraram na enseada é apresentado como uma estimativa da probabilidade de uma partícula que se encontra nas imediações deste ambiente realmente conseguir atingi-lo. É possível liberar um maior número de partículas, no entanto, é difícil para o usuário acompanhar o deslocamento de um maior número de partículas, uma vez que as mesmas são liberadas simultaneamente. Diferentes tempos de integração foram testados para se estimar o tempo de permanência das partículas dentro do Saco do Arraial. Foi contabilizado o tempo que a partícula levou para entrar e sair da enseada. Nas situações em que as partículas permaneceram dentro da enseada foram feitas estimativas do tempo que as mesmas levariam para completar o percurso e deixar a enseada.

Para se avaliar a intrusão de sal no Saco do Arraial em função do vento, foram escolhidos os períodos de menor descarga, conseqüentemente de maior penetração potencial de águas salgadas, da simulação de 1999 e 2005. A distribuição do sal nesta enseada é apresentada sob os ventos predominantes da região (NE e SO) em 4 perfis: dois longitudinais ao seu maior eixo e outros dois perpendiculares aos primeiros (a localização dos perfis está apresentada na Figura 10).

## CAPÍTULO VI - RESULTADOS

### 6.1 HIDRODINÂMICA DO SACO DO ARRAIAL

A Figura 11 mostra as séries temporais de velocidade de corrente (componentes zonais em vermelho e meridionais em azul) simuladas no Saco do Arraial. A Figura 11A mostra as componentes da velocidade de corrente no Ponto 2 durante o período de alta descarga fluvial (1999). A Figura 11B mostra as componentes da velocidade para o mesmo período para o Ponto 4. As Figuras 11C e 11D mostram as componentes da velocidade durante o período de baixa descarga fluvial (2005) para o Ponto 2 e para o Ponto 4, respectivamente.

Observa-se na Figura 11 que a componente meridional é menos intensa que a componente zonal em todas as situações. A amplitude dos valores de velocidade meridional não se altera com a variação da descarga fluvial (de 1999 para 2005). No entanto, velocidades zonais mais intensas (em torno de 50 % de intensificação) são encontradas durante alta descarga fluvial (1999). Nenhuma das componentes da velocidade apresentou valores superiores a 0.2 m/s.

As Figuras 11A e 11B mostram que para a situação de alta descarga fluvial (1999), levando em consideração apenas uma componente da velocidade, por exemplo, a componente zonal (linha vermelha), esta não apresenta o mesmo comportamento num mesmo período para os dois pontos de análise (P2 e P4). Isso quer dizer que os fluxos nestas regiões são independentes. Ou seja, quando se observa fluxo de entrada de água para o interior do Saco do Arraial no Ponto 2 (valores positivos) tanto pode haver o mesmo sentido de fluxo no Ponto 4 como fluxo no sentido oposto, ou seja, fluxo de saída (valores negativos). Da mesma forma, fluxos de saída de água do interior do Saco do Arraial no Ponto 2 tanto podem corresponder a fluxos de saída como de entrada de água nesta enseada na região do Ponto 4. O mesmo é válido para a componente meridional (linha azul).

As situações de fluxos opostos nas regiões dos Pontos 2 e 4 são importantes na determinação do sentido da circulação geral no interior do Saco do Arraial. Assim sendo, quando há fluxo de entrada no Ponto 2 e de saída no Ponto 4 é possível que se estabeleça um sentido contínuo de circulação anti-horário em toda a enseada, onde a



água que entra pela abertura norte sai pela abertura sul. Da mesma forma, quando há fluxo de saída no Ponto 2 e entrada no Ponto 4 é possível que haja fluxo horário no interior da enseada. Neste caso, a água que entra pela abertura sul sai pela abertura norte.

Estas situações de fluxos opostos no Ponto 2 e no Ponto 4 também são observadas no ano de 2005 (Figuras 11B e 11 D), no entanto, são exceções. Na maior parte do período da simulação se observa o mesmo sentido de fluxo para os dois pontos de análise, ou seja, quando a componente zonal (linha vermelha) da velocidade é positiva no Ponto 2 (Figura 11C) ela também o é no Ponto 4 (Figura 11D). Nestas situações a água entra e sai pelas duas aberturas ao mesmo tempo até que novas condições de circulação se estabeleçam. O mesmo é válido para a componente meridional (linha azul).

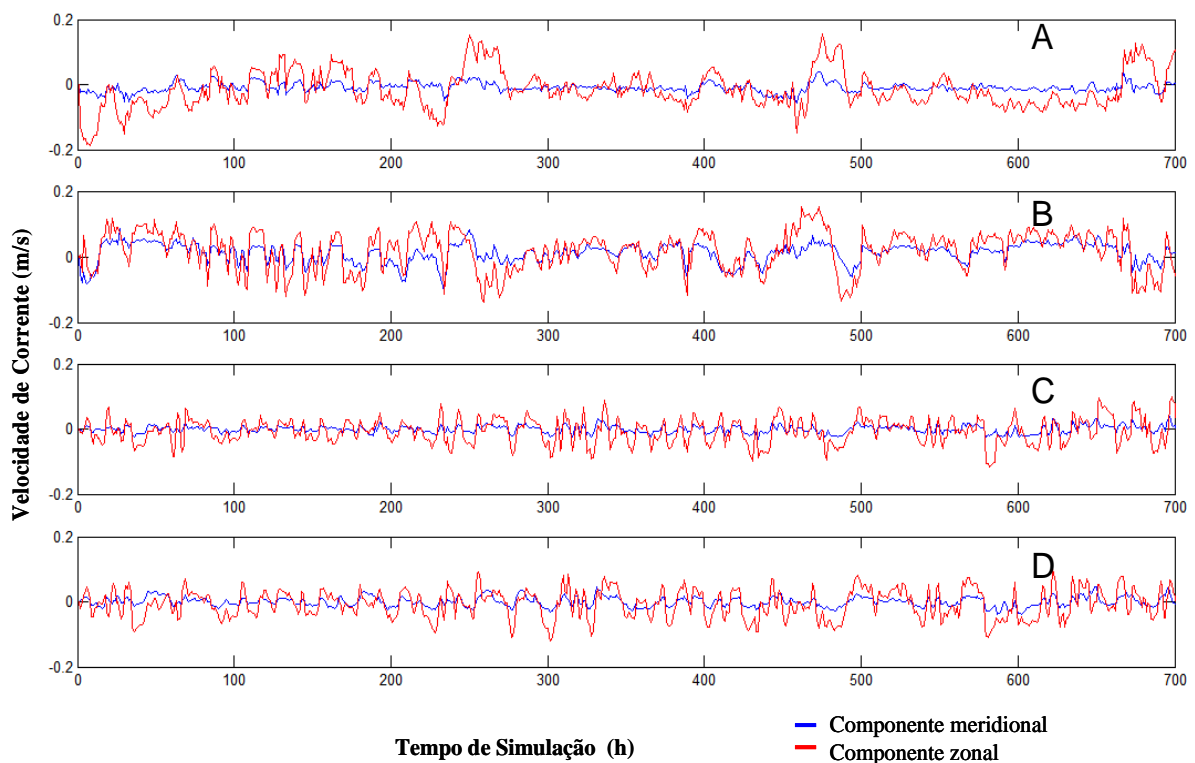


Figura 11: Séries de Velocidade de Corrente. Em azul componente meridional (norte/sul) e em vermelho a componente zonal (leste/oeste). A) Séries de velocidade de corrente em P2 em 1999. B) Séries de velocidade de corrente em P4 em 1999. C) Séries de velocidade de corrente em P2 em 2005. D) Séries de velocidade de corrente em P4 em 2005.

A Figura 12 mostra os vetores da velocidade de corrente simulados pelo modelo dentro do Saco do Arraial durante a maior descarga fluvial do período de 1999 (Figura 12A, período de alta descarga) e a menor descarga do período de 2005 (Figura 12B, período de baixa descarga) exemplificando, respectivamente, os maiores e menores valores de velocidade nesta enseada. Durante o período de alta descarga a ordem de grandeza dos valores de velocidade de corrente observados dentro do Saco do Arraial é de  $10^{-1}$  m/s enquanto durante o período de baixa descarga a ordem de grandeza das velocidades cai para  $10^{-2}$  m/s. Estes valores de velocidade de corrente são significativamente menores do que os encontrados no eixo estuarino principal.

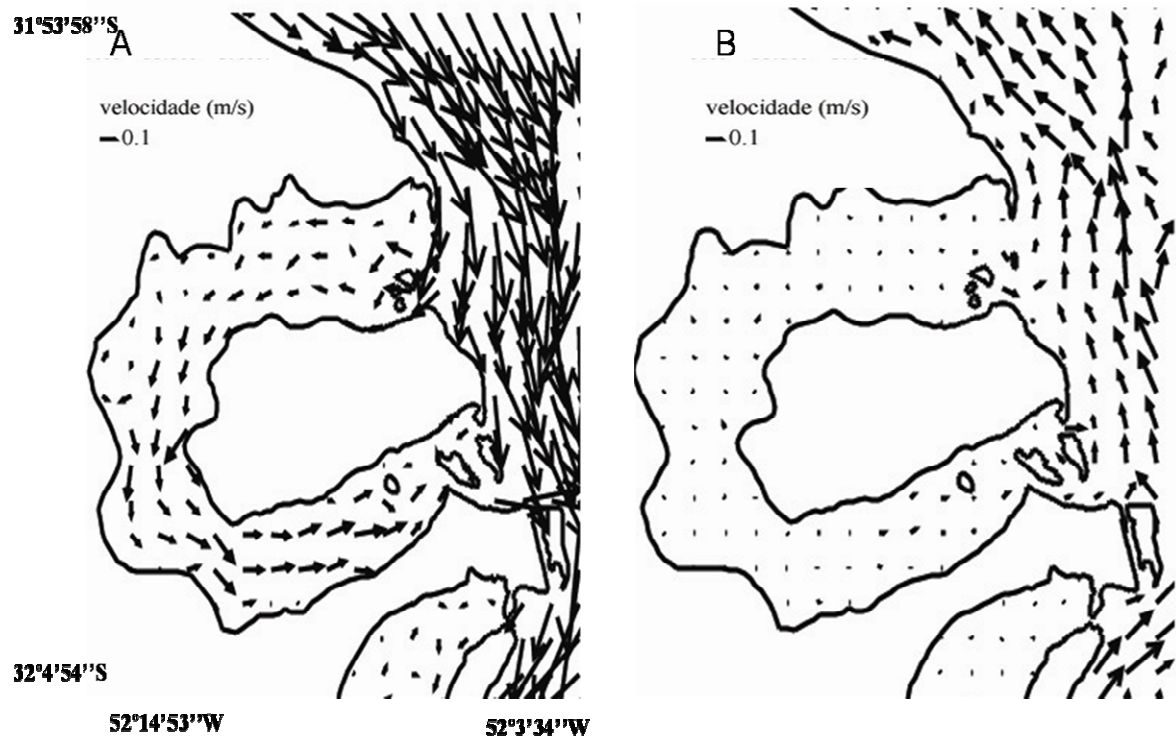


Figura 12: Vetores de velocidade de corrente simulados pelo modelo. A) durante o período de alta descarga fluvial (1999). B) durante o período de baixa descarga fluvial (2005).

## 6.2 DETERMINAÇÃO DAS PRINCIPAIS FORÇANTES DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL

A Figura 13 mostra as séries temporais de baixa frequência da elevação do nível do mar. Estas séries foram calculadas pelo modelo e extraídas em pontos localizados no Saco do Arraial (P3, em vermelho) e no estuário (P5, em azul) (Figura 10) durante anos de alta (1999) e baixa (2005) descarga fluvial.

A Figura 13A indica que as oscilações dentro do saco (linha vermelha) acompanham as oscilações na região estuarina (linha azul). As diferenças de fase entre as séries se acentuam sob condições extremas. Durante períodos de baixa descarga fluvial, a semelhança entre as séries é ainda maior (Figura 13B).

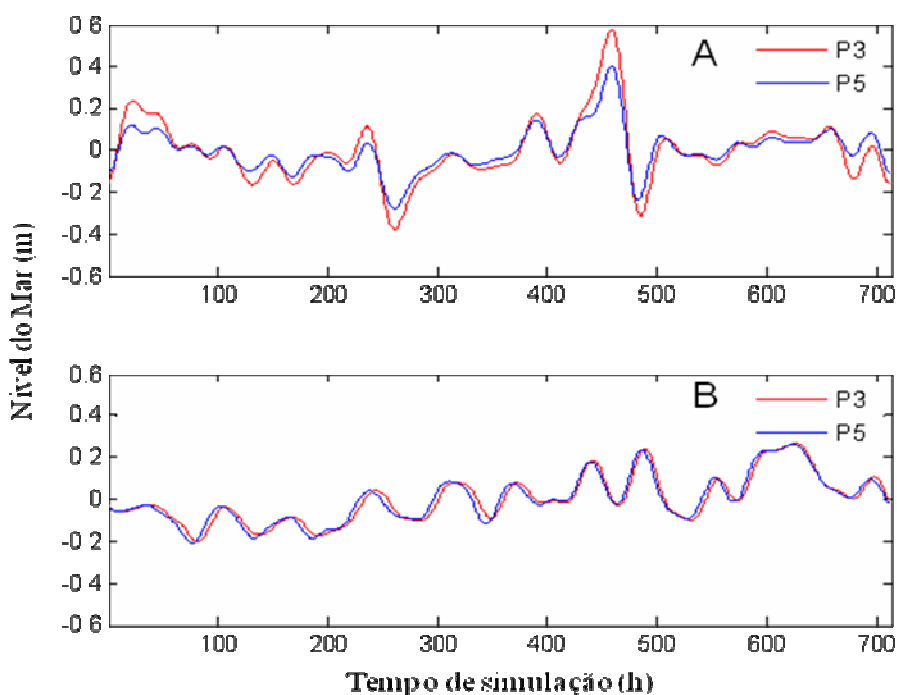


Figura 13: Séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Ponto 3 (vermelho) e no Ponto 5 (azul). A) baixa frequência em 1999; B) baixa frequência em 2005.

As séries temporais de alta frequência (Figura 14) indicam que as oscilações associadas à maré astronômica que são observadas na região estuarina (linha azul) sofrem pouca alteração no interior do saco (linha vermelha), com as maiores diferenças

sendo observadas nos períodos extremos de maré (máxima e mínima). Além disso, os resultados indicam que um aumento na descarga fluvial (Figura 14B) faz com que as oscilações de alta frequência sejam mais atenuadas no interior da enseada rasa.

