

ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DA LAGOA DOS PATOS NA FORMAÇÃO DO
DEPÓSITO LAMÍTICO AO LARGO DA PRAIA DE CASSINO - RS

Raphael Miguez Nogueira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof^a. Susana Beatriz Vinzón, D.Sc.

Prof. Paulo César Colonna Rosman, Ph.D.

Prof. João Luiz Baptista de Carvalho, D.Sc.

Prof^a. Josefa Varela Guerra, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2006

NOGUEIRA, RAPHAEL MIGUEZ

Aspectos hidrodinâmicos da Lagoa dos
Patos na formação do depósito lamítico ao
largo da praia de Cassino – RS
[Rio de Janeiro] 2006

IX, 55 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Sedimentos finos
2. Modelagem computacional

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DA LAGOA DOS PATOS NA FORMAÇÃO DO
DEPÓSITO LAMÍTICO AO LARGO DA PRAIA DE CASSINO - RS**

Raphael Miguez Nogueira

Maio/2006

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho tem como objetivo explicar a formação do depósito lamítico ao largo da praia de Cassino – RS através de resultados da modelagem computacional. Este depósito é caracterizado por camadas de até 1 metro de espessura tendo extensão desde a batimétrica de 5 metros até a de 20 metros. Modelos hidrodinâmico e de geração de ondas foram empregados com a finalidade de reproduzir os padrões de escoamento da região. Estes modelos fazem parte de um conjunto de modelos desenvolvidos no programa de engenharia costeira da COPPE/UFRJ, chamado SisBahia. Para este trabalho, modelos promediados na vertical (2DH) foram utilizados.

O modelo hidrodinâmico foi calibrado para o período de 06/05/99 à 25/09/99. Através de cenários típicos do padrão de circulação, a exportação de sedimentos para a plataforma continental foi analisada em termos da ação dos ventos e das vazões. A avaliação do efeito das vazões fluviais realizada com a modelagem evidenciou que estas podem ser importantes para a exportação de água para o oceano somente em períodos de eventos meteorológicos fracos. Padrões de correntes sobre a plataforma mostraram uma redução da intensidade das correntes ao largo da praia de Cassino, aonde se encontra o depósito, indicando uma possível região de deposição.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PATOS LAGOON HYDRODYNAMICS PATTERNS FOR THE MUD BANK
FORMATION IN THE INNER SHELF OF CASSINO BEACH - RS

Raphael Miguez Nogueira

May/2006

Advisor: Susana Beatriz Vinzón

Department: Oceanic Engineering

The aim of this work is to explain the mud bank formation in the inner shelf of Cassino beach – RS by using computational modeling. This mud bank is characterized by 1 meter layers with a extension that goes from 5 meters depth to 20 meters depth. Hydrodynamics and waves generation models were implemented in order to reproduce the main flow patterns. Depth averaged models (2DH) were used. The model used was SisBahia, a group of models developed by the coastal engineering program in COPPE/UFRJ.

The hydrodynamic model was calibrated against measured water elevation for the period 06/05/99 till 25/09/99 and measured currents for the period 02/08/99 till 09/08/99. From typical circulation patterns, exportation of sediments through the mouth was analyzed in terms of wind action and river discharges. It seems that rivers discharges are important in exportation of water and sediment when weak meteorological events are occurring. Currents patterns on the inner shelf showed a region where the intensity is decreased on the region that the mud bank is found.

CONTEÚDO

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Descrição da área em estudo.....	5
4. Metodologia	11
4.1. <i>Domínio e estratégia de modelagem</i>	12
5. Tratamento dos dados das fronteiras	14
5.1. <i>Batimetria</i>	14
5.2. <i>Rugosidade</i>	16
5.3. <i>Dados maregráficos</i>	17
5.4. <i>Dados de ventos</i>	23
5.5. <i>Vazões fluviais afluentes</i>	25
6. Calibração	26
7. Caracterização dos cenários contribuintes para a exportação de sedimentos e padrão de correntes	37
7.1. <i>Exportação de sedimentos para a plataforma continental</i>	37
7.2. <i>Padrão de correntes sobre a plataforma continental</i>	46
8. Conclusões e recomendações	51
9. Referências bibliográficas	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Lama depositada na face da praia de Cassino – RS após um evento de tempestade.	2
Figura 2: Imagem de satélite mostrando a pluma de sedimentos expelida pela embocadura do estuário.	3
Figura 3: Mapa de localização da Lagoa dos Patos – Rio Grande do Sul. Mapa adaptado do site www.worldatlas.com/webimage/countrys/samerica/brlarge.htm	5
Figura 4: Mapa adaptado da lagoa dividida conforme divisão proposta por Delaney (1965). Coordenadas em metros (UTM).	6
Figura 5: Espectro da maré astronômica obtida na estação Praticagem para o período de 01/05/99 a 30/09/99. Observa-se a dominância da constituinte O1.	8
Figura 6: Espectro da maré meteorológica filtrada dos dados medidos na estação Praticagem para o período de 06/05/99 a 25/09/99. Observam-se os períodos com maior energia.	9
Figura 7: Domínio de modelagem da Lagoa dos Patos e da plataforma continental, indicando a região foco deste trabalho e a malha de elementos finitos com 1054 elementos quadrangulares e 4699 nós.	13
Figura 8: Batimetria do domínio de modelagem referenciada pelo nível médio do mar. Escala de cores e eixos em metros. Isóbatas espaçadas a cada 5 metros.	15
Figura 9: Malha espaçada de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ do modelo de solução em escala global de maré FES99 (linhas azuis) identificando a região utilizada para interpolação dos dados para os nós da fronteira aberta (linha vermelha).	18
Figura 10: Comparação das séries de elevações modeladas pelo Teste5 (SisBahia – linha vermelha) e medidas na estação Praticagem (linha preta). A maré foi gerada a partir do ToolBox T_Tide (t_predic). Eixo x em dias e y em metros.	19
Figura 11: Série de elevação calculada a partir das componentes harmônicas para o nó central da fronteira oceânica (nó 43).	19
Figura 12: Série de elevação original (20 do total de 153 dias) dos dados medidos na estação Praticagem (linha magenta) mostrando a ação do filtro Thompson utilizado para obtenção da maré meteorológica (linha azul).	20
Figura 13: Comparação entre os espectros dos dados medidos (linha preta) e modelados (linha azul) na estação Praticagem. Maré meteorológica e astronômica sem amplificações ou reduções.	21
Figura 14: Comparação entre os espectros dos dados medidos (linha azul) e modelados (linha vermelha) na estação Praticagem. Maré meteorológica amplificada e componente semi-diurna reduzida.	21
Figura 15: Série de elevação prescrita para o nó 43 da fronteira aberta oceânica.	22

Figura 16: Elevação e espectro das elevações medidas e modeladas. Não há significativa influência da ação dos ventos sobre a plataforma continental especificada no modelo no mecanismo de set-up e set-down.	23
Figura 17: Série de intensidade e direção de ventos medidos na estação Praticagem durante os meses de maio (a), junho (b), julho (c), agosto (d) e setembro (e) de 1999.	24
Figura 18: Gráfico polar das freqüências de ocorrência da série temporal de ventos fornecida ao modelo como dados de entrada.	24
Figura 19: Série de vazões do rio Guaíba durante o período de 01/05/99 a 30/09/99.....	25
Figura 20: Localização das estações de medições das elevações (Praticagem, São Lourenço, Bojuru e Itapuã), de correntes e salinidade (Praticagem). Coordenadas em UTM.....	26
Figura 21: Série de elevações medidas (linha azul) e modeladas (linha magenta) para cada estação mostrando a influência da condição inicial de elevação no resultado do modelo. Condição inicial perpetua por aproximadamente 1 mês.	28
Figura 22: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 1 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.03 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.	29
Figura 23: Comparação entre as elevações medidas e modeladas na estação São Lourenço. Observe a melhoria na série de elevação quando a condição inicial é especificada para zero.	30
Figura 24: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 2 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.02 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.	30
Figura 25: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 3 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.	31
Figura 26: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 4 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.0005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.	31
Figura 27: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 5 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.00005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.	32
Figura 28: Salinidade medida na estação Praticagem para o período de 02/08/99 a 10/08/99.	32
Figura 29: Série de elevações medidas (linha azul) e modeladas (linha magenta) para cada estação do modelo Teste 5.	35

Figura 30: Espectro comparativo entre as elevações medidas e modeladas na estação Praticagem para o período de 06/05/99 a 25/09/99.....	36
Figura 31: Resultados para o período do mês de maio de 1999. Ventos NE orientado para baixo e SW para cima. Deltas H positivos indicam elevação maior em Praticagem do que em São Lourenço, resultando em entrada de água no estuário e, valores negativos indicam o oposto. Vazões positivas indicam entrada de água no estuário e negativas o oposto.	38
Figura 32: Padrões de correntes e de elevações (a), tensões devido a correntes (b) e ondas (c), e comprimento de pista (d) para o instante do dia 28/05 às 23:00, vento de NE com intensidade de 15.64 m/s. Isóbatas espaçadas em 5 metros.	44
Figura 33: Resultados para o período do mês de junho de 1999. Ventos NE orientado para baixo e SW para cima. Deltas H positivos indicam elevação maior em Praticagem do que em São Lourenço, resultando em entrada de água no estuário e, valores negativos indicam o oposto. Vazões positivas indicam entrada de água no estuário e negativas o oposto.	39
Figura 34: Resultados para o período do mês de julho de 1999. Ventos NE orientado para baixo e SW para cima. Deltas H positivos indicam elevação maior em Praticagem do que em São Lourenço, resultando em entrada de água no estuário e, valores negativos indicam o oposto. Vazões positivas indicam entrada de água no estuário e negativas o oposto.	40
Figura 35: Resultados para o período do mês de agosto de 1999. Ventos NE orientado para baixo e SW para cima. Deltas H positivos indicam elevação maior em Praticagem do que em São Lourenço, resultando em entrada de água no estuário e, valores negativos indicam o oposto. Vazões positivas indicam entrada de água no estuário e negativas o oposto.	41
Figura 36: Resultados para o período do mês de setembro de 1999. Ventos NE orientado para baixo e SW para cima. Deltas H positivos indicam elevação maior em Praticagem do que em São Lourenço, resultando em entrada de água no estuário e, valores negativos indicam o oposto. Vazões positivas indicam entrada de água no estuário e negativas o oposto.	42
Figura 37: Comparação com os resultados obtidos com o modelo Teste 5 para o período de calibração. Nos últimos dois gráficos as linhas azul e vermelha indicam dados medidos.	46
Figura 38: Padrão de correntes para o dia 15/05/99. Situação de vento fraco de NE (4.94 m/s) e vazões fluviais baixas (500 m ³ /s).	47
Figura 39: Padrão de correntes para o dia 26/07/99. Situação de vento fraco de NE (5.81 m/s) e vazões fluviais altas (4000 m ³ /s).	48
Figura 40: Padrão de correntes para o dia 09/06/99. Situação de vento forte de NE (15.23 m/s) e vazões fluviais moderadas (1500 m ³ /s).	48
Figura 41: Mapa de velocidades residuais eulerianas para todo o período de 5 meses simulado. É observado um vórtice ao largo da praia de Cassino. Barra de cores indica	

a intensidade das correntes em m/s. Isóbatas espaçadas em 5 m. Coordenadas em UTM.....	50
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de referência indicadas nas cartas náuticas e os utilizados no modelo.	15
Tabela 2: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo, ϵ , para uso no modelo 2DH do SisBahia (Rosman, 2001).....	16
Tabela 3: Coeficientes de rugosidade utilizados nesse trabalho como parâmetro de calibração das correntes em Praticagem.	17
Tabela 4: Análise harmônica da série de elevação medida em Praticagem para o período de 01/05/99 a 30/09/99	33

1. INTRODUÇÃO

Um estuário é definido como um ambiente costeiro que possui pelo menos uma conexão com o mar, onde existem trocas contínuas de massas d'água, tanto salgada como doce, apresentando limites a montante até onde se sente o efeito da onda de maré, e a jusante, até a zona de mistura. Dependendo das condições oceanográficas, meteorológicas e hidrológicas, a região da zona de mistura pode ser transportada para dentro (continente) ou para fora (costa) da embocadura do corpo hídrico.

A Lagoa dos Patos, considerada a maior laguna costeira do mundo (Kjerfve, 1986), se conecta com o oceano Atlântico através de um canal estreito (2 km de largura), com profundidade média de 2 metros, apresentando um canal de acesso ao porto de Rio Grande com profundidades de até 15 metros. Devido à sua grande importância na economia regional diversos estudos e trabalhos foram desenvolvidos com a intenção de aprimorar os conhecimentos da dinâmica desse ambiente.

A Lagoa dos Patos e a sua porção estuarina já foram assuntos de diversos trabalhos e estudos sobre modelagem numérica e computacional realizados por Möller et al (1996 & 2001) e Fernandes et al (2002 & 2004). Nesses estudos foram abordados com enfoque maior temas relacionados à região estuarina e ao interior da lagoa, limitando-se à região da plataforma como condição de contorno para os modelos empregados.

A base do desenvolvimento desse trabalho tem como motivação conhecer a circulação hidrodinâmica da região ao largo da praia de Cassino, onde se encontra um extenso depósito de lama. Em períodos de grande energia provocados pelo estado do mar, existe um fenômeno de migração da lama desse depósito para a praia, ocasionando um seríssimo problema ambiental. A praia com uma espessa camada de lama impossibilita o trânsito de automóveis, um costume local devido ao alto índice de compactação da areia e da baixa qualidade das vias urbanas e, além de prejudicar a atividade turística, afeta a comunidade bentônica e causa riscos à vida de banhistas e surfistas (Figura 1).



Figura 1: Lama depositada na face da praia de Cassino – RS após um evento de tempestade.

2. OBJETIVOS

Um dos objetivos a serem alcançados por este trabalho é avaliar a circulação hidrodinâmica da Lagoa dos Patos, da região estuarina e da plataforma continental com a finalidade de identificar cenários que promovem o transporte de sedimentos finos para a plataforma continental adjacente (Figura 2), visando assim explicar a formação do banco de lama encontrado ao largo da praia do Cassino, Rio Grande do Sul. Um segundo objetivo é caracterizar o padrão de corrente na plataforma continental que, eventualmente, propicia a formação deste banco de lama.



Figura 2: Imagem de satélite mostrando a pluma de sedimentos expelida pela embocadura do estuário.

Com o intuito de atingir os objetivos traçados, a estrutura dessa dissertação está dividida em capítulos que abordam a área de interesse, os modelos empregados, os resultados obtidos, as conclusões pretendidas e as referências bibliográficas, assim separados, além deste e do capítulo introdutório:

Capítulo 3 – Descrição da área em estudo: nesse capítulo será caracterizada a região de estudo, incluindo aspectos geomorfológicos, hidrológicos, meteorológicos e oceanográficos;

Capítulo 4 – Metodologia: serão apresentados os modelos computacionais a serem empregados nesse trabalho, justificando a sua utilização, e apresentadas algumas de suas facilidades e vantagens, serão também definidos o domínio e a estratégia de modelagem e a confecção da malha de elementos finitos;

Capítulo 5 – Tratamento dos dados das fronteiras: serão mostrados os dados utilizados nos modelos, abrangendo todo o processo de ajuste das condições de contorno aberta (marés astronômica e meteorológica), a inclusão dos dados de vento e os parâmetros utilizados nos modelos;

Capítulo 6 – Calibração: será demonstrado o processo de calibração do modelo hidrodinâmico;

Capítulo 7 – Caracterização dos cenários contribuintes para a exportação de sedimentos e padrões de correntes: os resultados serão analisados com foco nos cenários que favorecem a expulsão de água pela embocadura do estuário, os quais apresentam grande potencial para formação da pluma de sedimentos e do banco de lama ao largo da praia de Cassino. Resultados de tensão de atrito no fundo devido às correntes e ondas, de vazões simuladas na seção da embocadura, de gradientes de elevação entre a Lagoa dos Patos e a plataforma continental, além da ação dos ventos serão utilizados;

Capítulo 8 – Conclusões e recomendações: serão descritos os resultados encontrados neste trabalho, além de relacionar algumas recomendações com o intuito de melhorar o conhecimento da região;

Capítulo 9 – Referências bibliográficas: aqui estão listados todos os trabalhos consultados para o desenvolvimento dessa dissertação.

3. DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A Lagoa dos Patos, situada na região sul do Brasil no estado do Rio Grande do Sul, localizada entre as latitudes 30° e $32^{\circ}15'$ sul e longitudes $50^{\circ}30'$ e $52^{\circ}15'$ oeste, é considerada a maior laguna costeira do mundo, possuindo área superficial de aproximadamente 10.350 km^2 (Figura 3).



Figura 3: Mapa de localização da Lagoa dos Patos – Rio Grande do Sul. Mapa adaptado do site www.worldatlas.com/webimage/countries/samerica/brlarge.htm

Segundo Delaney (1965), a lagoa pode ser dividida geomorfologicamente em três regiões: a zona estuarina, a lagoa e a região norte (Figura 4). A zona estuarina pode ser definida entre a embocadura e a região da Ponta da Feitoria. O estuário é conectado com o mar por um canal estreito com 20 km de comprimento por 1 a 2 km de largura e profundidades máximas de 15 m (Zaviolov et al, 2003). Ao norte do estuário, o Canal São Gonçalo escoa as águas da Lagoa Mirim, possuindo vazões moderadas (médias de 200 m^3/s) e representa um grande aporte de sedimentos. Trabalhos desenvolvidos por Hartmann

et al (1990b & 1990c) mostram uma grande contribuição de sedimentos finos para a região estuarina. Como citado em Hartmann et al (1990c), o Canal de São Gonçalo pode contribuir com concentrações que podem variar de 75 mg/l para 320 mg/l em um período de aproximadamente 5 horas no momento da passagem de uma frente fria.

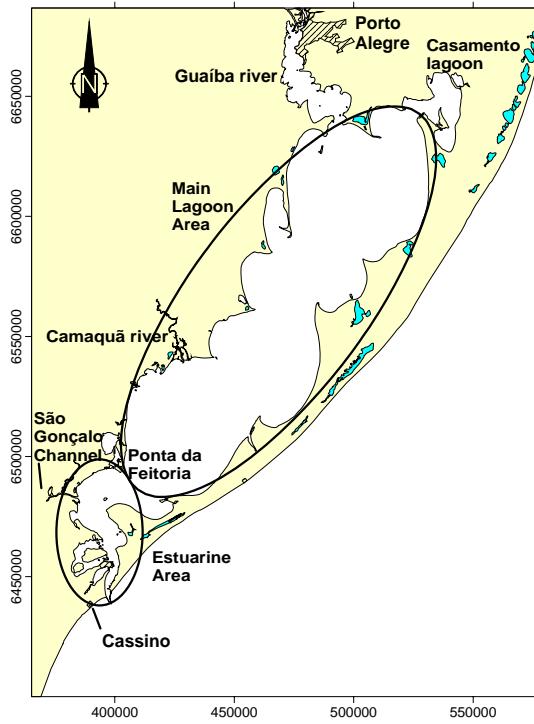


Figura 4: Mapa adaptado da lagoa dividida conforme divisão proposta por Delaney (1965). Coordenadas em metros (UTM).

A porção central de todo o sistema é formada pela Lagoa dos Patos. A lagoa é composta por quatro grandes sacos separados por pontões de areia com profundidades médias de 1 metro. O eixo maior é coincidente com a orientação NE-SW, paralelo à linha de costa e aos ventos dominantes. Suas águas são predominantemente doces. A profundidade média da laguna é de 5 metros, e assim é classificada como rasa (Moller et al, 1996). A Lagoa drena uma bacia hidrográfica de aproximadamente 200.000 km² (incluindo a bacia da Lagoa Mirim) formada por rios com regime de vazão característico de médias latitudes: alta descarga no final do inverno e início da primavera seguido de baixa a moderada descarga durante o verão e o outono. Os principais contribuintes são os rios Camaquã e Guaíba. Valores médios anuais de vazão estão na ordem de 2000 m³/s com picos sazonais que variam desde 700 a 3000 m³/s na primavera (Moller et al, 2001). A porção norte é formada pelo rio Guaíba e a lagoa do Casamento.

A hidrodinâmica é influenciada principalmente pela ação de ventos e pelas descargas fluviais. A ação do vento na laguna pode ser observada através da diferença de nível gerada dentro da laguna e entre a laguna e o oceano. Moller et al (1996) concluíram que a circulação na região do canal de acesso é provocada principalmente pela ação de ventos remotos (maré meteorológica), enquanto que a porção central do estuário é influenciada pela ação dos ventos locais, apesar da pouca influência da maré meteorológica, e no interior da lagoa o vento local é o principal agente. O vento no interior da lagoa favorece o mecanismo de set-up e set-down (Fernandes et al, 2004) promovendo trocas de águas entre o continente e o oceano.

A ação do vento sobre todo o sistema, ou seja, atuando sobre a laguna, o estuário e sobre a plataforma continental provoca efeitos distintos, gerando padrões de circulação característicos ao ambiente. O vento NE atuando no corpo da lagoa causa empilhamento (set-up) de água na área localizada próxima a Ponta da Feitoria (Figura 4) e consequente rebaixamento (set-down) na sua porção norte, enquanto que na plataforma continental, devido ao transporte de Ekman, força que atua defletindo o escoamento a 90 graus a esquerda (hemisfério sul) do agente forçante (vento), provoca um rebaixamento do nível de água na costa, gerando assim um gradiente de pressão entre o oceano e a lagoa, promovendo uma circulação em direção ao oceano. Durante a ação de ventos SW, característicos de passagens de frentes frias, com períodos de 6 a 11 dias dependendo da estação do ano (verão e inverno respectivamente), gera um efeito oposto ao vento NE. À medida que atua na lagoa, empilhamento de água no norte e rebaixamento do nível ao sul da lagoa é gerado, e com a consequente ação sobre a plataforma continental, empilha água na costa, promovendo um gradiente de pressão reverso ao vento NE e favorece a entrada de água no estuário (Fernandes et al, 2004).

A maré astronômica exerce pouca influência na dinâmica da laguna uma vez que amplitudes médias de 50 cm são encontradas e, por isso, é classificada como do tipo micro-maré (Daves, 1964). A maré é do tipo mista, apresentando a componente diurna (O1) como dominante (Figura 5).

