

HIDRODINAMICA DO SACO DA MANGUEIRA: MECANISMOS QUE CONTROLAM AS TROCAS COM O ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS

IGOR OLIVEIRA MONTEIRO¹; MÁRCIA LUIZA PEARSON²; OSMAR OLINTO MÖLLER JUNIOR³; ELISA HELENA LEÃO FERNANDES⁴

¹Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Rua Eng. Alfredo Huch, 475 – Centro - CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: Oceigor@furg.br

²Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Rua Eng. Alfredo Huch, 475 – Centro - CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: Marciapearson@yahoo.com.br

³Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Rua Eng. Alfredo Huch, 475 – Centro - CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: dfsomj@furg.br

⁴Fundação Universidade Federal do Rio Grande – Rua Eng. Alfredo Huch, 475 – Centro - CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: dfsehf@furg.br

RESUMO

O Saco da Mangueira (SM) é uma enseada semifechada, conectada ao estuário da Lagoa dos Patos. Devido a sua importância local, esta enseada está sujeita a sérios impactos antrópicos. Com a finalidade de fornecer subsídios para o manejo deste ambiente, os objetivos deste trabalho foram: 1) determinar os fatores que controlam a hidrodinâmica do SM; 2) avaliar o efeito que mudanças na geomorfologia do SM teriam na dinâmica do local. Para isso realizaram-se experimentos com o modelo hidrodinâmico de elementos finitos TELEMAC. Os resultados das simulações mostraram que as principais forçantes da circulação do SM são as oscilações submareais no canal estuarino, e a ação local do vento sobre as águas desta enseada. A salinização do SM apresentou um tempo de resposta de 26 horas em relação ao regime de enchente no estuário. Simulações feitas para diferentes cenários mostraram que a construção da Ponte dos Franceses reduziu as trocas (redução de área) e intensificou a velocidade da corrente entre a enseada e o canal estuarino, causando significativas alterações morfológicas. Além disso, a alteração morfológica da conexão entre a enseada e o estuário, como uma alternativa de manejo, não alterou significativamente as trocas entre estes dois ambientes.

PALAVRAS-CHAVES: modelagem numérica, enseada rasa, hidrodinâmica, Lagoa dos Patos

ABSTRACT

HYDRODYNAMICS OF SACO DA MANGUEIRA EMBAYMENT: MECHANISMS CONTROLLING EXCHANGES WITH THE PATOS LAGOON ESTUARY

The Saco da Mangueira (SM) embayment is a semi-enclosed system connected to the Patos Lagoon estuary through a narrow inlet. This embayment represents an important system for the region, being subject to several human impacts. The objectives of this study are: 1) to investigate the main factors controlling the hydrodynamics of SM embayment; 2) to evaluate the effect of changing the morphology of the inlet where this embayment connects to the main estuary. The TELEMAC model was used to carry out numerical simulations of the Patos Lagoon estuarine area, with special interest in the hydrodynamics of the SM embayment. Modeling results indicate that the dynamics of SM embayment is directly related to the subtidal oscillations in the main access channel and to local wind effects. Salinity inside SM responds to the remote wind with a time lag of 26 h regarding salinity in the estuary. Results from the different morphological scenarios indicate that the construction of a bridge reduces the exchanges with the estuary and intensifies current velocity, resulting in significant morphological changes. Moreover, results considering a wider connection between the two systems as a management alternative for the area, did not improve exchanges.

KEYWORDS: modeling, shallow embayment, hydrodynamics, Patos Lagoon

1 – INTRODUÇÃO

O Saco da Mangueira é um ambiente semi-fechado ligado ao estuário da Lagoa dos Patos através de uma estreita comunicação (Fig. 1). Neste local são realizadas várias atividades econômicas, como suporte ao parque industrial da cidade de Rio Grande, pesca artesanal de camarão, e atividades de lazer. Por outro lado, esta enseada recebe 29% do total de efluentes de Rio Grande, incluindo o efluente doméstico oficial da cidade, e alguns efluentes pluviais e industriais (indústria de pescado, de fertilizantes, de uma refinaria, de frigoríficos, e de refino de óleos vegetais), sendo que a maioria destes não recebe tratamento (Baumgarten *et al.* 2001). As águas desta enseada foram classificadas como eutróficas (Baumgarten *et al.* 1995) e condições anóxicas na coluna d'água e sedimento não se estabelecem devido a hidrodinâmica do local (Kantin e Baumgarten 1982).

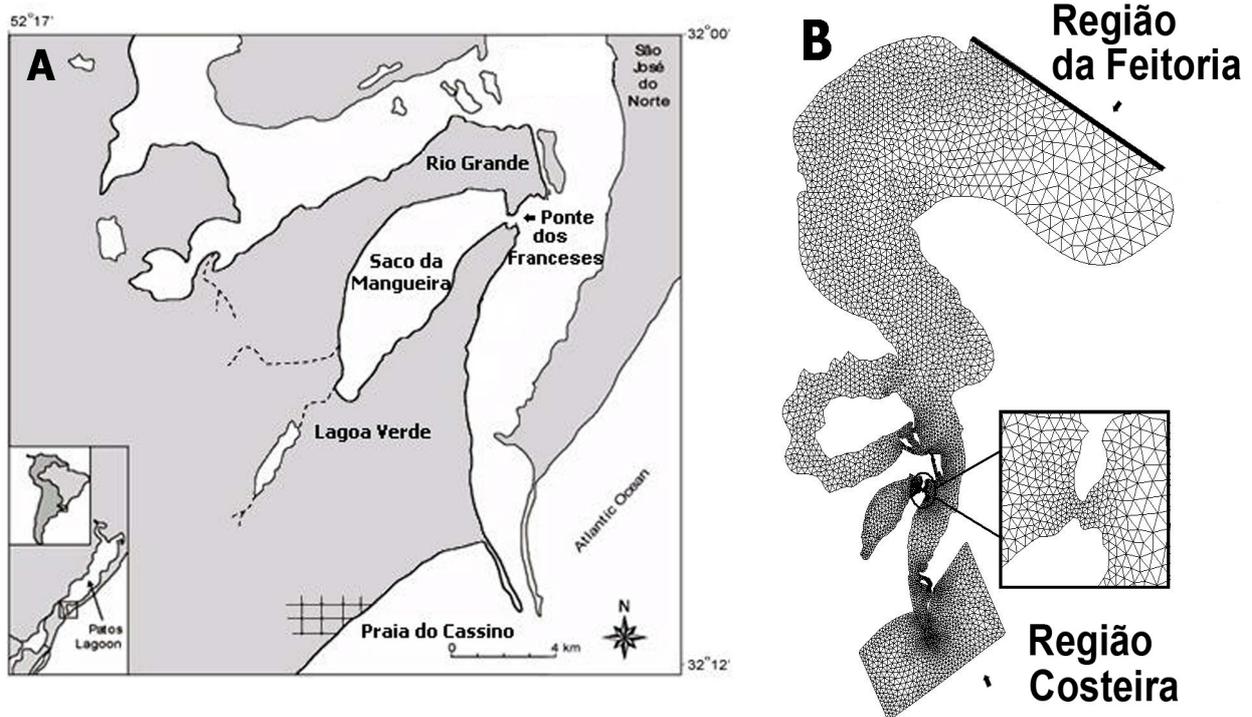


FIGURA. 1. A) – Área de estudo. Modificado de Baumgarten *et al.* (1998) B) Grade batimétrica de elementos finitos utilizada para as simulações hidrodinâmicas

Além disso, a crescente necessidade de intensificar o tráfego de veículos nas proximidades do Saco da Mangueira levou à construção de uma ponte (Ponte dos Franceses) no estreito que liga esse ambiente ao corpo principal do estuário. Devido ao caráter morfodinâmico do local, que apresenta uma relação de causa e efeito com a hidrodinâmica, acredita-se que esta obra de engenharia tenha alterado o padrão de circulação do sistema, influenciando o tempo de residência das águas dentro desta enseada e o comportamento dos processos locais de erosão e deposição do sedimento.