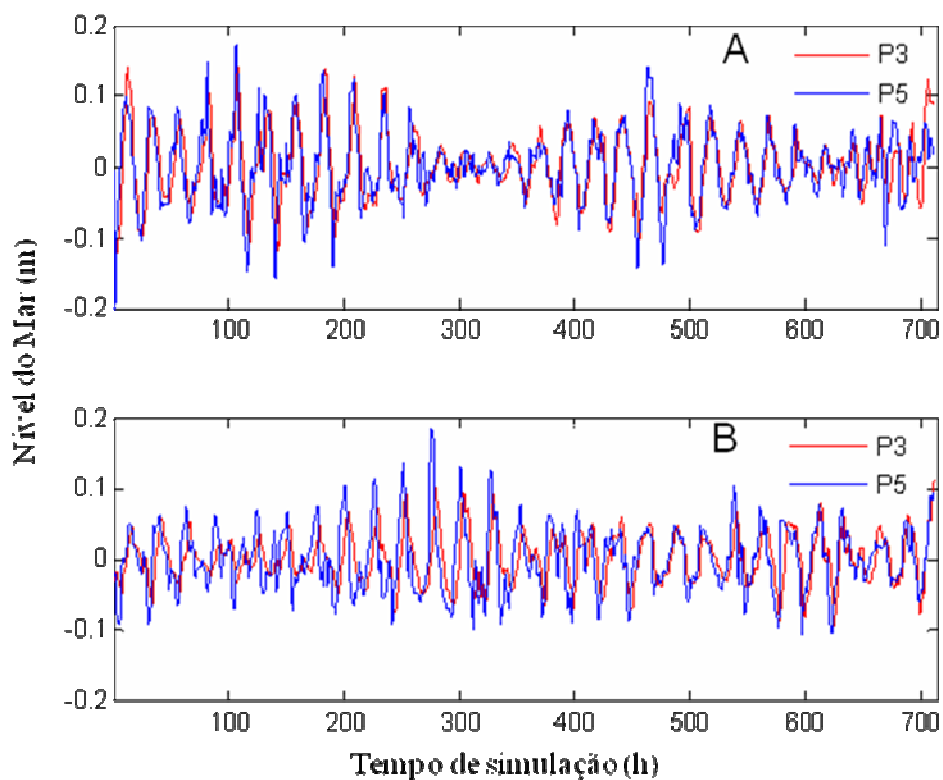


Figura 14: Séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Ponto 3 (vermelho) e no Ponto 5 (azul). A) alta frequência em 1999; B) alta frequência em 2005.

A Figura 15 mostra a correlação cruzada entre as séries temporais de baixa (Figura 15A e 15C) e alta frequência (Figura 15B e 15D) da elevação do nível da água calculadas pelo modelo para o Saco do Arraial (P3) e para o estuário (P5), comparando as oscilações de baixa (Figura 15A e 15C) e alta frequência (Figura 15B e 15D) durante anos de alta (1999) e baixa (2005) descarga fluvial.

Os resultados mostram que as oscilações de baixa frequência da elevação do nível dentro do Saco do Arraial (Figuras 15A e 15C) são diretamente relacionadas às oscilações de baixa frequência do estuário. No período de alta descarga fluvial (Figura 15A) o coeficiente de correlação máximo é 0.97 e a defasagem temporal é de 2 h,

enquanto que no período de baixa descarga fluvial (Figura 15C), o coeficiente de correlação máximo é de 0.99, com uma defasagem temporal de 4 h. As oscilações de alta frequência da elevação do nível do mar também apresentam alta correlação. Tanto nos períodos de alta (Figura 15B), como nos de baixa (Figura 15D) descarga fluvial os coeficientes de correlação máximos são de 0.88 e a defasagem temporal entre as séries é de 3 h.

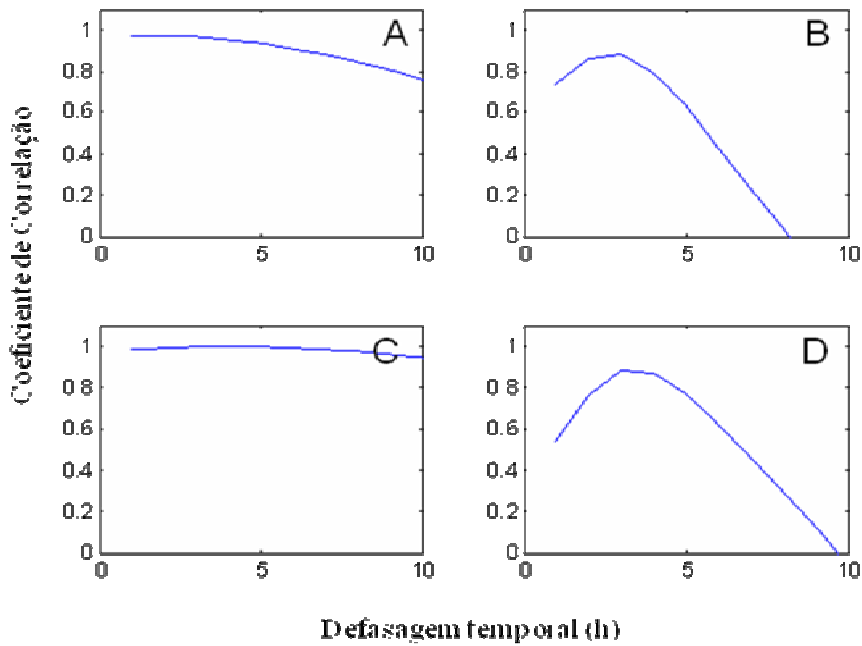


Figura 15: Correlação cruzada entre as séries temporais de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para o Saco do Arraial (P3) e para o estuário (P5). A) Oscilações de baixa frequência com alta descarga; B) Oscilações de alta frequência com alta descarga; C) Oscilações de baixa frequência com baixa descarga; D) Oscilações de alta frequência com baixa descarga.

Os resultados desta análise de correlação cruzada são sumarizados na Tabela 2, e indicam que as oscilações de elevação do nível do mar observadas no estuário principal são observadas dentro do Saco do Arraial. As oscilações de baixa frequência apresentam os maiores coeficientes de correlação, com pouca variação em relação à descarga fluvial. Já a defasagem temporal entre as séries mostra-se inversamente proporcional à descarga fluvial. Por outro lado, as oscilações de alta frequência da elevação do nível do mar indicam que não ocorrem modificações na correlação e na defasagem temporal em função da descarga fluvial.

Tabela 2: Coeficientes de correlação e defasagem temporal da elevação do nível do mar dentro do Saco do Arraial (P3) e no estuário (P5) em baixa e alta frequência para os anos de alta e baixa descarga fluvial.

Períodos simulados	1999		2005	
	Baixa	Alta	Baixa	Alta
Bandas de Frequência				
Coeficientes de Correlação	0.97	0.88	0.99	0.88
Defasagem temporal	2h	3h	4h	3h

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise harmônica das séries de elevação do nível do mar calculadas pelo modelo para os pontos P3, P5 e P6. Outras componentes não foram utilizadas devido à limitação do tamanho das séries temporais.

Tabela 3: Resultados da análise harmônica das séries temporais de nível dos Pontos 3, Ponto 5 e Ponto 6, para os períodos de alta (1999) e baixa (2005) descarga.

Período Simulado	1999			2005		
	P6	P5	P3	P6	P5	P3
Principais Constituintes da maré						
O1(diurna lunar)	0.0552	0.0090	0.1303	0.0552	0.0469	0.0390
K1 (luni-solar diurna)	0.0327	0.0082	0.0509	0.0327	0.0202	0.0169
Q1	0.0092	0.0073	0.0370	0.0092	0.0188	0.0128
N2 (semi Diurna lunar)	0.2070	0.0023	0.0564	0.2070	0.02	0.0113
M2(semi Diurna lunar principal)	0.0172	0.0031	0.0351	0.0172	0.0113	0.0079

De maneira geral as componentes de maré tendem a ser atenuadas à medida que se afastam do Ponto 6. As componentes diurnas e semi-diurnas sofrem atenuação do Ponto 6 para o Ponto 5 em períodos de alta e baixa descarga fluvial. No entanto, durante alta descarga fluvial as amplitudes das componentes se intensificam do Ponto 5 para o Ponto 3.

A Figura 16 apresenta a relação entre a série temporal de baixa frequência da diferença de nível de água dentro do Saco do Arraial (calculadas pela diferença de nível dos pontos localizados nas suas extremidades, pontos P3 e P5) e a componente longitudinal do vento durante períodos de alta (Figura 16A) e baixa (Figura 16B) descarga fluvial.

Os resultados indicam que o efeito local do vento sobre o Saco do Arraial produz um gradiente no nível de água entre as suas extremidades. Quando o vento é de NE (valores negativos), a água é empilhada em direção ao interior do saco, enquanto que ventos de SO (valores positivos) tendem a empilhar água em direção ao estuário. Esta análise preliminar indica que a relação entre as séries temporais é mais direta durante períodos de alta descarga fluvial. De forma a quantificar a relação e a defasagem temporal entre as séries no domínio das frequências, foi feita uma análise espectral cruzada para os períodos de alta (Figura 17) e baixa descarga fluvial (Figura 18).

De uma forma geral, os resultados sugerem que as séries temporais apresentam elevada correlação, com pouca defasagem temporal durante os períodos de alta (Figura 17) e baixa (Figura 18) descarga fluvial. Entretanto, a correlação ocorre em diferentes bandas de frequência em cada caso. Durante períodos de alta descarga fluvial (Figura 17), o pico de máxima energia do espectro ocorre na frequência equivalente a 6 dias, enquanto que durante os períodos de baixa descarga fluvial (Figura 18), o pico máximo ocorre na frequência equivalente a 4 dias.

Uma análise similar entre as séries temporais de alta frequência de diferença de nível de água no Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento é apresentada nas Figuras 19 a 21. Os resultados mostram que independentemente da descarga fluvial, não há evidências de correlação entre as séries de diferença de nível e vento longitudinal em alta frequência.

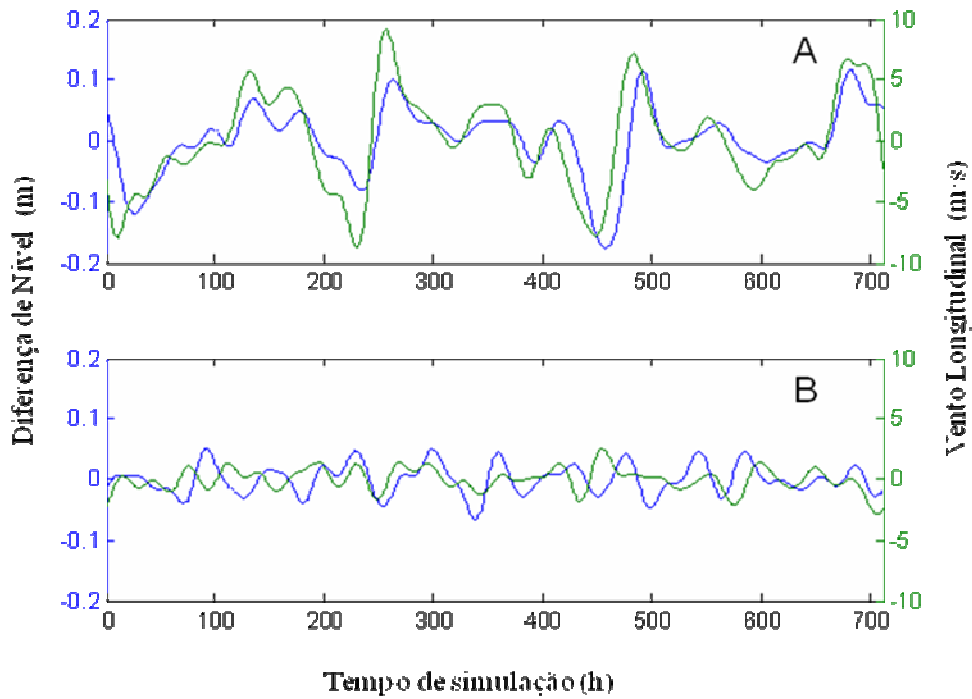


Figura 16: A) Série temporal de baixa frequência do vento longitudinal (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante o período de alta descarga fluvial (1999). B) Série temporal de baixa frequência do vento longitudinal (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante o período de baixa descarga fluvial (2005).

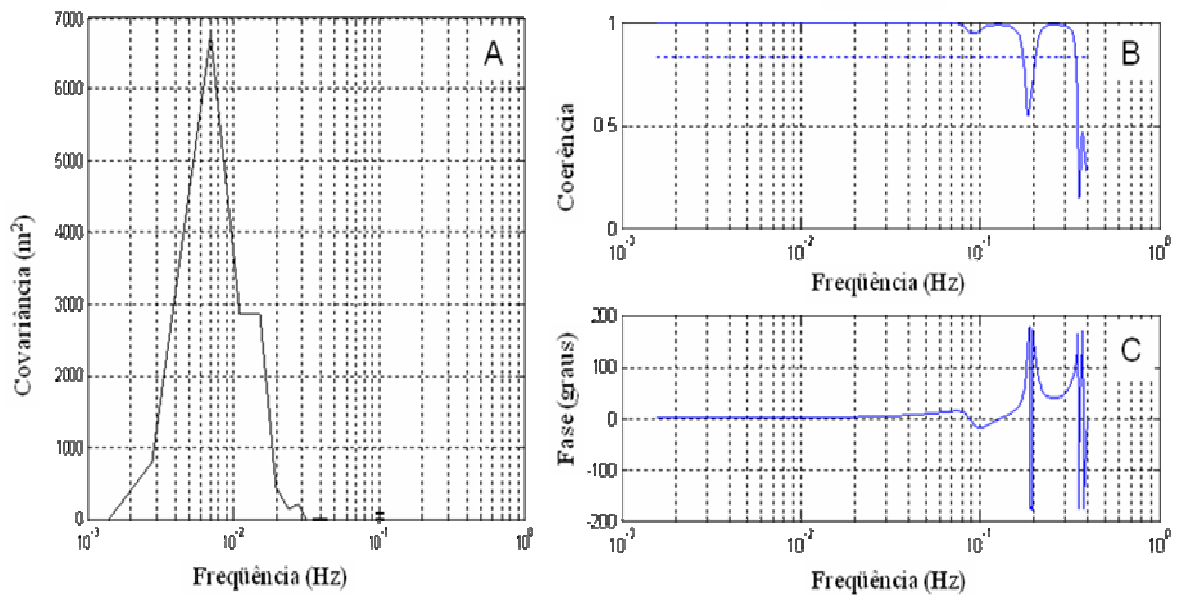


Figura 17: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água no Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento de baixa frequência durante alta descarga fluvial (1999). A) Co-espectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .



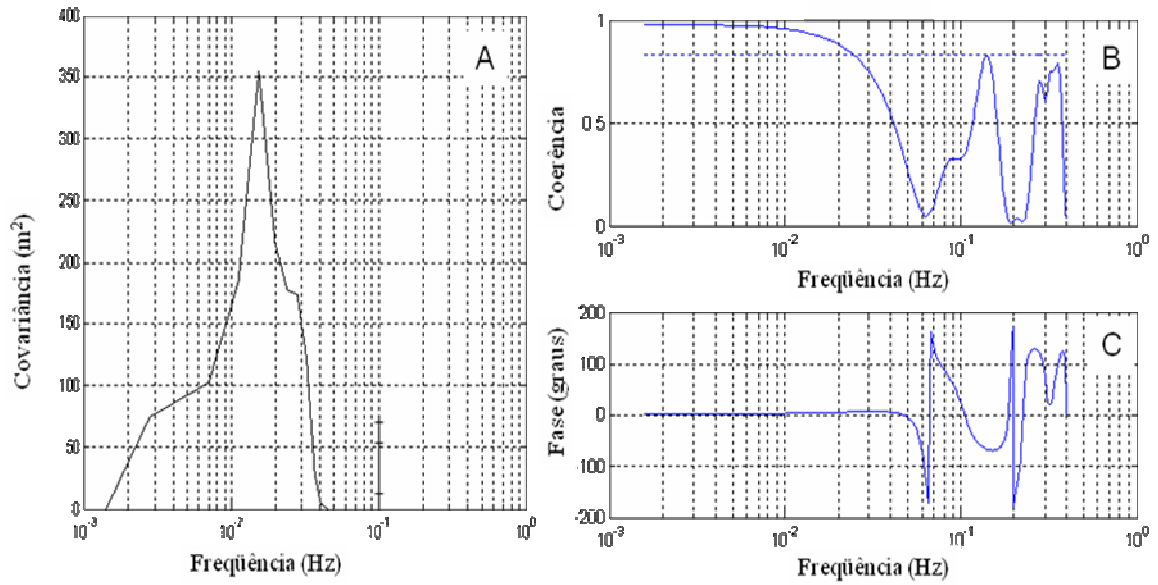


Figura 18: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água no Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento de baixa frequência durante alta descarga fluvial (2005). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus).