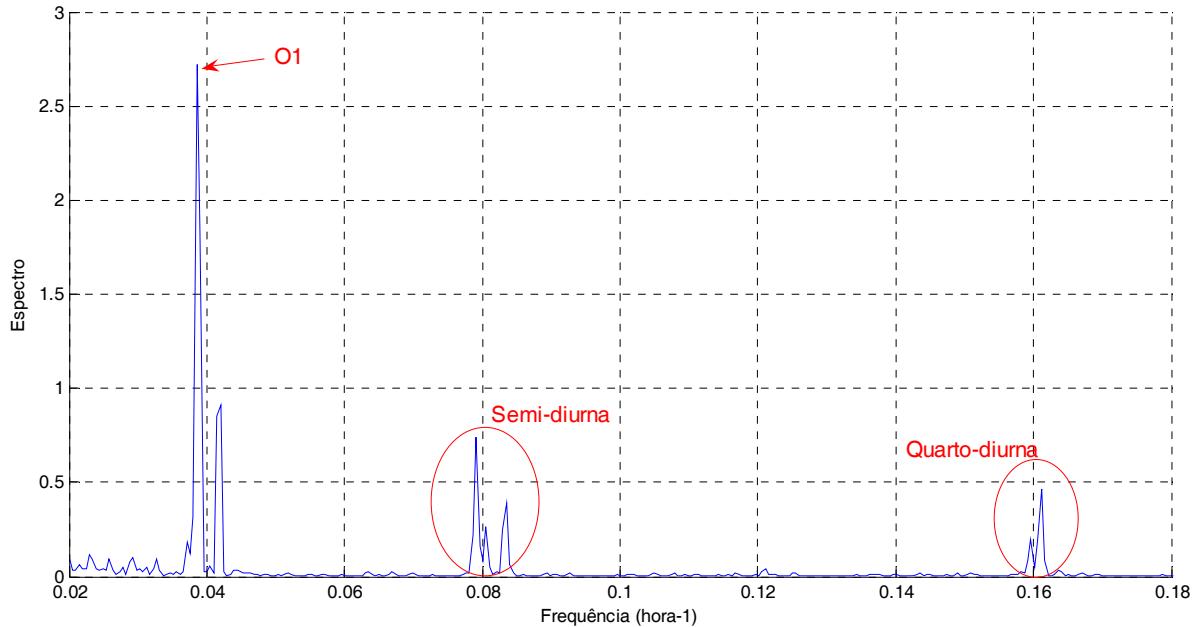


Figura 5: Espectro da maré astronômica obtida na estação Praticagem para o período de 01/05/99 a 30/09/99. Observa-se a dominância da constituinte O1.

Apesar de a maré astronômica ser pouco influenciante na circulação, a maré meteorológica associada a esta, exerce papel fundamental no que tange ao tipo de escoamento da região. A maré meteorológica está diretamente associada a grandes oscilações da superfície livre do mar provocadas por variações bruscas da pressão barométrica e ventos remotos associados ao transporte de Ekman. Essas oscilações possuem amplitudes na ordem de 0,50 a 1,00 m com períodos que variam de 3 a 20 dias (Figura 6). A maré meteorológica induz um gradiente de pressão entre a região da Ponta da Feitoria e o oceano adjacente, promovendo intrusão salina (associada a ventos do quadrante sul) ou expulsão de água do estuário (associada a ventos do quadrante norte).

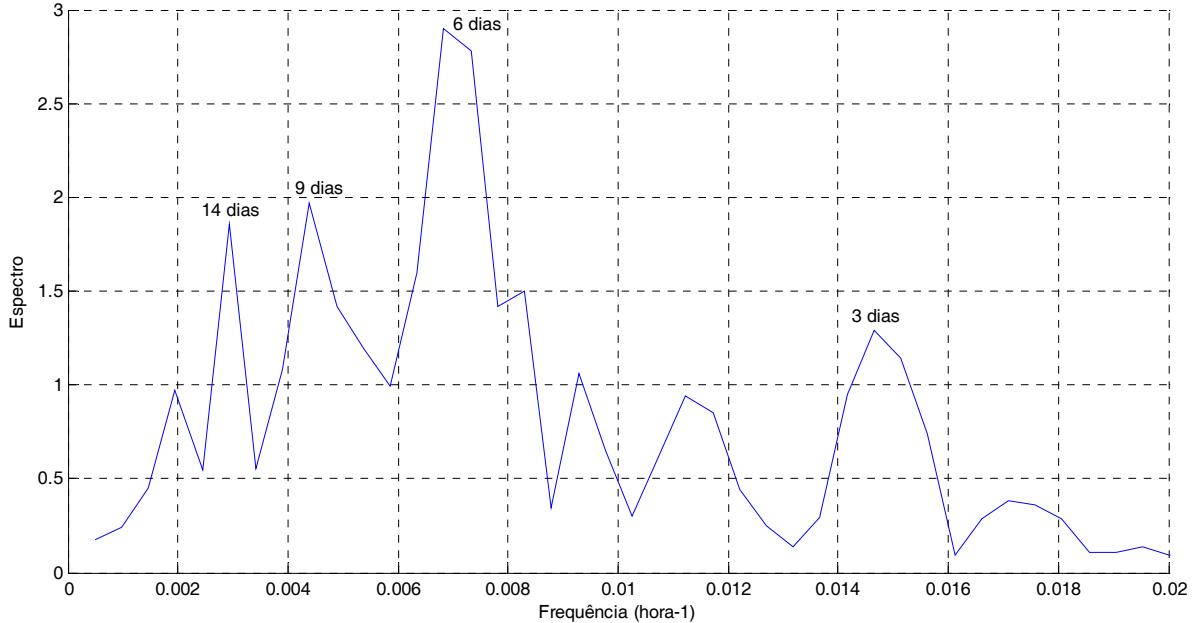


Figura 6: Espectro da maré meteorológica filtrada dos dados medidos na estação Praticagem para o período de 06/05/99 a 25/09/99. Observam-se os períodos com maior energia.

Estudos feitos por Moller et al (1996, 1999 & 2001), Eliza et al (2001, 2002, 2004a, 2004b & 2004c), mostram que na região a influência de fenômenos meteorológicos, tais como frentes frias, são as forçantes responsáveis pelas maiores alterações no padrão hidrodinâmico da região. A escala temporal de entrada de frentes frias no sistema varia de 6 (inverno) a 11 dias (verão) (Moller et al, 1996).

Devido à reduzida influência da maré astronômica, a distribuição da salinidade não acompanha as variações da maré, mas sim está correlacionada com a ação dos ventos e variações das descargas fluviais na escala de horas até semanas. O estuário da Lagoa dos Patos apresenta grande variabilidade em relação à salinidade, variando de 0 a 34 ppm. A intensidade do gradiente vertical de salinidade e o limite da penetração salina dependem da descarga fluvial e da ação dos ventos. As baixas descargas fluviais (verão e outono) e os ventos SE e SW promovem a entrada de água salgada no estuário, podendo penetrar até 150 km para dentro da lagoa. Em contraste, ventos NE e altas descargas fluviais reduzem显著mente a salinidade do estuário, podendo permanecer dias com água doce, tendo a zona de mistura do estuário completamente transferida para a plataforma continental adjacente.

Enquanto que as características da circulação no oceano profundo da parte adjacente ao Atlântico Sul até a costa do Sul do Brasil são bem conhecidas e documentadas,

a circulação sobre a plataforma continental, entre a corrente do Brasil e a costa, ainda é virtualmente desconhecida. Estudos desenvolvidos no foco de analisar a hidrodinâmica na região da plataforma continental sugeriram que em todas as estações do ano, existia na região águas provenientes dos trópicos, indicando a presença de uma dominância de correntes em direção ao sul. E, em alguns modelos implementados para a região, também simularam uma forte tendência de haver correntes do quadrante sul, podendo ser invertida somente quando na ação de ventos fortes do quadrante sul, ou seja, associadas a frentes frias (Zavialov et al, 2002).

4. METODOLOGIA

A metodologia aplicada é a utilização do módulo 2DH do SisBahia, sigla representativa de Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, conjunto de modelos desenvolvidos pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (AECO) do Programa de Engenharia Oceânica (PenO) e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da COPPE/UFRJ. Na base do SisBahia podem-se encontrar os seguintes modelos: hidrodinâmico, transporte advectivo-difusivo euleriano, transporte advectivo-difusivo lagrangeano, qualidade de água e geração de ondas. Para o desenvolvimento desse trabalho, os modelos hidrodinâmico e de geração de ondas foram utilizados.

Com o modelo hidrodinâmico, resultados temporais de elevação, de tensões de atrito no fundo devido às correntes e de vazões na seção da embocadura foram gerados com a finalidade de analisar o comportamento da circulação perante a ação dos agentes externos. Mapas de correntes para os cenários típicos de circulação também foram criados. Além dos mapas de correntes, foi gerado um mapa de velocidades residuais para todo o período modelado.

O modelo de geração de ondas foi utilizado para gerar as tensões de atrito no fundo devido à ação de ondas geradas pelo vento local no corpo lagunar.

O modelo a ser utilizado para a modelagem computacional depende fortemente dos objetivos do estudo desejado. Além desse aspecto, o conhecimento da estrutura hidrosalina, da morfologia do estuário e da disponibilidade de dados de campo também são fatores importantes na escolha de um modelo.

No domínio deste trabalho a finalidade é caracterizar o escoamento sobre a ação de agentes externos (ventos e vazões), enquanto que aspectos relativos a estratificação e a distribuição salina no estuário não serão tratados. Assim, o modelo de circulação hidrodinâmica SisBAHIA foi escolhido para realizar a modelagem numérica devido a sua larga empregabilidade e a disponibilidade de suporte no programa de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ.

O conceito de modelagem envolve a utilização de aproximações que simplificam o problema estudado, centrando a atenção nos principais fenômenos que atuam no corpo

d'água. No caso em estudo, o interesse está na previsão da circulação hidrodinâmica da Lagoa dos Patos e da plataforma continental sob influência das marés astronômica e meteorológica, dos ventos e das vazões dos rios Guaíba, Camaquã e do Canal São Gonçalo.

A formulação completa dos modelos empregados, trabalhos desenvolvidos e o manual de utilização estão descritos no site www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

4.1. Domínio e estratégia de modelagem

O domínio de modelagem exerce uma função primordial no que tange na concretização dos objetivos traçados para qualquer trabalho. É fundamental a sua correta definição para reproduzir os fenômenos desejados. Assim, o domínio definido para a Lagoa dos Patos está mostrado na Figura 7. Foram definidos como contorno de terra (contorno fechado) os rios Guaíba (porção norte), Camaquã (porção central) e Canal de São Gonçalo (região estuarina) e, como contorno de mar (contorno aberto ou oceânico), a região da plataforma continental, numa área que abrange desde a cidade de Sarita (ao sul do mapa) até a cidade de Conceição se estendendo até a linha batimétrica de 50 metros. Este extenso contorno aberto foi definido para que não haja interferências das condições de fronteira sobre a região ao largo da praia de Cassino, onde é o foco deste trabalho.

Para a estratégia de modelagem da circulação hidrodinâmica da Lagoa dos Patos desenvolveu-se uma malha de cálculo de elementos finitos com diferentes densidades de pontos de cálculo a fim de reduzir o tempo computacional. Na plataforma continental, os elementos quadrangulares possuem diferentes tamanhos, que variam de $4.5 \times 7 \text{ km}^2$ adjacente ao contorno oceânico, a $150 \times 350 \text{ m}^2$ na embocadura do estuário. O estuário e a lagoa foram discretizados com elementos de $300 \times 600 \text{ m}^2$ e $4 \times 4 \text{ km}^2$ respectivamente.

Na Figura 7 é ilustrada a malha distribuída ao longo de todo o domínio de modelagem, ressaltando as regiões estuarina e ao largo da praia de Cassino, com uma discretização mais refinada. O intuito é identificar padrões de corrente que favorecem a expulsão de sedimentos da laguna para a plataforma continental até ao largo da praia de Cassino, onde se encontra um grande depósito de lama.

A malha de cálculo foi construída utilizando o aplicativo *ArgusOne* e foi discretizada em elementos finitos quadráticos possuindo 1054 elementos quadrangulares com 4699 nós (pontos de cálculo).

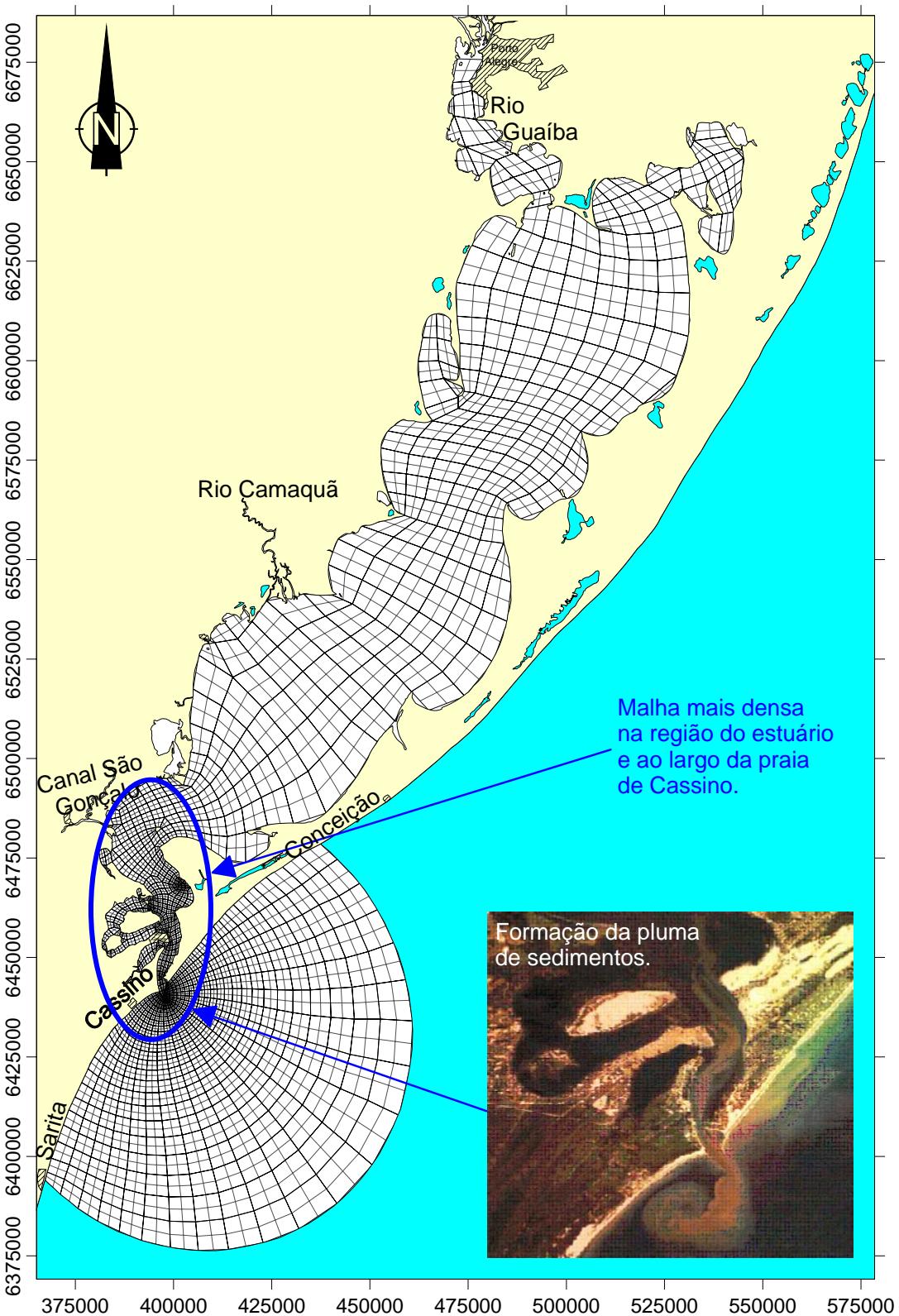


Figura 7: Domínio de modelagem da Lagoa dos Patos e da plataforma continental, indicando a região foco deste trabalho e a malha de elementos finitos com 1054 elementos quadrangulares e 4699 nós.

5. TRATAMENTO DOS DADOS DAS FRONTEIRAS

5.1. *Batimetria*

Os dados relativos a batimetria da área de estudo foram obtidos a partir da digitalização de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) através do aplicativo *Surfer*. Com este aplicativo obtiveram-se as cotas batimétricas relacionadas com as suas respectivas coordenadas em projeção Universal Transversa Mercator (UTM).

As cartas náuticas utilizadas foram:

Nº 2100: Costa Sul: de Mostardas a Rio Grande, escala 1:269516;

Publicada em 31 de outubro de 1964. Revisada em 15/10/1999; Sondagens reduzidas ao nível da baixa-mar média de sizígia;

Nº 2112: Costa Sul: de Rio Grande a Feitoria, escala 1:80000;

Publicada em 21 de março de 1965. Revisada em 30/09/2000; Sondagens reduzidas ao nível médio das alturas mínimas;

Nº 2140: Costa Sul: Lagoa dos Patos, escala 1:271653;

Publicada em 28 de novembro de 1965. Revisada em 30/09/2000; Sondagens reduzidas ao nível da baixa-mar média de sizígia.

A batimetria digitalizada das cartas náuticas representa as profundidades críticas as quais nenhuma embarcação corre o risco de atingir cotas mais rasas que estas, uma vez que já considera situações de baixos níveis de água. Para cada carta náutica existem informações dos níveis de referência altimétrica aos quais a batimetria foi levantada. Na Tabela 1 estão listados as estações e os níveis de referência altimétricos em relação ao nível médio do mar (Z_0) contidas nas cartas náuticas e a referência adotada no modelo (Z_0 Adotado).

Assim, o nível altimétrico adotado foi de 0,22 m para toda a batimetria da região de estudo. Esse valor foi somado aos dados digitalizados com a intenção de referenciá-los ao nível médio do mar. Após o processo de captura da batimetria com o aplicativo *Surfer* e a correção do nível de referência, os dados batimétricos puderam ser interpolados para toda a área de estudo, resultando no mapa batimétrico da Figura 8.

<i>Carta Náutica n°</i>	<i>Estação</i>	$Z_0 (m)$	Z_0 Adotado (m)
2100	Rio Grande	0.22	0.22
2112	Rio Grande	0.22	0.22
	Ponta da Feitoria	0.24	
2140	Praia do Araçá	0.34	0.22
	Capão da Moça	0.22	
	Arambaré	0.16	
	São Lourenço	0.35	
	Ponta da Feitoria	0.24	

Tabela 1: Níveis de referência indicadas nas cartas náuticas e os utilizados no modelo.

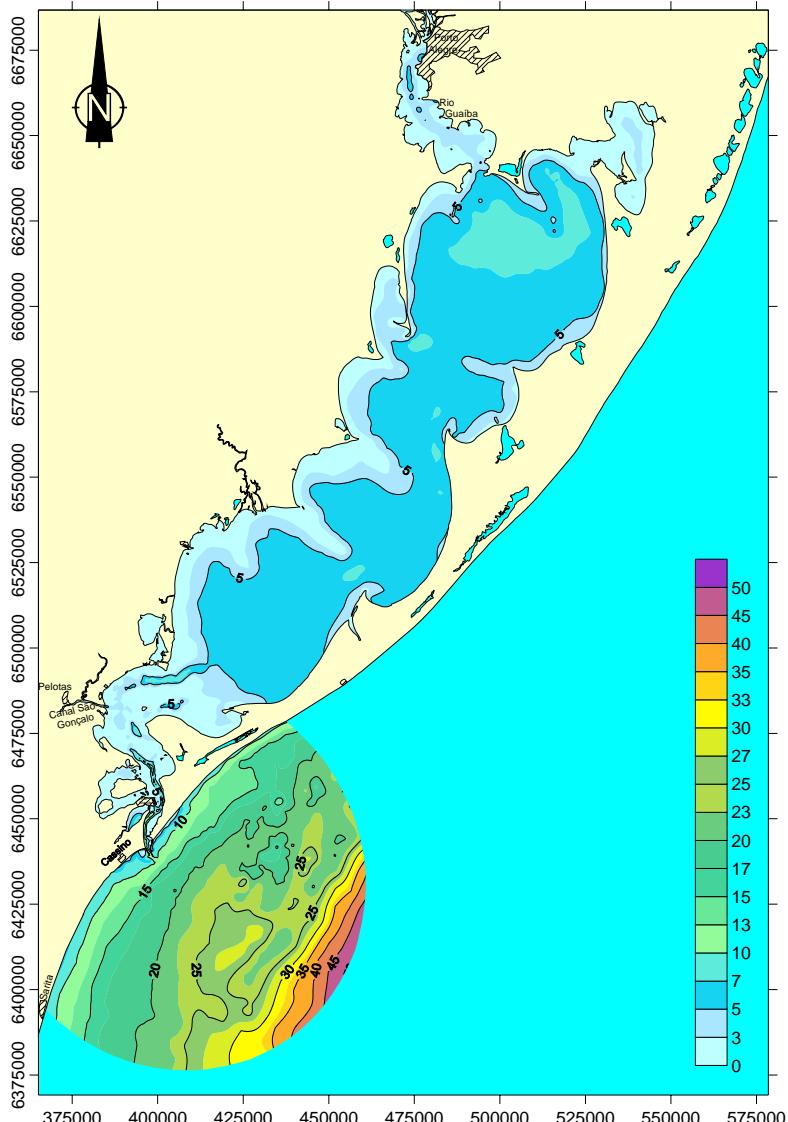


Figura 8: Batimetria do domínio de modelagem referenciada pelo nível médio do mar. Escala de cores e eixos em metros. Isóbatas espaçadas a cada 5 metros.

5.2. Rugosidade

A rugosidade pode ser especificada no modelo de forma variável em todo o domínio, podendo ser informada nó a nó ou especificada para determinadas regiões. A rugosidade tem a função de reproduzir as perdas de energia no escoamento de corpos hídricos devido à influência do atrito pelo fundo. Muitas vezes esse parâmetro é utilizado como um fator de calibração de modelos, com a intenção de se fazer reproduzir bem as correntes modeladas em relação às medidas.