O entendimento da dinâmica do Saco da Mangueira é determinante para o estabelecimento de um plano de recuperação e manejo deste sistema. São raros, entretanto, os trabalhos sobre a hidrodinâmica do Saco da Mangueira (Pereira 1997).

A grande variabilidade temporal e espacial observada na região estuarina sugere que um estudo mais detalhado da hidrodinâmica desta região, e de suas enseadas rasas, não pode ser realizado somente com base 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 está baseada na utilização de modelos numéricos como sofisticadas técnicas de interpolação e extrapolação de dados de campo, tanto no domínio espacial quanto temporal. Fernandes (2001), Fernandes *et al.* (2002, 2005) e Möller *et al.* (1996) comentam sobre a necessidade de utilização de modelos numéricos bi- e tri-dimensionais para o estudo da dinâmica do estuário da Lagoa dos Patos. Dentre os modelos numéricos aplicados para a região, destaca-se o modelo TELEMAC, que está baseado no método dos elementos finitos. A aplicação deste método representa um significativo avanço em relação aos resultados obtidos com modelos baseados no método de diferenças finitas, sendo especialmente recomendada em regiões de morfologia complexa e acentuados gradientes batimétricos, como no estuário da Lagoa dos Patos.

O modelo TELEMAC-2D já foi calibrado e validado para simulações da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos e do seu estuário, e estes resultados encontram-se publicados em Fernandes *et al.* (2001, 2002), Cecílio (2004) e Schiller (2004). Os resultados destes autores mostram que, em todos os exercícios de calibração do modelo TELEMAC para esta região, a reprodução do modelo foi classificada como boa, de acordo com o critério proposto

por Walstra *et al.* (2001). O modelo TELEMAC-2D representa, então, uma ferramenta adequada para o estudo da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos e do seu estuário.

Dentro deste contexto, os objetivos desse trabalho são: 1) determinar quais são os fatores físicos que controlam a hidrodinâmica do Saco da Mangueira; 2) avaliar o efeito que mudanças na morfologia do estreito que conecta o Saco da Mangueira ao estuário teriam na dinâmica do local.

2 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Saco da Mangueira (Fig. 1) é uma enseada marginal semi-fechada e rasa, (profundidade média de 1,5 m), ligada ao estuário da Lagoa dos Patos por um estrangulamento de 240 m. O sistema possui uma área de 27 km², onde em uma extremidade recebe água vinda do estuário e na outra extremidade recebe uma pequena contribuição de água doce vinda dos arroios Vieira e Simão.

O estuário da Lagoa dos Patos (Fig. 1), no qual está localizado o Saco da Mangueira, ocupa aproximadamente 10% da superfície total da laguna, sendo caracterizado por amplas regiões de bancos (80%), canais naturais e artificiais e sacos marginais rasos. A conexão entre o estuário e o Oceano Atlântico se dá através de uma estreita entrada (750 m de largura), cujo canal de acesso possui profundidade média de 14 m e máxima de 20 m. O limite interior para a penetração da água salgada é a 60 km da boca do estuário (Ponta da Feitoria, Fig. 1B). A média anual de salinidade no estuário é 13, com valores instantâneos variando de 0 a 34 (Castello 1985). Gradientes verticais são observados e o estuário pode variar desde o tipo cunha salina até bem misturado (Möller & Castaing 1999, Fernandes *et al.* 2003).

A hidrodinâmica do estuário é controlada pela combinação dos efeitos causados pela ação do vento local sobre superfície da água (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). Möller *et al.* (2001) propuseram uma esquemática de define o efeito destas forçantes sob as condições predominantes de vento observadas na região. Em períodos de vento NE, a ação do vento local promove um aumento da elevação na região da Feitoria (Fig. 1B). 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.

A ação do vento como fator determinante para a entrada de água salgada no interior do estuário se verifica em períodos de descargas fluviais fracas ou moderadas (< 3.000 m³ s⁻¹). Por outro lado, em épocas de vazantes intensas (> 4.000 m³ s⁻¹), 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 (Möller 1996, Fernandes *et al.* 2002).

3 – METODOLOGIA

3.1 – O modelo numérico

O TELEMAC-2D (EDF, França) é um modelo hidrodinâmico baseado na técnica de elementos finitos. A técnica de elementos finitos permite que se concentre maior número de elementos nas regiões de maior interesse

e com maiores variações morfológicas, e utilize-se uma menor resolução nas regiões onde a morfologia é mais homogênea permitindo a diminuição do tempo computacional. Ele utiliza um sistema cartesiano como referência, no qual os eixos x e y formam um plano horizontal e a gravidade atua na direção vertical. Seu equacionamento está baseado na equação da continuidade e nas duas equações de conservação da quantidade de movimento, ambas integradas na vertical e derivadas da equação de Navier-Stokes. As variáveis de saída do modelo são as componentes em x (u) e y (v) da velocidade, a altura da coluna d'água (h), elevação da superfície d'água (Z) e um traçador (T) representando a salinidade. Um termo de atrito de Reynolds é adicionado a elas para representar o atrito interno provocado por flutuações na velocidade sobre sua média. Isso torna o sistema sem solução, gerando a necessidade de um esquema de fechamento turbulento. O TELEMAC-2D aplica o conceito de viscosidade turbulenta de Boussinesq. O modelo considera ainda velocidades verticais desprezíveis, e impermeabilidade da superfície e do fundo. A fricção com o fundo é parametrizada através da Lei de Manning, e o coeficiente de atrito é prescrito pelo usuário e considerado constante no tempo e no espaço.

As equações de Navier Stokes são resolvidas com base no Método de Separação de Operações (*Operator Splitting Method*) (Marchuk 1975, Zienkiewicz & Ortiz 1995). A solução envolve dois passos: 1) a solução dos termos advectivos; e 2) a solução dos termos de propagação, difusão e termos fonte. O Método das Características é utilizado para resolver a advecção das componentes da velocidade u e v (Galland *et al.* 1991, Bates *et al.* 1997, 1998). O cálculo das características (trajetórias) é feito pelo Método de Runge-Kutta de primeira ordem. O Método *Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG)* é aplicado para resolver a advecção da altura da coluna d'água (h). Os termos de propagação, difusão e fonte são resolvidos pelo Método do Gradiente Conjugado (Hervouet & Van Haren 1994, 1996).

As condições de contorno do modelo consideram que nos contornos fechados não há fluxo de água através do fundo e de faces laterais, e existe uma condição de livre deslizamento nas bordas para todos os vetores tangentes a estas. Nos contornos abertos, o modelo considera a altura da superfície livre e a condição de contorno superficial é fornecida estimando a tensão de cisalhamento do vento agindo na superfície, calculada a partir da velocidade do vento e do coeficiente de arraste do vento. Para cada variável principal, ou seja, altura da coluna d'água (h), e velocidades (u e v), o usuário determina se há um valor prescrito ou livre em cada ponto da grade.

3.2 – Dados batimétricos

Os dados batimétricos utilizados para a geração das grades foram digitalizados a partir das cartas náuticas 2140 (Lagoa dos Patos), 2101 (Porto de Rio Grande), 2102 (São José do Norte ao canal da Setia), 2103 (da Barra do Canal São Gonçalo às Porteiras) e 2106 (Saco do Rincão e proximidades) da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), e complementados com levantamentos batimétricos atuais para a região do Saco da Mangueira (dados não publicados). Estes dados foram processados no módulo de geração de grades do modelo TELEMAC (MATISSE) visando obter a melhor representação possível das características batimétricas da região. A malha utilizada para as simulações da hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos (e Saco da Mangueira) tem 9452 triângulos e é apresentada na Figura 1B.

3.3 – Ajuste do modelo ao estuário

Os dados de campo utilizados para as simulações do Saco da Mangueira abrangem o período entre 07/1999 e 08/1999, representando um cenário típico de inverno na região: elevadas descargas e passagem de frentes frias.