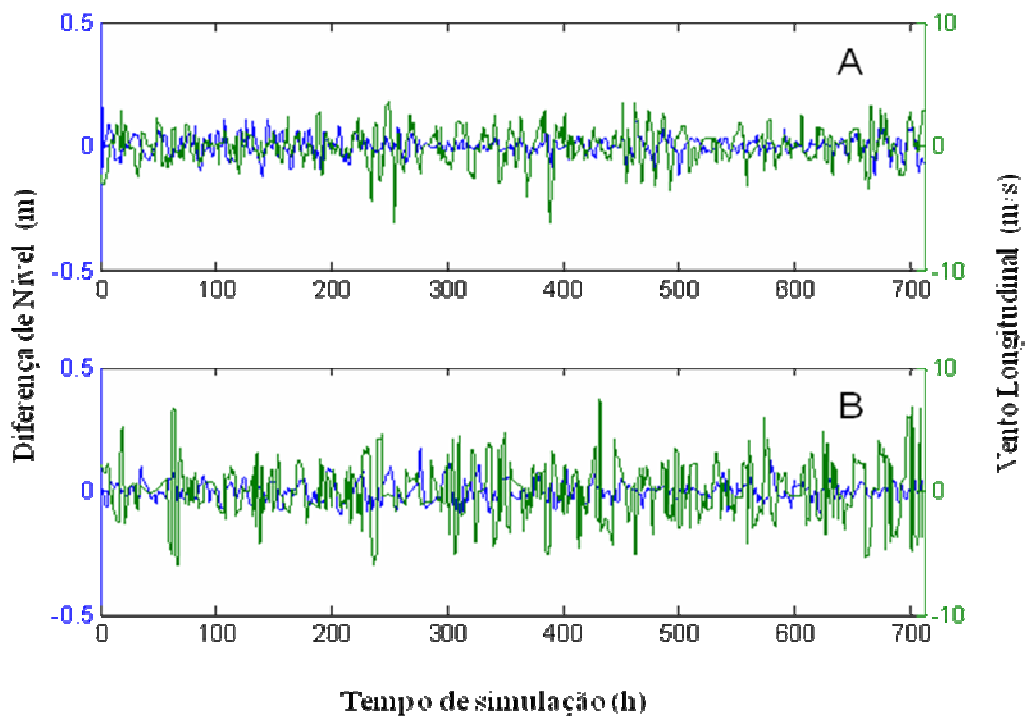


Figura 19: A) Série de vento em alta frequência (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante alta descarga fluvial em 1999. B) série temporal de vento em Baixa frequência (verde) e diferença de nível no Saco do Arraial (azul) durante baixa descarga fluvial em 2005.

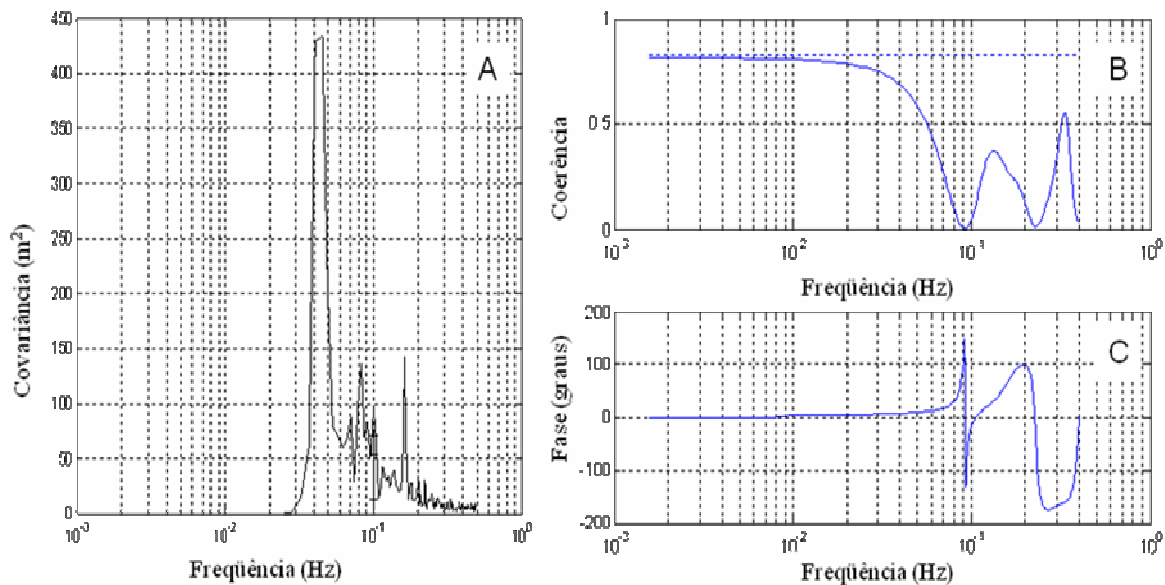


Figura 20: Análise espectral cruzada entre as diferenças de nível de água do Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento em alta freqüência durante alta descarga fluvial (1999). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus).

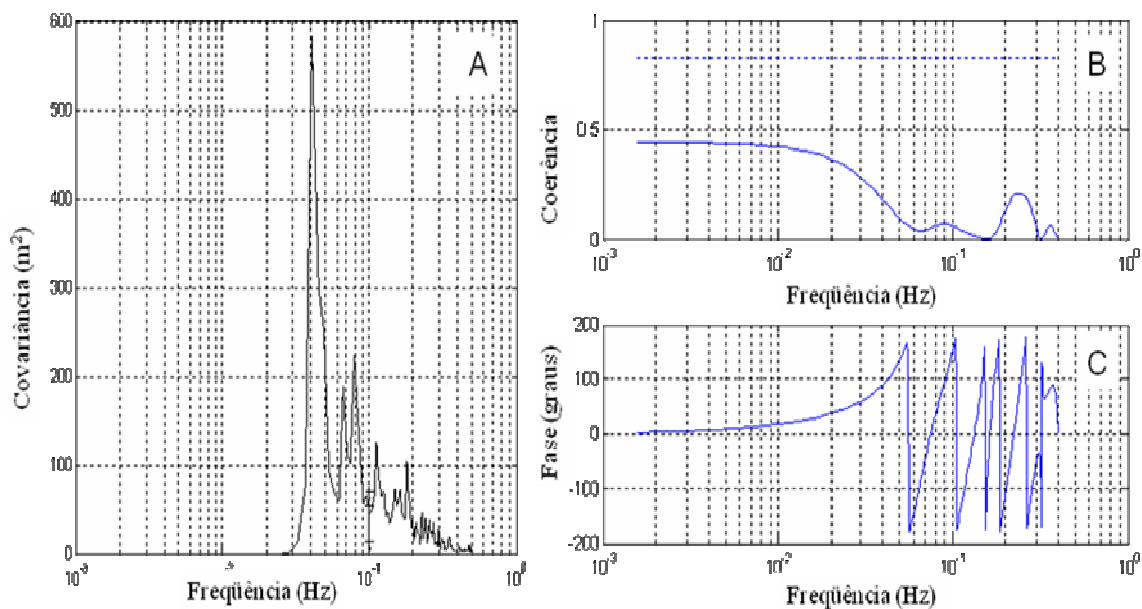


Figura 21: Análise espectral cruzada entre as diferenças de nível de água do Saco do Arraial e a componente longitudinal do vento em alta freqüência durante alta descarga fluvial (2005). A) Co-spectro. B) espectro de Coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Fase (em graus) .

A Figura 22 apresenta a comparação entre a diferença de nível ao longo do eixo principal (longitudinal) do estuário e a diferença de nível no saco durante os períodos de alta (Figura 22A) e baixa (Figura 22B) descarga fluvial. Os resultados indicam uma evidente relação entre as séries temporais de diferença de nível. Durante o período de alta descarga fluvial (1999) (Figura 22A), o aumento do desnível ao longo do estuário se reflete de forma direta no desnível observado no interior do Saco do Arraial. A diferença máxima de nível no Saco do Arraial (0.29 m no instante 459 h) é observada no mesmo instante da maior diferença de nível estuarina (1.36 m). Durante períodos de baixa descarga fluvial, entretanto, as séries temporais parecem apresentar comportamentos opostos (Figura 22B).

A correlação entre estas séries temporais de diferença de nível é quantificada através da análise espectral cruzada apresentada nas Figuras 23 e 24, para alta e baixa descarga, respectivamente. Os resultados indicam que durante a condição de alta descarga fluvial (Figura 23) as séries apresentam alta correlação em duas bandas de frequência, correspondendo a 6 e 1 dias, com coerência entre as séries maior que 90% e sem defasagem temporal entre elas. Durante períodos de baixa descarga fluvial (Figura 24), entretanto, as séries temporais de diferença de nível não apresentam correlação estatística significativa.

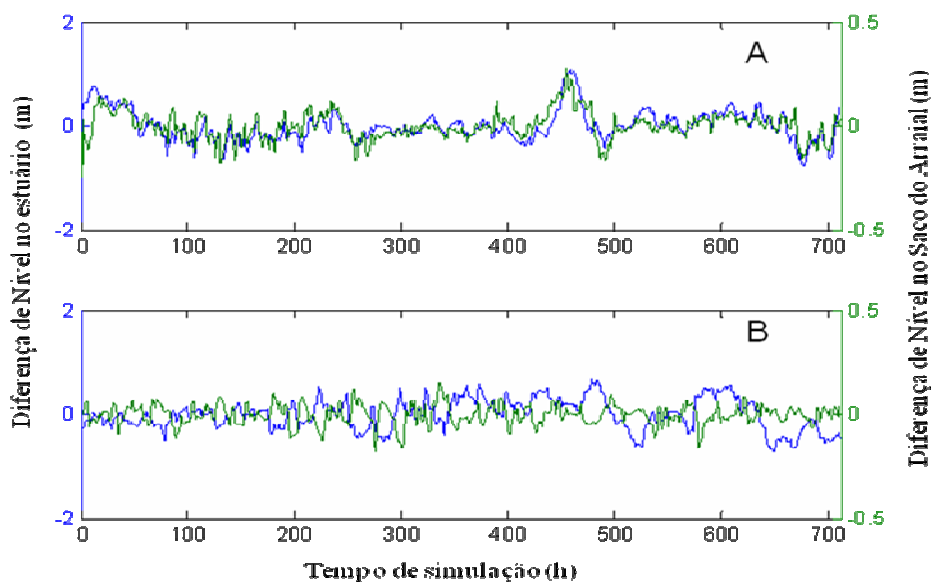


Figura 22: A) diferença de nível no saco do arraial (verde) no estuário (azul) durante alta descarga fluvial em 1999. B) diferença de nível no saco do arraial (verde) no estuário (azul) durante baixa descarga fluvial em 2005.

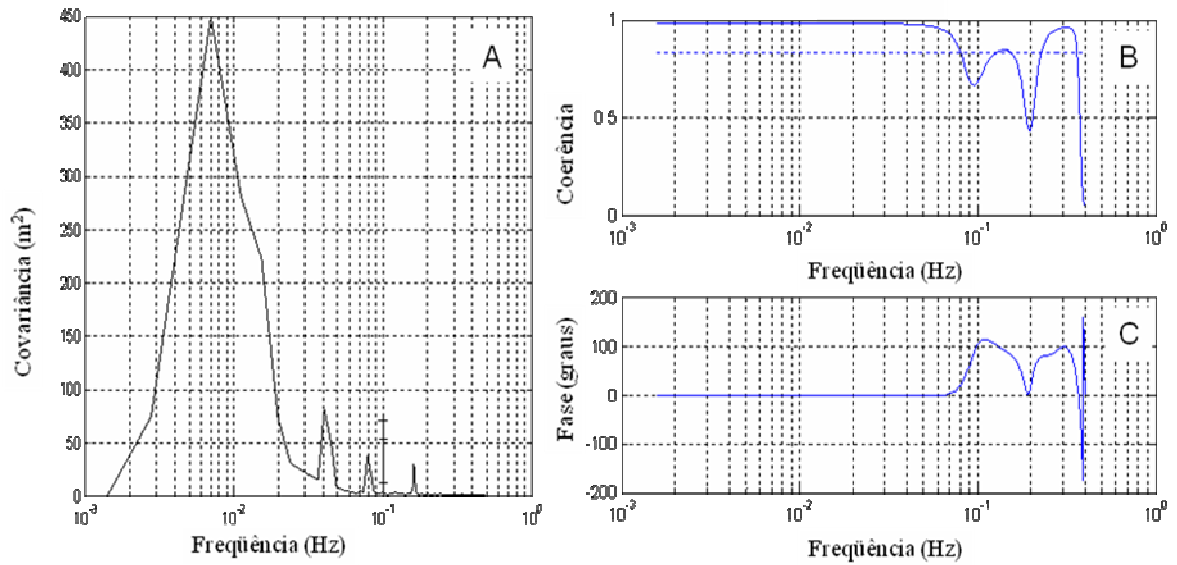


Figura 23: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água ao longo do eixo principal do estuário (longitudinal) e a diferença de nível de água no interior do Saco do Arraial durante o período de alta descarga fluvial (1999). A) Co-espectro. B) Espectro de coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Espectro de fase (em graus) .

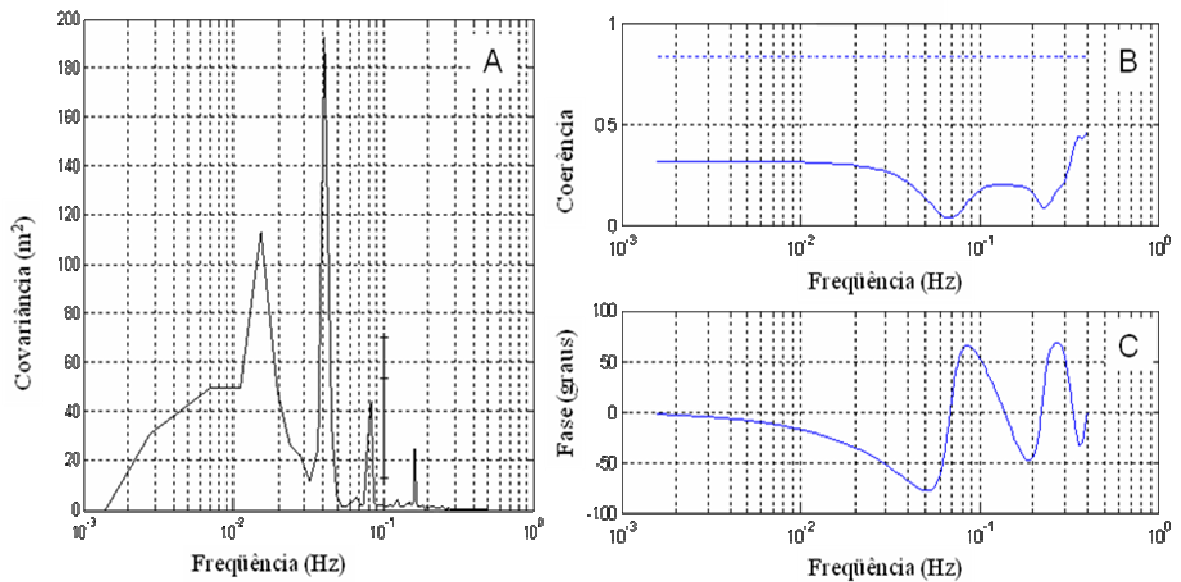


Figura 24: Análise espectral cruzada entre a diferença de nível de água ao longo do eixo principal do estuário (longitudinal) e a diferença de nível de água no interior do Saco do Arraial durante o período de baixa descarga fluvial (2005). A) Co-espectro. B) Espectro de coerência. A linha pontilhada horizontal (azul) indica nível de significância de 95%. C) Espectro de fase (em graus).