O atrito no modelo SisBahia é parametrizado seguindo a lei quadrática (1), tendo Chézy como coeficiente de atrito (2). O parâmetro de rugosidade especificado no modelo é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ε) (Tabela 2).

$$\tau_i = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} U_i \quad [i = 1, 2] \quad (1)$$

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (2)$$

Terreno ou leito de terra

Leito com transporte de sedimentos	0.0070 m < ε < 0.0500 m
Leito com vegetação	0.0500 m < ε < 0.1500 m
Leito com obstáculos	0.1500 m < ε < 0.4000 m

Fundo de pedra ou rochoso

Fundo de alvenaria	0.0003 m < ε < 0.0010 m
Fundo de pedra lisa	0.0010 m < ε < 0.0030 m
Fundo de asfalto	0.0030 m < ε < 0.0070 m
Fundo com pedregulho	0.0070 m < ε < 0.0150 m
Fundo com pedras médias	0.0150 m < ε < 0.0400 m
Fundo com pedras	0.0400 m < ε < 0.1000 m
Fundo com rochas	0.1000 m < ε < 0.2000 m

Fundo de concreto

Fundo de concreto liso	0.0001 m < ε < 0.0005 m
Fundo de concreto inacabado	0.0005 m < ε < 0.0030 m
Fundo de concreto antigo	0.0030 m < ε < 0.0100 m

Tabela 2: Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo, ε , para uso no modelo 2DH do SisBahia (Rosman, 2001).

Neste trabalho esse dado foi considerado uniforme em todo o domínio de modelagem e foi usado como um fator de calibração das correntes medidas na estação Praticagem. Na Tabela 3 estão listados os coeficientes utilizados para se chegar a melhor reprodução.

Modelos	ϵ (m)
Teste 1	0.03
Teste 2	0.02
Teste 3	0.005
Teste 4	0.0005
Teste 5	0.00005

Tabela 3: Coeficientes de rugosidade utilizados nesse trabalho como parâmetro de calibração das correntes em Praticagem.

O coeficiente de rugosidade que melhor reproduziu as correntes medidas na estação Praticagem foi o do modelo Teste 5. Observa-se a necessidade de especificar um fundo muito liso para que se possa adquirir os melhores resultados dos modelos.

5.3. Dados maregráficos

Os dados maregráficos disponíveis compreendem um conjunto de 5 meses de medições da variação da superfície livre do mar com freqüência horária no cais da Praticagem. Como não existe nenhum dado disponível de medições de maré realizadas na plataforma continental que pudesse ser utilizado como condição de contorno oceânico para o período em análise, os dados maregráficos utilizados na fronteira aberta do modelo foram calculados a partir da soma de duas séries de elevações obtidas a partir de constantes harmônicas (maré astronômica) e de dados filtrados da série de elevação medida na estação Praticagem (maré meteorológica).

A maré astronômica foi constituída de oito componentes harmônicas fornecidas pelo modelo de solução em escala global de maré FES99 (Lefèvre et al, 2002). A partir desse modelo, pode-se obter amplitude e fase de cada uma das oito componentes do espectro da maré (O1, Q1, P1, K1, M2, N2, S2 e K2) para qualquer região do globo, gerando resultados em uma malha com espaçamento de 0,25 graus de latitude e 0,25 graus de longitude. Para a obtenção dos dados na fronteira do modelo da Lagoa dos Patos, resultados foram gerados numa região abrangendo desde a latitude 31°15' até 33°30' sul e longitude 50° até 52°30' oeste, totalizando 89 dados disponíveis de amplitude e fase para cada componente, conforme Figura 9.

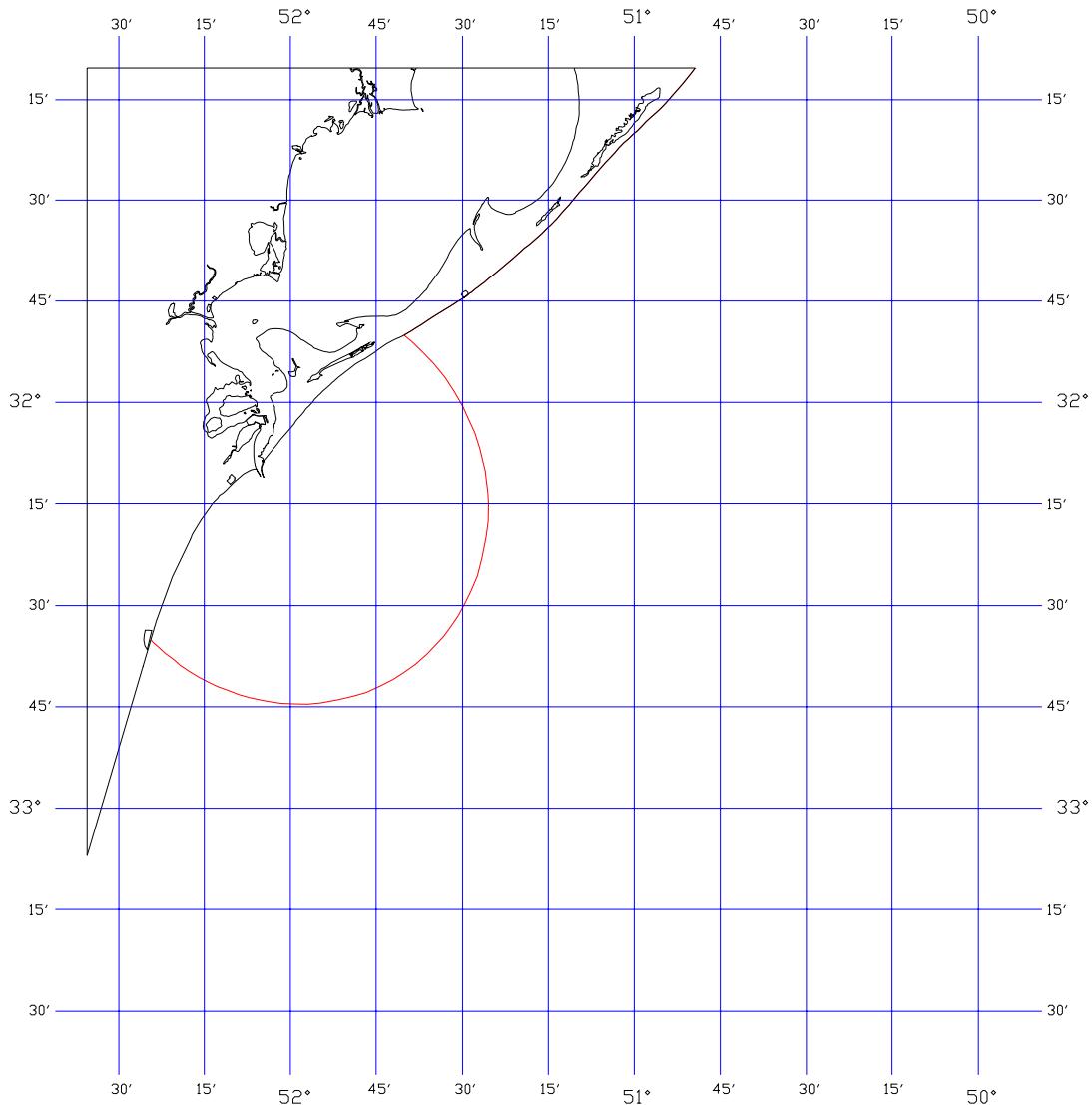


Figura 9: Malha espaçada de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ do modelo de solução em escala global de maré FES99 (linhas azuis) identificando a região utilizada para interpolação dos dados para os nós da fronteira aberta (linha vermelha).

Com esses dados disponíveis pode-se interpolar as amplitudes e as fases de cada componente para cada um dos 43 nós da fronteira oceânica do modelo. De posse das componentes harmônicas, as séries temporais de elevação, que representam a maré astronômica, foram geradas a partir da função *t_predic* pertencente ao pacote de ferramentas de análise de maré *T_Tide* (Pawlowicz et al, 2002) em ambiente Mathlab. Essa ferramenta gera a previsão da maré para o período escolhido, que nesse caso foi de 06/05/99 00:00 à 25/09/99 23:00 (Figura 10).

Dessa forma, a maré astronômica foi especificada. A maré astronômica apresenta amplitudes máximas de 0.33 m na sizígia e 0.26 m na quadratura. A série de elevação calculada para o nó central da fronteira oceânica está ilustrada na Figura 11.

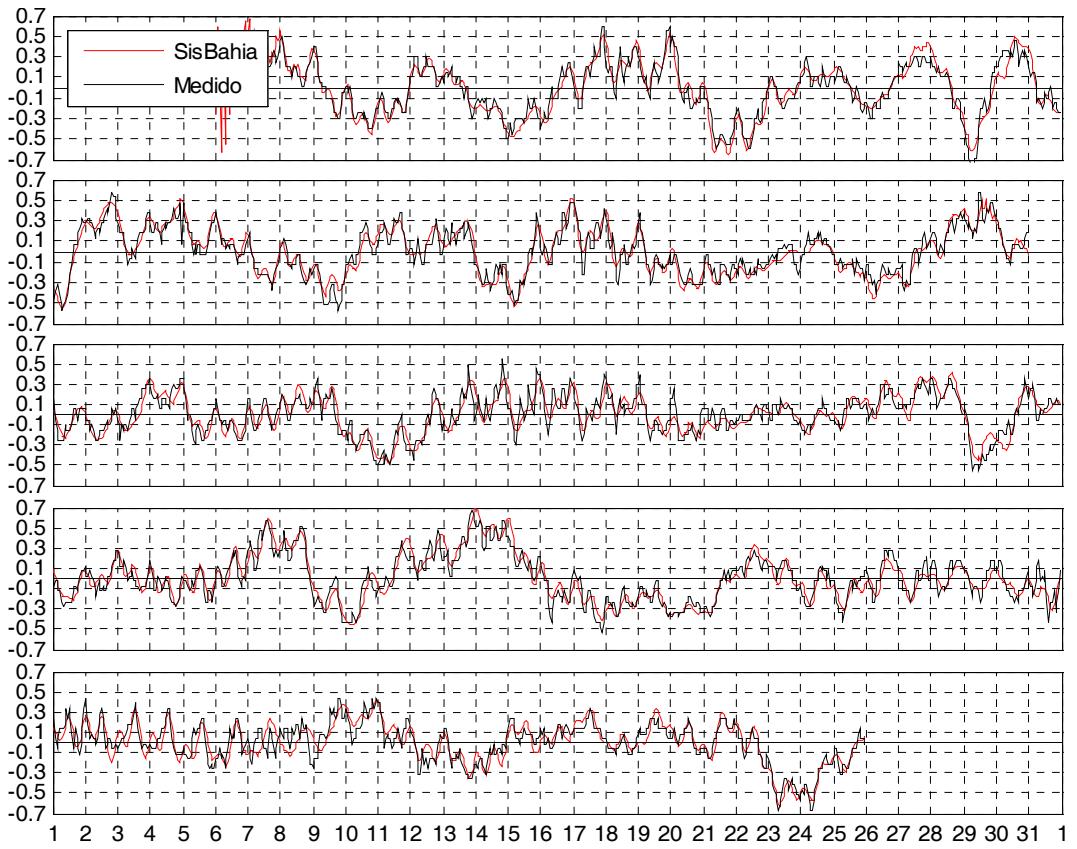


Figura 10: Comparação das séries de elevações modeladas pelo Teste5 (SisBahia – linha vermelha) e medidas na estação Praticagem (linha preta). A maré foi gerada a partir do ToolBox T_Tide (t_predic). Eixo x em dias e y em metros.

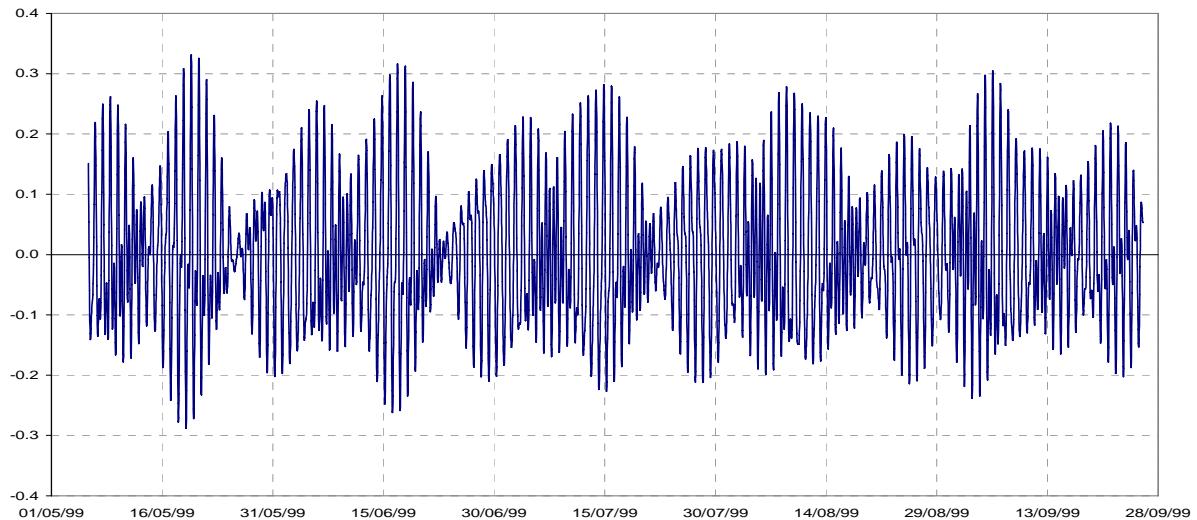


Figura 11: Série de elevação calculada a partir das componentes harmônicas para o nó central da fronteira oceânica (nó 43).

A maré meteorológica exerce forte influência na hidrodinâmica da região, e para podermos reproduzir esse efeito foram utilizados os dados medidos na estação Praticagem. Nesses dados estão gravados variações do nível da superfície do mar, ou seja, estão presentes oscilações de baixa e alta freqüência. Para identificar as ondulações de baixa freqüência o filtro Thompson foi configurado para retirar freqüências acima de 5.78×10^{-6} Hz (dois dias de período), conforme visualizado na Figura 12.

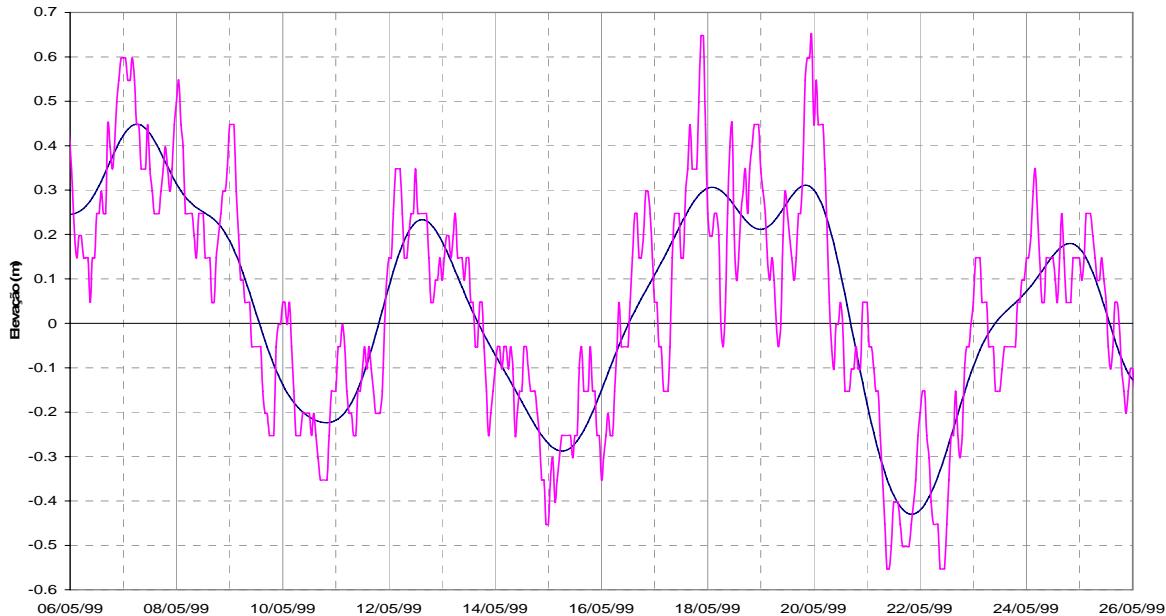


Figura 12: Série de elevação original (20 do total de 153 dias) dos dados medidos na estação Praticagem (linha magenta) mostrando a ação do filtro Thompson utilizado para obtenção da maré meteorológica (linha azul).

Desta forma, obteve-se um registro da maré meteorológica na estação Praticagem. Essa estação é localizada no interior do estuário e está na zona abrigada, isso significa que existe uma atenuação da energia das ondas pelo efeito do estrangulamento da seção da embocadura provocado pela ação dos molhes (Figura 13). Como o objetivo é encontrar um sinal que possa ser representativo da maré meteorológica na plataforma continental, esse registro foi amplificado. Para saber se essa amplificação é satisfatória, o novo sinal foi especificado como condição de contorno oceânico para um novo modelo e comparou-se a energia da onda simulada na estação Praticagem com a maré filtrada nesta mesma estação (Figura 14).

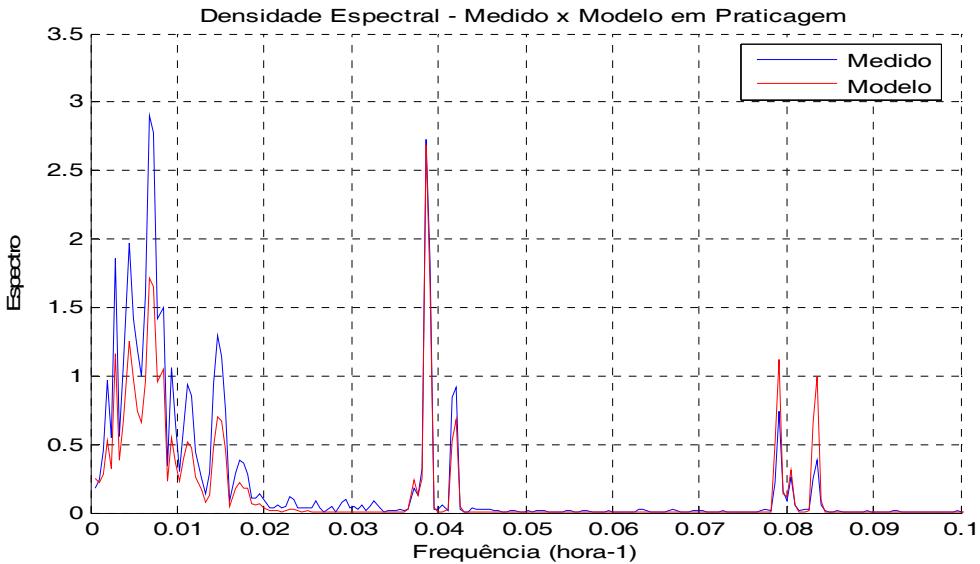


Figura 13: Comparação entre os espectros dos dados medidos (linha preta) e modelados (linha azul) na estação Praticagem. Maré meteorológica e astronômica sem amplificações ou reduções.

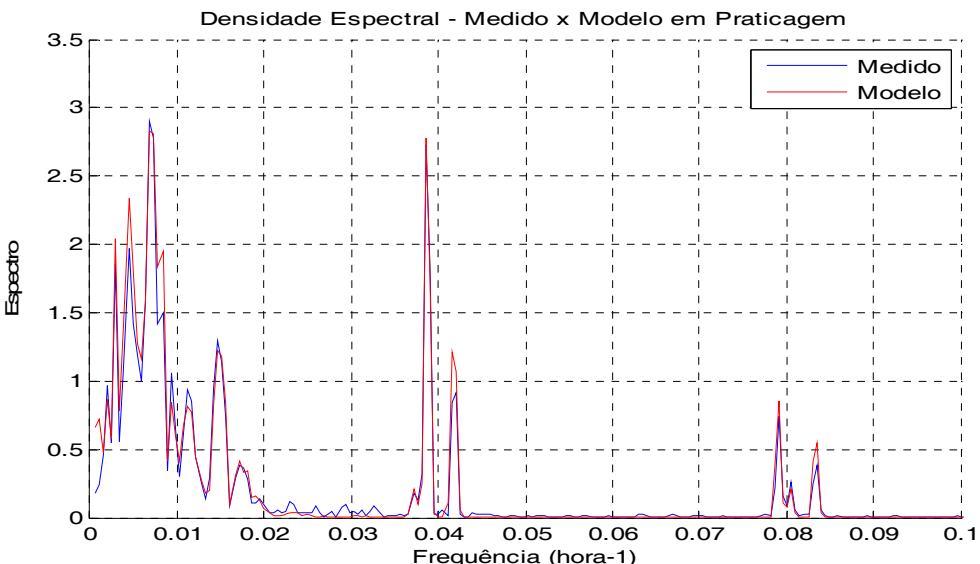


Figura 14: Comparação entre os espectros dos dados medidos (linha azul) e modelados (linha vermelha) na estação Praticagem. Maré meteorológica amplificada e componente semi-diurna reduzida.

De acordo com Zavialov et al (2002), ao analisar dados medidos de correntes para o período de março a agosto de 1997 na plataforma continental, na batimétrica de 50 metros, e correlacionando-os com dados de ventos para o mesmo período, constatou que a influência dos fenômenos meteorológicos com períodos de 2 a 10 dias era responsável por 50% das intensidades das correntes, enquanto que 30 a 20% eram devidas a fenômenos com períodos maiores que 10 dias, e a maré astronômica, componentes diurna e semi-diurna eram responsáveis por 20 a 10%.

Na região não existe nenhuma informação a respeito da diferença de fase dessa onda longa (maré meteorológica). Ela possui comprimento na ordem de 10^6 m para um período de dois dias e se propaga em condições de águas rasas. Como o seu comprimento é maior que a extensão da fronteira oceânica (ordem de 10^5 m), o seu efeito é uma constante subida e descida do nível médio do mar apresentando pouca diferença de fase. Assim, arbitrou-se que o registro da maré meteorológica já amplificada fosse diretamente somado às séries de elevações (maré astronômica) calculadas para cada nó da fronteira oceânica. Com isso estaria reproduzindo bem o comportamento hidrodinâmico no estuário e gerando correntes na plataforma devido aos efeitos da maré astronômica e da ação dos ventos locais.

Dessa forma, as séries de elevação a serem prescritas como condições de contorno aberta foram especificadas. Na Figura 15 está representada a série de elevação para o nó 43.