As fronteiras abertas do estuário foram forçadas com séries temporais de elevação do nível do mar. Na fronteira oceânica do modelo, foi prescrita uma série temporal de elevação do nível do mar fornecida pela Praticagem da Barra (Fig. 2A), enquanto que a série temporal da fronteira norte (Fig. 2A) do estuário foi obtida através de uma simulação numérica para toda a Lagoa dos Patos (para o mesmo período) (Cecílio 2004). No contorno superficial, a tensão de cisalhamento do vento foi calculada a partir de dados de velocidade e direção do vento, também fornecidos pela Praticagem da Barra (Fig. 2B). Os principais parâmetros utilizados nas simulações

numéricas são apresentados na Tabela 1, e seus valores estão baseados no trabalho de calibração e validação do modelo TELEMAC para esta região (Fernandes *et al.* 2001, 2002).

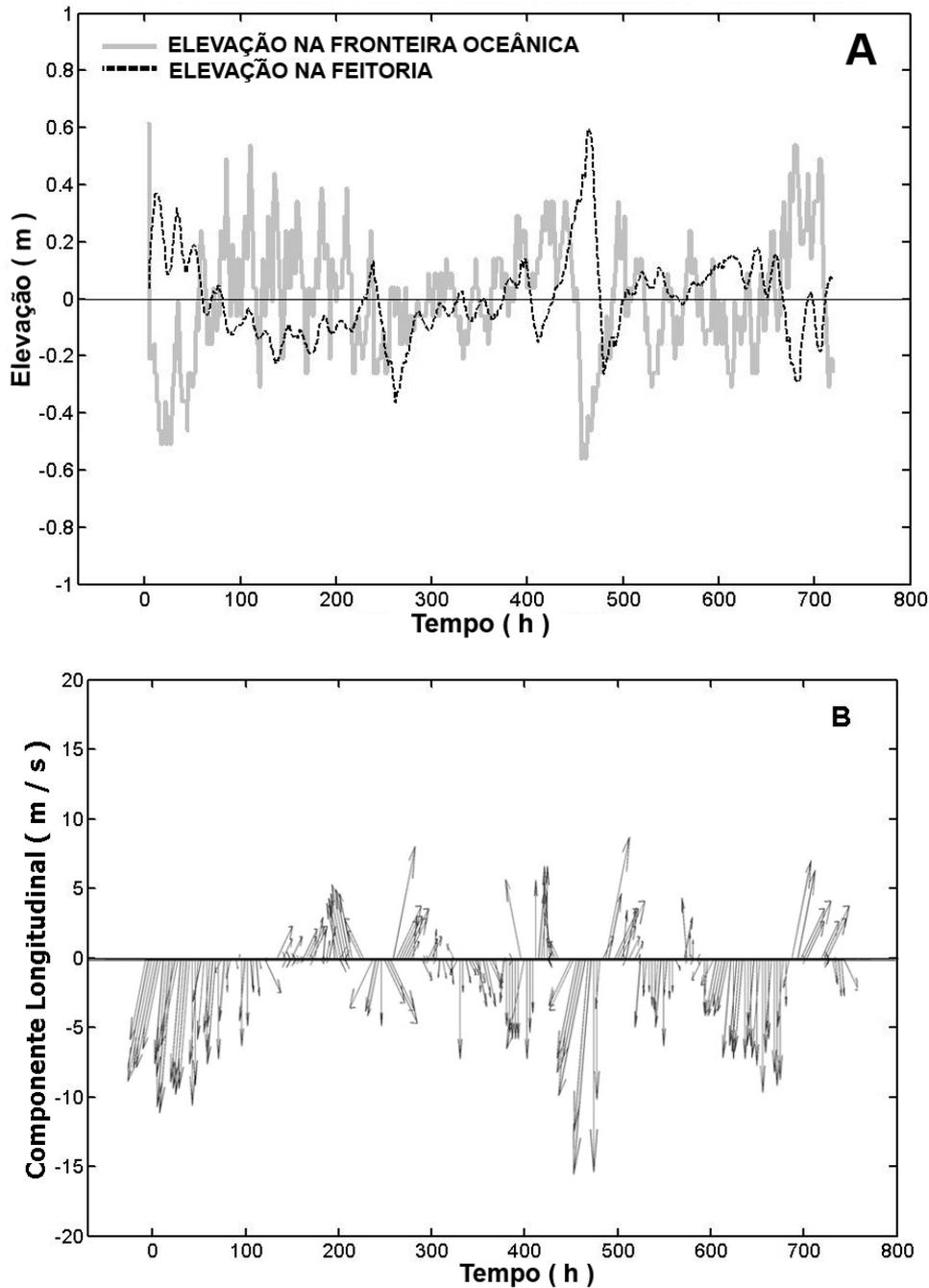


FIGURA 2 – Elevações na costa e na Feitoria (A) e velocidade do vento medida na Praticagem (B) utilizados como condições de contorno para o modelo.

Tabela 1 – Configuração dos principais parâmetros das simulações numéricas	
Passo de tempo	30 s
Número de passos de tempo	85800
Coriolis	Sim
Coefficiente de coriolis	$-7,7 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$
Modelo de turbulência	Viscosidade constante
Coefficiente de viscosidade turbulenta	$10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Coefficiente de difusividade do traçador	$1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Lei de atrito com o fundo	Manning
Coefficiente de atrito com o fundo	$2 \cdot 10^{-2}$
Coefficiente de atrito do vento	$2 \cdot 10^{-6}$
Salinidade prescrita na região costeira	30

As simulações numéricas para o estudo da hidrodinâmica do Saco da Mangueira foram realizadas com base na sua configuração atual (Fig. 3B). Para o estudo do efeito de mudanças morfológicas sobre a circulação desta enseada, as simulações foram feitas com base em três cenários distintos: 1) cenário com a batimetria antiga do Saco da Mangueira (dados de 1933, Fig. 3A); 2) cenário com a batimetria atual do Saco da Mangueira (dados de 2004, Fig. 3B); 3) cenário com a batimetria modificada pelo alargamento da ligação entre o Saco da Mangueira e o estuário (Fig. 3C).

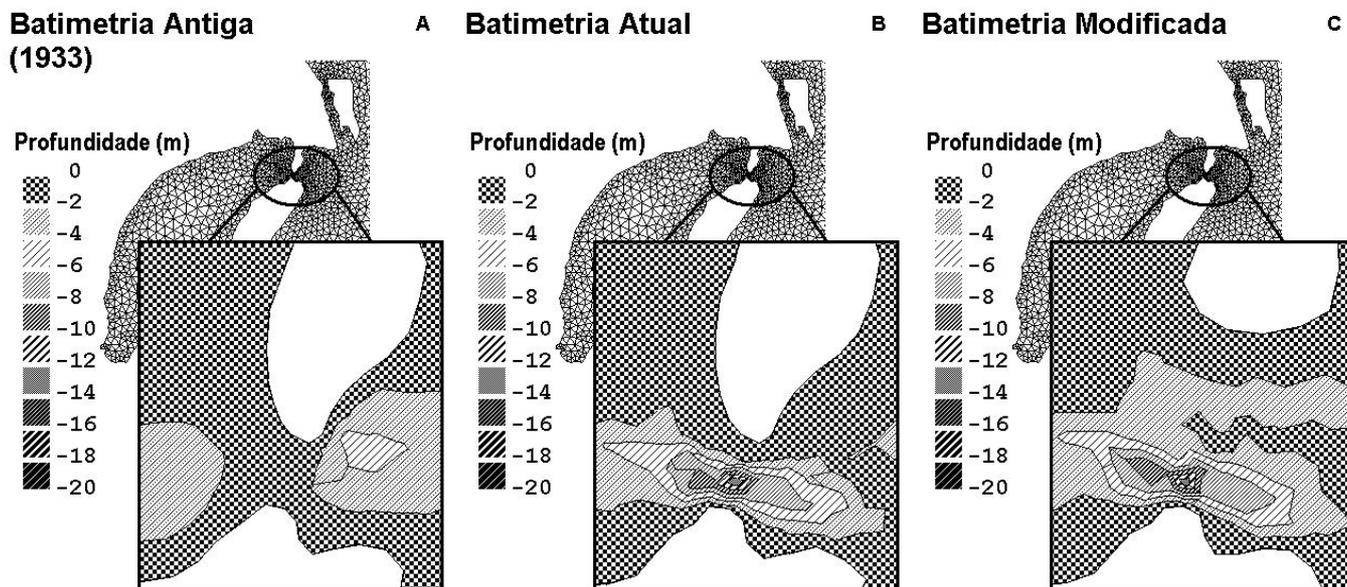


FIGURA 3 – Cenários utilizados para o estudo do efeito de alterações morfológicas sobre a circulação do local.