## 6.3 ESCALAS DE TEMPO DA CIRCULAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL

### 6.3.1 TEMPO DE RENOVAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA

O tempo de renovação do volume de água do Saco do Arraial foi estimado em 18 dias para períodos de alta descarga, e 31 dias para períodos de baixa descarga fluvial. Este parâmetro leva em consideração apenas duas variáveis inversamente correlacionadas: o volume do corpo d'água e a descarga fluvial. Então, para um corpo hídrico de volume constante, quanto maior a descarga menor é o tempo necessário para a renovação de água neste corpo hídrico.

### 6.3.2 TEMPO DE DESCARGA

Este parâmetro considera, além da descarga e do volume, a porção de água doce dentro da enseada. As frações de água doce no Saco do Arraial estimadas a partir da média das salinidades dos pontos no Saco do Arraial e na região estuarina foram: 0.95 durante períodos de alta descarga e 0.55 durante períodos de baixa descarga. O tempo estimado de descarga para o Saco do Arraial é 17 dias, independente da descarga fluvial.

### 6.3.3 TEMPO DE PERMANÊNCIA DE PARTICULAS INERTES DENTRO DO SACO DO ARRAIAL - TELEMAT 2D

A Figura 25 apresenta o deslocamento das partículas inertes durante o período de alta descarga fluvial, em um momento de fluxo de vazante (Figura 25A) e enchente (Figura 25B). Durante a vazante, apenas uma partícula entrou no Saco do Arraial (Figura 25A). As demais partículas seguiram pelo canal principal e chegaram à zona costeira em 5 dias. Embora seja um baixo percentual de entrada de partículas, a situação fornece um bom exemplo do tempo de permanência de partículas inertes dentro desta enseada. A única partícula que entrou na enseada circundou a Ilha dos Marinheiros em sentido anti-horário e deixou o saco em 5 dias.

Durante o período de baixa descarga fluvial (Figura 26A) somente uma das partículas liberadas entrou no Saco do Arraial durante o período de vazante. Embora esta partícula tenha percorrido uma trajetória bem similar à situação anterior, ela percorreu uma distância menor e foi incapaz de sair da enseada, parando perto da posição do Ponto 4 no 5º dia. Considerando a distância percorrida (aproximadamente 2/3 do comprimento

do Saco) durante estes 5 dias, seria razoável esperar que a partícula precisasse de mais 3 dias para percorrer o restante do percurso e deixar a baía, totalizando um tempo de permanência de 8 dias.

A comparação entre as Figuras 25A e 26A confirma a hipótese de que velocidades à jusante são maiores durante períodos de maior descarga fluvial, favorecendo a saída de partículas do saco em direção ao estuário e à zona costeira.

A Figura 25B apresenta o deslocamento das partículas durante o período de alta descarga fluvial, em um momento de fluxo de enchente. Durante este período, somente uma partícula entrou através da abertura meridional da enseada, deslocando-se em sentido horário e parando perto da posição do Ponto 2 depois de 7 dias. Considerando a mesma condição de fluxo, seria razoável esperar que esta partícula levasse mais 2 ou 3 dias para sair da enseada pela abertura norte, totalizando um tempo de permanência de aproximadamente 10 dias dentro do saco.

O experimento considerando uma baixa descarga fluvial (Figura 26B) apresentou comportamento semelhante, mas em menor intensidade. Considerando que um terço do comprimento do Saco do Arraial foi percorrido no intervalo de tempo de 5 dias, seria razoável esperar que a partícula deixasse a baía após 15 dias através de sua abertura norte.

Importante notar que a excursão das partículas a montante do estuário foi menor durante a situação de menor descarga fluvial (1999) (Figura 26B) refletindo que, embora o período se caracterize como de menor descarga quando comparado a 1999, pode haver situações de fluxo de enchentes intensas.

De uma forma geral, as situações apresentadas indicam que as partículas no interior da enseada percorrem menores distâncias do que as partículas que estão circulando ao longo do eixo principal do estuário. Este comportamento está diretamente relacionado a menor hidrodinâmica observada dentro das enseadas rasas. Também é importante notar que a maioria das partículas não entra na baía. Muitas delas seguem o fluxo principal ultrapassando as entradas da enseada durante os regimes de enchente e de vazante.

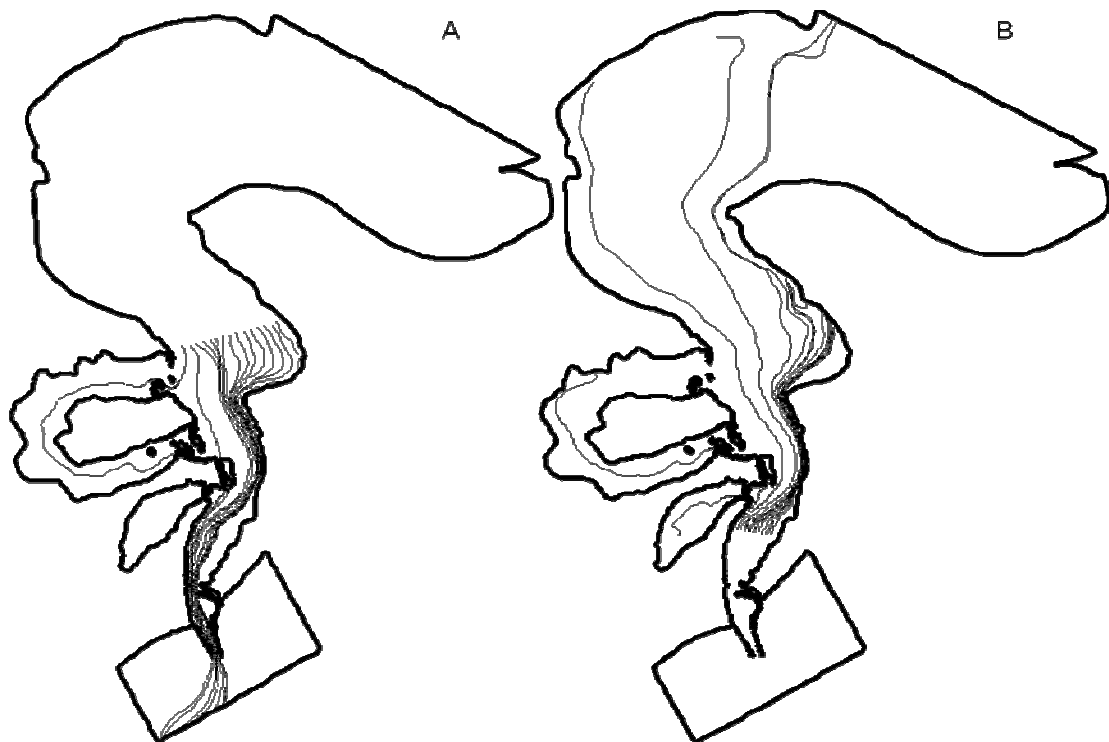


Figura 25: Trajetória das partículas (cada linha corresponde a uma trajetória) durante vazante e enchente.  
 A) regime de vazante em 1999; B) regime de enchente de 1999.

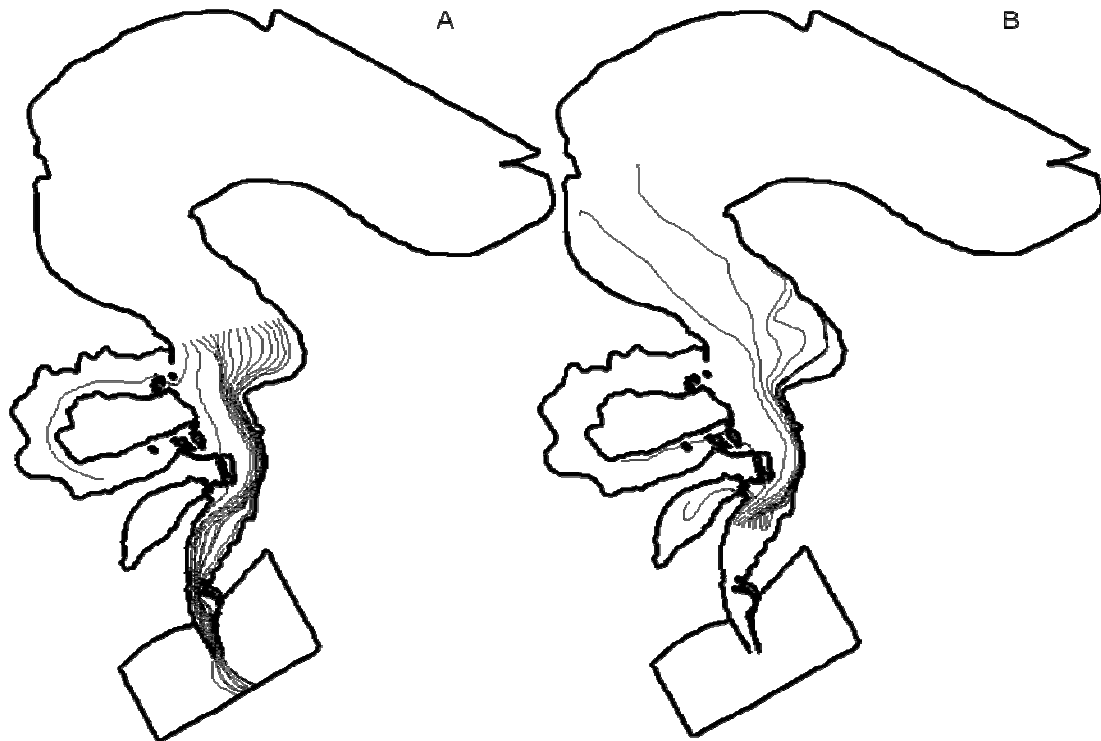


Figura 26: Trajetória das partículas (cada linha corresponde a uma trajetória) durante vazante e enchente.  
 A) regime de vazante de 2005; B) regime de enchente de 2005.

A tabela 4 sumariza os cálculos das escalas de tempo estimadas para o Saco do Arraial.

Tabela 4: Estimativas da descarga, tempo de renovação do volume de água, fração de água doce, tempo de descarga e tempo de permanência das partículas dentro do Saco do Arraial durante o período de alta (1999) e de baixa (2005) descarga fluvial.

Período simulado	1999	2005
Descarga estimada	42.6 m <sup>3</sup> /s	24 m <sup>3</sup> /s
Tempo de renovação do volume da água	18 dias	31 dias
Fração de água doce	0.95	0.55
Tempo de descarga	17 dias	17 dias
Tempo de permanência das partículas	de 5 a 8 dias	de 7 a 15 dias



#### 6.4 SALINIZAÇÃO DO SACO DO ARRAIAL DEVIDO AO VENTO – TELEMAC 3D

Visando elucidar a relação entre a entrada de sal no Saco do Arraial e o vento, os períodos de menor descarga fluvial foram selecionados durante as simulações de 1999 e 2005. A distribuição vertical da salinidade no Saco do Arraial sob os regimes de ventos principais (SO na 516<sup>a</sup> hora de simulação e NE na 651<sup>a</sup> de simulação; Figura 9) são mostrados através dos resultados da simulação de 2005 (Figuras 27 e 28). A simulação de 1999 não mostrou nenhum conteúdo de sal nos perfis selecionados.

A Figura 27 apresenta a penetração de sal no Saco do Arraial durante ventos de NE nos perfis A, B, C e D (Figura 10). Analogamente, a Figura 28 apresenta a penetração de sal no Saco do Arraial durante ventos de SO. O perfil A mostra que a penetração de sal se dá através de sua porção sul do perfil nas duas situações (Figuras 27A e 28A), sendo mais intensa durante regimes de ventos de SO (Figura 28A) do que durante regimes de ventos de NE (Figura 27A). O perfil B mostra que a penetração de sal se dá através de sua porção leste nas duas situações (Figuras 27B e 28B). A penetração de sal é maior durante regimes de ventos de SO (Figura 28B) do que durante regimes de ventos de NE (Figura 27B). Da mesma forma, o perfil C mostra que a penetração de sal se dá através de sua porção sul nas duas situações (Figuras 27C e 28C). A penetração de sal é maior durante regimes de ventos de SO (Figura 28C) do que durante regimes de ventos de NE (Figura 27C). O perfil D mostra que a penetração de sal se dá através de sua porção leste nas duas situações (Figuras 27D e 28D). A penetração de sal é maior durante regimes de ventos de SO (Figura 28D) do que durante regimes de ventos de NE (Figura 27D).

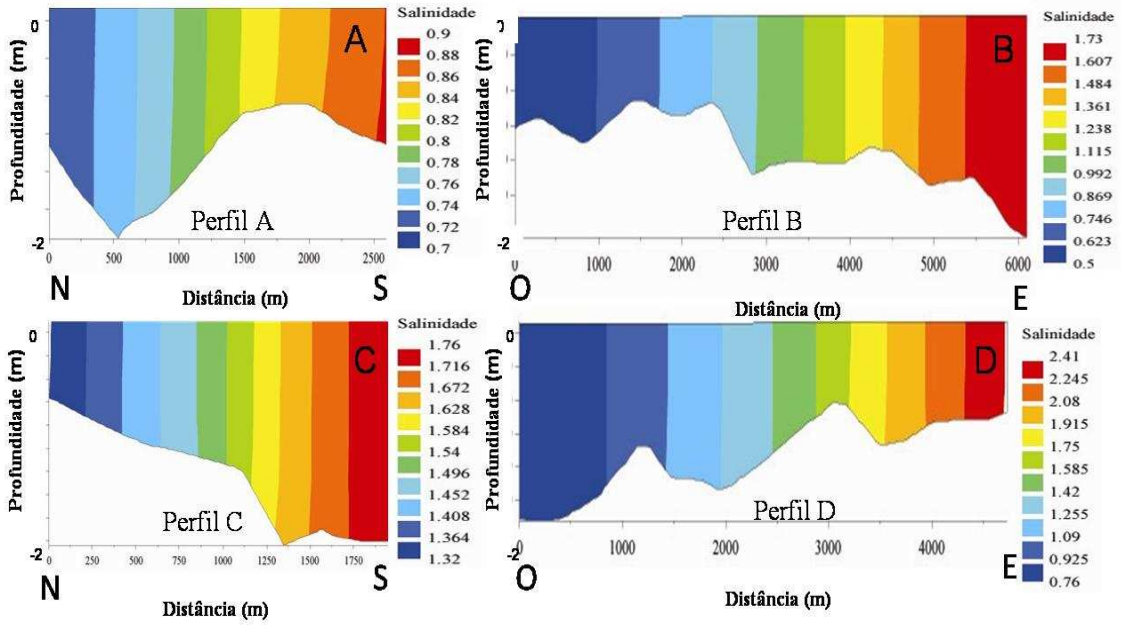


Figura 27: Distribuição de sal no Saco do Arraial em 2005 sob eventos de NE. A) Perfil A. B) Perfil B. C) Perfil C D) Perfil D.