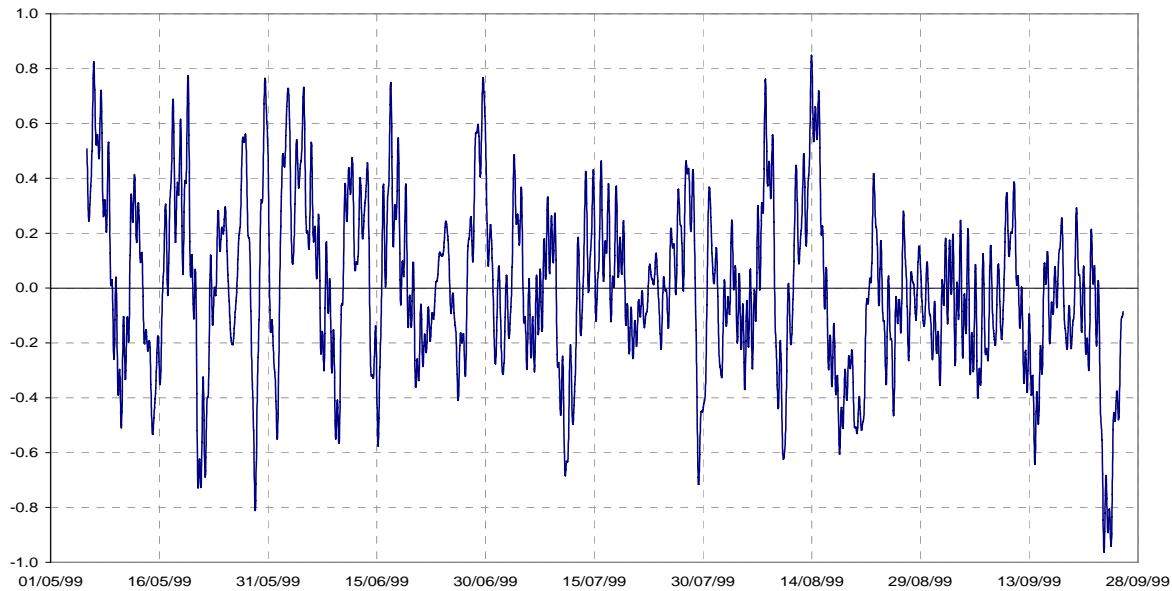


Figura 15: Série de elevação prescrita para o nó 43 da fronteira aberta oceânica.

Sabe-se que a ação dos ventos sobre a plataforma continental é capaz de gerar o mecanismo de set-up e set-down, promovendo trocas de água entre a lagoa e o oceano. Com o intuito de verificar se o vento, atuando sobre a superfície da área da plataforma continental do modelo, fosse capaz de gerar esse mecanismo e, garantindo a não duplicação dos fenômenos ao se adicionar a maré meteorológica na fronteira aberta, um modelo foi gerado tendo somente os ventos medidos como agente forçante da hidrodinâmica. Ao se comparar as elevações medidas e modeladas, assim como o seu espectro, notamos uma fraca influência dos ventos na geração das elevações em Pratigagem

(Figura 16). Assim, pode-se dizer que ao somar a maré meteorológica ao contorno oceânico não haverá duplicação de fenômenos.

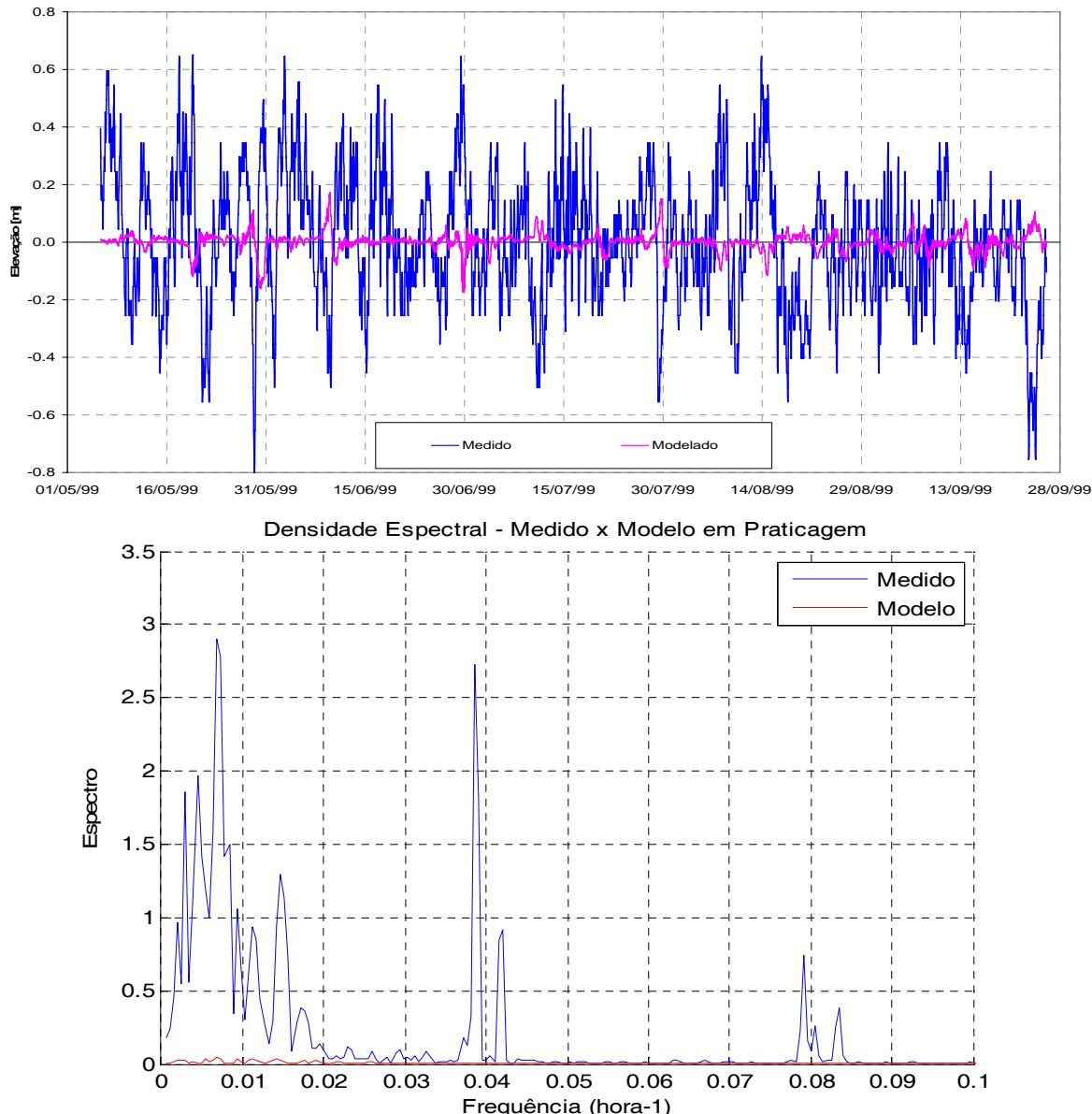


Figura 16: Elevação e espectro das elevações medidas e modeladas. Não há significativa influência da ação dos ventos sobre a plataforma continental especificada no modelo no mecanismo de set-up e set-down.

5.4. Dados de ventos

Os dados de ventos podem ser inseridos no modelo de forma uniforme ou variável no tempo e no espaço, e para se definir qual tipo a ser usado, depende diretamente da disponibilidade de estações de medição na região de estudo. Os dados de intensidade e direção de ventos utilizados na modelagem foram obtidos através de medições horárias

durante o período de 01/05/99 a 30/09/99 na estação Praticagem, sendo esta estação a única disponível na região (Figura 17). Então o modelo foi alimentado com dados de ventos variáveis no tempo, mas uniformes no espaço.

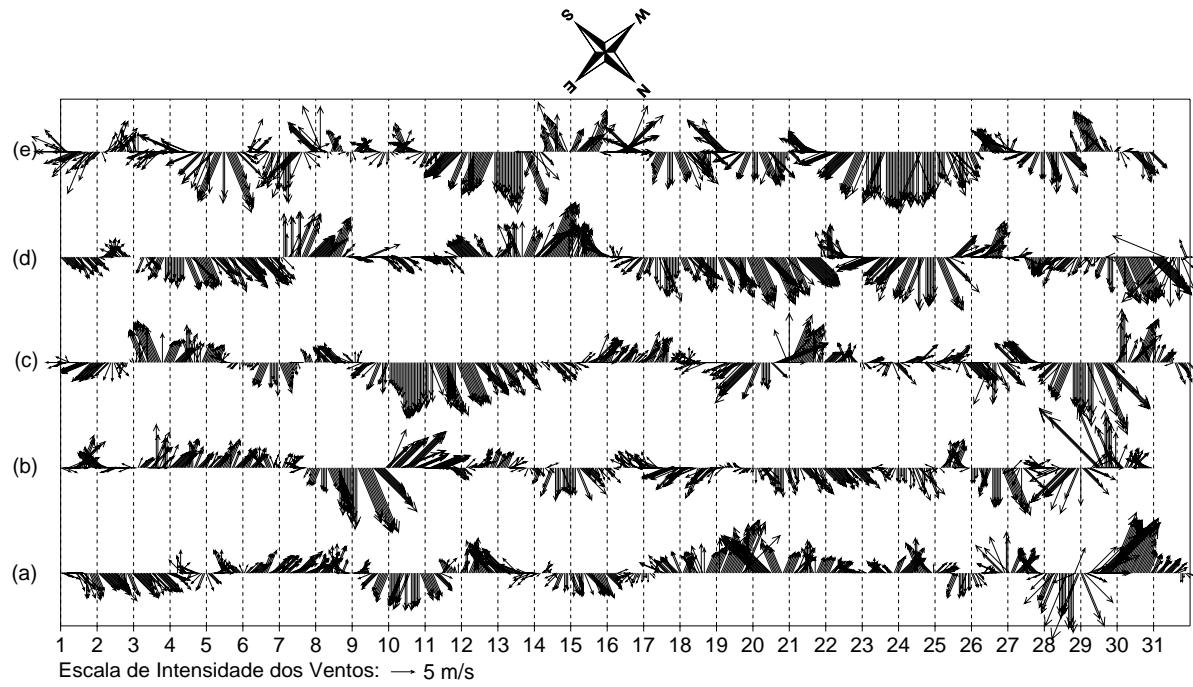


Figura 17: Série de intensidade e direção de ventos medidas na estação Praticagem durante os meses de maio (a), junho (b), julho (c), agosto (d) e setembro (e) de 1999.

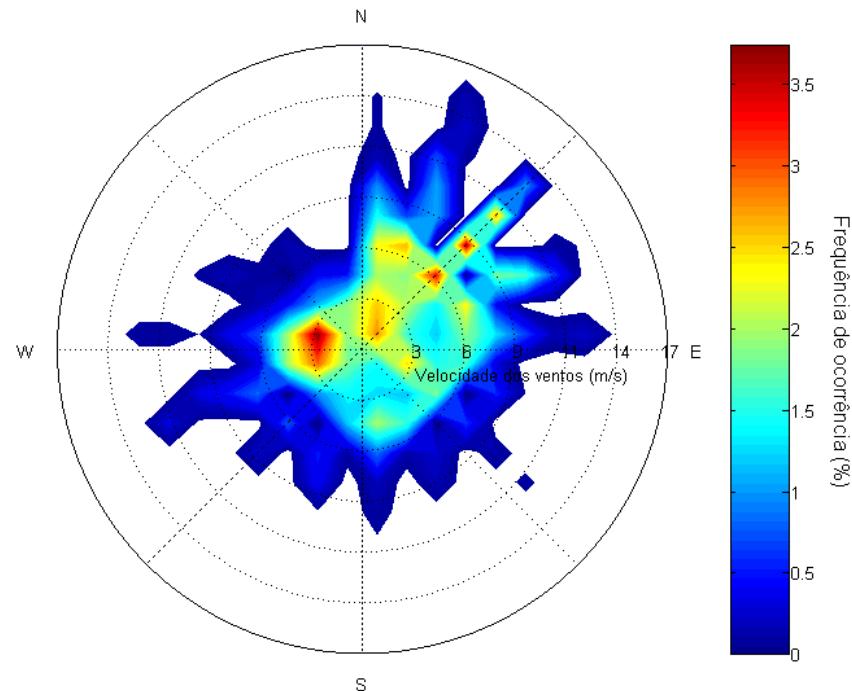


Figura 18: Gráfico polar das freqüências de ocorrência da série temporal de ventos fornecida ao modelo como dados de entrada.

De acordo com Moller et al (2001), ventos do quadrante N-E são dominantes ao longo de todo o ano. Durante o verão e a primavera existe uma influência de ventos E atuando como brisas marítimas. Os ventos do quadrante S-W têm a sua influência aumentada no outono e no inverno como frentes frias que se tornam mais frequentes na região. De acordo com a Figura 18, podemos notar a forte influência dos ventos NE e NNE atingindo picos de até 16,80 m/s de intensidade, a presença de ventos E, principalmente no início da primavera e uma notável ocorrência de ventos W, porém de fraca intensidade. Os ventos SW, para esse período, apresentaram pouca periodicidade na região, com ocorrência de apenas 4 grandes eventos.

5.5. Vazões fluviais afluentes

Os dados de vazões de rios afluentes na Lagoa dos Patos foram obtidos através do site da Agência Nacional de Águas (ANA – www.ana.gov.br). Para construir a série de vazões do rio Guaíba, contorno de terra ao norte do domínio de modelagem, foram somados as descargas dos rios Jacuí, Taquari e Caí obtendo assim uma série de vazões média diária para o período de 01/05/99 a 30/09/99 (Figura 19).

O rio Camaquã, afluente na região central da Lagoa dos Patos também foi incluído no domínio de modelagem (Figura 19). Em relação ao Canal de São Gonçalo, como não se pode obter dados medidos, adotou-se uma vazão parametrizada de 200 m³/s, conforme também assumido em VAZ (2003).

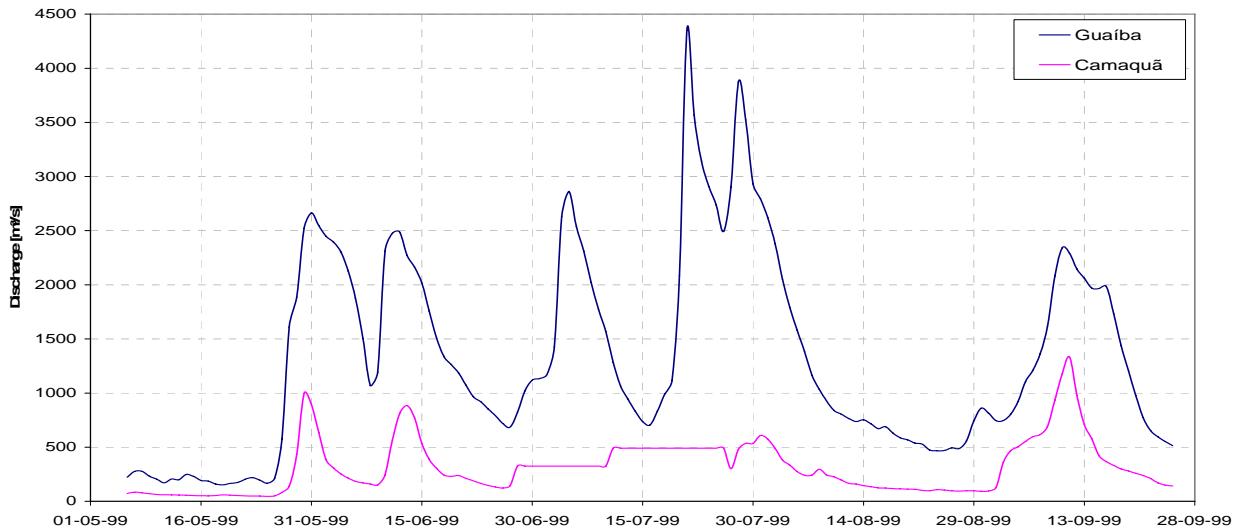


Figura 19: Série de vazões do rio Guaíba durante o período de 01/05/99 a 30/09/99.

6. CALIBRAÇÃO

O processo de calibração pode ser definido como a etapa em que parâmetros do modelo são ajustados com o intuito de reproduzir os dados medidos. Esse processo depende fortemente da disponibilidade de dados de campo e da experiência do modelador. Para o período em análise, dados de elevações horárias em 4 estações para os 5 meses de simulação estão disponíveis, mas em relação à correntes, somente uma semana compreendida entre os dias 02 e 09 de agosto de 1999 está disponibilizada (Figura 20). Esses dados foram disponibilizados em dois níveis na coluna d'água, um a 3 metros e o outro a 10 metros da superfície livre na estação Praticagem. As correntes medidas estão orientadas no sentido longitudinal do canal de acesso, em que as intensidades positivas indicam escoamento em direção ao interior do estuário e negativas em direção ao oceano.

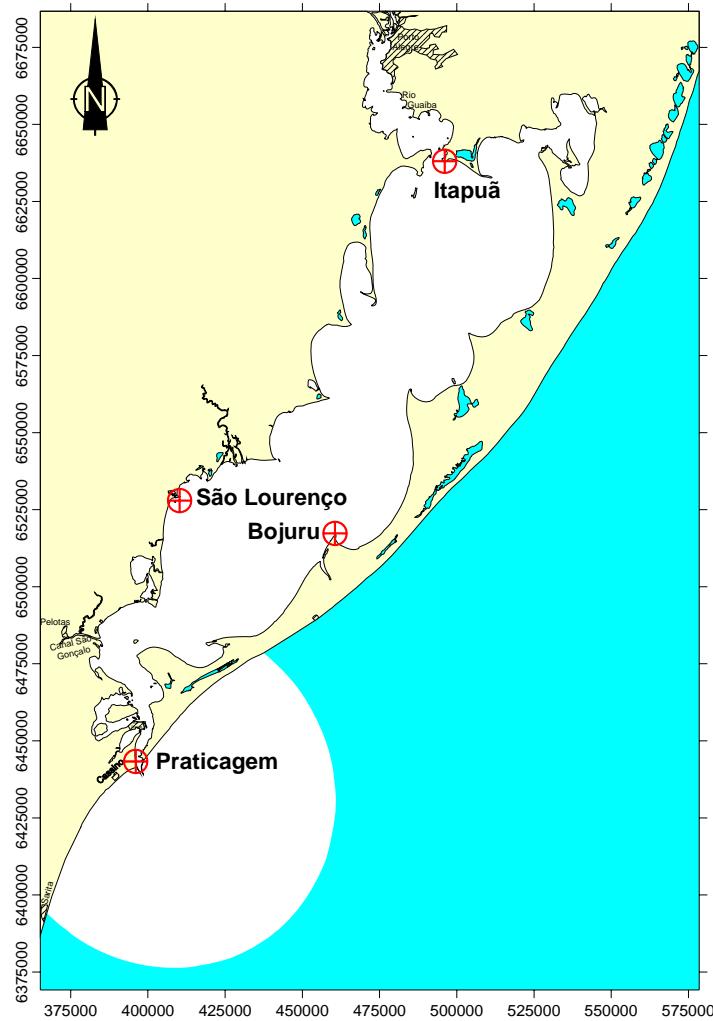
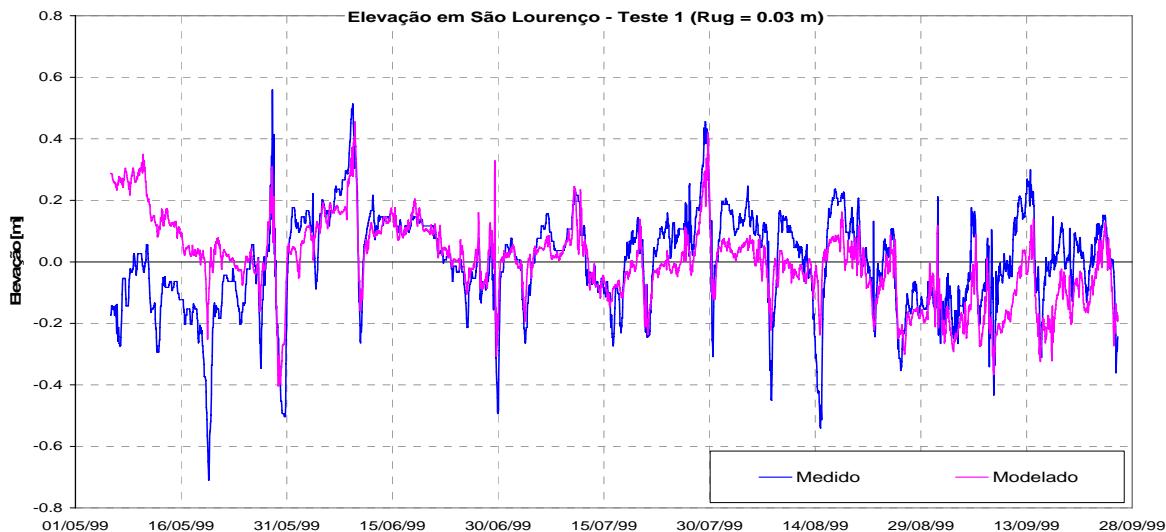


Figura 20: Localização das estações de medições das elevações (Praticagem, São Lourenço, Bojuru e Itapuã), de correntes e salinidade (Praticagem). Coordenadas em UTM.

O processo de calibração foi realizado variando a rugosidade do fundo conforme a Tabela 3, mantendo todas as condições de contorno, ou seja, ventos, marés e vazões para o período de 06/05/1999 a 25/09/1999. Resultados com intervalo de tempo horários foram gerados com o intuito de averiguar as mudanças nos padrões do escoamento.

Os modelos hidrodinâmicos foram executados com passo de tempo de 200 segundos, apresentando ganho médio de 200 vezes o tempo real com desempenho médio de 1 segundo por passo de tempo e número de Courant máximo e médio iguais a 13,8 e 2,9, respectivamente. O tempo computacional gasto foi de 13 horas e 30 minutos para todo o período modelado em um computador desktop com processador Pentium IV de 3,20 GHz e memória RAM de 2,00 GB.

A condição inicial de elevação, no primeiro modelo (Teste 1), foi especificada para o primeiro valor da série de elevações da fronteira aberta com o intuito de que não gere instabilidade no modelo. Os gráficos de comparação entre as elevações modeladas e medidas de todas as estações da Figura 21 mostram que a condição inicial de 52 cm perpetuou, aproximadamente, por 1 mês, ocasionando uma grande diferença entre os dados. Em relação à condição inicial de intensidade de correntes, essa foi prescrita como nula para todos os modelos utilizados.