3.4 – ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados das simulações foram processados de forma a fornecer séries temporais de nível, velocidade de corrente e salinidade em locais específicos do estuário e Saco da Mangueira. Técnicas de análise no domínio do tempo foram aplicadas para verificação dos processos físicos envolvidos e das relações de causa e efeito. Foram utilizadas análises de correlação cruzada para verificar possíveis defasagens entre as séries temporais. Devido à necessidade de analisar a significância das diferenças entre os cenários em estudo foram feitos testes de variâncias no qual foi utilizada a distribuição F como estimativa dos valores críticos (Triola 1999). De forma a facilitar o entendimento dos processos físicos envolvidos durante a análise dos resultados, os dados de vento foram decompostos em uma componente longitudinal ao eixo principal do Saco da Mangueira (paralelo à costa) através de uma rotação horária de 37° dos eixos coordenados.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Efeito do vento na geração de gradientes de elevações no Saco da Mangueira

A Figura 4A apresenta séries temporais de nível calculadas pelo modelo para um ponto localizado no centro do Saco da Mangueira e um ponto localizado no canal de acesso do estuário, nas proximidades da cidade de Rio Grande. As séries temporais demonstram uma forte relação entre a elevação na enseada e a elevação no estuário. Uma análise de correlação cruzada entre as séries (Fig. 4B) evidencia que a elevação no Saco da Mangueira está diretamente relacionada ao comportamento da elevação no canal principal do estuário, sem

qualquer defasagem temporal. Como a hidrodinâmica do baixo estuário é controlada pelo vento não-local (Möller *et al.* 1996, Möller *et al.* 2001, Fernandes *et al.* 2002), esse tem efeito direto sobre a hidrodinâmica do Saco da Mangueira. Porém, para períodos com ventos de baixa intensidade, a ação da tensão de cisalhamento do vento sobre a Lagoa dos Patos (efeito local do vento) pode se tornar importante dentro do estuário. Esse comportamento está ilustrado na Figura 5A, onde foi plotada uma série temporal da componente longitudinal do vento e uma série temporal de elevação do nível d'água calculada pelo modelo para um ponto no centro da enseada. Com ventos soprando de sudoeste (valores positivos) ocorre o abaixamento do nível dentro da enseada, por outro lado, os ventos de nordeste (valores negativos) causam o efeito inverso, fazendo aumentar o nível. A análise de correlação cruzada entre essas séries temporais (Fig. 5B) mostra que existe uma correlação negativa entre elas, indicando uma defasagem de 180° entre as séries. Os resultados também mostram que a resposta do Saco da Mangueira a ação do vento local é instantânea.

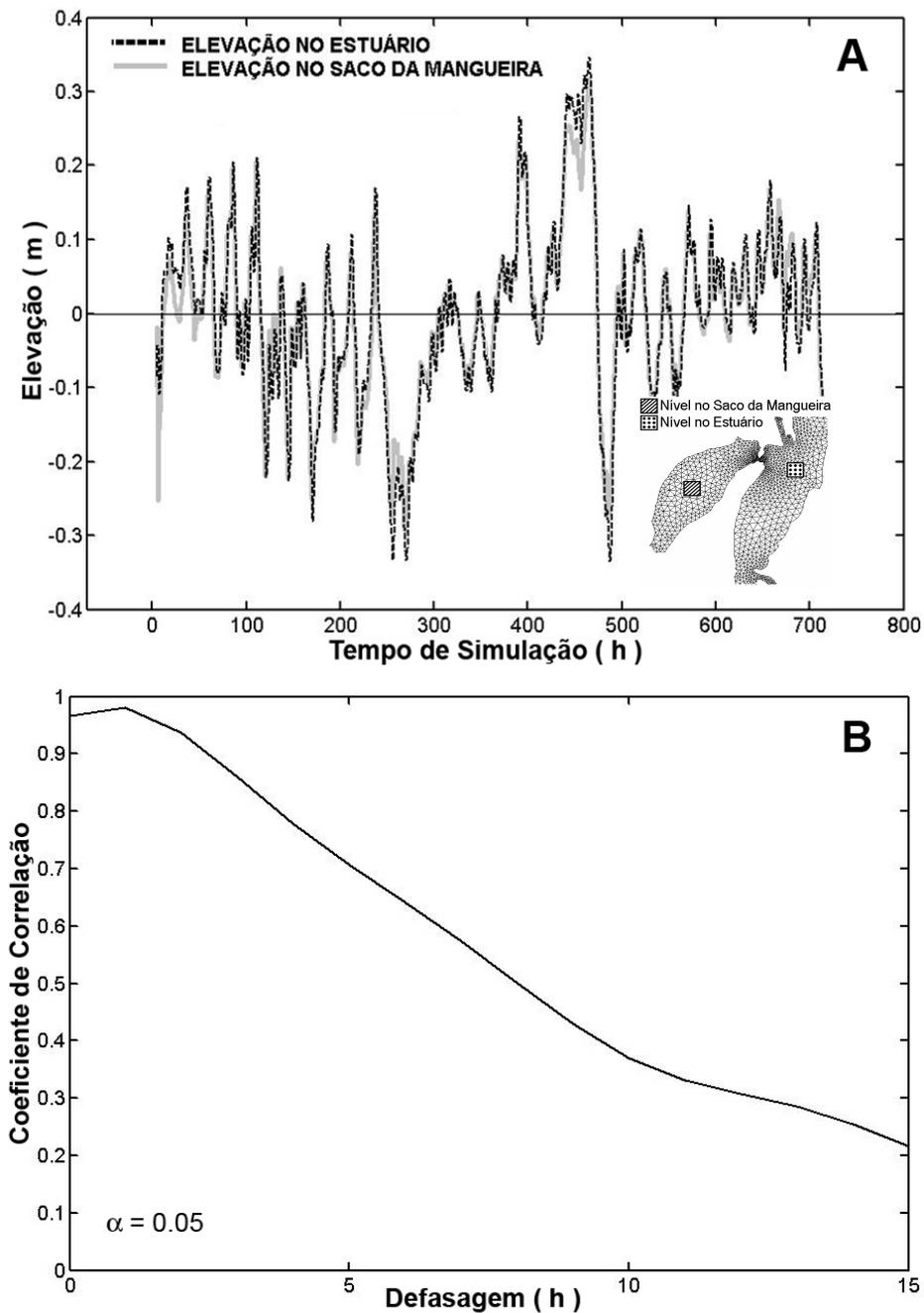


FIGURA 4 – Elevações no estuário e no Saco da Mangueira (A) e correlação cruzada entre as séries (B).