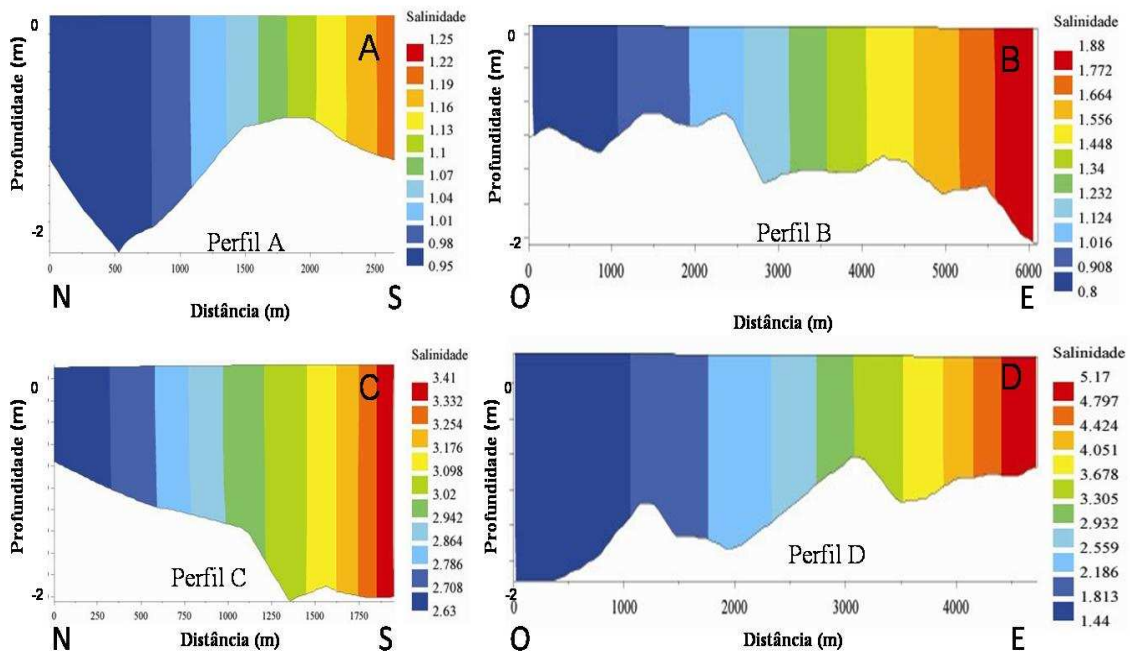


Figura 28: Distribuição de sal no Saco do Arraial em 2005 sob eventos de SO. A) Perfil A. B) Perfil B. C) Perfil C D) Perfil D.

## CAPÍTULO VII - DISCUSSÃO

Somente um limitado número de estudos tem analisado a vulnerabilidade das zonas costeiras à luz das mudanças climáticas (e.g. Sánchez-Arcilla *et al*, 1996; Jiménez & Sánchez-Arcilla, 1997; Nicholls *et al*, 1999; Short & Nickeles, 1999; Simas *et al*, 2001; Carbognin & Tosi, 2002). Dentro deste contexto, o presente trabalho é um estudo preliminar sobre o efeito das variações de descarga fluvial sobre a circulação do Saco do Arraial, enseada estuarina da Lagoa dos Patos. O fluxo de entrada de água dos rios para dentro dos sistemas estuarinos varia muito, e as condições dos estuários (tipos) se modificam em função disto (Bowden, 1967), sendo então necessários estudos mais aprofundados que considerem variações reais de descarga fluvial. A carência deste tipo de estudo na Lagoa dos Patos vem da década passada, quando Möller *et al* (1996) alertaram que o papel da descarga fluvial nas trocas entre a Lagoa dos Patos e a zona costeira permanecia desconhecido. Entretanto, a disponibilidade de séries temporais de descarga fluvial ainda é muito limitada. Quanto melhor forem os dados de descarga disponíveis para este tipo de estudo, melhores e mais conclusivos serão os resultados obtidos.

A análise das correntes no Saco do Arraial, através das suas componentes zonais e meridionais, fornece informações sobre a dinâmica da região. Conforme apresentado, em períodos de alta descarga fluvial (1999) a dinâmica da região tende a se intensificar, devido à intensificação da componente zonal da velocidade. Estes períodos são também caracterizados por não apresentar padrão de sentido de fluxo entre a parte norte e a parte sul da enseada. A não concordância entre os sentidos de fluxos destas duas regiões pode estabelecer fluxos contínuos (horário e anti-horário) ao longo de todo o Saco. Por outro lado, o período de baixa descarga fluvial (2005) se caracteriza por apresentar fluxos no mesmo sentido na parte sul e norte da enseada.

A ordem de grandeza das velocidades simuladas pelo modelo dentro do Saco do Arraial ( $10^{-1}$  m/s) está aquém dos valores esperados. No Saco da Mangueira, outra enseada rasa da Lagoa dos Patos com comunicação mais restrita ao estuário, foram simulados valores de velocidade de até 1.5 m/s em trabalhos anteriores (Fernandes *et al*, 2007). Ainda que o Saco do Arraial seja mais raso, era de se esperar valores de velocidade semelhantes aos simulados do Saco da Mangueira. Explicações para que o

modelo tenha subestimado as velocidades de corrente podem estar relacionadas à sua parametrização ou limitação da grade numérica.

As oscilações de maré e submaré do Saco do Arraial seguem as oscilações estuarinas (com alto coeficiente de correlação e pouca defasagem temporal) em condições de alta e baixa descarga fluvial. Resultados similares foram obtidos por Fernandes *et al* (2007) para o Saco da Mangueira, embora esses autores não tenham considerado o comportamento diferenciado por banda de frequência, nem avaliado o efeito da descarga fluvial sobre estas oscilações. O comportamento do Saco do Arraial mostra que, durante períodos de alta descarga fluvial, as oscilações de baixa frequência dentro do saco excedem as oscilações de nível na região estuarina e apresentam menor defasagem temporal. No entanto, as variações de descarga fluvial não afetam as correlações nem a defasagem temporal entre as séries de alta frequência.

Independentemente da descarga fluvial, as amplitudes das constituintes harmônicas da maré são atenuadas conforme a maré se propaga estuário acima. Do ponto mais interno do estuário (Ponto 5) as constituintes são atenuadas em relação ao Ponto 6 durante os períodos de alta e baixa descarga fluvial. Este comportamento corrobora Kjerfve & Knoppers (1991), que destacam que, em lagoas do tipo estrangulado, o canal atua como um filtro hidráulico natural na atenuação da maré, e está de acordo com os resultados de Fernandes *et al* (2004). Recentemente, Möller *et al* (2007) também observaram que as amplitudes das marés diurnas tendem a diminuir à montante devido ao aumento exponencial da área da seção do estuário. Eles também observaram que somente 18% das oscilações da constituinte O1 observadas na boca do estuário atingem o limite norte do estuário e as constituintes semidiurnas são mais atenuadas pelo efeito de filtro do canal de entrada que as diurnas devido aos efeitos de fricção.

Mas será que a propagação do sinal de maré para o interior das enseadas rasas sofre um processo de atenuação semelhante? No caso do Saco do Arraial, esta condição é válida somente para o período de baixa descarga fluvial. Durante períodos de alta descarga fluvial, as amplitudes das constituintes no interior do saco são maiores que as amplitudes observadas na região estuarina, mesmo se comparadas com as amplitudes do ponto próximo à boca do estuário (O1, K1, Q1 e M2 em 1999 e O1, K1, e M2 em 2005) (Tabela 3). A amplificação das amplitudes das constituintes de maré, em pontos

estuarinos mais internos de corpos de água costeiros semi-fechados, foi observada por Nicolle & Karpytchev (2007) em Pertuis Breton, uma enseada rasa da Baía de Biscay (França), utilizando o TELEMAC-2D. Neste trabalho os autores relacionaram esse resultado ao efeito da fricção de fundo, típico de baías muito rasas. Segundo Wong & Throwbridge (1990) a fricção de fundo tem duplo efeito e este não está bem determinado. Aparentemente até um limite ela atenua a maré, além dele ela permite que a onda aumente de amplitude.

De uma forma geral, os resultados do trabalho sugerem que a amplificação e atenuação do sinal de maré dentro da enseada rasa estão correlacionadas com períodos de alta e baixa descarga fluvial, respectivamente.

Embora Kjerfve & Knoppers (1991) destaquem que os canais de acesso das lagoas estranguladas atuam como um filtro tanto das oscilações de maré quanto de submaré, este comportamento não foi observado neste trabalho, pois as oscilações de baixa frequência foram minimamente afetadas pelo efeito de filtro do canal de entrada. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Fernandes *et al* (2004). De acordo com estes autores, oscilações de baixa frequência são de fato menos atenuadas e se propagam além das oscilações de alta frequência na Lagoa dos Patos. Este comportamento também foi observado em outros estuários no mundo. De acordo com Wong (1993), Great South Bay (EUA) se comporta como um filtro passa-baixa, onde oscilações de submaré governadas por eventos atmosféricos na zona costeira adjacente podem ser propagar para dentro da lagoa através de seus canais sem sofrer atenuação, enquanto que oscilações de alta frequência são substancialmente atenuadas. Resultados similares foram encontrados para as marés semidiurnas que caracterizam as baías de Delaware (EUA), as quais experimentam significativa atenuação, enquanto que as oscilações de baixa frequência se conservam (Wong & DiLorenzo, 1988 em Wong 2002).

O efeito local do vento sobre a superfície do Saco do Arraial produziu um gradiente de nível entre as suas extremidades, conforme o esperado. Quando o vento é de NE (valores negativos) a água é empurrada em direção ao ponto mais interno da baía enquanto ventos de SO (valores positivos) tendem a empilhar água em direção ao estuário. Estes resultados estão de acordo com o que foi observado por Fernandes *et al* (2007) para o saco da Mangueira. Embora a relação entre estas variáveis pareça ser mais

direta durante períodos de alta descarga fluvial, a análise espectral cruzada indica que há correlação entre estas séries com alto coeficiente de correlação e sem atraso de fase entre as séries durante alta e baixa descarga fluvial. Durante períodos de alta descarga fluvial, a correlação máxima ocorreu em 4-6 dias, enquanto que durante baixa descarga fluvial a mesma variou de 1 a 13 dias. Estes resultados confirmam os resultados obtidos previamente por Tomazelli (1993) e Möller *et al* (1996) sobre o tempo das oscilações de submaré na região de estudo.

A combinação do efeito local com o efeito remoto do vento sobre a superfície do mar em ambientes costeiros é bem descrita na literatura. De acordo com Wong (2002), a variabilidade de submaré pode ser induzida pelo vento através da combinação de seus efeitos local e remoto. Para o efeito remoto, ventos na plataforma continental adjacente a um estuário particular podem produzir flutuações de nível na sua desembocadura e estas flutuações por sua vez podem forçar uma variabilidade de submaré no interior do estuário. Por outro lado, o efeito local do vento atua diretamente sobre a superfície do estuário produzindo variabilidade no sistema. A combinação desses efeitos pode exercer diferentes influências na variabilidade dos estuários. Em estuários onde a variabilidade lateral pode ser ignorada, o efeito remoto tende a produzir fluxo unidirecional ao longo da coluna d'água com a elevação do nível do mar na costa causando um fluxo de enchente e o rebaixamento promovendo vazante (Wong, 1994 em Wong 2002). Em contraste, o efeito local do vento tende a produzir fluxos bi-direcionais, com correntes superficiais se deslocando na mesma direção do vento enquanto as correntes de camadas mais profundas se deslocam na direção do vento local induzindo o rebaixamento ao longo do estuário e contra a direção do vento (Officer, 1976 em Wong 2002). Vários autores comentam sobre a importância do vento como uma força eficiente para induzir processos de trocas entre lagoas costeiras como Lake Pontchartrain (Louisiana), Indian River Lagoon (Florida) e Great South Bay (New York) (Chuang & Swenson, 1981; Swenson & Chuang, 1983; Smith, 1983; Wong & Wilson, 1984 em Wong, 2002) e a região costeira. Entretanto, pouco se comenta a respeito do efeito da combinação destes efeitos sobre a dinâmica dos estuários tributários (enseadas rasas).

As diferenças observadas na análise espectral cruzada referente à diferença de nível das baías e a série temporal do vento longitudinal entre o período de alta e baixa descarga podem ser relacionadas com a sazonalidade da atenuação das oscilações. De

acordo com Fernandes *et al* (2004), oscilações de maré e submaré são mais atenuadas durante o inverno do que durante o verão. Durante o inverno a descarga continental é mais forte, e conseqüentemente o nível dentro da lagoa é mais alto, intensificando o gradiente de pressão entre a lagoa e a zona costeira, e representando uma barreira física à propagação do sinal de maré.

A semelhança entre as séries de diferença de nível dentro do estuário e dentro do Saco do Arraial é evidente durante o período de alta descarga fluvial (1999), o que confirma que o aumento de nível de água observado na fronteira norte do estuário esse reflete num aumento de nível dentro do saco. A magnitude deste aumento está diretamente relacionada com a descarga fluvial. A maior diferença de nível do Saco do Arraial é observada ao mesmo tempo da maior diferença de nível no estuário em períodos de alta descarga (alto coeficiente de correlação e pouca defasagem temporal). A mesma relação não é observada em períodos de baixa descarga. Em outras palavras, nestes períodos, o aumento do nível no Saco do Arraial não é somente dependente da descarga fluvial, mas também resultante de uma complexa combinação desta com fluxos de enchente e ventos favoráveis (em intensidade e duração).

A descarga fluvial efetiva dentro do Saco do Arraial (42,6 e 24 m<sup>3</sup>/s em 1999 e 2005, respectivamente), foi obtida com base nas médias da velocidade que foram calculadas pelo modelo para uma secção transversal na entrada do saco. Estas estimativas foram utilizadas para calcular o Tempo de Renovação do volume de água do Saco do Arraial e do Tempo de descarga da enseada. Os tempos de renovação do volume de água do Saco do Arraial para os períodos de alta e baixa descarga fluvial, 18 e 31 dias, podem estar superestimados em função dos baixos valores de velocidades encontrados no Saco do Arraial. Era esperado que o tempo de descarga durante períodos de alta descarga fosse menor que durante anos de baixa descarga. No entanto, este resultado é modulado pela entrada de água salgada mais intensa verificada durante períodos de baixa descarga fluvial. No período relativo à alta descarga, quase todo o volume de água da enseada estava preenchido por água doce (95%), enquanto que no período de baixa descarga, esta fração era apenas de 55%. Logo, tanto a influência da água doce quanto da água salgada proveniente da região costeira são importantes para a dinâmica do Saco do Arraial.

Expressões como tempo de trânsito, tempo de residência e outras escalas de tempo de renovação têm sido usadas como parâmetros de classificação de estuários e corpos d'água semi-fechados (Dyer 1973; Bolin & Rhode 1973; Zimmerman, 1976; Takeoka, 1984). O objetivo comum destes parâmetros é quantificar o tempo que a água permanece dentro de um estuário. As diferentes escalas de tempo de renovação podem ser usadas para caracterizar um estuário, para comparar diferentes estuários a respeito de processos de transporte ou para agregar dados de campo em parâmetros fáceis de serem usados. O tempo de residência de uma região, por exemplo, é usualmente calculado como o tempo necessário até toda a água daquela região (correspondente a todos os traçadores liberados no instante zero) ter sido substituída, conseqüentemente, este critério pode levar a tempos de residência muito altos. Para aplicações práticas, a residência é considerada completa quando uma pequena quantidade de água ainda permanece na região. A água residual é usualmente definida de maneira subjetiva, como uma parcela remanescente da massa d'água original (Braunschweig *et al*, 2003).

O acompanhamento da trajetória de partículas lagrangeanas inertes representa mais uma ferramenta para estudos relacionados à hidrodinâmica dos estuários (Martins *et al*, 2007). A simulação da trajetória de partículas com o modelo numérico foi utilizada neste estudo para avaliar seus deslocamentos de acordo com as direções do vento predominantes na região. O tempo de permanência da partícula, aqui definido como o tempo que a partícula permaneceu no interior do saco, pode ser avaliado através das trajetórias destas partículas.