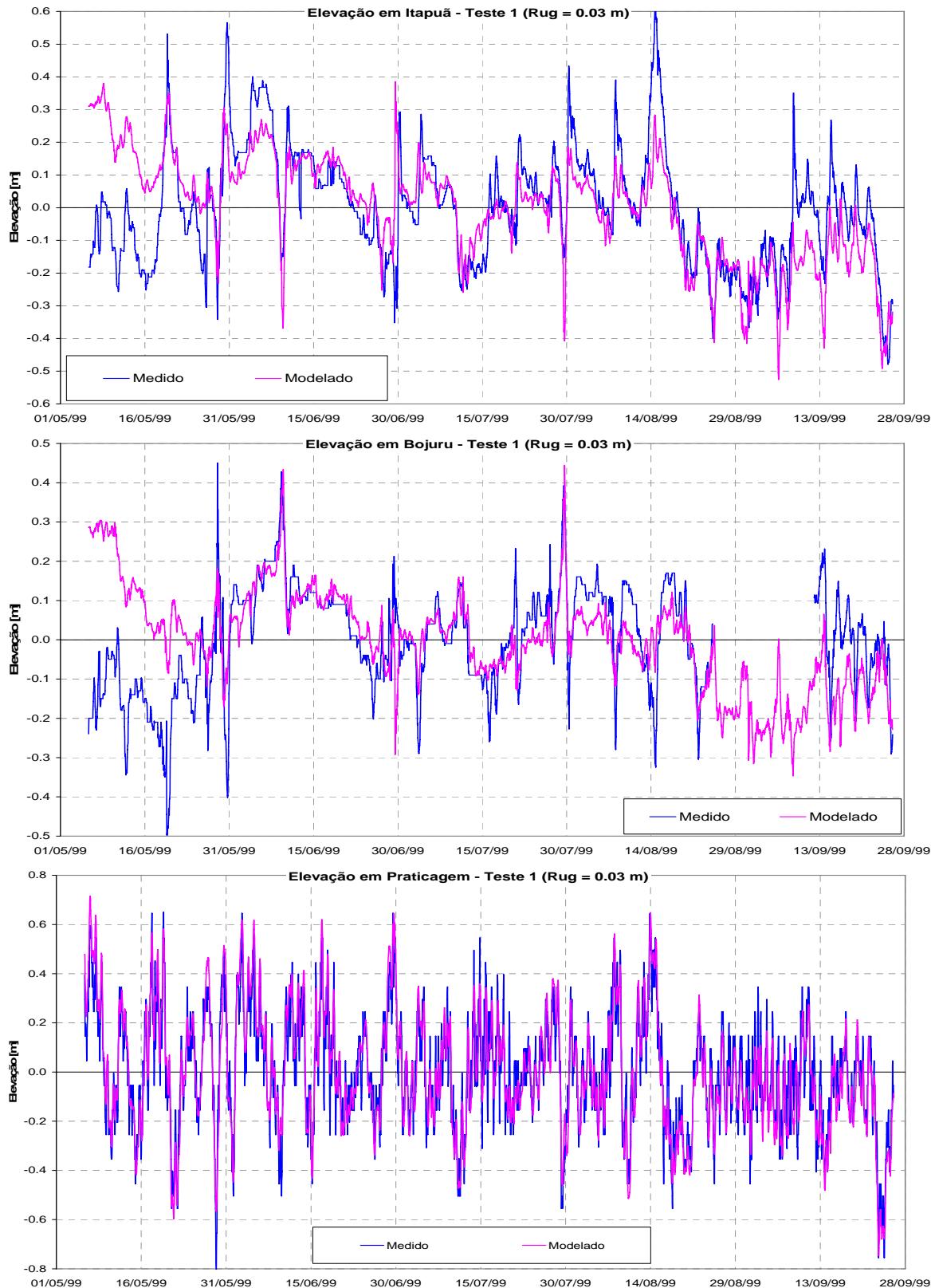


Figura 21: Série de elevações medidas (linha azul) e modeladas (linha magenta) para cada estação mostrando a influência da condição inicial de elevação no resultado do modelo. Condição inicial perpetua por aproximadamente 1 mês.

Ao se comparar as séries de correntes medidas e modeladas em Praticagem para o modelo Teste 1, verificou-se uma má reprodução das correntes. As correntes estão subestimadas. Como o modelo empregado é promediado na vertical, o objetivo da calibração das correntes modeladas é que seja reproduzida na média das medidas, ou seja, coincidir entre as duas curvas (azul e vermelha). Essa má representação das correntes pode ser consequência da alta rugosidade especificada.

Um novo modelo foi gerado com rugosidade de 0.02 m (Teste 2), porém a condição inicial de elevação foi prescrita como nula, com a finalidade de retirar a “memória” do modelo em relação a condição inicial de elevação. O resultado comparativo entre as elevações da estação São Lourenço e de correntes na estação Praticagem estão ilustrados nas Figura 23 e Figura 24. Os outros modelos, do Teste 3 ao Teste 5, seguiram as mesmas condições que as do Teste 2, porém variando a amplitude da rugosidade equivalente conforme a Tabela 3. Os resultados da comparação entre as correntes medidas e modeladas estão ilustradas nas Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

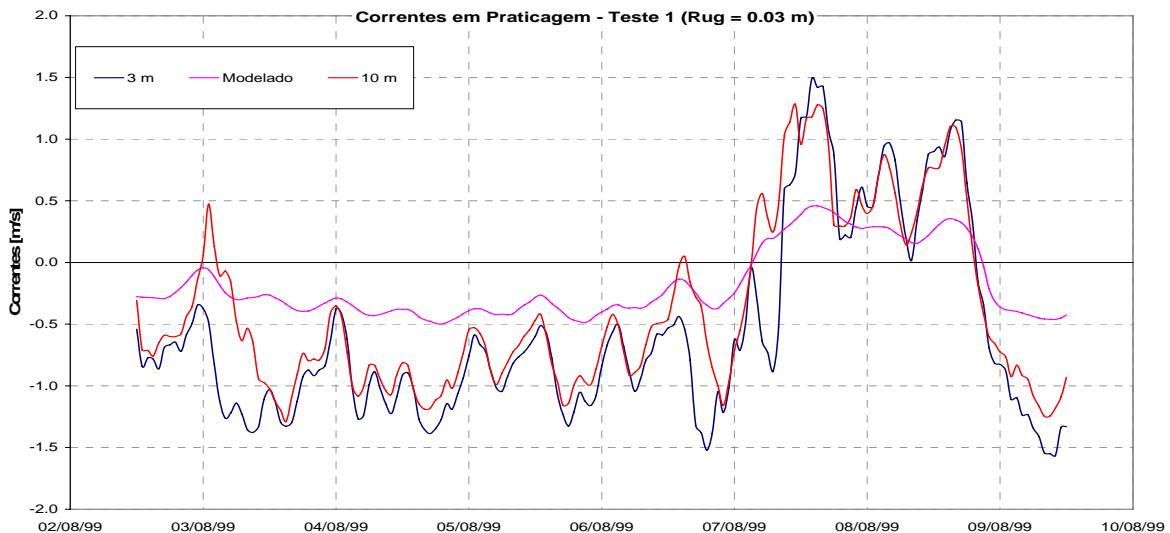


Figura 22: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 1 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.03 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.

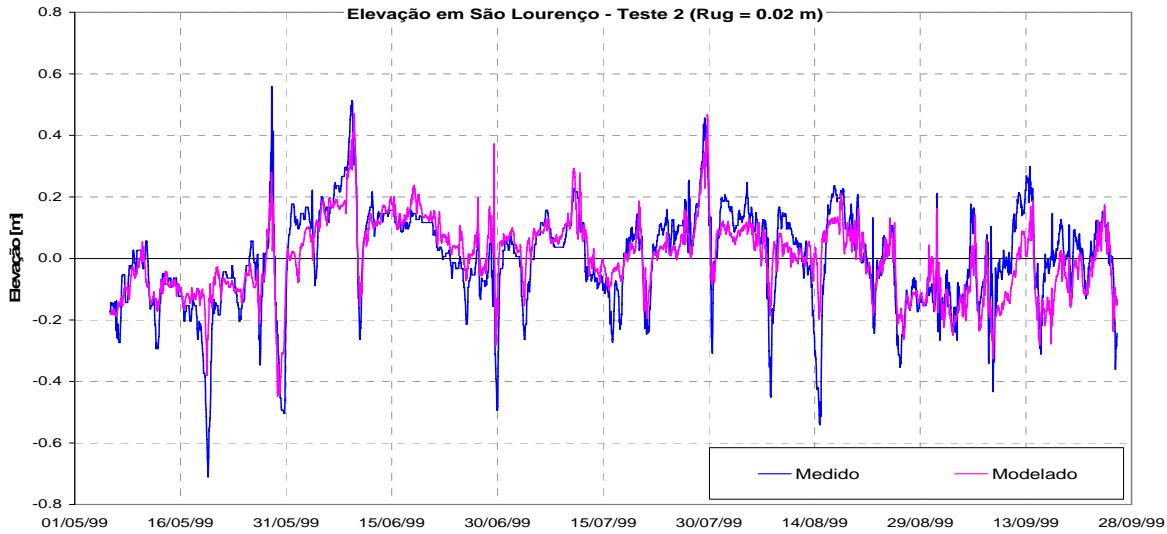


Figura 23: Comparação entre as elevações medidas e modeladas na estação São Lourenço. Observe a melhoria na série de elevação quando a condição inicial é especificada para zero.

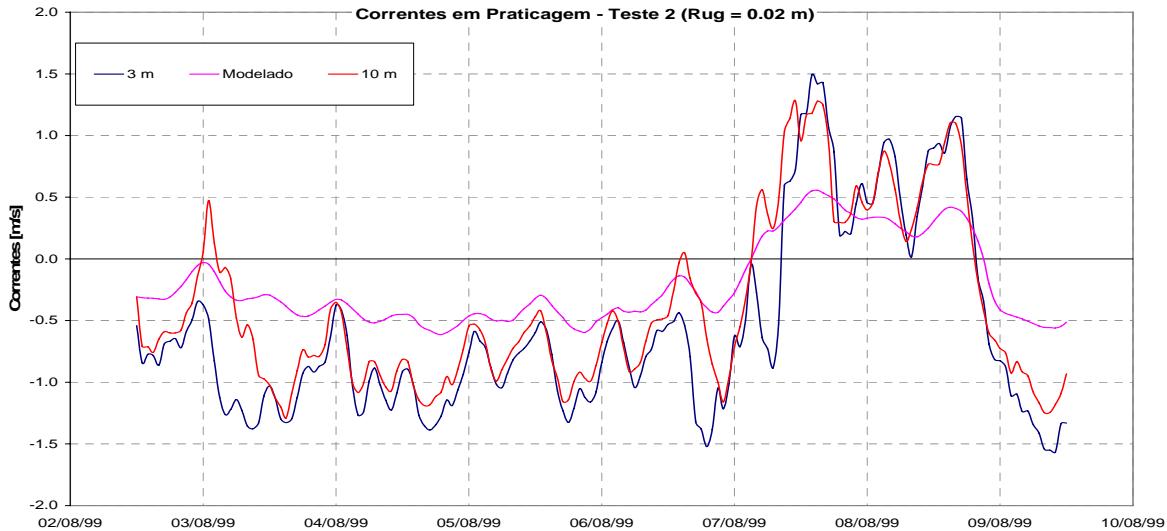


Figura 24: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 2 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.02 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.

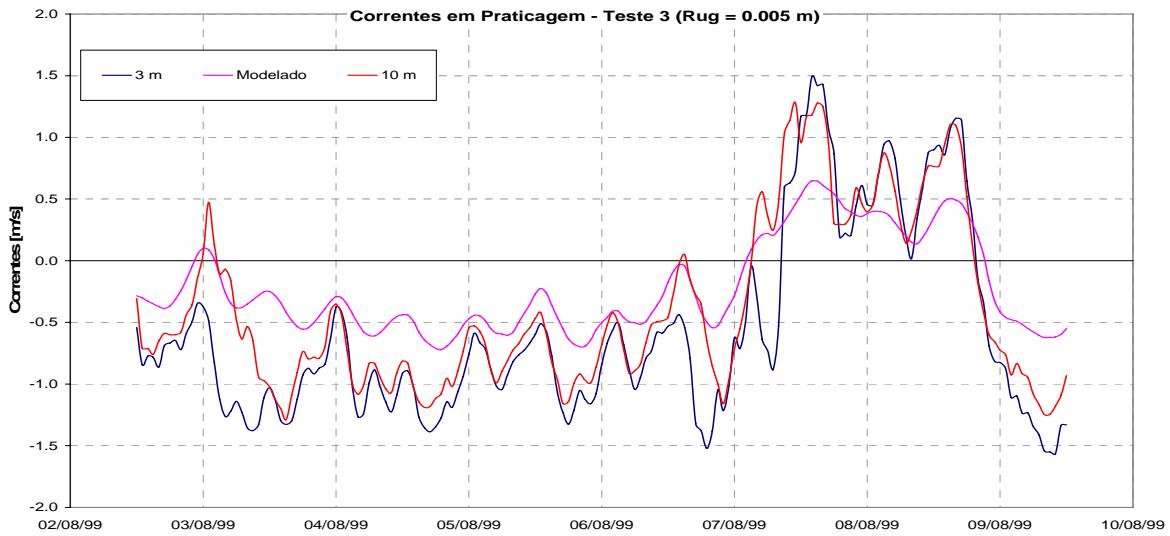


Figura 25: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 3 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.

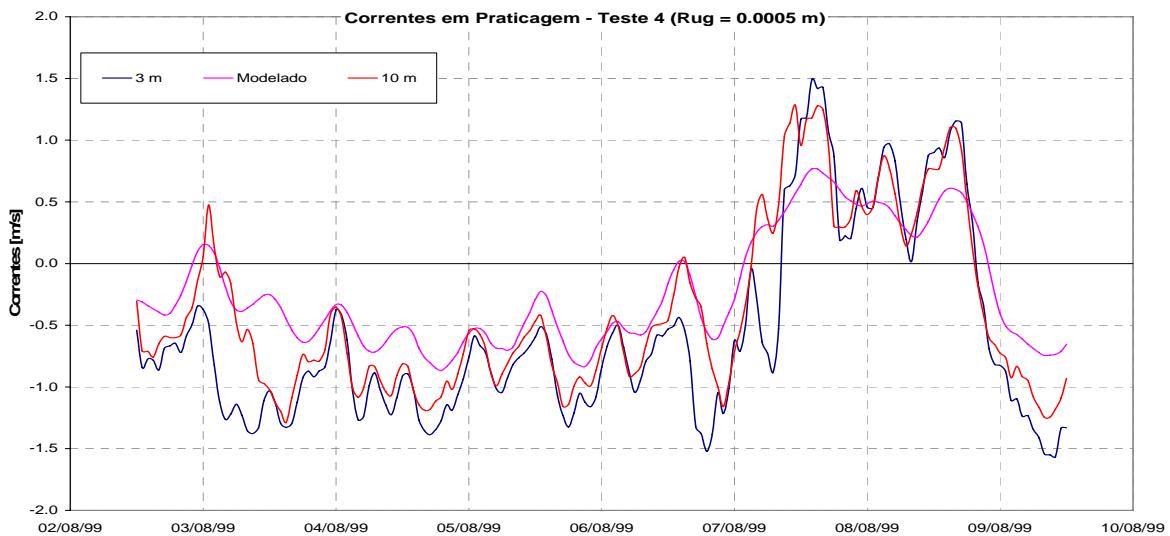


Figura 26: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 4 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.0005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.

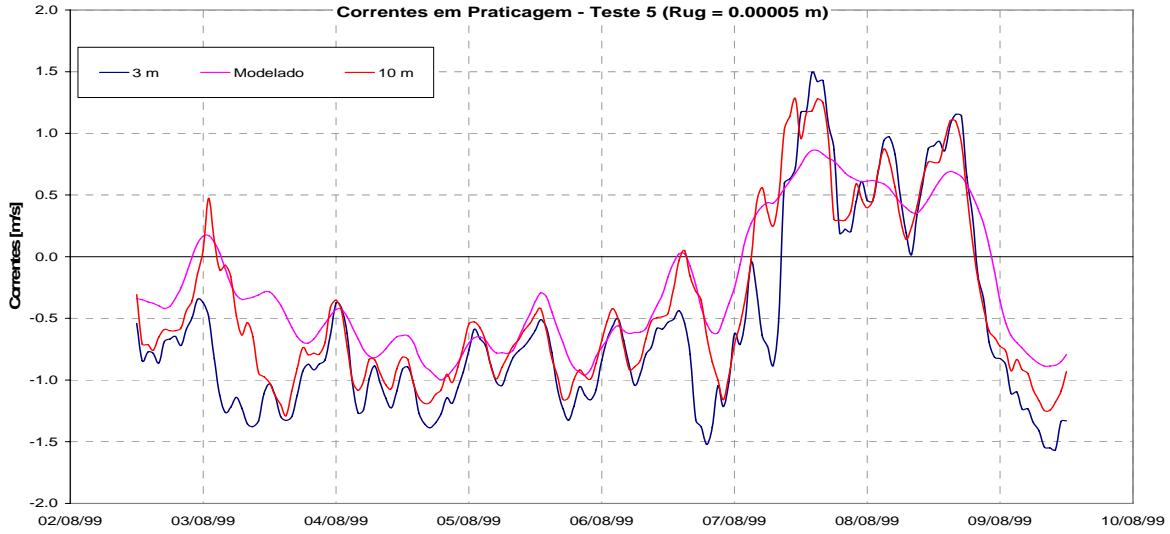


Figura 27: Comparação entre as correntes medidas e modeladas para o modelo Teste 5 com amplitude da rugosidade equivalente do fundo igual a 0.00005 m. Os níveis 3 e 10 m na legenda são as correntes medidas. Correntes negativas indicam escoamento em direção ao oceano.

Para as rugosidades testadas, a que melhor reproduziu as correntes foi a do Teste 5 (Figura 27). Ao observar a série temporal de salinidade para essas mesmas duas profundidades para o mesmo período (Figura 28), três períodos de estratificação (dias 03/08/99, 06/08/99 e 07/08/99) e dois de homogeneidade (dias 04/08/99 a 06/08/99 e 07/08/99 a 09/08/99) são encontrados.

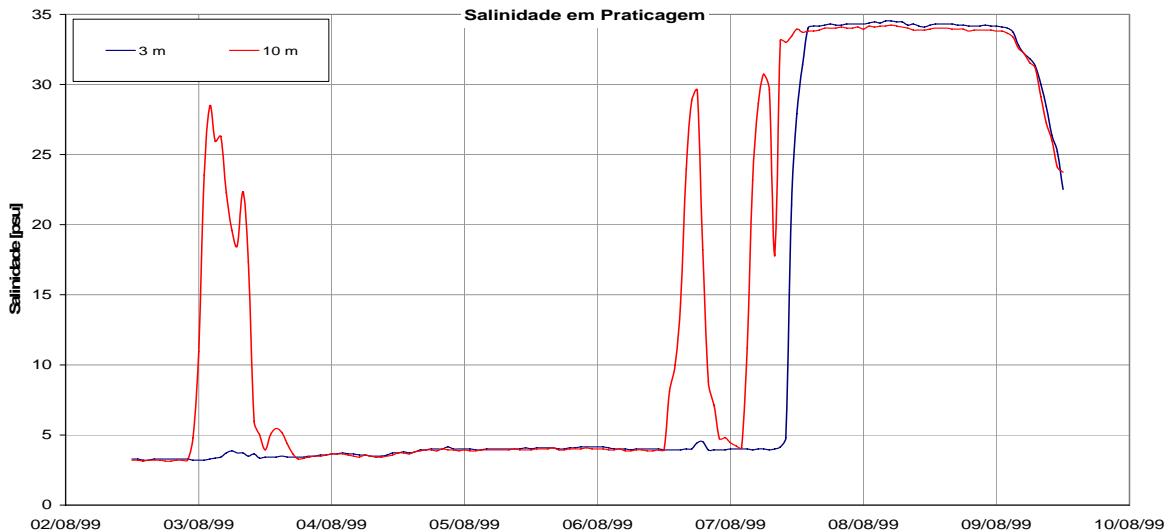


Figura 28: Salinidade medida na estação Praticagem para o período de 02/08/99 a 10/08/99.