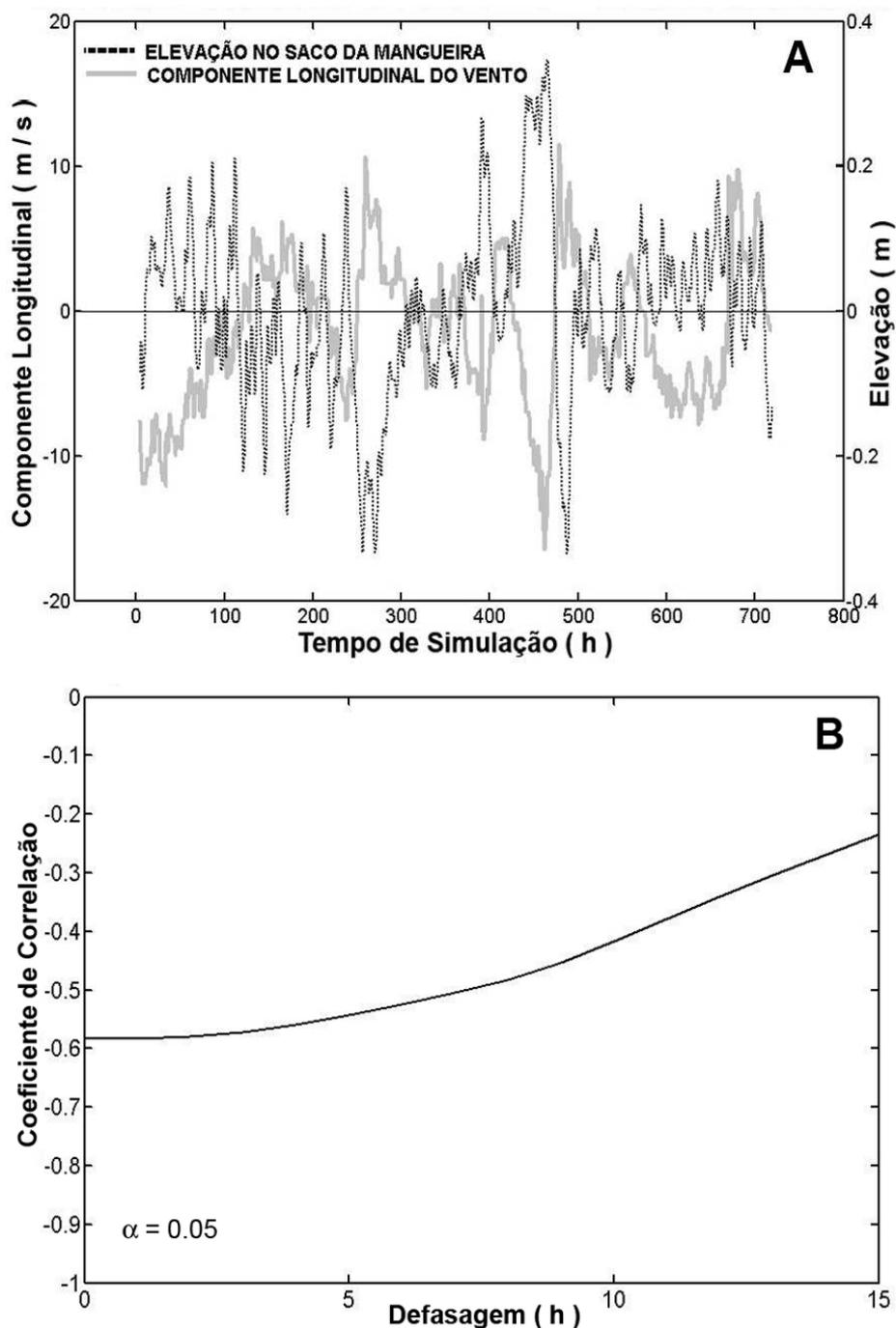


FIGURA 5 – Componente longitudinal do vento e elevação no Saco da Mangueira (A) e correlação cruzada entre as séries (B).

A Figura 6A mostra o desnível calculado para o Saco da Mangueira com base em séries temporais de elevação calculadas pelo modelo para pontos localizados nos extremos da enseada, chamados de Lagoa Verde e Ponte dos Franceses (Fig. 1A). Os resultados demonstram que a componente longitudinal do vento em sua ação local sobre a superfície da água do Saco da Mangueira causa um desnível entre as extremidades desta enseada, onde ventos de nordeste (valores negativos) empilham água em direção à extremidade inferior do Saco da Mangueira (Lagoa Verde), gerando um gradiente de pressão entre a entrada do Saco da Mangueira e o canal principal que favorece a penetração de água no interior da enseada. Por outro lado, ventos de sudoeste (valores positivos) empilham água em direção à extremidade superior (Ponte dos Franceses), gerando um gradiente de pressão entre a entrada do Saco da Mangueira e o canal principal que favorece a saída de água para o canal.

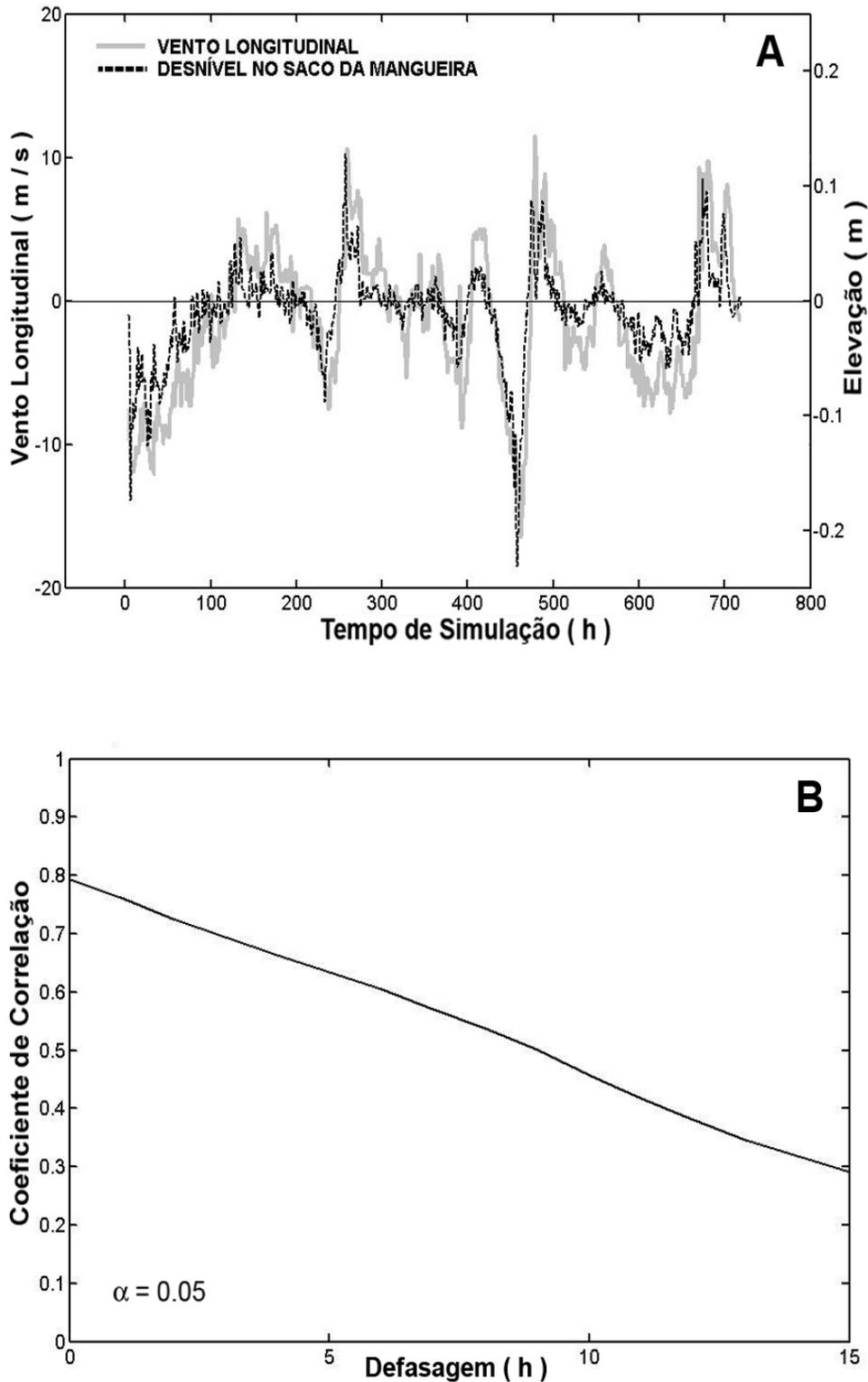


FIGURA 6 – Séries temporais de desnível no Saco da Mangueira e componente longitudinal do vento (A); e correlação cruzada entre as séries (B).