O experimento de liberação de partículas mostra que elas levam de 4 a 15 dias, dependendo da descarga fluvial, para percorrer o Saco do Arraial. Num trabalho anterior conduzido por Martins *et al* (2007) foi constatado que as partículas liberadas dentro das enseadas rasas da Lagoa dos Patos (Saco do Arraial e Saco da Mangueira) não foram capazes de deixar estas zonas e atingir o canal principal, e que as partículas liberadas no canal não atingiram as enseadas rasas. Eles relacionaram seus resultados à limitação da resolução espacial utilizada pelo modelo. No entanto, no presente trabalho, esta limitação é quase improvável, mas mesmo assim poucas partículas se deslocaram dinamicamente entre essas regiões do estuário da Lagoa dos Patos. É preciso considerar que as trocas de água que ocorrem nas enseadas rasas não podem ser comparadas às trocas que ocorrem nos canais, uma vez que as velocidades observadas nestes ambientes



são bem maiores. A maioria das partículas segue o fluxo dos canais principais onde são encontradas as maiores velocidades. Valores de velocidade de corrente medidos no canal de acesso estão por volta de 2.0 m/s (Paim & Möller, 1986) enquanto as estimativas para o Saco do Arraial estão em torno de 0.1 m/s.

Em relação à salinidade observada, Paim & Möller (1986) consideram que a descarga fluvial também influencia a circulação estuarina, mas o efeito do vento remoto tem maior habilidade para empurrar água marinha para dentro da Lagoa. Isto foi confirmado por Fernandes *et al* (2004). Segundo estes autores, o vento exerce controle sobre as variações de salinidade na entrada da Lagoa dos Patos reforçando a conclusão geral apresentada por Goodrich (1988), que diz que a advecção devido às forçantes meteorológicas é primariamente responsável pelas variações da salinidade de submaré. O mesmo é agora observado para o Saco do Arraial. Sob ventos de SO a salinidade observada dentro do Saco do Arraial é maior, diminuindo com ventos de NE. Isto é extremamente relevante sob o ponto de vista ecológico. Fernandes *et al* (2007) estudando a dinâmica do Saco da Mangueira, observaram que uma vez que água salgada atinge as partes internas desta enseada, o sistema tende a permanecer salgado, o que pode causar problemas sérios relacionados com produtividade biológica e eutrofização do ambiente. Hartmann & Schetini (1991) observaram que, mesmo com intenso fluxo fluvial, em algumas situações não ocorre a expulsão dos sais da desembocadura da Lagoa dos Patos devido ao equilíbrio estabelecido por ventos do quadrante sul, que podem gerar uma maré meteorológica superior a um metro de altura na região costeira adjacente, diminuindo a diferença entre os níveis do interior da laguna e da bacia receptora.

Estudos mundiais apontam para tendências de aumento nas temperaturas médias de várias bacias de drenagem do Rio Grande do Sul, na ordem de 0,5 a 2,0°C, até meados do Século 21, acompanhado por chuvas e vazões dos principais rios 10 a 60% maiores. Neste cenário, os fluxos de água doce poderiam elevar a vazão média da Laguna dos Patos para 2251 m<sup>3</sup>/s para 3274 m<sup>3</sup>/s, estendendo a zona de mistura até a região costeira adjacente e prejudicando a pesca artesanal, condições de navegação e atividades do Porto de Rio Grande. A dessalinização do estuário da Laguna dos Patos, além de redução da produtividade das marismas e de invertebrados estuarinos, alguns de

interesse econômico, pode facilitar a expansão de espécies invasoras sensíveis à salinidade.

Este trabalho, portanto, vem a contribuir para o entendimento da dinâmica estuarina frente às possíveis conseqüências das mudanças globais. Embora seja um estudo preliminar, os resultados apresentados aqui devem ser considerados em estudos mais aprofundados sobre o tema.

## CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho foram:

- As oscilações de nível de água do Saco do Arraial seguem as oscilações do estuário da Lagoa dos Patos, cujas amplitudes dependem da intensidade da descarga fluvial. Quanto maior a descarga, maior a amplitude das oscilações.

- Dependendo da descarga fluvial, as constituintes da maré podem ser atenuadas ou amplificadas durante a passagem da zona estuarina para as zonas mais rasas do Saco do Arraial.

- A relação entre ventos de NE (SO) e entrada (saída) de água no Saco do Arraial é mais direta em períodos de alta descarga fluvial.

- Em períodos de alta descarga fluvial as diferenças de nível no Saco do Arraial são diretamente relacionadas com a diferença de nível no estuário. Por outro lado, em períodos de baixa descarga fluvial, as diferenças de nível dependem da combinação da descarga fluvial, entrada de água salgada no sistema e regime de vento.

- Quanto maior a descarga fluvial, menor o tempo necessário para a renovação do volume de água no Saco do Arraial e menor será o tempo de permanência das partículas. O tempo de descarga depende da vazão, mas é contrabalançada pelo conteúdo de sal.

Como conclusão geral, pode-se dizer que a dinâmica do Saco do Arraial é controlada pelas forçantes analisadas: descarga fluvial, entrada de água salgada e vento. A contribuição da descarga fluvial na dinâmica deste saco é maior em períodos de alta descarga. Durante períodos de baixa descarga aumenta a contribuição relativa da influência da penetração da água do mar e do vento. Se, os resultados das mudanças globais se manifestarem no aumento das vazões dos principais rios que deságuam na Lagoa dos Patos conforme previsto, a dinâmica do Saco do Arraial durante as situações de intensa descarga fluvial tende a ser semelhante ao simulado para o período de 1999.

## CAPÍTULO IX – BIBLIOGRAFIA

ABDELRHMAN, M. A. 2005. Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62 (1-2): 339-351.

ABREU, P. C.; CASTELLO, J. P. 1997. Estuarine-Marine Interactions. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C.; Castello, J.P. (Org.). *Subtropical Convergence Environments. The coast and sea in the Southwestern Atlantic*. BERLIN: SPRINGER, 1997, p. 179-182.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; AMARAL, R. F. 2007. Diagnóstico sobre os efeitos da elevação do nível do mar decorrente do aquecimento global - Estudo de caso da Baía e Estuário de Santos e São Vicente (SP), Brasil. *Anais IV Congresso sobre planejamento e gestão das zonas costeiras dos países de expressão portuguesa*. Funchal, Portugal.

ALMEIDA, R. A. F. 2000. Modelagem de transporte sedimentar na Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão de curso*. Fundação Universidade Federal de Rio Grande, Brasil, 90 p.

ALMEIDA, M. T.; BAUMGARTEN, M. G. Z., RODRIGUEZ, R. M. O. 1993. Identificação das possíveis fontes de contaminação das águas que margeiam a cidade do Rio Grande. *Série "Documentos Técnicos-Oceanografia 06"*. FURG, Rio Grande, 34 p.

AMARAL, K. J.; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, J. P. S. 2004. Estuário do Rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. *Mecânica Computacional*, V. XXIII, G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky (Eds.), Bariloche, Argentina.

ANDUTTA, F. P. 2006. Experimentos e modelagem numérica com aplicação ao Estuário Tropical do Rio Curimataú, RN. *Dissertação de mestrado*. Instituto Oceanográfico de São Paulo, Brasil.

ASMUS, M. L. 1984. Estrutura da Comunidade Associada à *Ruppia maritima* no Estuário da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Rio Grande, Brasil, 154 p.

BAPTISTA, J. B. 1984. Flutuações diárias e horárias dos elementos dissolvidos, material em suspensão e características físicas da água na parte sul do estuário da Lagoa e praia do Cassino (RS-Brasil). *Dissertação de Mestrado em Oceanografia Biológica*, Universidade Federal do Rio Grande, 100 p.

BATES, P. D.; ANDERSON, M. G.; HERVOUET, J. M.; HAWKES, J. C. 1997. Investigating the behaviour of two-dimensional finite element models of compound channel flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 3-17.

BATES, P. D.; HORRIT, M. E.; HERVOUET, J. M. 1998. Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography. *Hydrological Processes* 12: 1257-1277.

BAUMGARTEN, M. G. Z. & NIENCHESKI, L. F. H. 1998. Avaliação da qualidade hidroquímica da área portuária da cidade do Rio Grande. *Documentos Técnicos Oceanografia*, Rio Grande, 9: 1-66.

BAUMGARTEN, M. G. Z. & POZZA S. A. 2001. Qualidade de águas. Descrição dos Parâmetros químicos referidos na legislação ambiental. ISBN: 85-85042-70-2 Editora FURG, Rio Grande, 166 p.

BAUMGARTEN, M. G. Z.; NIENCHESKI, L. F. H.; KUROSHIMA, K. N. 1995. Qualidade das águas estuarinas que margeiam o município do Rio Grande (RS): Nutrientes e Detergente Dissolvidos. *Atlântica* (17): 17-34.

BEMVENUTI, C. E. 1997. Benthic invertebrates. In: Seeliger U, Odebrecht C, Castello JP (eds) Subtropical convergence environments: The coast and sea in the southwestern Atlantic. Springer, Berlin Heidelberg New York, p 43-46.

BEMVENUTI, C. E. 1998. Fundos não vegetados. In: Seeliger U, Odebrecht C, Castello JP (eds) Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Editora Ecocientia, Rio Grande Brazil, p 87-91.

BEZERRA, M. C. L.; FACCHINA, M. M.; RIBAS, O. T. 2002. *Agenda 21 Brasileira – Resultado da Consulta Nacional*, MMA/PNUD, Brasília.

BOLIN, B. & RODHE, H. 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25: 58-62.

BORDAS, M. P.; CASALAS, A.; SILVEIRA, A.; GONÇALVES, M. 1984. Circulação e dispersão em sistemas costeiros e oceânicos. Caso da Lagoa dos Patos. *Technical Report*, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

BOWDEN, K. F. 1967. Stability Effects on Turbulent Mixing in Tidal Currents. *Phys. Fluids* 10, S278.

BRAGA, M. F. S. & KRUSCHE, N. 2000. Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. *Atlântica*, 22: 27-40.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; CHAMBEL, P.; NEVES, R. 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics* 53(3): 137-145.

CALLIARI, L. J. 1998. O Ambiente e a Biota do Estuário da Lagoa dos Patos: Características Geológicas. In: U. Seeliger, C. Odebrecht e J. P. Castello (Ed.). *Os Ecossistemas Costeiros e Marinhos do Extremo Sul do Brasil*. Rio Grande: Ecocientia, p. 341.

CALLIARI, J. L. 1980. Aspectos sedimentológicos e ambientais da região sul da Lagoa dos Patos. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

CALLIARI, L. J. & FACHIN, S. 1993. Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamínticos costeiros. *Pesquisas*, 20(1): 57-69.

CALMANO, W. 1996. Metals in sediments: remobilization and environment hazards. In: *Munawar, M.; Dave, G., eds. Development and Progress in sediment Quality Assessment: Rationale, Challenges, Techniques & Strategies*, p 1-33.

CAMERON, W. M. & PRITCHARD, D. 1963. Estuaries, p. 306-324. In M. N. Hill (ed.), *The Sea*, V. II. John Wiley and Sons, New York.

CARBOGNIN, L. & TOSI, L. 2002. Interaction between climate changes, eustacy and land subsidence in the North Adriatic region, Italy. *Marine Ecology*, 23: 38-50.

CASTELLO, J. P. 1985. La ecología de los consumidores del estuario de la Lagoa dos Patos, Brazil. In: *Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: Towards an ecosystem integration* (Ed. A. Yanes-Arancibia). DR(N) Unan Press, Mexico: 386-406.

CASTELLO, J. P. & MÖLLER, O. O. 1978. On the relationship between rainfall and shrimp production in the estuary of the Patos Lagoon (Rio Grande, RS). *Atlântica*, 3: 67-74.

CASTELLO, J. P. & MÖLLER, O. O. 1977. Sobre as condições oceanográficas no Rio Grande do Sul. *Atlântica*, 2(2): 25-35.

CECÍLIO, R.O. 2004. Identificação das zonas de erosão e deposição de sedimentos finos devido à forçante barotrópica no estuário da Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão de curso de Oceanologia*, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Brasil.

CHEN, C.; LIU, H.; BEARDSLEY, R. C. 2003. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20: 159-186.

CHENG R. T. & WALTERS R. A. 1982. Modelling of estuarine hydrodynamics and field data requirements. In: R.H. Gallagher, D.H. Norrie, J.T. Oden and O.C. Zienkiewicz, Editors, *Finite Elements in Fluids*, V. 4, Wiley, New York, p. 89-108.

CHURCHILL, J. H.; FORWARD, R. B.; LUETTICH, R. A.; HENCH, J. L. 1999. Circulation and larval fish transport within a tidally dominated estuary. *Fisheries Oceanography*, 8(2): 173-189.

CIOTTI, A. M.; ODEBRECHT, C.; FILMANN, G.; MÖLLER, O. O. 1995. Freshwater outflow and subtropical convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Cont. Shelf Research*, 15: 1737-1756.

CLOSS, D. 1962. Foraminíferos e tecamebas da Lagoa dos Patos. *Boi Esc. Geo.*, 11: 1-130.

COLLING, L. A. & BEMVENUTI, C. E. 2004. Variabilidade Mensal na Estrutura da Associação Macrozoobentônica numa Enseada Estuarina da Lagoa dos Patos. *Anais do VI Simpósio de ecossistemas Brasileiros*, 2004.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 1986. Decreto n 88.351 de 1 de junho de 1983. Art. 20. Resolução n 20 de 18 de junho de 1986. DOU de 30 de julho.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 2005. Decreto n 99.274 de 17 de março de 2005. Resolução n 357 de 17 de março de 2005. DOU de 18 de março.

COSTA, C. S. B.; SEELIGER, U.; KINAS, P. G. 1988. The effect of wind velocity and direction on the salinity regime in the Patos Lagoon estuary. *Ciência e Cultura*, 40: 909-912.

COSTA, C. S. B. 1997. Tidal Marsh and Wetland Plants. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C.; Castello, J.P. (Org.). *Subtropical Convergence Environments: the Coast and Sea in the Southwestern Atlantic*. 1 ed. Berlin (Alemanha): Springer-Verlag, 1997, p. 24-26.

D'ALPAOS, A.; LANZONI, S.; MARANI, M.; FAGHERAZZI, S.; RINALDO, A. 2005. Tidal network ontogeny: channel initiation and early development. *Journal of Geophysical Research*. 110, F02001, doi:10.1029/2004JF000182.

De LORENZO, M. 1995. Relação de nutrientes e de fatores ambientais na ocorrência de cianobactéria *Aphanothece sp* ao redor da cidade de Rio Grande. *Monografia de Graduação do Curso de Oceanologia*, FURG, Rio Grande, 68 p.

DEPETRIS, P. 1996. ENSO - Controlled Flooding in the Paraná River (1904 - 1991). *Naturwissenschaften*, 83: 127-129.

DEUSFELD, N. 2003. Numerical Simulation of Flexible Vegetal Roughness in Coastal Zones; *TUHH*, Anniversary Publication, p. 40-43.

DYER, K. R. 1990. The rich diversity of estuaries. *Estuaries*, 13: 504-505.

DYER, K. R. 1973. Estuaries: a physical introduction. Wiley, London Bolin B, Rodhe H A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25: 58-62.

DYKE, P. 1996. Modelling Marine Processes. Prentice Hall, 158 p.

EMERY & THOMSON. 1998. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. First edition; Library of Congress Cataloging in Publication Data. Pergamon.

FEPAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL). 1995. Portaria SSMA n 7, Norma Técnica 003/95. Enquadramento dos recursos hídricos da parte sul do estuário da Laguna dos Patos. DOU, 24 de maio de 1995.

FERNANDES, E. H. L.; MÖLLER, O. O.; MONTEIRO, I.; PEARSON, M. 2007. On the dynamics of Saco da Mangueira embayment. *Journal of Coastal Research*, 47: 97-107.

FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MÖLLER, O. O. 2005. Spatial Gradients in the Flow of Southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research* 21(4): 759-769.