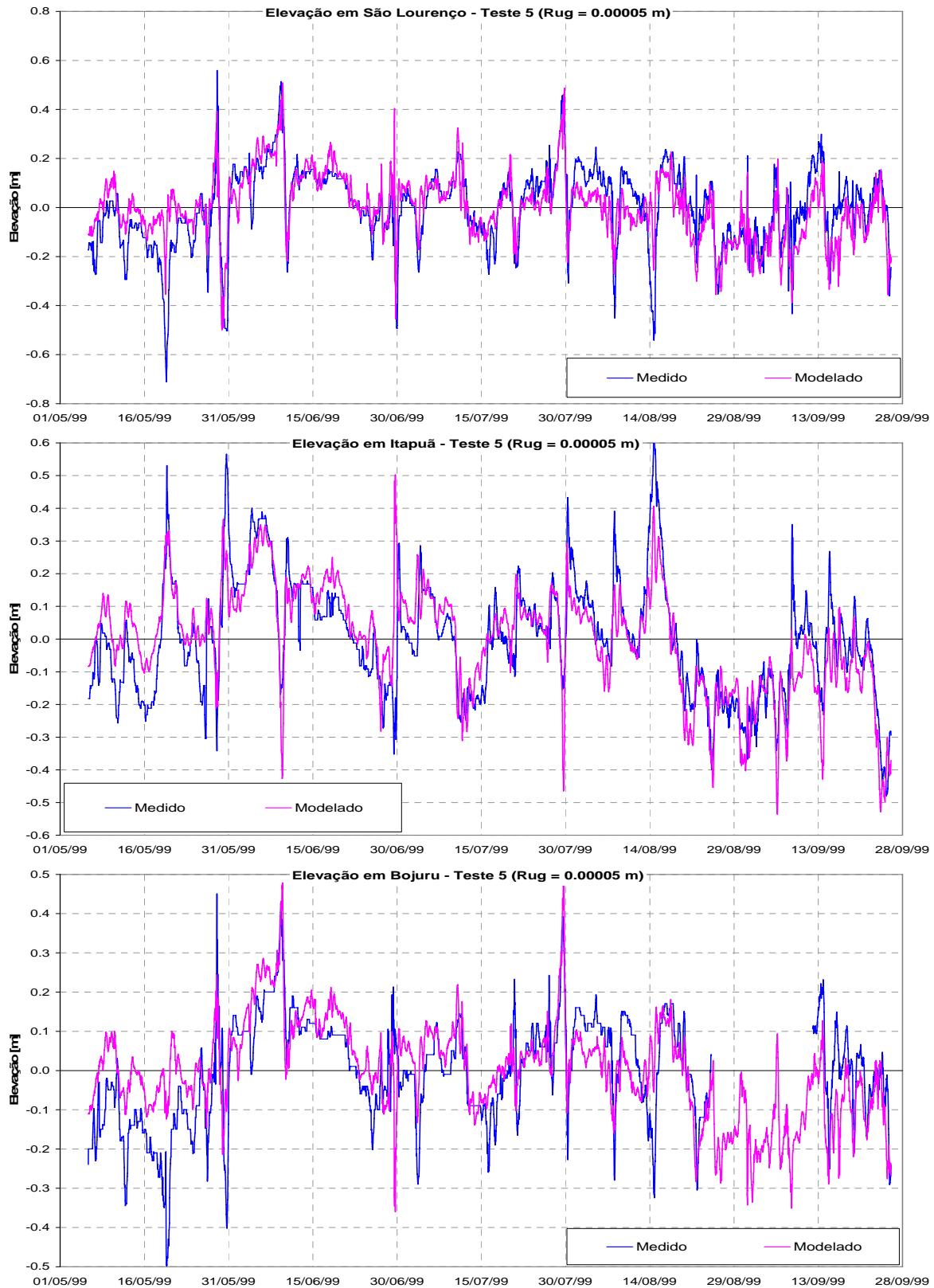
É razoável que o resultado do modelo Teste 5 reproduza bem as correntes quando em período de homogeneização da salinidade na coluna d'água. As oscilações presentes nos dados medidos que o modelo não consegue reproduzir devem ser explicadas pela não

inclusão das componentes quarto-diurnas na especificação da maré astronômica, devido a indisponibilidade dos mesmos. Essas oscilações quarto-diurnas estão presentes na análise harmônica das elevações medidas em Praticagem (Tabela 4).

Componente	Freq (ciclo/hora)	Amp (m)	Amp_Erro (m)	Fase (º)	Fase_Erro (º)
MM	0.001512	0.0027	0.039	188.04	269.3
MSF	0.002822	0.0413	0.054	83.15	91.84
ALP1	0.034397	0.0076	0.011	272.34	87.58
2Q1	0.035706	0.0089	0.012	164.98	79.78
*Q1	0.037219	0.0248	0.013	80.09	30.63
*O1	0.038731	0.1099	0.013	102.04	7.4
*NO1	0.040269	0.0129	0.011	28.84	59.24
*K1	0.041781	0.0553	0.011	167.61	12.6
J1	0.043293	0.0051	0.009	123.17	129.02
OO1	0.044831	0.0061	0.013	274.1	146.85
UPS1	0.046343	0.0049	0.013	56.36	162.39
EPS2	0.076177	0.0015	0.006	175.2	181.61
MU2	0.07769	0.0037	0.006	269.88	113.31
*N2	0.078999	0.0404	0.007	255.37	11.85
*M2	0.080511	0.0243	0.007	286.2	18.75
L2	0.082024	0.0055	0.007	34.95	70.25
*S2	0.083333	0.0365	0.007	119.54	13.64
ETA2	0.085074	0.0018	0.007	143.32	192.5
MO3	0.119242	0.0025	0.004	128.36	134.06
*M3	0.120767	0.0067	0.006	276.52	46.36
*MK3	0.122292	0.0059	0.005	93.09	65.45
*SK3	0.125114	0.0071	0.006	114.58	49.76
*MN4	0.159511	0.0177	0.008	207.15	24.79
*M4	0.161023	0.0331	0.007	242.37	11.5
SN4	0.162333	0.0013	0.005	206.77	213.15
*MS4	0.163845	0.0109	0.007	319.39	41.34
S4	0.166667	0.0017	0.005	52.42	196.05
2MK5	0.202804	0.0016	0.003	164.96	124.28
2SK5	0.208447	0.0033	0.003	100.35	72.41
2MN6	0.240022	0.003	0.003	352.06	69.77
M6	0.241534	0.0016	0.003	101.24	110.53
*2MS6	0.244356	0.004	0.004	113.48	43.84
2SM6	0.247178	0.0014	0.003	216.91	152.99
3MK7	0.283315	0.0013	0.002	133.4	117.19
M8	0.322046	0.0003	0.001	69.89	214.23

Tabela 4: Análise harmônica da série de elevação medida em Praticagem para o período de 01/05/99 a 30/09/99.

As séries de elevações para todas as estações geradas pelo modelo Teste 5 estão mostradas na Figura 29.



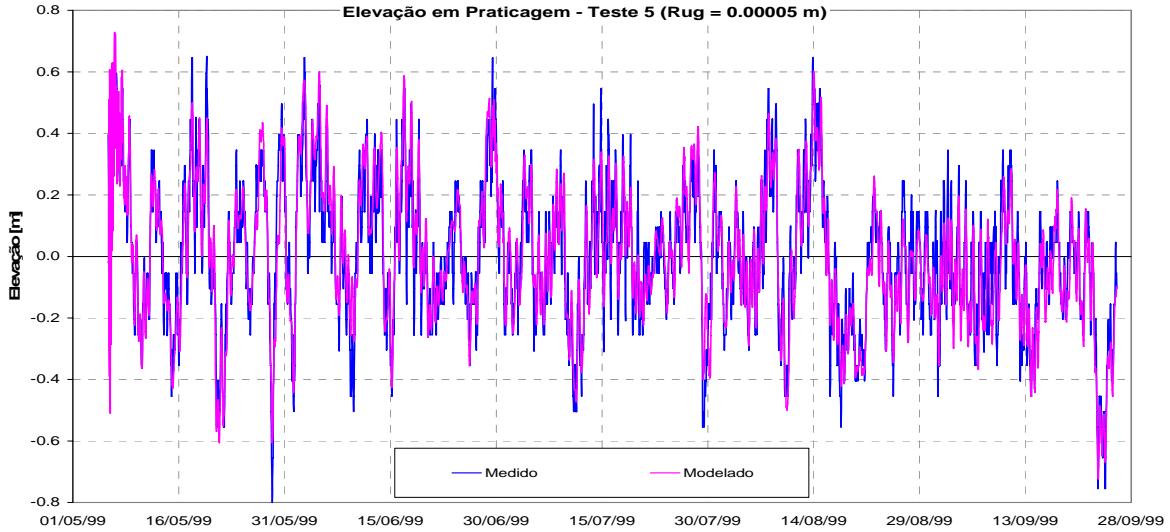


Figura 29: Série de elevações medidas (linha azul) e modeladas (linha magenta) para cada estação do modelo Teste 5.

O modelo conseguiu reproduzir o comportamento do sistema, porém ao se analisar as séries de elevações das estações internas da lagoa (São Lourenço, Bojuru e Itapuã), onde as variações dos níveis da superfície livre são diretamente influenciadas pelas vazões dos rios e da ação dos ventos sobre o corpo lagunar, a intensidade dos picos de elevações modeladas estão em grandezas diferentes. Isso pode ser explicado ao fato de se utilizar os dados de ventos medidos em Praticagem uniforme para todo o domínio. É possível que as intensidades dos ventos possam ser diferentes em algumas regiões da Lagoa, mas em relação às direções não, porque os resultados do modelo mostram uma concordância em termos de fase.

Em relação a estação Praticagem, as elevações modeladas estão subestimadas em relação as medidas. Esse fato também pode ser devido a supressão de determinadas componentes harmônicas na previsão da maré astronômica, apesar de que as componentes dominantes do espectro da maré estão bem representadas, de acordo com a Figura 30.

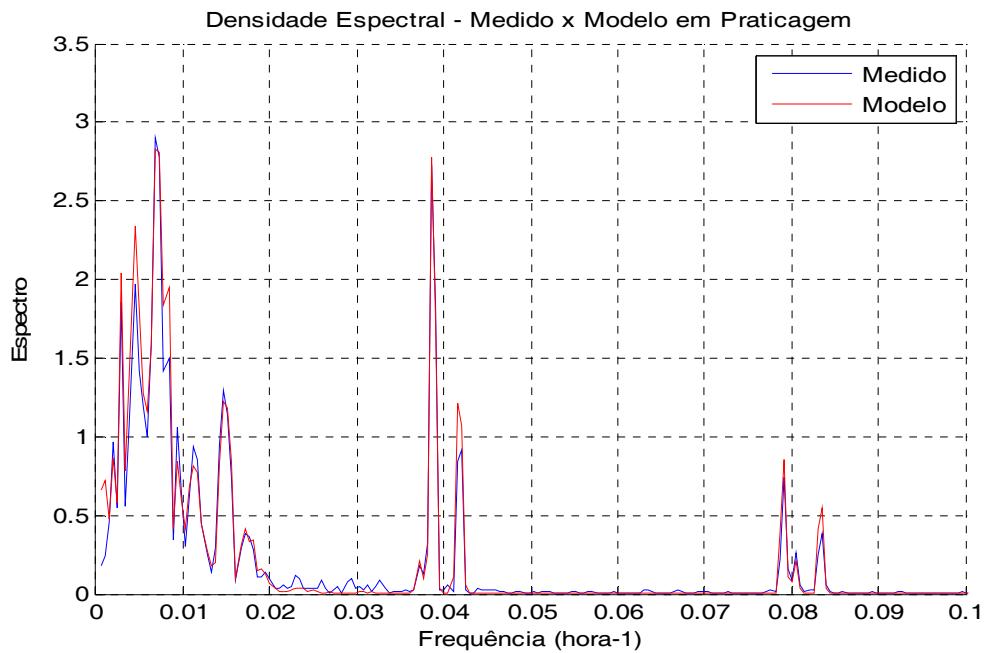


Figura 30: Espectro comparativo entre as elevações medidas e modeladas na estação Praticagem para o período de 06/05/99 a 25/09/99.

7. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS CONTRIBUINTES PARA A EXPORTAÇÃO DE SEDIMENTOS E PADRÃO DE CORRENTES

7.1. Exportação de sedimentos para a plataforma continental

A caracterização dos cenários típicos que contribuem para a exportação de sedimentos para a plataforma continental será realizada de acordo com dados medidos na região e resultados obtidos dos modelos computacionais empregados. Esses cenários serão analisados em termos da ação dos ventos analisando o efeito conjunto das vazões dos rios Guaíba e Camaquã.

Da Figura 31 até a Figura 35, os dados medidos e resultados do modelo são apresentados mensalmente, correlacionando as diferentes forçantes com o escoamento na embocadura e as tensões geradas no fundo da Lagoa. Com a finalidade de entender o papel das vazões fluviais no processo de exportação de sedimentos pela embocadura do estuário, um novo cenário de modelagem com vazões nulas é apresentado, tendo as mesmas configurações utilizadas no modelo calibrado (Teste 5).

Em cada figura, a primeira série temporal corresponde somatório das vazões afluentes pelos rios, a segunda corresponde aos ventos medidos, rotacionados para que o eixo vertical dos ventos concidisse principal da lagoa (NE-SW), a terceira série apresenta as diferenças de elevação medida e modelada entre Praticagem e São Lourenço, que representa o gradiente de pressão responsável pelo fluxos através da embocadura. Estes fluxos são apresentados na quarta série temporal de cada figura para os cenários com e sem vazões fluviais. As duas últimas séries correspondem as tensões de atrito no fundo devido às correntes e às ondas, respectivamente, para dois pontos distintos na porção central da Lagoa: um na região rasa (profundidade de 2.2 m) e outro na região profunda (profundidade de 6.6 m).

Os eventos de exportação de água (vazões negativas na embocadura) estão indicados nas figuras (retângulos sombreados) de forma a identificar o papel dos diferentes forçantes.

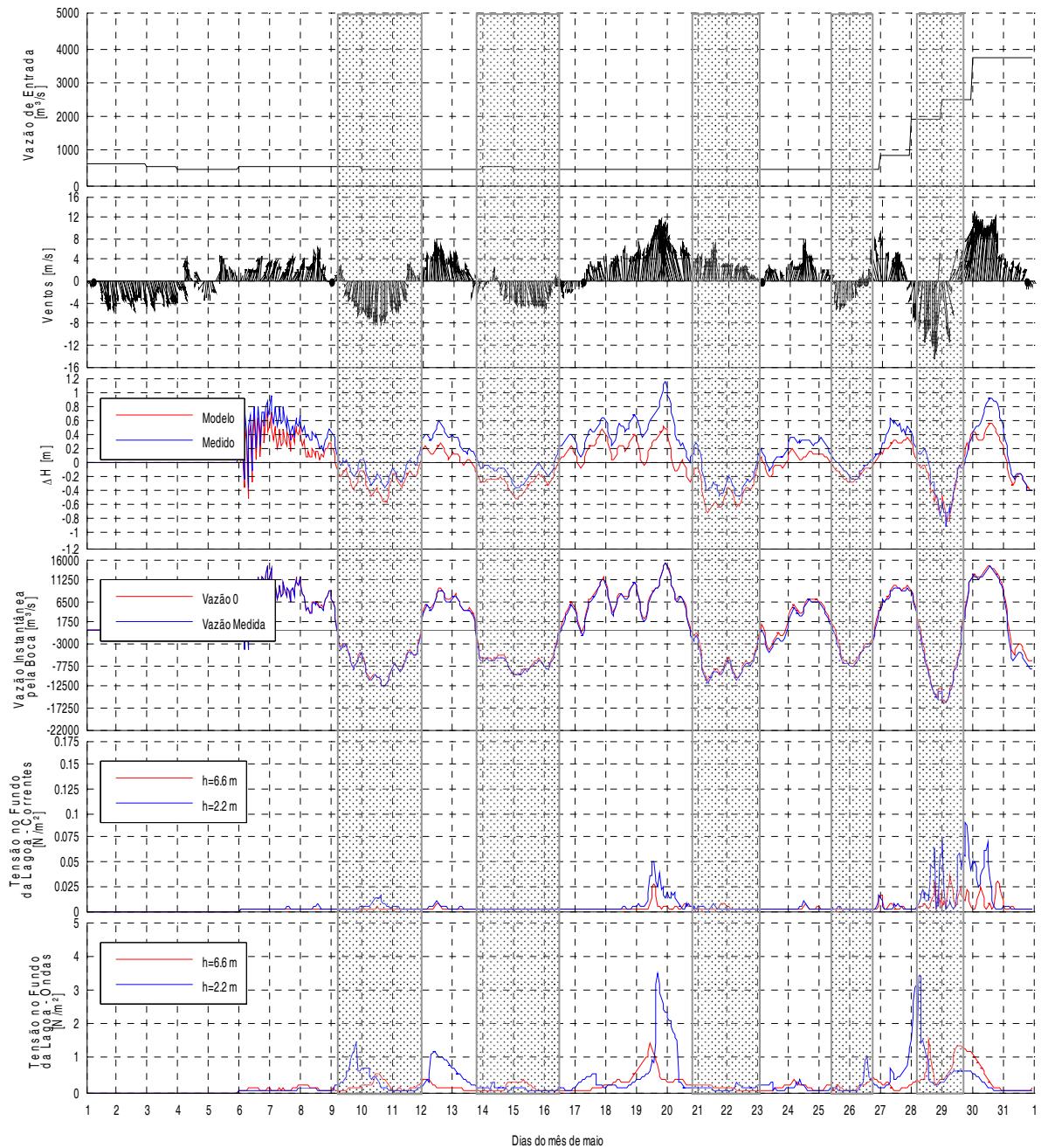


Figura 31: Vazões fluviais, ventos (eixo vertical na direção NE, orientado para baixo), gradiente de pressão entre Praticagem e São Lourenço (ΔH positivo indica elevação maior em Praticagem), vazão na embocadura (positivo indicam entrada de água no estuário) e tensões no fundo da Lagoa, porção central, devidas à correntes e ondas. Mês de maio de 1999.

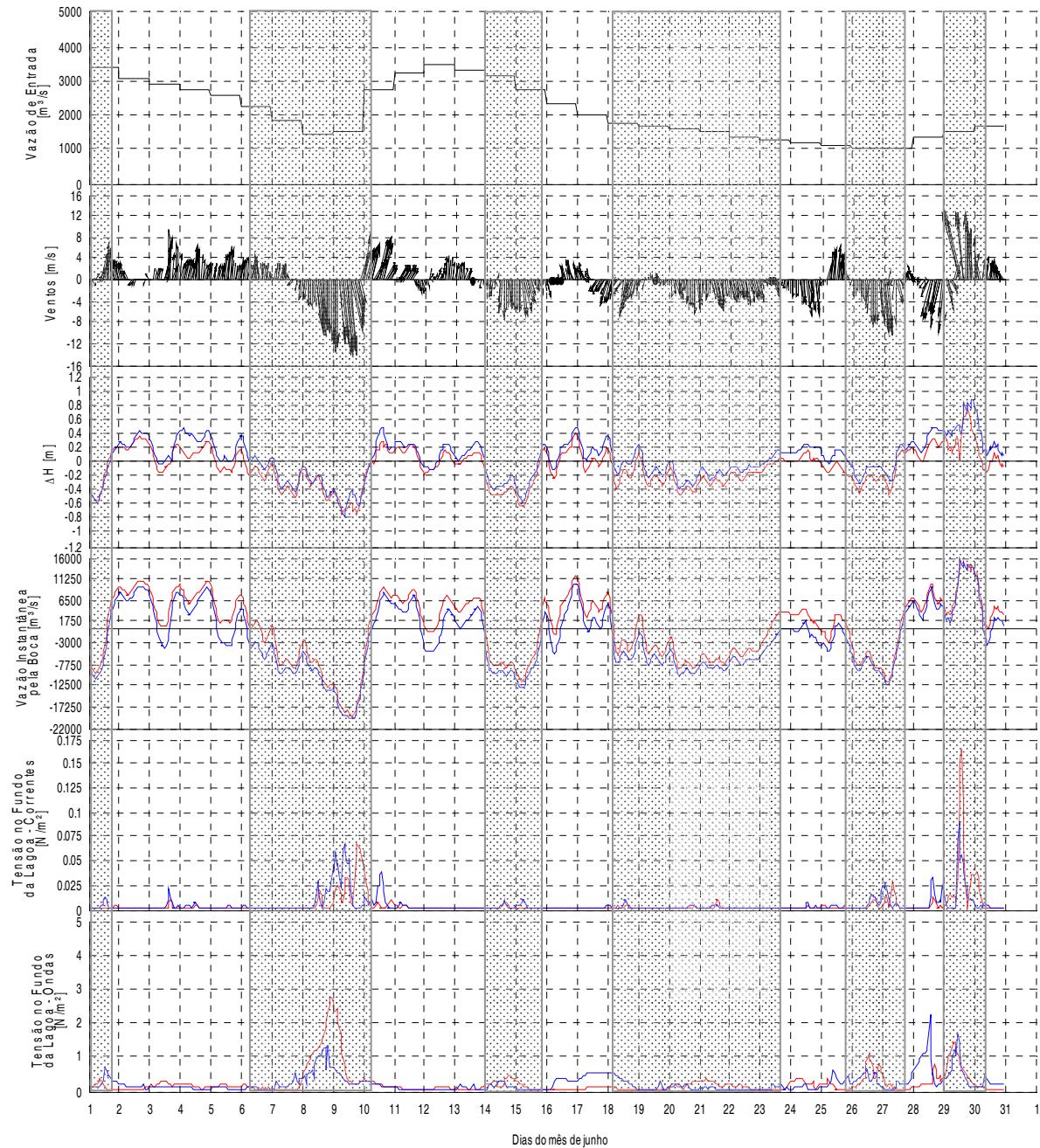


Figura 32: Vazões fluviais, ventos (eixo vertical na direção NE, orientado para baixo), gradiente de pressão entre Praticagem e São Lourenço (ΔH positivo indica elevação maior em Praticagem), vazão na embocadura (positivo indicam entrada de água no estuário) e tensões no fundo da Lagoa, porção central, devidas à correntes e ondas. Mês de junho de 1999.