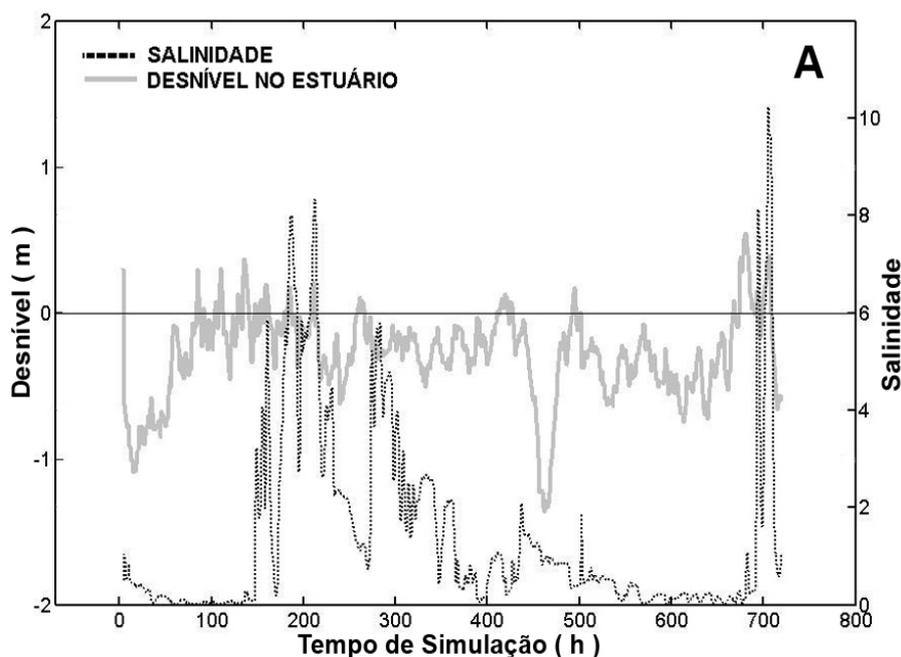
A análise de correlação cruzada entre o desnível calculado e o vento longitudinal (Fig. 6B) indica alta correlação e nenhuma defasagem temporal entre as séries. Isto demonstra que o efeito do desnível gerado devido à ação da componente longitudinal do vento sobre a enseada é instantâneo e apresenta forte influência sobre a circulação interna do Saco da Mangueira. Esta circulação interna promove o transporte de água de uma extremidade para outra, influenciando a oxigenação e a ressuspensão de sedimento e nutrientes, de acordo com o

vento atuante. A combinação entre a circulação interna e as trocas de água com o estuário adjacente evitam a formação de condições anóxicas (Kantin & Baumgarten 1982).

4.2 – Salinidade no Saco da Mangueira

O conhecimento da dinâmica do sal dentro desta enseada é muito importante para estudos associados à instalação de cultivos e à entrada de larvas de importância comercial no interior da enseada. Isto se deve ao fato de que a entrada do meroplâncton está naturalmente associada à entrada de água salgada. Além disso, uma atenção especial em relação à entrada de sal é necessária ao se considerarem estudos hidroquímicos, uma vez que a salinidade influencia as taxas de intercâmbio entre a coluna d'água, o sedimento e a atmosfera (Baumgarten *et al.* 1995).

Para analisar os fatores que estão associados às mudanças de salinidade no Saco da Mangueira, foi utilizada uma série temporal de salinidade retirada de um ponto situado a aproximadamente 1 km da boca da enseada. Esta série temporal de salinidade (Fig. 7A) foi plotada juntamente com uma série temporal de desnível no estuário da Lagoa dos Patos (calculada através da subtração entre a elevação na boca do estuário e a elevação na Feitoria, e representativa do efeito não-local do vento) com a finalidade de estabelecer uma relação de causa e efeito. Com desníveis positivos no estuário (elevação maior na fronteira oceânica devido à ação de ventos do quadrante sul) o gradiente de pressão barotrópico força a entrada de água no estuário e, conseqüentemente, no Saco da Mangueira, como é observado através dos valores de salinidade mais elevados na figura. Na região próxima a entrada do Saco da Mangueira, local de onde foi extraída a série temporal calculada de salinidade, foram encontrados valores de salinidade 10 para o evento mais forte de vento sudoeste do período de estudo. Este valor foi próximo ao obtido *in situ* por Baumgarten *et al.* (2001) em um episódio de vento de sudoeste no mês de julho de 1995. Estes autores observaram salinidade 15 próximo à entrada da enseada e salinidade 7 na outra extremidade. Na Figura 7B foi plotada a correlação cruzada entre o desnível no estuário e a salinidade no Saco da Mangueira, demonstrando que um expressivo aumento de salinidade no interior da enseada deverá ocorrer 26 horas após o estabelecimento do desnível.



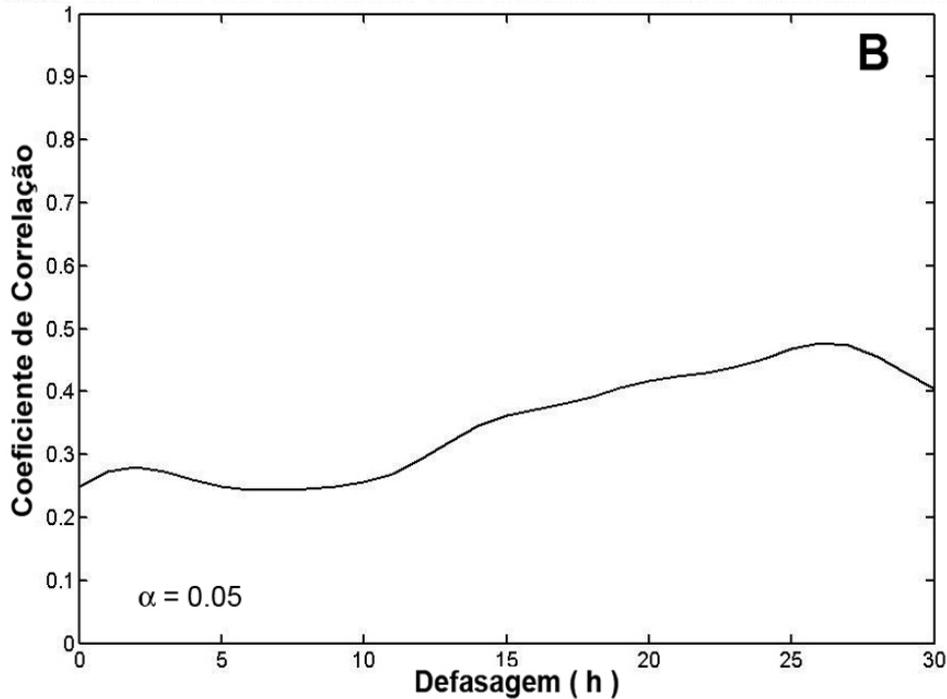


FIGURA 7 – Desnível no estuário e salinidade no Saco da Mangueira.

Entretanto, os resultados referentes ao comportamento da salinidade apresentados nesse trabalho devem ser analisados com cuidado, pois foram obtidos através de um modelo bidimensional que considera somente a dinâmica estuarina devido a forçante barotrópica da circulação. Diferenças poderão ser observadas em estudos numéricos semelhantes que incluam processos de transporte difusivo e advectivo devido ao gradiente de densidade causado pelos gradientes de salinidade (forçante baroclínica da circulação).

4.3 – Comparação entre os resultados simulados utilizando o cenário com a batimetria antiga e o cenário com a batimetria atual

A Figura 8 apresenta as séries temporais de velocidade de corrente simuladas para o cenário com a batimetria antiga e para o cenário com a batimetria atual na região da boca do Saco da Mangueira. O cenário da batimetria antiga representa a configuração da região após a construção da ponte e o estabelecimento do aterro. Uma análise qualitativa dos resultados sugere que as séries temporais são diferentes. Entretanto, com o objetivo de avaliar se as séries podem ser consideradas significativamente diferentes, foi realizado um teste estatístico de comparação entre as variâncias das velocidades obtidas para os dois cenários. O resultado do teste demonstrou que os valores amostrais apóiam ($\alpha = 0,05$) a hipótese de que as velocidades de corrente no cenário com a batimetria antiga (logo após a construção da Ponte dos Franceses) eram significativamente maiores que as velocidades no cenário com a batimetria atual. Os altos valores de velocidade de corrente encontrados através da simulação numérica para o cenário com a batimetria antiga são uma conseqüência da diminuição da área transversal que liga os dois ambientes. Estes valores de velocidade de correntes mais elevados encontrados no cenário com a batimetria antiga, provavelmente foram o principal fator que promoveu a intensa erosão no local, originando a configuração observada na batimetria atual. A grande erosão que houve neste local fez com que a profundidade aumentasse de 3 m (Fig. 3A) para 14 m, conforme representado na figura da batimetria atual (Fig. 3B). Com o aumento da profundidade causado pela erosão, a velocidade diminui, conforme encontrado nos valores simulados para o cenário com a batimetria atual, resultando em uma condição de maior equilíbrio morfodinâmico.