FERNANDES, E. H. L.; MARIÑO-TAPIA, I.; DYER, K. R.; MÖLLER, O. O. 2004. The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. *Ocean Dynamics*, Alemanha, 54(4): 348-359.

FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MÖLLER, O. O. & NIENCHESKI, L. F. H. 2002. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research* 22: 1699-1713.

FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; NIENCHESKI, L. F. H. 2001. Calibration and validation of the TELEMAC-2D model to the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research* 34: 470-488.

FERNANDES, E. H. L. 2001. Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brasil. *Tese de doutorado*. University of Plymouth, 198 p.

FERNANDES, E. H. L. 1997. Modelagem do Transporte de Elementos Particulados e Dissolvidos entre a Região Estuarina da Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica*. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Brasil.

FERREIRA, S. & SEELIGER, U. 1985. The colonization process of algal epiphytes on *Ruppia maritima* L. *Bot. Mar.* 28: 245-249.

GALLAND, J. C.; GOUTAL, N. E.; HERVOUET, J. M. 1991. TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Advances in Water Resources* 14: 138-148.

GARCIA, A. M. & VIEIRA, J. P. 1997. Abundância e diversidade da assembléia de peixes dentro e fora de uma pradaria de *Ruppia maritima* L. no estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil). *Atlântica*, 19: 161-181.

GARCIA, A. M.; VIEIRA, J. P.; WINEMILLER, K. 2001. Dynamics of the shallow-water fish assemblage of the Patos Lagoon estuary (Brazil) during cold and warm ENSO episodes. *Journal of Fish Biology*, British Isles, 59: 1218-1238.

GEYER W. R. 1997. Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(6): 713-722.



GIESE, B. S.; JAY, D. A. 1989. Modelling Tidal Energetics of the Columbia River Estuary *Estuarine Coastal and Shelf Science* ECSSD3, 29(6): 549-571.

GODOLPHIM, M. F. 1976. Geologia do Holoceno Costeiro do Município de Rio Grande, RS. Porto Alegre, IG/UFRGS. *Dissertação de Mestrado*, 146 p.

GOODRICH, D. M. 1988. On meteorologically induced flushing in three U.S. east coast estuaries. *Estuarine and Coastal Shelf Science* 26: 111-121.

HAMMOND, M. E. R.; MALVAREZ, G. C.; COOPER, A. 2002. The distribution of *Spartina anglica* on estuarine mudflats in relation to wave-related hydrodynamic parameters. *Journal of Coastal Research* 36: 352-355.

HARTMANN, C. 1996. Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da laguna dos Patos, RS. *Tese de doutorado*, 363 p.

HARTMANN, C. & SCHETTINI C. A. F. 1991. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS – *Revista Brasileira de Geociências*, p. 371-377.

HEARN, C. J. & ROBSON, B. J. 2002. On the effects of wind and tides on the hydrodynamics of a shallow mediterranean estuary. *Continental Shelf Research*, 22 (18-19): 2655-2672.

HELLWEGER, F. L.; BLUMBERG, A. F.; SCHLOSSER, P.; HO, D. T.; CAPLOW, T.; LALL, U.; LI, H. 2004. Transport in the Hudson estuary: a modeling study of estuarine circulation and tidal trapping. *Estuaries* (27) 3: 527-538.

HERVOUET, J. M. & VAN HAREN, L. 1994. TELEMAC-2D. Principle note. Electricité de France. *Relatório técnico* HE-43/94/051/B.

HERVOUET, J. M. & VAN HAREN, L. 1996. Recent advances in numerical methods for fluid flows. In: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds). *Flood plain processes*. Jon Wiley and Sons.

HERZ, R. 1977. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. *Tese de doutorado*, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

HURET, M.; DADOU, I.; DUMAS, F.; LAZURE, P.; GARÇON, V. 2005. Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume. *Continental Shelf Research*, 25(5-6): 629-653.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2001. Third Assessment Report e WG2. Technical Summary Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 20-73.

JANZEN, C. D. & WONG, K. C. 1988. On the low-frequency transport processes in a shallow coastal lagoon. *Estuaries* 21: 754-766.

JI, Z. G.; MORTON M. R.; HAMRICK, J. M. 2001. Wetting and drying simulation of estuarine processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(5): 683-700.

JIMÉNEZ, J.A. & SÁNCHEZ-ARCILLA, A. 1997. Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms. *Climatic Change* 35: 95-118.

JORGE, I. E. W. & BAUMGARTEN M. G. Z. 2006. Ações de educação ambiental numa comunidade escolar que convive com a falta de saneamento básico. *Cadernos de Ecologia Aquática*, 1 (1): 31-44.

KAPUSTA, S. C. & BENVENUTI, C. E. 1998. Atividade nictemeral de alimentação de juvenis de *Callinectes Sapidus*, Rathbun, 1895 (Decapoda: Portunidae) numa pradaria de *Ruppia Maritima* L. E num plano não vegetado, numa enseada estuarina da Lagoa dos Patos, RS, BR. *Nauplios*, 6: 45-52.

KENNISH, M.J. 1997. Practical handbook of estuarine and marine pollution. Boca Raton: CRC press, p. 253-325.

KJERFVE, B. C. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: *Estuarine variability*, Wolfe, D.A., (Ed.), p. 63-81. Orlando, Florida: Academic Press.

KJERFVE, B.; RIBEIRO, C. H. A.; DIAS, G. T. M.; FILIPPO, A. M.; QUARESMA, V. S. 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, 17(13): 1609-1643.

KJERFVE, B.; SCHETTINI, C. A. F.; KNOPPERS, B.; LESSA, G. &amp. FERREIRA, H. O. 1996. Hydrology and salt balance in a large hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 42(6): 701-725.

KJERFVE, B. & KNOPPERS, B. A. 1999. Physical characteristics of lagoons of the east Fluminense coast, State of Rio de Janeiro, Brazil. Em *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems*, Rio de Janeiro. B. Knoppers, E. D. Bidone, J. J. Abrão (eds.). *Série Geoquímica Ambiental* 6: 57-67, 210 p.

KJERFVE, B.; KNOPPERS, B. A. 1991. Tidal Choking in a Coastal Lagoon. In: B Parker. (Org.). *Tidal Hydrodynamics*. New York: John Wiley and Sons, p. 169-179.

KJERFVE, B. & MAGILL, K. E. 1989. Hydrological Changes in Charleston Harbour. In: ASCE. (Org.). *Proceedings of Coastal Zone*. Charleston.

KNOPPERS, B. A. & KJERFVE, B. 1999. Coastal lagoons of southeastern Brazil: physical and biogeochemical characteristics, p. 25-66. *Estuaries of South America*. G. M. E. Perillo, M. C. Piccolo, M. Pino (eds.). Springer Verlag, Heidelberg, 223 p.

KNOX, G. A. 1986. Estuarine ecosystems: a system approach, v. 1 and 2. CRC Press, Boca Raton, 117 p.

KOCH, E. W. & SEELIGER, U. 1988. Germination ecology of two *Ruppia maritima* L. populations in southern Brazil. *Aquatic Botany*, 31(3-4): 321-327.

KRUSCHE, N., SARAIVA, J. M. B.; REBOITA, M. S. 2002. *Normais Climatológicas provisórias de 1991 a 2000 para Rio Grande, RS*.

KUO, A.Y. & PARK, K. 1995. A framework for coupling shoals and shallow embayments with main channels in numerical modeling of coastal plain estuaries. *Estuaries*, 18(2): 341-350.

KURUP, G. R.; HAMILTON, D. P.; PATTERSON, J. C. 1998. Modelling the effect of seasonal flow variations on the position of salt wedge in a microtidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(2):191-208.

LEE, J. M.; WISEMAN, W. J.; KELLY, F. J. 1990. Barotropic, subtidal exchange between Calcasieu Lake and the Gulf of México. *Estuaries*, 13(3): 258-264.

LLORET, J.; MARIN, A.; MARÍN-GUIRAO, L. 2008. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78: 403-412.

LONG, T. 1989. Le quaternaire litoral du Rio Grande do Sul. Témoin des quatre derniers épisodes eustatiques majeurs géologie e evolution. *These de Doctorant*, Université de Bordeaux I, n. 282, 183 p.

MARCHUK, G. I. 1975. *Methods of Numerical Mathematics*. Springer-Verlag, 316 p.

MARQUES, W.C. 2005. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Brasil. *Dissertação de Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica*. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Brasil.

MARTINS, I.M.; DIAS, J.M.; FERNANDES, E.H. AND MUELBERT, J.H. 2007. Numerical modelling of fish eggs dispersion at the Patos Lagoon estuary-Brazil. *Journal of Marine Systems*, 68(537-555).

MATTHIENSEN, A.; YUNES, J. S.; CODD, G. A. 1999. Ocorrência, distribuição e toxicidade de cianobactérias no estuário da Lagoa dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Biologia*, Brasil, (59): 361-376.

METHA, A. J. 1990. Significance of bay superelevation in measurements of sea level changes. *Journal of Coastal Reserch*, 6: 801-813.

MELO, O. T. 1998. Comportamento biogeoquímico de nutrientes do estuário do Rio Bacanga, Ilha de São Luiz-MA. *Dissertação de Mestrado*, UFPA, Centro de Geociências, 115 p.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de estuário*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 418 p.

MÖLLER, O. O. 1996. Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S, Bresil). Measures et modelisation. *PhD Thesis*, L'Universite Bordeaux I, Ecole Doctorale des Sciences de la Terre et de la Mer.

MÖLLER, O.O. & CASTING, P. 1999. Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). In: Perillo, G.M.E.; Piccolo, M.C.; Quivira, M.P. (Eds.). *Estuaries of South America*. Springer-Verlag, p. 83-100.

MÖLLER, O.O.; CASTAING, P.; FERNANDES, E. H. L.; LAZURE, P. 2007. Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 311-320.

MÖLLER, O.O.; CASTAING, P.; SALOMON, J. C.; LAZURE, P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of the Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2): 275-289.

MÖLLER, O. O.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; MATA, M. M. 1996. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research* 16: 335-351.

MÖLLER, O. O.; PAIM, P. S.; SOARES, I. D. 1991. Facteurs et mecanismes de la circulation des eaux dans l'estuaire de la lagune dos Patos (RS, Bresil). *Bull. Inst. Geol. Basin D'aquitaine*. Bordeaux (França) 49:15-28.

MONTEIRO, I. O.; PEARSON, M. L.; MÖLLER, O. O.; FERNANDES, E. H. L. 2005. Hidrodinâmica do saco da Mangueira: Mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. *Atlantica*, 27(2): 87-101.

MONTEIRO, I. O.; PEARSON, M. L.; MÖLLER, O. O.; FERNANDES E. H. L. 2006. Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 27: 87-101.

MOTTA, V. F. 1969. Relatório diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do canal de acesso pela Barra do Rio Grande. *Technical Report IPH/UFRGS*, Brazil.

MUÑOZ, H. R. 2000. *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos: desafios da Lei de Águas de 1997*, 2 ed, Brasília, Secretaria de Recursos Hídricos.

NEVES, H. A. P. 1980. A importância do Porto do Rio Grande na economia do Rio Grande do Sul (1890-1930). *Dissertação de Mestrado em História do Brasil*, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 197 p.

NICHOLLS, R. J.; HOOZEMANS, F. M. J.; MARCHAND, M. 1999. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change* 9, S69-S87.

NICOLLE, A & KARPYTCHEV M. 2007. Evidence for spatially variable friction from tidal amplification and asymmetry in the Pertuis Breton (France). *Continental Shelf Research*, 27(18): 2346-2356.

NIENCHESKI, L. F. H.; BAUMGARTEN, M. G.; FILLMANN, G.; WINDOM, H. L. 1999. Nutrients and suspended matter behavior in the Patos Lagoon Estuary (Brazil). In: G.M.E. Perillo, M.C. Piccolo, M. Pino-Quivira. (Org.). *Estuaries of South America*. Heidelberg: Springer-Verlag, p. 67-81.

NIENCHESKI, L. F. H. & WINDOM, H. L. 1994. Nutrient flux and budget in Patos Lagoon estuary. *The Science of the Total Environment*, Elsevier, 149(1-2): 53-60.

NOGUEZ, C. T. 2005. Construção do sistema de informações geográficas da margem esquerda do canal de Rio Grande/ SJN(MEGR/SJN) com base em imagens digitais de pequeno formato. *Tese de mestrado em Oceanografia física, química e geológica*. Universidade Federal de Rio Grande, Brasil.

O'CONNOR, W. P. 1991. A Numerical Model of Tides and Storm Surges in the Rio de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*, 11(12): 1491-1508.

ODEBRECHT, C.; ABREU, P. C.; MÖLLER, O. O.; NIENCHESKI, L. F.; PROENÇA, L. A.; TORGAN, L. C. 2005. Drought effects on pelagic properties in the shallow and turbid Patos Lagoon, Brazil. *Estuaries*, 28(5): 675-685.

OEY, L. Y.; MELLOR, G.L.; & HIRES, R. I. 1985. A Three-Dimensional Simulation of the Hudson–Raritan Estuary. Part I: Description of the Model and Model Simulations. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.

OLIVEIRA, L. R. & BAUMGARTEN, M. G. Z. 1998. Uma proposta de educação ambiental: população periférica versus poluição orgânica. *Anais da XI Semana Nacional de Oceanografia: Oceanografia e suas Interfaces*. Rio Grande, RS, p. 107-109.

PAIM, P. S. G. & MÖLLER, O. O. 1986. Material em Suspensão e Dissolvido no estuário da Laguna dos Patos, fase III. *Relatório Interno FURG/DGEOLOG*. 150 p. Rio Grande.

PARASO, M. C. & VALLE-LEVINSON, A. 1996. Meteorological influences on sea level and water temperature in the lower Chesapeake Bay: 1992. *Estuaries* 19(3): 548–561.

PERSICH, R. P.; ODEBRECHT, C.; BERGESH, M & ABREU P. C. 1996. Eutrofização e Fitoplâncton: Comparação entre duas enseadas rasas no estuário da Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 18: 27-41

PORTO, R. L. 1997. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico. *Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos*.

PRITCHARD, D. W. 1969. What is a estuary. Physical viewpoint. In: LAUFF, G. H. ed *Estuaries*. Washington, American Association for the Advance of Science, p. 3-5.

RIBEIRO, A. R. L. 2006. Distribuição de carbono e nitrogênio orgânicos particulados em duas enseadas do estuário da Lagoa dos Patos- RS. *Dissertação de mestrado* em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande, Brasil.

RIGO, D. 2004. Análise do Escoamento em regiões estuarinas com Manguezais – Medições e Modelagem na Baía de Vitória, ES. *Tese de doutorado* em Engenharia Oceânica Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Brasil, 140 p.

ROCHEFORT, M. 1958. Rapports entre la pluviosité et l'écoulement dans le Brésil Subtropical et le Brésil Tropical Atlantique. *Travaux et Mémoires de l'Institut des Hautes Etudes de l'Amérique Latine*. ROSMAN, P. C. C. 2001. “Os Modelos para Recursos Hídricos”. Em: Magrini, A. dos Santos, M. A. (eds). *Gestão Ambiental em Recursos Hídricos (Vol. 3)*, Capítulo 2 (Parte III), Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J. A.; STIVE, M. J. F.; IBÁÑEZ, C.; PRATT, N.; DAY JR, J. W.; CAPOBIANCO, M. 1996. Impacts of sea-level rise on the Ebro Delta a first approach. *Ocean and Coastal Management* 30, 197-216.

SANTOS, E. D.; ABREU, P. C.; THOMPSON, F. L.; HICKENBICK, G. R.; ALMEIDA, M. T. & BAUMGARTEN, M. G. Z. 1997. Poluição Orgânica e Condições Sanitárias das águas Próximas à Cidade do Rio Grande - RS, Brasil (Verão de 1996). *Atlântica*, 19: 5-18.