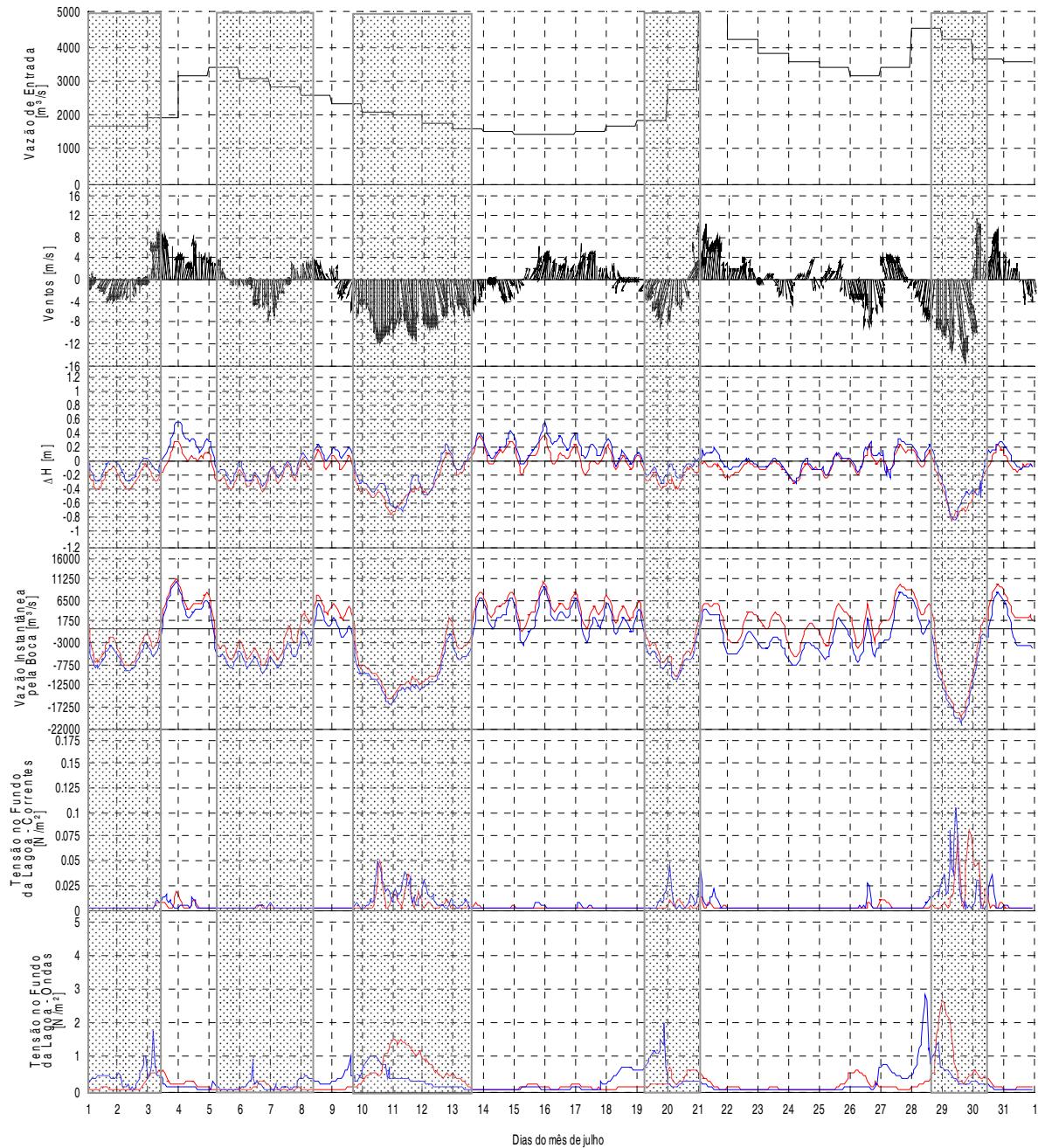


Figura 33: Vazões fluviais, ventos (eixo vertical na direção NE, orientado para baixo), gradiente de pressão entre Praticagem e São Lourenço (ΔH positivo indica elevação maior em Praticagem), vazão na embocadura (positivo indicam entrada de água no estuário) e tensões no fundo da Lagoa, porção central, devidas à correntes e ondas. Mês de julho de 1999.

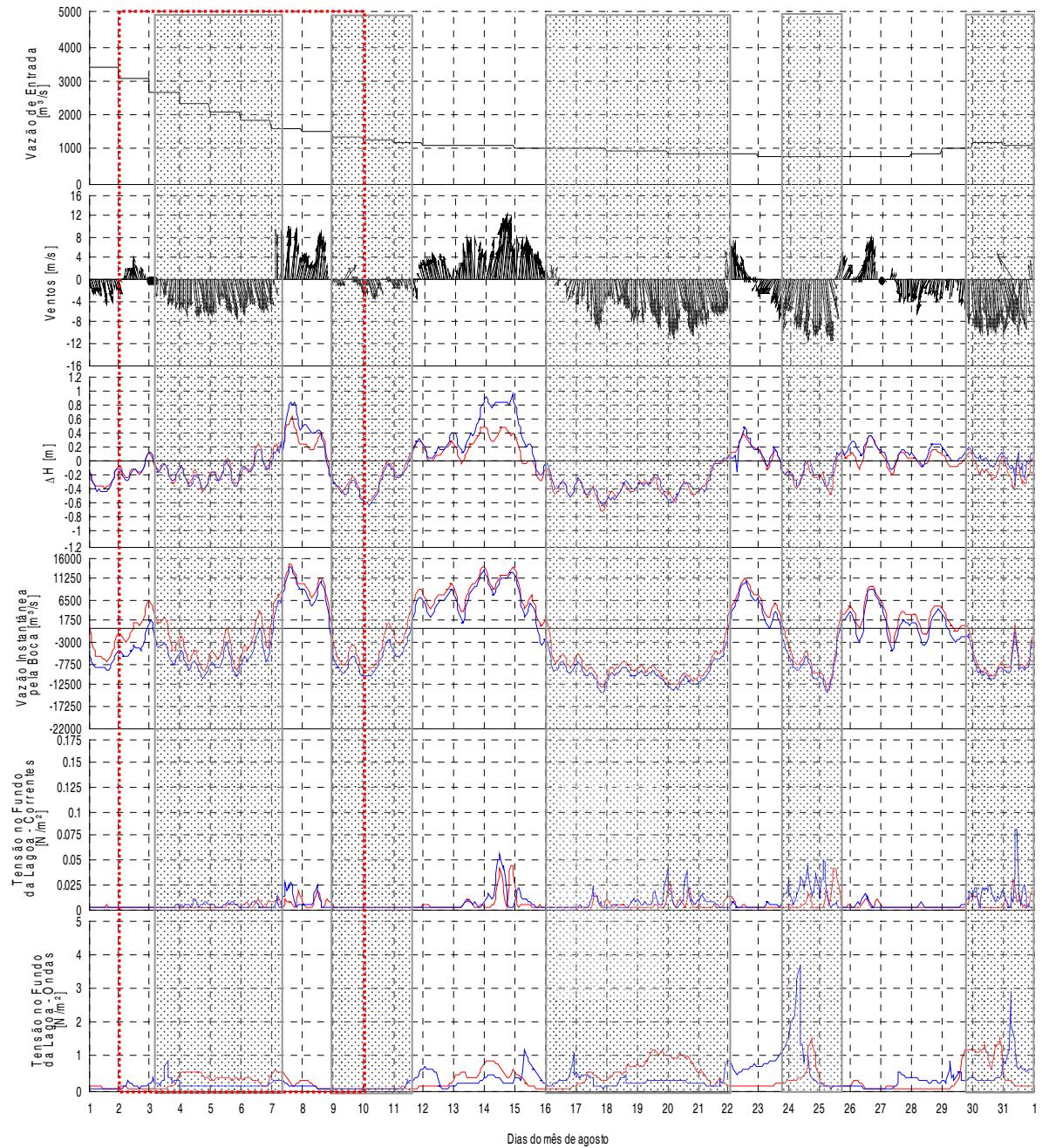


Figura 34: Vazões fluviais, ventos (eixo vertical na direção NE, orientado para baixo), gradiente de pressão entre Praticagem e São Lourenço (ΔH positivo indica elevação maior em Praticagem), vazão na embocadura (positivo indicam entrada de água no estuário) e tensões no fundo da Lagoa, porção central, devidas à correntes e ondas. No quadro vermelho é indicado o período de dados utilizados na calibração, onde há informações disponíveis de correntes e salinidade. Mês de agosto de 1999.

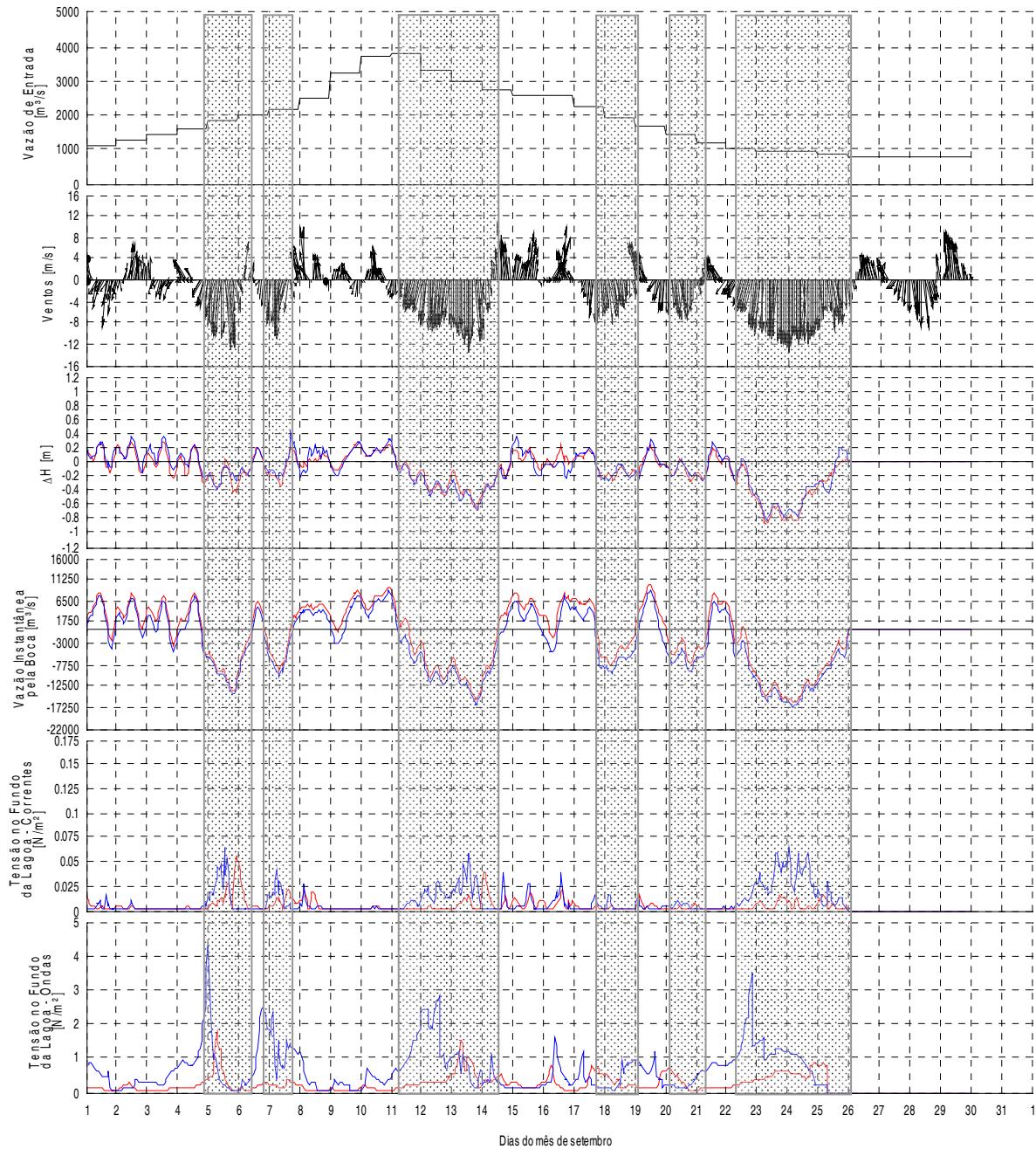


Figura 35: Vazões fluviais, ventos (eixo vertical na direção NE, orientado para baixo), gradiente de pressão entre Praticagem e São Lourenço (ΔH positivo indica elevação maior em Praticagem), vazão na embocadura (positivo indicam entrada de água no estuário) e tensões no fundo da Lagoa, porção central, devidas à correntes e ondas. Mês de setembro de 1999.

Observa-se em geral que a forçante que domina a circulação hidrodinâmica e a exportação de água da Lagoa é a ação dos ventos de NE, reinantes e dominantes na região.

Com relação ao efeito das vazões dos rios, observa-se que o primeiro pico de cheia ocorre no final de maio, conjuntamente com ventos significativos. Neste caso o efeito da

vazão não é notado no fluxo d'água na embocadura. Esta começa a ser percebida no dia 3 de junho quando há ocorrência de ventos fracos ($\sim 4\text{m/s}$), mudando o sentido do escoamento na embocadura (no dia 3 de junho, os fluxos resultantes das simulações com e sem vazão tem sinais opostos). Isto ocorre em outras ocasiões de ventos fracos como pode se observar nos dias 5 12 e 25 de junho e no período de 23 a 27 de julho, quando se observa também o efeito da maré astronômica. Do total de horas de vazante no período analisado, observa-se que 80% é explicado pela ação do vento. Em apenas 20% do tempo a vazão explica a exportação de água.

É observado que são os ventos e não as vazões ou marés astronômicas os quais promovem maiores alterações na tensão de atrito do fundo na porção central da Lagoa. Em particular aqueles ventos orientados no sentido do eixo da lagoa, ou seja, ventos NE e SW. Isto é consequência do maior fluxo no sentido NE-SW no interior da lagoa (correntes) e da maior pista disponível para geração de ondas, na ordem de 120 km. Eventos de ressuspensão na Lagoa devem estar associados à ventos de NE, sendo que das 15 ocorrências de picos nas tensões de fundo, somente 2 foram devidas à ventos de SW, favorecendo assim sua expulsão para a plataforma continental.

Nos mapas da Figura 36 estão ilustrados os padrões de correntes, elevação, tensões devido a correntes e a ondas e comprimento de pistas para um cenário de vento NE, para o evento do dia 28 de maio (23h), indicado na Figura 31. Nota-se a sobre-elevação do nível d'água na região sul da Lagoa e rebaixamento na costa, promovendo um forte gradiente de pressão (aproximadamente de 1 metro entre São Lourenço e Praticagem), ocasionando uma forte vazão de vazante no canal de acesso (em torno de $17000\text{ m}^3/\text{s}$). As tensões devido às correntes são relativamente fracas (menores de 0,2 Pa) se comparadas às tensões de fundo promovidas pelas ondas geradas (de mais de 4 Pa), tensões estas suficientes para ressuspender os sedimentos depositados na Lagoa e disponibilizados para serem transportados pelas correntes.

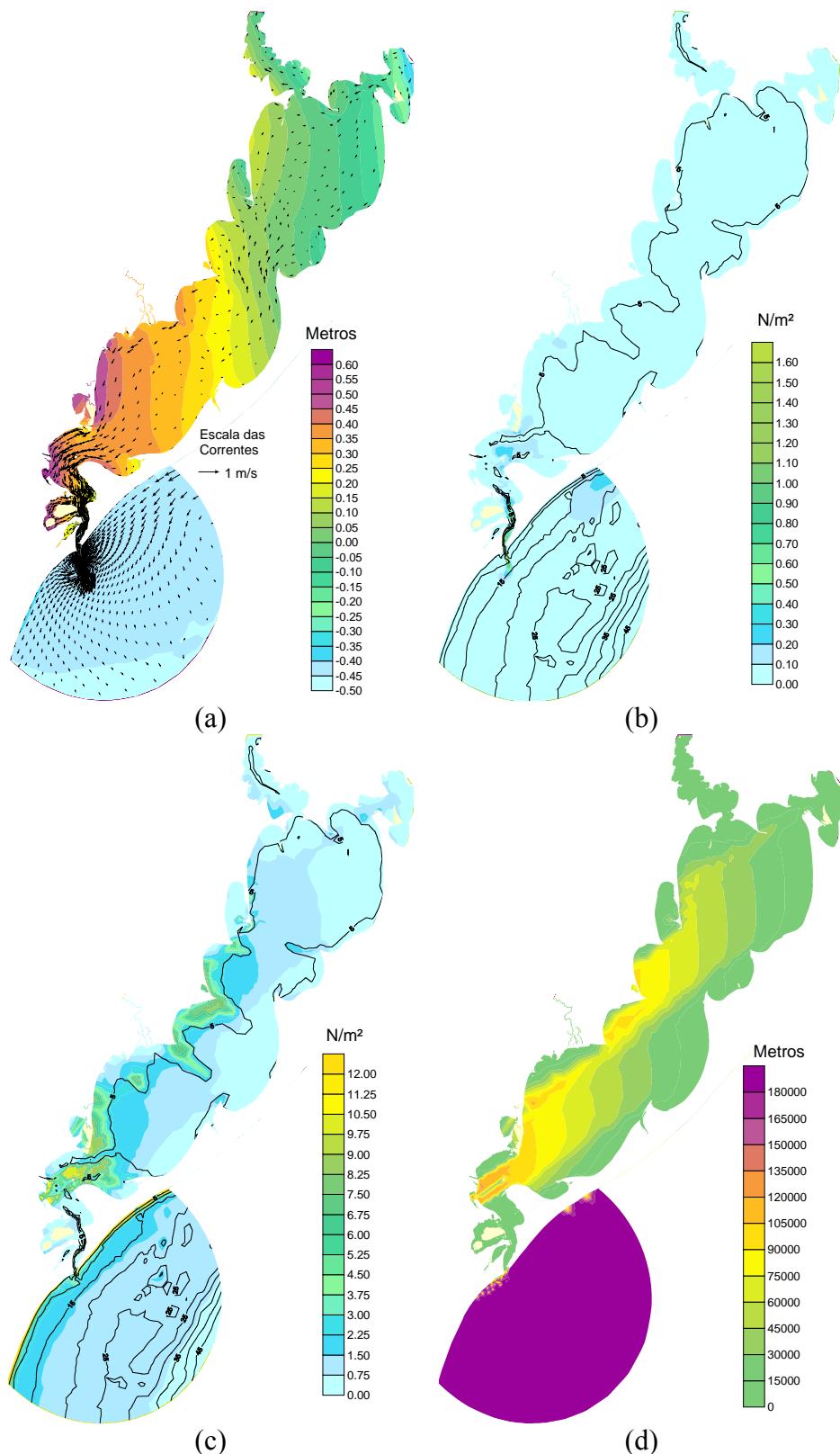


Figura 36: Padrões de correntes e de elevações (a), tensões devido a correntes (b) e ondas (c), e comprimento de pista (d) para o instante do dia 28/05 às 23:00, vento de NE com intensidade de 15.64 m/s. Isóbatas espaçadas em 5 metros.

O papel das vazões durante período de ação de ventos do quadrante S-W seria o de resistir ao avanço das águas do mar eventualmente impedindo a intrusão salina. Porém este efeito não foi corroborado com os dados disponíveis. No período de dados utilizados na calibração, de 2 a 10 de agosto (Figura 37), ocorreram ventos relativamente fortes de NE durante 4 dias, mudando para SW no final do período. As vazões foram decrescentes de 3000 a 1500 m³/s, após 4 dias do pico da cheia de 4500 m³/s. As correntes medidas foram de enchente no fundo e vazante na superfície no início do período, com salinidades de 25 e 4 psu respectivamente, mudando para correntes de vazante em superfície e fundo, com salinidades de 4 psu, persistindo por 3 dias, até a ocorrência da inversão do gradiente de pressões, pouco antes da virada da direção do vento para SW. Esta inversão do gradiente de pressões, provavelmente ocorre devido à maré meteorológica remotamente gerada, que vai provocar a sobrelevação do nível d'água na costa com antecedência à mudança de direção do vento local. Com a inversão das correntes há o ingresso de água salgada e diferenças significativas nas magnitudes das correntes de superfície e fundo. Com a mudança de direção do vento para SW observa-se salinidades altas no fundo e superfície e similaridade nas correntes. Apesar das altas vazões observadas no período, não se observa uma influência significativa das mesmas.

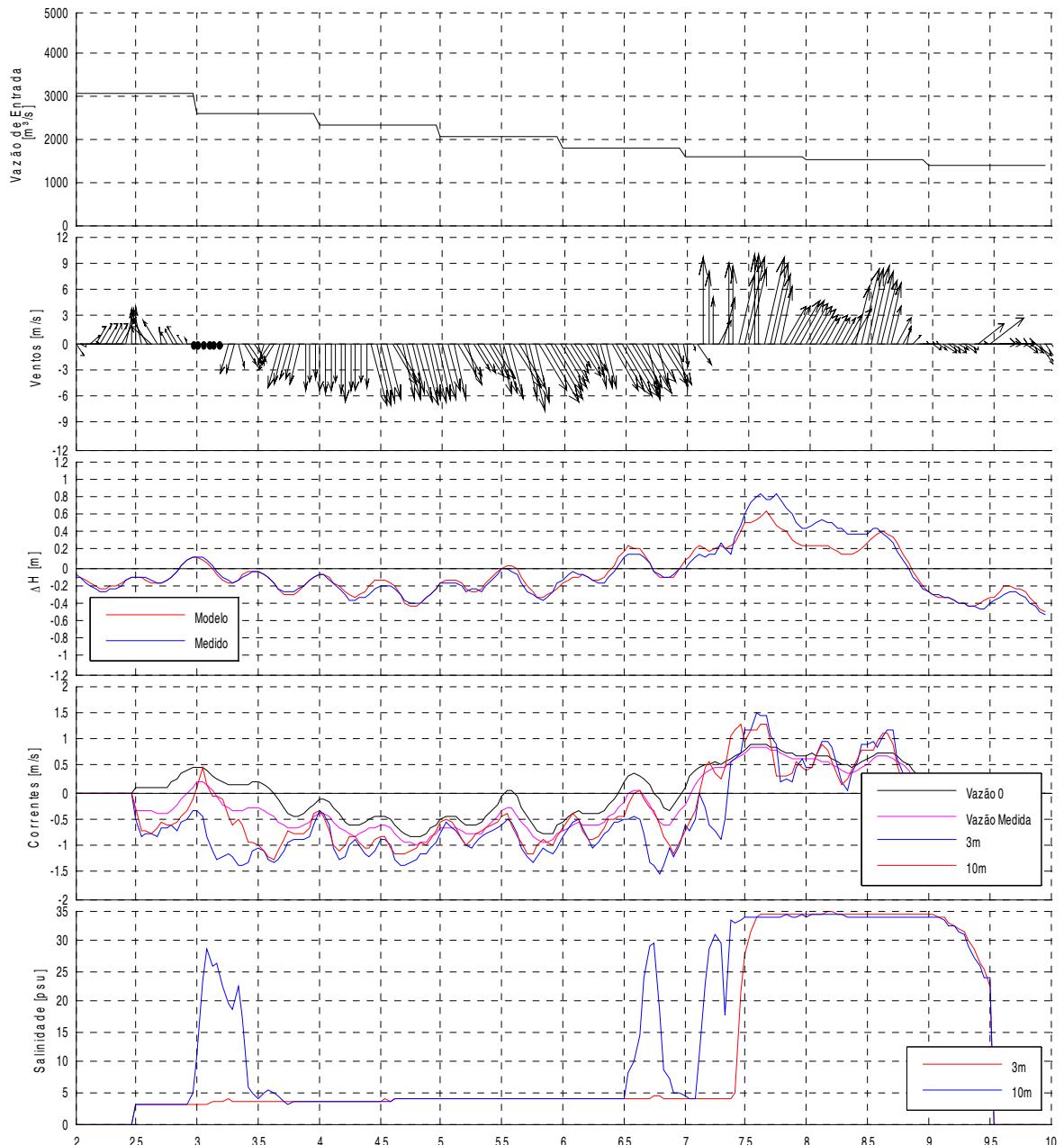


Figura 37: Comparação com os resultados obtidos com o modelo Teste 5 para o período de calibração.
Nos últimos dois gráficos as linhas azul e vermelha indicam dados medidos.