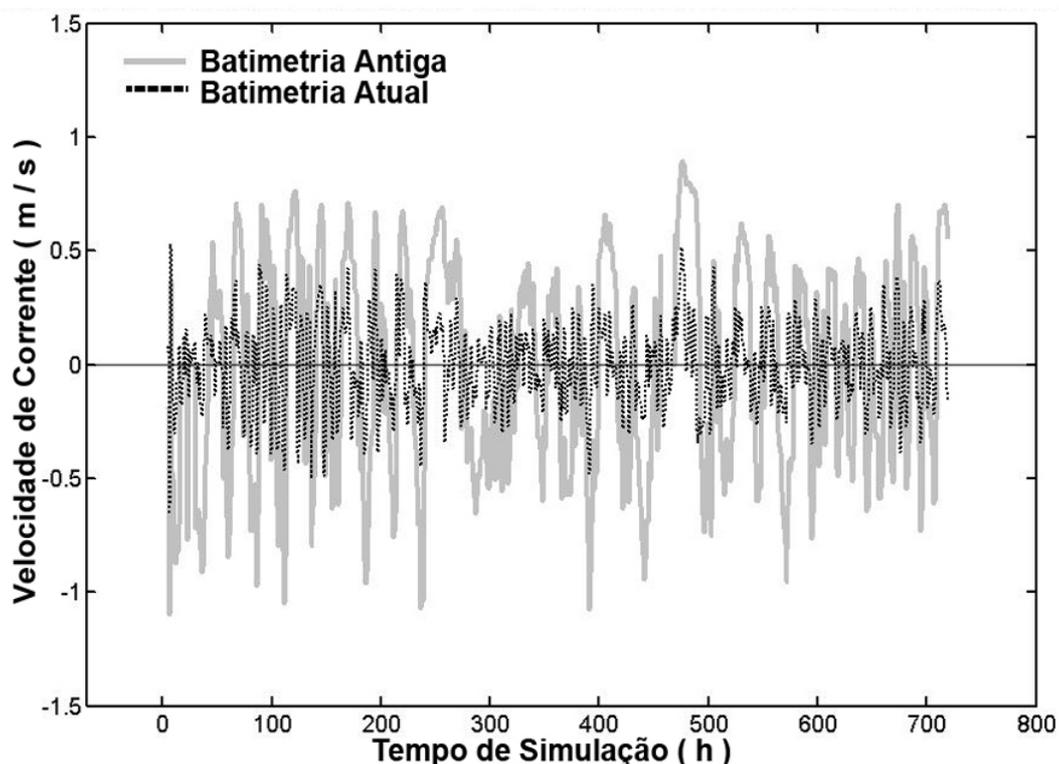


FIGURA 8 – Comparação entre as velocidades de corrente no Saco da Mangueira para a batimetria antiga e a batimetria atual.

Para verificar o efeito da obra de construção da Ponte dos Franceses sobre o tempo de residência das águas no ambiente, foi realizada uma comparação dos volumes trocados entre o Saco da Mangueira e o estuário com base nos dois cenários (batimetria antiga e atual). A comparação foi feita através de um teste de variância onde a distribuição de Fisher foi utilizada para avaliar a significância da relação entre as séries. O resultado do teste demonstrou que os valores amostrais apóiam ($\alpha = 0,05$) a hipótese de que os volumes trocados no cenário com a batimetria antiga eram significativamente menores que os volumes trocados entre os sistemas no cenário com a batimetria atual. Isto demonstra que, apesar de ter velocidades maiores, a área transversal reduzida devido ao aterro para a construção da ponte, fez com que as trocas no cenário da batimetria antiga fossem menores. Esta redução nas trocas de água após a construção da ponte, até o momento em que o ambiente atingiu um novo equilíbrio morfodinâmico, pode ter influenciado a degradação deste ambiente devido, entre outros, o aumento do tempo de residência de contaminantes na enseada.

4.4 – Comparação entre os resultados simulados utilizando o cenário com a batimetria atual e o cenário com a batimetria modificada

Com o objetivo de avaliar como a hidrodinâmica do Saco da Mangueira seria afetada por modificações na morfologia do estreito que conecta a enseada ao estuário, foi criado um cenário com uma batimetria hipotética na qual foram retirados 250 m do aterro que causa o estrangulamento do canal de ligação entre estes dois ambientes (Fig. 3C). Os resultados dessa simulação podem ser vistos na Figura 9 na qual estão plotados os valores de vazão na boca do Saco da Mangueira para o cenário com a batimetria atual e para o cenário com a batimetria modificada. Seguindo a mesma metodologia utilizada anteriormente, a comparação entre as séries temporais de vazão para os dois cenários foi realizada através de um teste estatístico que relaciona as variâncias entre as duas séries temporais. Para um α de 0,05 não há evidência amostral para apoiar a afirmação de que a alteração da morfologia do local (aumentando em 250 m a largura do estrangulamento) intensificaria as trocas entre a enseada

e o estuário. Os resultados encontrados com esta simulação indicam que este tipo de alteração morfológica não ajudaria na recuperação deste ambiente e que outras alternativas devem ser investigadas.

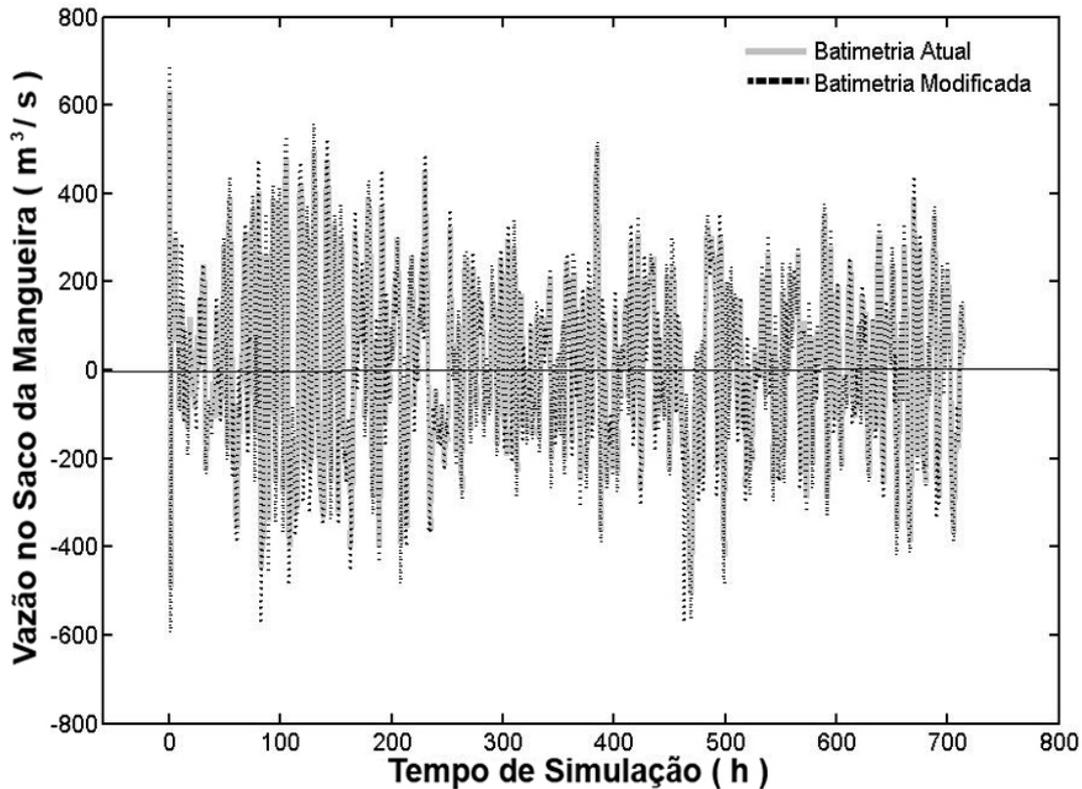


FIGURA 9 – Comparação de vazões entre o Saco da Mangueira e o estuário nos cenários da batimetria atual e batimetria modificada.