SCHILLER, R. V. 2004. Influência de alterações morfológicas sobre a hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão do curso de Oceanologia*. Fundação Universidade do Rio Grande, Brasil.

SEELIGER, U.; CORDAZZO, C. V. 2002. Estuário da Lagoa dos Patos e Costa Adjacente. In: Ulrich Seeliger; César Vieira Cordazzo; Francisco Barbosa. (Org.). *Os Sites e o Programa Brasileiro de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração*, p. 145-165.

SEELIGER, U.; CORDAZZO, C; BARCELLOS, L. 2004. *Areias do Albardão. Um Guia Ecológico Ilustrado do Litoral no Extremo Sul do Brasil* ISBN: 85-87167-03-0 Editora Ecoscientia, RS, 96 p.

SCHROEDER, W. W.; DINNEL, S. P.; WISEMAN JR, W.J. 1992. Salinity structure of a shallow, tributary estuary. In: David Prandle (Ed.) *Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone*. American Geophysical Union. Washington, DC, USA. Part III, 155-172.

SHORT, F. T. & NECKLES, H. A. 1999. The effects of climate change on seagrasses. *Aquatic Botany* 63: 169-196.

SIMAS, T.; NUNES, J. P.; FERREIRA, J. G. 2001. Effects of global climate change on coastal salt marshes. *Ecological Modelling*, 139: 1-15.

SOUZA, S. R. de. 2002. Caracterização Morfo-Sedimentar do Saco do Arraial – Extremo Sul da Lagoa dos Patos/RS. *Dissertação de mestrado*. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Brasil, 164 p.

SWAIN, E. D.; WOLFERT, M.; BALES, J.D.; GOODWIN, C.R. 2004. Two-dimensional hydrodynamic simulation of surface-water flow and transport to Florida Bay through the Southern Inland and Coastal Systems (SICS). *US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4287*, 56 p.

TAGLIANI, C. R. A.; TAGLIANI, P. R. A.; CALLIARI, L.J. 2006. Estudo de caso da Ilha dos Marinheiros, estuário da Laguna dos Patos, RS, Brasil: Diagnóstico ambiental, modelo de elevação digital e avaliação de vulnerabilidade frente a cenários de elevação do nível do mar, 104 p, Português; Restrita; MMA/PROBIO.

TAKEOKA, H. 1984. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Res.* 3: 311-326.

TEETER, A. M.; JOHNSON, B. H.; BERGER, C.; STELLING, G.; SCHEFFNER, N. W.; GARCIA, M. H.; PARCHURE, T. M. 2001. Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). *Hidrobiologia*, 444(1-3): 1-23.

TCHERNIA, P., 1980: *Descriptive regional oceanography*. Pergamon Marine Series 3. Pergamon, Oxford.

THOMPSON, K.W. 1987. Time dependent boundary conditions for hyperbolic systems. *Journal of Computational Physics* 68: 1-24.

TOLDO JR., E. E. 1994. Sedimentação, Predição do Padrão de ondas e dinâmica sedimentar da antepraia e zona de surfe do sistema lagunar da Lagoa dos Patos. Curso de pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul . *Tese de doutorado*. 183 p.

TOMAZELLI, L. J. 1993. O regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas* 20: 18-26.

VALLE-LEVINSON, A. 1995. Observations of Barotropic and Baroclinic Exchange in the lower Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 15(13): 631-647.

VASSIE, J. 1982. Tides and low frequency variations in the equatorial Atlantic. *Oceanologica Acta* 5: 3-6.

VAZ, A. C. 2003. Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no estuário da Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão de curso* de Oceanologia da Fundação Universidade do Rio Grande, Brasil.

WONG, K.C. 1993. Numerical simulation of the exchange process within a shallow bar-built estuary. *Estuaries*, 16(2): 335-345.

WONG, K.C. 2002. On the Spatial Structure of Currents Across the Chesapeake and Delaware Canal - KC – Estuaries. *Estuaries*, 25(4A): 519-527.

WONG, K. C. AND J. H. THROWBRIDGE. 1990. Some observational evidence on the effect of atmospheric forcing on tidal variability in the upper Delaware Bay. *Journal of Geophysical Research* 95: 16229-16240.

ZIENKIEWICS, O. C. & ORTIS, P. 1995. A split-characteristic based finite element model for the shallow water equation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 20: 1061-1080.

ZIMMERMAN, J. T. F. 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea, part I. Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *J Sea Res* 10(2): 149-191.

YANES-ARANCIBA, A. 1986. Ecología de la zona costeira. AGT Editor, México, DF. 187 p.



## ANEXOS

## ANEXO I - ENQUADRAMENTO DAS ÁGUAS DO SUL DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS

A classificação das águas nacionais pelo governo brasileiro baseada no uso e qualidade, fornece um suporte legal para administrar o uso das águas no estuário da Lagoa dos Patos.

As águas da parte sul do estuário da Lagoa dos Patos, incluindo as áreas límnicas que drenam os municípios de Rio Grande e São José do Norte, foram classificadas segundo seus usos preponderantes em seis Classes, com base nas Classes originais citadas pela Resolução nº 20 do CONAMA (1986, artigo número 20) e nas três novas Classes para as águas salobras (A, B e C) propostas pela FURG.

Por serem salobras, as águas do Saco do Arraial foram enquadradas em duas classes, Classe A e B, segundo a VERSÃO FINAL DO ENQUADRAMENTO DA FEPAM, oficializado em 1995 por publicação no D.O.U., Portaria SSMA número 7 de 24/05/95, Norma Técnica 003/95.

Na Classe A se enquadram as águas destinadas à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas. Nas águas dessa classe não serão tolerados lançamentos de águas residuárias, domésticas e industriais, lixo e outros resíduos sólidos e substâncias tóxicas, mesmo tratados. Foram enquadradas nessa Classe: Saco do Justino, Saco do Arraial, Saco do Martins, Saco da Quitéria, Saco da Agulha; Saco da Tuna, Saco do Boto; Saco do Medanha.

Na Classe B se enquadram as águas destinadas à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho), à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana. São tolerados inclusive, lançamentos de despejos, desde que, além de atenderem aos padrões de emissão do Art. 21 da Resolução nº 20 do CONAMA (1986), não venham a fazer com que os limites estabelecidos para a respectiva classe sejam ultrapassados. Saco da Mangueira e demais regiões rasas do sul do estuário com profundidade inferior a um metro.

Outros regiões mencionadas neste trabalho foram enquadrados como:



oxigênio, D.B.O., presença de substâncias oleosas, nutrientes e elementos metálicos, etc.). Também regulamenta as atividades de monitoramento. Assim, esta regulamentação é o principal instrumento legal para obrigar indústrias locais e conglomerados urbanos a obedecerem padrões de emissão de líquidos.

## ANEXO II - CLIMANÁLISE - BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA

O boletim de monitoramento e análise climática do Centro de Previsão de Tempo e Clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza informações sobre aspectos climáticos e sinóticos, perturbações atmosféricas (formação de sistemas frontais e frontogênese) e dados hidrológicos de todo o Brasil. Assim, as informações relevantes para a região sul do Brasil referentes aos períodos das simulações estão sumarizadas a seguir.

Em julho de 1999, na Região Sul do Brasil ocorreram chuvas entre 50 e 200 mm e com os maiores totais sobre o sul do Paraná, oeste do Estado de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul. No campo de desvio de precipitação, observaram-se desvios positivos em boa parte do Estado de Santa Catarina, região litorânea do Paraná e norte do Rio Grande do Sul. No restante da região as chuvas estiveram próximas da média climatológica.

Durante o mês de julho cinco sistemas frontais atuaram na região (Figura A.1).

No dia 4, o primeiro sistema frontal originou-se de uma ciclogênese ocorrida no oceano, na altura do litoral do Rio Grande do Sul e, teve deslocamento pelo interior até Palmas e Guaíra, no Paraná. Do dia 4 até o dia 8 o sistema frontal deslocou-se pelo litoral até Salvador-BA e, durante sua trajetória causou chuvas intensas (100 mm) entre os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e de fortes a moderadas no restante da Região Sul.

No dia 8, o segundo sistema frontal atingiu o litoral do Rio Grande do Sul, até Porto Alegre-RS, deslocando-se no dia seguinte para o oceano. No dia 14, o terceiro sistema deslocou-se pelo interior, até Catanduva-SP e Campo Grande-MS, e também pelo litoral. Esse sistema causou chuvas fracas no Rio Grande do Sul. No dia 20, uma nova frontogênese e ciclogênese ocorreram no Rio Grande do Sul. Ocorreram chuvas de moderadas a fracas no Rio Grande do Sul. No dia 21, em Santa Vitória do Palmar-RS foi registrada chuva de 78 mm. Nas demais regiões esses sistemas causaram apenas nebulosidade.

O quinto sistema frontal atuou no dia 27 no sul do país. Esta frente fria estava associada a um sistema de baixa pressão em superfície, localizado no oeste do Rio Grande do Sul, que deslocou-se pelo interior desse Estado. A frente fria causou chuvas moderadas no Rio Grande do Sul, exceto em Cruz Alta e em Bom Jesus, onde foram registradas chuvas de 52 mm.

No dia 30, o último sistema frontal atuou no sul do país e teve um rápido deslocamento pelo litoral. Esse sistema causou chuvas fracas e nebulosidade durante sua trajetória.

Na Região Sul houve alteração significativa nas condições pluviométricas quando comparado com os meses de maio e junho. Em julho, as chuvas foram observadas em toda Região e, foram observadas anomalias positivas na região norte do Rio Grande do Sul. Porém, anomalias negativas também foram observadas no oeste paranaense e no extremo sul do Rio Grande do Sul. Nos outros postos da Região Sul, os desvios variaram entre 21,7% e 52% nos postos de Passo Real e Passo Fundo (RS), respectivamente.

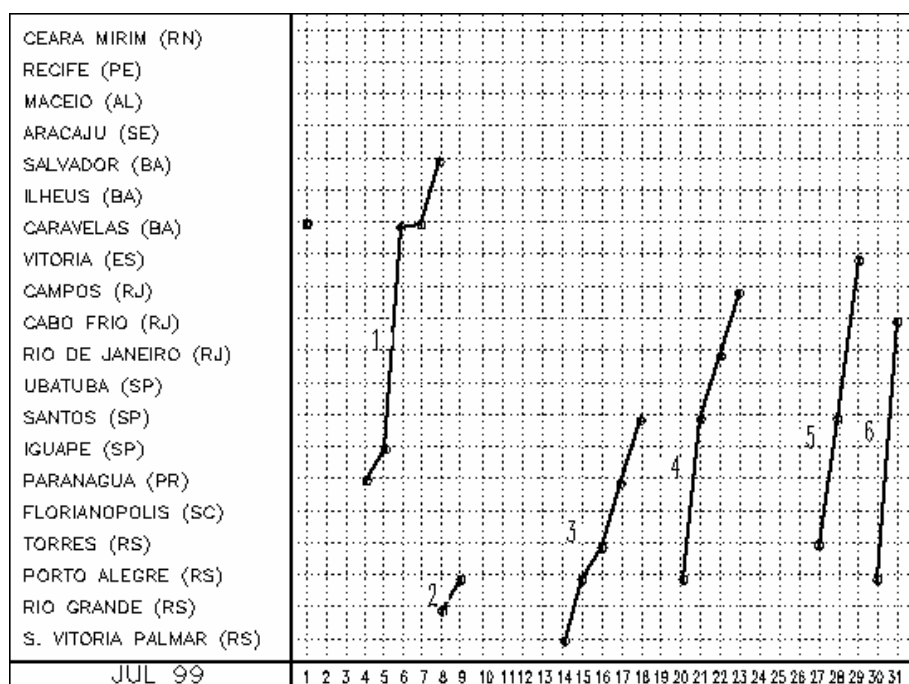


Figura A.1: sistemas frontais do mês de julho de 1999.

Em janeiro de 2005 persistiu um comportamento similar ao observado no mês de dezembro de 2004, ou seja, a rápida passagem dos sistemas frontais pouco contribuiu

para a ocorrência de chuvas. Os totais mensais foram inferiores a 150 mm em grande parte da Região, exceto no norte do Paraná, onde o total acumulado excedeu os 200 mm.

Neste período quatro sistemas frontais atuaram no País (Figura A.2). Este número ficou abaixo da média climatológica para latitudes entre 35°S e 25°S, que é de seis sistemas. De modo geral, as frentes frias apresentaram um rápido deslocamento pela Região Sul, onde causaram aumento da nebulosidade e chuva fraca.

A terceira frente fria ingressou pelo sul do País no dia 15. Este sistema teve um rápido deslocamento pela Região. No dia 20, um sistema de baixa pressão, que atuou desde a superfície até os níveis médios da atmosfera, ingressou pelo Rio Grande do Sul e deslocou-se para o oceano.

No dia 25, o quarto e último sistema frontal ingressou pela Região Sul. Pelo interior, este sistema deslocou-se até Campo Grande-MS. Pelo litoral, a frente avançou até Caravelas-BA, onde permaneceu estacionária nos dias 28 e 29, deslocando-se para o oceano no dia seguinte.

Contudo, as vazões observadas nas bacias do Uruguai, sul da bacia do Paraná e sul da bacia do Atlântico Sudeste foram menores que a Média de Longo Termo, consistente com as anomalias negativas de precipitação nestas áreas. Na bacia do Uruguai, a estação de Passo Fundo-RS também apresentou vazão menor que a do mês anterior e menor que o correspondente valor da Média de Longo Termo.

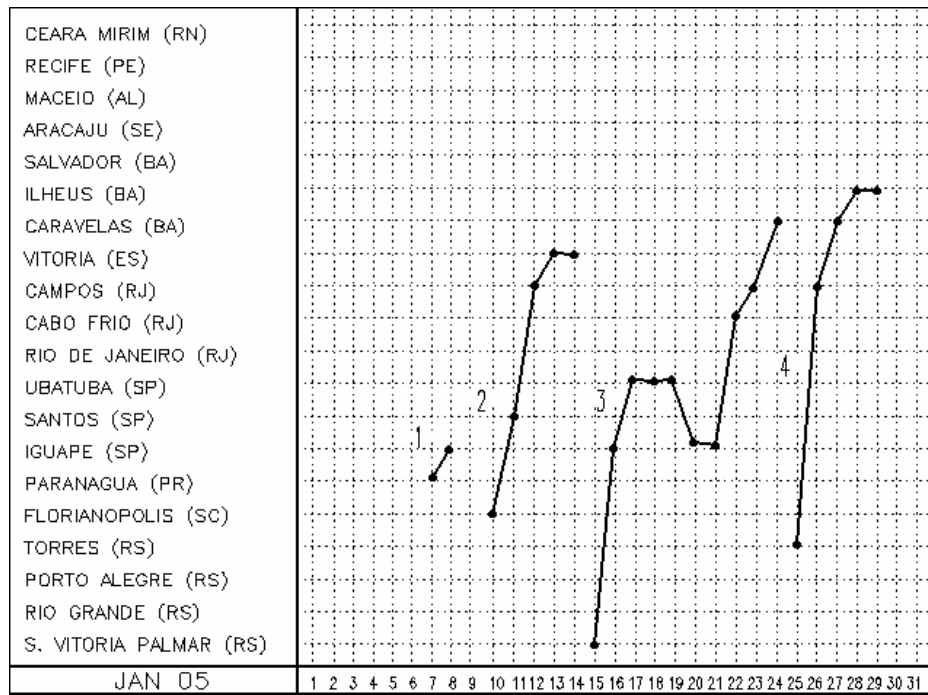


Figura A.2: sistemas frontais do mês de janeiro de 2005.