7.2. Padrão de correntes sobre a plataforma continental

Os padrões de correntes sobre a plataforma continental para diversas situações com ventos do NE, e portanto com ocorrência de exportação de água da Lagoa, são mostrados na Figura 38 (vazão mínima), na Figura 39 (vazão média) e na Figura 40 (vazão alta). Estes resultados evidenciam a contribuição da morfologia local na formação do

depósito lamítico, com a tendência à formação de um vórtice ao sul da embocadura, ao largo da praia de Cassino.

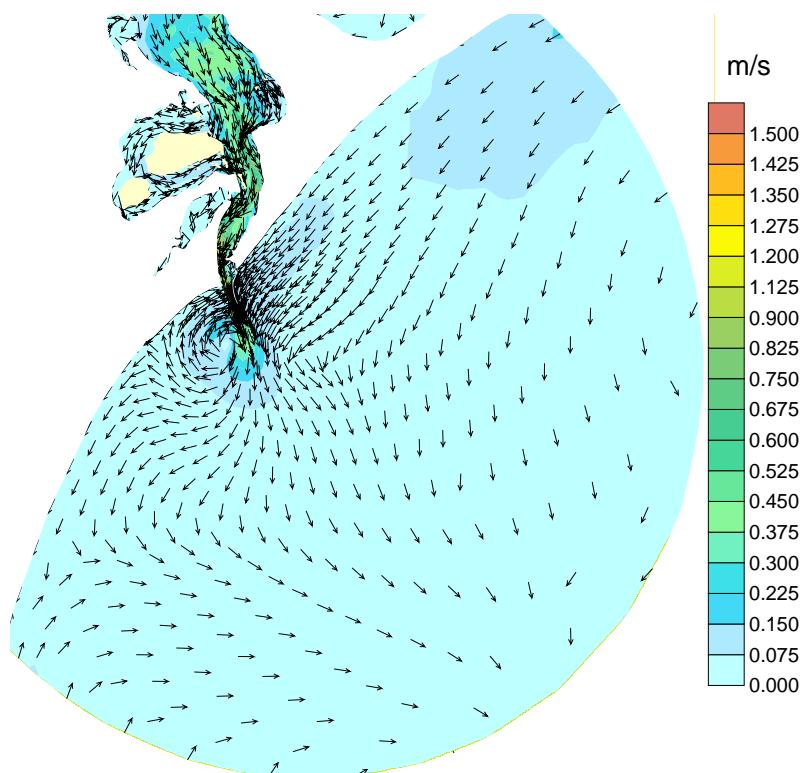


Figura 38: Padrão de correntes para o dia 15/05/99. Situação de vento fraco de NE (4.94 m/s) e vazões fluviais baixas (500 m³/s).

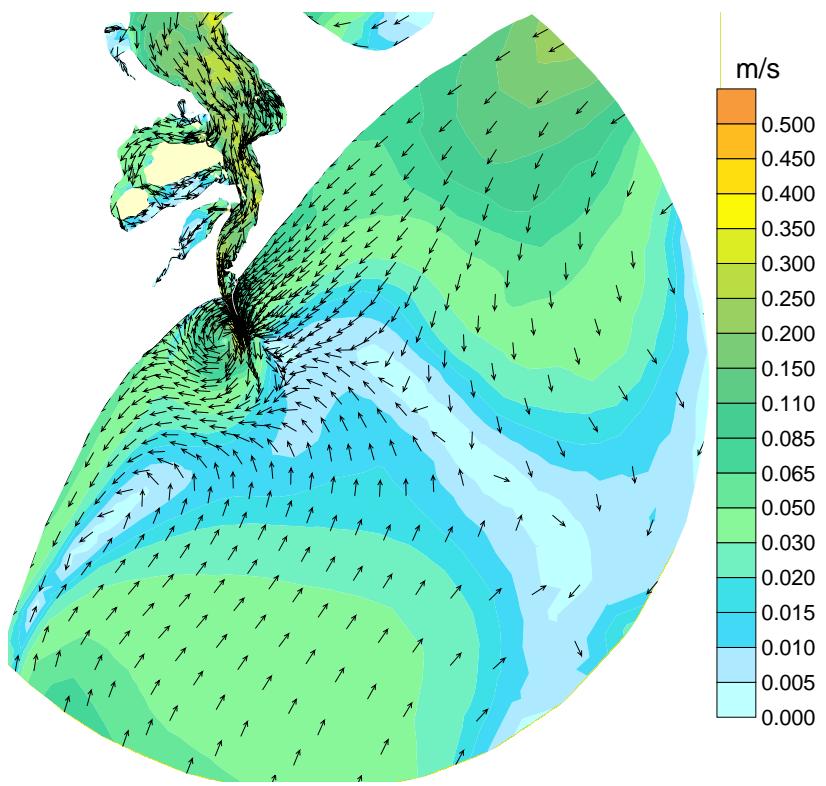


Figura 39: Padrão de correntes para o dia 26/07/99. Situação de vento fraco de NE (5.81 m/s) e vazões fluviais altas (4000 m³/s).

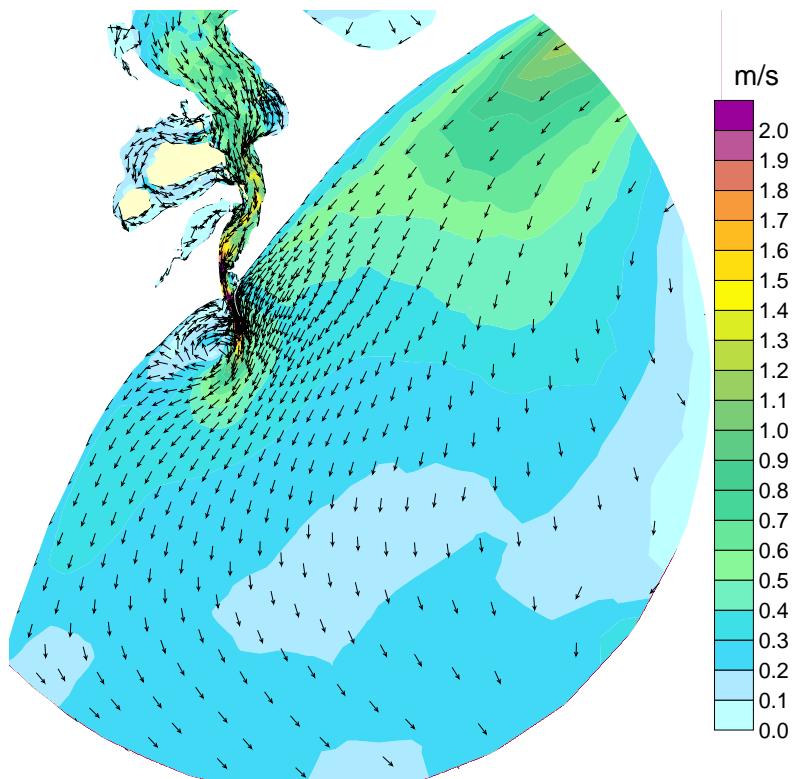


Figura 40: Padrão de correntes para o dia 09/06/99. Situação de vento forte de NE (15.23 m/s) e vazões fluviais moderadas (1500 m³/s).

Com a finalidade de avaliar a persistência da tendência dos padrões de correntes à formação deste vórtice sobre a plataforma continental, foi obtido um mapa de velocidades residuais eulerianas. Velocidade residual euleriana pode ser definido como uma promediação das velocidades, em cada nó da malha de cálculo, ao longo de um determinado período. Assim, este mapa foi gerado para o período todo da simulação de cinco meses. O resultado está mostrado na Figura 41 com detalhe na área de interesse. Esse mapa indica a predominância das correntes orientadas para o sul e a presença de um vórtice entre as batimétricas de 5 e de 20 metros, região onde se localiza o depósito de lama (Calliari & Fachin (1993), Calliari et al (2000) e Vinzon et al. 2005), constituindo um indício da contribuição da morfologia local para a formação do depósito. Este mapa de correntes residuais indica também a dominância das exportações de água, e consequentemente sedimentos, pela embocadura.

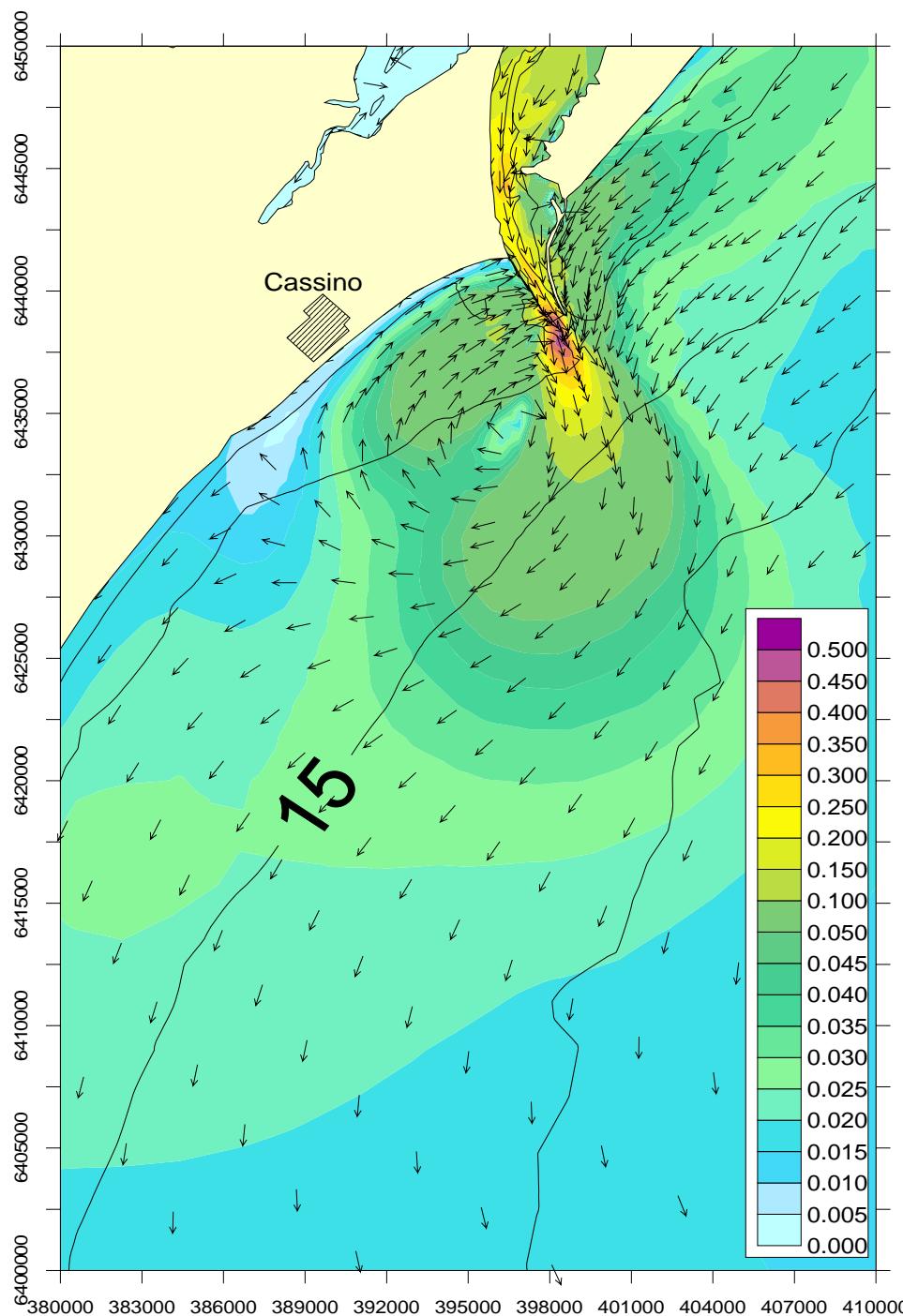


Figura 41: Mapa de velocidades residuais eulerianas para o período de 5 meses simulado. É observado a formação de um vórtice ao largo da praia de Cassino assim como exportação residual de água pela embocadura. Barra de cores indica a intensidade das correntes em m/s. Isóbatas espaçadas em 5 m. Coordenadas em UTM.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O uso do modelo de solução global de maré FES99 (Lefèvre et al, 2002) para obtenção das componentes harmônicas do espectro da maré demonstrou pequena diferença em relação à análise harmônica dos dados medidos em Praticagem. Na análise harmônica, componentes quarto - diurnas foram calculadas e mostraram uma amplitude de 6 cm. Como não havia disponível nenhuma informação a respeito de componentes quarto - diurnas nas fontes de dados utilizadas e pesquisadas, essas constituintes não foram levadas em consideração. Com o intuito de melhorar os resultados, devem-se implementar essas componentes nas séries temporais de elevações da fronteira aberta.
- O uso do filtro Thompson também foi uma das boas ferramentas que contribuiu para obtenção da maré especificada na fronteira oceânica. Com ele pode-se reproduzir o efeito da maré meteorológica, remotamente gerada, na hidrodinâmica da lagoa, enquanto que na plataforma continental, as correntes foram geradas a partir da ação dos ventos locais e da maré astronômica.
- No processo de calibração verificou-se a dependência da condição inicial nas estações no interior da lagoa, o modelo leva aproximadamente 1 mês para poder o resultado ser independente da condição inicial. Em relação à rugosidade, os melhores resultados obtidos foram quando 0.00005 m de amplitude de rugosidade equivalente foi utilizado, representando um fundo extremamente liso. Este valor se justificaria pela redução do atrito pela presença de lama no fundo (Gabioux et al, 2005).
- As magnitudes das correntes simuladas foram menores as medidas. Esta subestimação pode ser devido a não inclusão de componentes quarto-diurnas do espectro da maré astronômica, à distribuição de rugosidades, considerada constante neste trabalho, ou ainda ao coeficiente de atrito do vento adotado.
- O vento é a forçante mais importante que promove as maiores alterações no padrão do escoamento do sistema. O mecanismo de set-up / set-down (empilhamento / rebaixamento) na lagoa e na costa é o responsável pelas trocas d'água entre a lagoa e o oceano.
- Ventos de NE tendem a empilhar água na porção sul da lagoa enquanto que atuando sobre a plataforma continental, tendem a rebaixar o nível do mar devido ao transporte de Ekman, que deflete o escoamento para a esquerda do agente forçante,

favorecendo um gradiente de pressão em direção ao estuário com a conseqüente expulsão de água pela embocadura. O mesmo processo, porém em situação oposta é observado durante a ação de ventos SW.

- A avaliação do efeito das vazões dos rios realizada com a modelagem evidenciou que estas podem ser importantes para a exportação de água para o oceano somente em períodos de eventos meteorológicos fracos.
- Para o período simulado, os resultados mostraram uma dominância das expulsões de água do sistema em relação aos momentos de intrusão. Isso se deve a dominância dos ventos do quadrante N-E. O tempo de residência da lagoa foi estimada em 340 dias, ou aproximadamente 1 ano.
- Através do mapa de velocidades residuais euleriana, pode-se identificar também um vórtice ao sul da embocadura, em condições de efluxo do estuário, provocado pela ação dos ventos do quadrante N-E atuando sobre as águas da plataforma continental.. Esse vórtice indica uma provável causa para o depósito de lama nessa região. A geometria do vórtice modelado (Figura 41) é bem representativo com o vórtice observado na imagem de satélite da Figura 2.
- Vale salientar que outros fatores devem contribuir para a formação do depósito lamítico ao largo da praia de Cassino e que não foram levados em consideração neste estudo, como os efeitos da baroclinicidade na pluma de sedimentos expelida sobre a plataforma continental, e das correntes geradas por ondas de gravidade. As correntes geradas pela maré meteorológica sobre a plataforma continental não estão sendo modeladas neste trabalho, e serão objeto de estudos futuros.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALLIARI, L. J., 1980, *Aspectos sedimentológicos e ambientais na região estuarial da Lagoa dos Patos*. Tese de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: 200p.
- CALLIARI, L. J.; GOMES, M. E. V.; GRIEP, G. H.; MOLLER, O. O., 1980, “Características sedimentológicas e fatores ambientais da região estuarial da Lagoa dos Patos”. In: *Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 2, pp. 862-875, Balneário Camboriú, Santa Catarina, Brasil.
- CALLIARI, L. J.; FACHIN, S., 1993, “Laguna dos Patos. Influência nos depósitos lamíticos costeiros”. *Pesquisas* v. 20 (1), pp. 57-69, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- CALLIARI, L.; KLEIN, A. H. F.; BARROS, F. C. R., 1996, “Beach differentiation along the Rio Grande do Sul coastline (Southern Brazil)”. *Revista Chilena de História Natural* v. 69, pp. 485-493.
- CALLIARI, L.; SPERRANSKI, N. S.; TORRONTEGUY, M.; OLIVEIRA, M. B., 2000, “The mud banks of Cassino beach, southern Brazil: characteristics, processes and effects”. *Journal of Coastal Research* v. ICS 2000 Proceedings, pp. 318-325, Nova Zelândia.
- CALTABIANO, A. C. V., 1994, *Análise quali-quantitativa do material em suspensão no estuário da laguna dos Patos, RS*. Monografia de Graduação, Departamento de Geociência, Laboratório de Oceanografia Geológica, FURG, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 50p.
- CASTELÃO, R. M.; MOLLER, O. O.; FETTER F, A. F.; CAMPOS, E. J. D. (____). “Dinâmica da Lagoa dos Patos (RS-Brasil) forçada por ventos”. Submetido a edição especial do XII SNO, 10p.
- 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 Graduação, Laboratório de Oceanografia Física, FURG, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 70p.
- COSTA, C. S. B.; SEELIGER, U.; KINAS, P. G., 1988, “The effect of wind velocity and direction on the salinity regime in the lower Patos Lagoon estuary”. *Ciência e Cultura* v. 40 (9), pp. 909-912.
- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. R.; MOLLER, O. O.; NIEMCHESKI, L. F. H., 2002, “The Patos Lagoon hydrodynamics during na El Niño event (1998)”. *Continental Shelf Research* v. 22, pp. 1699-1713.
- FERNANDES, E. H. L.; DYER, K. D.; MOLLER, O. O., 2004a, “Spatial gradients in the flow of southern Patos Lagoon”. *Journal of Costal Research* v. 20, pp. 102-112.

- FERNANDES, E. H. L.; MARINO-TAPIA, I.; DYER, K. D.; MOLLER, O. O., 2004b, “The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary”. *Ocean Dynamics* v. 54, pp. 348-359.
- FERNANDES, E. H. L.; MONTEIRO, I. O.; MOLLER, O. O., 2004c, “On the dynamics os Saco da Mangueira embayment – Patos Lagoon (Brazil)”. Submetido ao Journal of Coastal Research em dezembro de 2004, 14p.
- HARTMANN, C.; SILVA, O. F., 1988, “Dinâmica sazonal da pluma de sedimentos na desembocadura da laguna dos Patos, analisada através de imagens Landsat”. *IVº Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Rio Grande do Norte, 8p.
- HARTMANN, C.; SILVA, O. F.; MENDES, C. A. B.; HAERTEL, V.; NUNES, J. C., 1990a, “Estudo por sensoriamento remoto das “frentes” costeiras na região da desembocadura da laguna dos Patos, RS”. *VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 24-29/06/1990, Anais* v. 3, Manaus, Amazônia.
- HARTMANN, C.; CALLIARI, L.; MOLLER, O. O., 1990b, “Material em suspensão no estuário da laguna dos Patos (RS) Fase I – Observações preliminares – Abril/1979 a Março/1980”. *Sociedade & Natureza* v. 2 (4), pp. 73-95, Uberlândia.
- HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C., 1990c, “Influência do Canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da laguna dos Patos – RS”. *Revista Brasileira de Geociências* v. 20 (1-4), pp. 329-332.
- HARTMANN, C.; CALLIARI, L., 1995, “Composição e qualidade do material em suspensão durante alta turbidez na extremidade sul da laguna dos Patos, RS, Brasil”. *Pesquisas* v. 22 (1-2), pp. 74-83, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- HARTMANN, C., 1996, *Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da laguna dos Patos, RS*. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: 380p.
- LEFÈVRE, F.; LYARD, F.H.; LE PROVOST, C., 2002, “FES99: A global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* v. 19, pp. 1345-1356, Sep.
- MOLLER, O. O.; LORENZZENTTI, J. A.; STECH, J. L.; MATA, M. M., 1996, “The Patos lagoon summertime circulation and dynamics”. *Continental Shelf Research* v. 16 (3), pp. 335-351.
- MOLLER, O. O.; CASTAING, P., 1999, “Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30º S, Brazil)”. *Estuarines of South América (their Geomorphology and Dynamics) - Environmental Science*, pp. 83-100, Berlin, Spring.
- MOLLER, O. O.; CASTAING, P.; SALOMON, J-C.; LAZURE, P., 2001, “The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon”. *Estuarine Research Federation* v. 24, n° 2, pp. 297-311.

- ROSMAN, P. C. C., 2001, “Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental”. In: da Silva, R. C. V., *Métodos numéricos em recursos hídricos*, 1. ed., chapter 1, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ABRH.
- PIOLA, A. R.; MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; MOLLER, O. O., 2005, “The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf”. *Geophysical Research Letters* v. 32, 4p.
- SCHILLER, R. V., 2004, *Influência de alterações morfológicas sobre a hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos*. Monografia de Graduação, Laboratório de Oceanografia Física, FURG, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 84p.
- VAZ, A.C. (2003). *Efeito da descarga de água doce em processos ocorrentes no Estuário da Lagoa dos Patos*. Monografia de conclusão de curso, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.
- ZAVIOLOV, P. O.; GRIGORIEVA, J. V.; MOLLER, O. O.; KOSTIANOY, A. G.; GREGOIRE, M., 2002, “Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique”. *Journal of Geophysical Research* v. 107 (24), pp. 1-10.
- ZAVIOLOV, P. O.; MOLLER, O. O.; CAMPOS, E., 2002, “First direct measurements of currents on the continental shelf of southern Brazil”. *Continental Shelf Research* v. 22, pp. 1975-1986.
- ZAVIOLOV, P. O.; KOSTIANOY, A. G., MOLLER, O. O., 2003, “SAFARI cruise: mapping river discharge effects on Southern Brazilian shelf”. *Geophysical Research Letters* v. 30, no. 21, 2126, 4p.