5 – CONCLUSÕES

A dinâmica do Saco da Mangueira está diretamente relacionada à dinâmica do canal de acesso ao estuário, que é controlada principalmente pelo efeito não-local (remoto) do vento. O vento soprando de sudoeste causa um empilhamento de água na costa e um abaixamento do nível dentro do estuário, e conseqüentemente dentro do Saco da Mangueira. O vento de nordeste causa um abaixamento do nível na costa com aumento do nível dentro do estuário e no Saco da Mangueira.

A componente longitudinal do vento (efeito local) agindo sobre a superfície do Saco da Mangueira também influencia significativamente a circulação desta enseada, causando um transporte de água instantâneo entre as suas extremidades na direção do vento. Com ventos soprando de nordeste, a água é transportada em direção à extremidade sul da enseada (Lagoa Verde), enquanto que os ventos de sudoeste causam um transporte na outra direção (Ponte dos Franceses). Estes desníveis internos estabelecem gradientes barotrópicos de pressão entre a entrada da enseada e o estuário principal, forçando água para dentro e para fora do Saco da Mangueira, respectivamente.

A salinidade no Saco da Mangueira é dependente do desnível entre a zona costeira e o limite norte do estuário. A salinização do Saco da Mangueira apresentou 26 horas de defasagem em relação ao estabelecimento do gradiente de pressão responsável pelo regime de enchente no estuário.

A construção da ponte na região de ligação do Saco da Mangueira com o estuário e o conseqüente estrangulamento do local causaram um aumento significativo das velocidades de corrente. Estas altas velocidades

de corrente causaram mudanças morfodinâmicas no local resultando na erosão da região de ligação entre a enseada e o estuário. Somente com o aumento da profundidade e, conseqüentemente da área transversal, é que ao longo do tempo, estabeleceu-se um novo equilíbrio morfodinâmico com velocidades menores. Esta acentuada erosão fez com que a profundidade máxima aumentasse de três para quatorze metros em aproximadamente 70 anos. A construção da ponte também diminuiu as trocas entre o estuário e o Saco da Mangueira, podendo ter agravado os problemas de contaminação no local, devido à diminuição da taxa de renovação das águas.

Os resultados das simulações indicam que a alteração da morfologia, com o aumento da largura do estreito em 250 m não aumenta significativamente as trocas entre estes dois ambientes.

Espera-se que as conclusões deste trabalho colaborem para a realização de novos estudos voltados ao entendimento dos processos físicos, químicos, geológicos e biológicos, que determinam a qualidade da água do Saco da Mangueira, bem como para a tomada de decisões de manejo desse sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto ECOSUD (contrato IAC4-CT-2001-10020), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 540467/01-4), pelo financiamento dado a esse projeto, e a Associação de Práticos da Barra de Rio Grande e ao Projeto Mar Dentro pelos dados cedidos.

LITERATURA CITADA

- BATES, PD, MG ANDERSON, JM PRICE HERVOUET & JC HAWKES. 1997. Investigating the behavior of two-dimensional finite element models of compound channel flow. *Earth Surface Process and Landforms*, 22, 3-17.
- BATES, PB, M HORRIT & JM HERVOUET. 1998. Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography. *Hydrological processes*, 12, 1257-1277.
- BAUMGARTEN, MGZ, LFH NIENCHESKI & KN KUROSHIMA. 1995. Qualidade das águas estuarinas que margeiam o município de Rio Grande (RS, Brasil): nutrientes e detergentes dissolvidos. *Atlântica*, 17:17-34
- BAUMGARTEN, MGZ, CE, AZNAR, JM ROCHA, MT ALMEIDA & PG KINAS. 1998. contaminação química das águas receptoras do principal efluente doméstico da cidade do rio grande (rs). *Atlântica*, 20:23-34
- BAUMGARTEN, MGZ, LFH NIENCHESKI & L VEECK. 2001. Nutrientes na coluna da água e na água intersticial de sedimentos de uma enseada rasa estuarina com aportes de origem antrópica (RS – Brasil). *Atlântica*, 23:101-116
- CASTELLO, JP 1985. La ecología de los consumidores del estuario de la Lagoa dos Patos. In: YAÑEZ-ARANCIBIA, A (ed.). Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: Towards an Ecosystem Integration. DR (R) UNAM Press, Mexico, Chap., pp. 386-406.
- CECILIO RO 2004. Identificação de zonas de erosão e deposição de sedimentos finos devido a forçante barotrópica no estuário da Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão do curso de Oceanologia - FURG*.
- FERNANDES, EHL, 2001. Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil. Tese (Dotorado), University of Plymouth, Inglaterra. 198 pp.
- FERNANDES, EHL, KR DYER & LFH NIENCHESKI. 2001. TELEMAC-2D calibration and validation to the hydrodynamics of the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI 34: 470 – 488.
- FERNANDES, EHL, KR DYER, OO MÖLLER & LFH NIENCHESKI. 2002. The Patos Lagoon hydrodynamics during na El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22:1699-1713.
- FERNANDES, EHL, KR DYER & OO MÖLLER. 2003. Morphological influence on the formation of spatial gradients in the southern Patos Lagoon. Em: *Proceedings of the 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. 01 – 05 Setembro, 2003, Barcelona, Espanha. P. 504-515.
- FERNANDES, EHL; KR DYER, & OO MÖLLER, 2005. Spatial gradients in the flow of the southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 21(4):759-769.
- GALLAND, JC, N GOUTAL, N & JM HERVOUET. 1991 TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Adv. Water Resources*, 14(3), 138-148.
- HERVOUET, JM & VAN HAREN. 1994. TELEMAC-2D Principle Note. Electricité de France. *Technical Report HE-43/94/051/B*.
- HERVOUET, JM E VAN HAREN. 1996. Recents Advances in numerical methods for fluid flows. Em: *Floodplain Processes*. Editado por ANDERSON, MG, DE WALLING; AND PD BATES. Pp. 183-214
- KANTIN, R & MGZ BAUMGARTEN. 1982 Observações hidrológicas no estuário da Lagoa dos Patos: os elementos nutrientes dissolvidos *Atlântica*, 5(1): 76-82
- MARCHUK, GI 1975. *Methods of Numerical Mathematics*. Springer Verlag.
- MÖLLER, OO, JA LORENZETTI, JL STECH & MM MATA. 1996. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16, 35–351.
- MÖLLER, OO 1996. Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S, Bresil). Measures et modelisation. PhD T hesis, L'Universite Bordeaux I, Ecole Doctorale dès Sciences de la Terre et de la Mer.
- MÖLLER, OO & P CASTAING. 1999. Hydrological characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (301S, Brazil). In: Perillo, GME., MC Piccolo. (Eds.), *Estuaries of South America (their Geomorphology and Dynamics)—Environmental Science*. Springer, Berlin, pp. 83–100.
- MÖLLER, OO, P CASTAING, JC SALOMON, P LAZURE. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries* 24 (2), 297–311.

- PEREIRA, AF; 1997. Simulação numérica da circulação do Saco da Mangueira (estuário da Lagoa dos Patos), utilizando o método de elementos finitos: Fundação Universidade Federal do Rio Grande, *Monografia de conclusão do curso de oceanologia*, 90 p.
- SCHILLER, RV 2004. Influência de alterações morfológicas sobre a hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos. *Monografia de conclusão do curso de Oceanologia – FURG*
- TRIOLA MF 1999. Introdução à Estatística. ED LTC – L Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ.
- WALSTRA, LC, LC VAN RIJN, H BLOGG & M VAN ORMONDT (2001) Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at teignmouth 1999. TR121-EC MAST Project no. MAS3-CT97-0086, HR Wallingford, UK.
- ZIENKIEWICZ, OC & P ORTIZ. 1995. A split-characteristic based finite element model for the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 20, 1061-1080.

Recebido: 31/05/05

Aceito: 06/12/05

