

**ESTUÁRIO DO RIO MACAÉ: MODELAGEM COMPUTACIONAL  
COMO FERRAMENTA PARA O GERENCIAMENTO INTEGRADO DE  
RECURSOS HÍDRICOS  
ENIEF 2004**

**Karen Juliana do Amaral<sup>\*</sup>, Paulo Cesar Colonna Rosman<sup>\*</sup>, and José Paulo Soares de  
Azevedo<sup>†</sup>**

<sup>\*</sup> Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE  
Programa de Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos  
Centro de Tecnologia, Bloco I, Sala 206, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: karen@coc.ufrj.br

<sup>\*</sup> Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE  
Programa de Engenharia Costeira  
Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 203, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: pccr@peno.ufrj.br

<sup>†</sup> Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE  
Programa de Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos  
Centro de Tecnologia, Bloco I, Sala 206, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: zepaulo@hidro.ufrj.br

**Palavras-chave:** Rio Macaé, modelagem computacional, gerenciamento integrado.

**Resumo.** *Este trabalho mostra, através de um exemplo prático, a necessidade da integração entre o Gerenciamento de Recursos Hídricos e o Gerenciamento Costeiro. No caso utilizou-se a modelagem computacional como uma ferramenta de auxílio do gerenciamento integrado. A região de estudo compreende o trecho inferior da bacia do rio Macaé, incluindo a parte final, estritamente fluvial, toda zona estuarina da bacia, bem como a zona costeira adjacente. Através da modelagem computacional simulou-se a hidrodinâmica do trecho e a intrusão salina para cinco diferentes cenários. Em função dos resultados obtidos e análises efetuadas, reafirma-se a importância da utilização da modelagem computacional como ferramenta de gestão integrada, identificando lacunas de informação no sistema da bacia, e recomendando-se medidas para saná-las, bem como para melhorar a gestão integrada da bacia do rio Macaé.*

## 1 INTRODUÇÃO

As costas e os estuários são ambientes nos quais os impactos humanos têm causado uma grande variedade de mudanças. Eles são considerados como locais ideais para o desenvolvimento industrial ou portuário, devido à quantidade abundante de água que dispõem, por serem regiões de ligação para transporte e abrigo de navios. Assim, essas regiões sofrem intensas pressões e demandas dos vários setores da sociedade, podendo ser essa pressão a causadora de mudanças e degradações ambientais, que podem se tornar irreversíveis se não forem gerenciadas adequadamente.

Os próximos 10 ou 20 anos serão decisivos na implantação de planos de gestão ambiental. Estima-se que nesse período, a população da zona costeira mundial terá quase dobrado, o que exige um esforço dentro desse espaço de tempo, a fim de se criar a base para uma sociedade sustentável<sup>1</sup>.

Cenários prevêem que a população total atinja 11 bilhões de habitantes em um século, sendo que 95% desse crescimento deve ocorrer nos países em desenvolvimento, aos quais o Brasil pertence. Dessa população que habita os países em desenvolvimento, estima-se que dois terços (3,7 bilhões) viverão ao longo das áreas costeiras<sup>1</sup>.

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

A região de estudo adotada compreende o trecho inferior da bacia do Rio Macaé, incluindo a parte final estritamente fluvial, toda zona estuarina da bacia, bem como a zona costeira adjacente. Embora pouco extenso, esse trecho incorpora áreas de grande interesse social (abastecimento de água, pesca e agricultura) e industrial (abastecimento da Usina Termelétrica Norte Fluminense, cujas instalações encontram-se em andamento). Esta região, dotada de um alto potencial de riquezas naturais e uma grande variedade de unidades biológicas, principalmente no trecho estuarino, também tem sido impactada pelo desenvolvimento das atividades petrolíferas aí desenvolvidas.

A escassez de estudos na região do rio Macaé vem dificultando, em um plano mais amplo, a formação de um Sistema de Informações de Recursos Hídricos, imprescindível para o início da cobrança pelo uso da água no rio Macaé, que trará recursos para a revitalização do rio e posterior otimização dos seus usos múltiplos.

Portanto, o presente trabalho contribui para o enriquecimento dos conhecimentos sobre o comportamento hidrodinâmico de um corpo d'água estuarino, além de avaliar a intrusão salina no interior do estuário com a apresentação de cinco cenários de modelagem. Esse tipo de informação permite a otimização e racionalização do uso dos recursos hídricos, acompanhando a tendência mundial rumo a um desenvolvimento sustentável, já que o atual modelo de crescimento econômico gerou enormes desequilíbrios, assim, uma conciliação entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental é essencial para o bem estar da nossa geração e das futuras.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é mostrar, através de um exemplo prático, a necessidade da integração entre o Gerenciamento de Recursos Hídricos e o Gerenciamento Costeiro<sup>1</sup>, principalmente em regiões estuarinas, que são áreas de

---

<sup>1</sup>O termo Recursos Hídricos foi utilizado aqui com o sentido de águas interiores, ficando assim o gerenciamento dissociado em Gerenciamento de Recursos Hídricos e Gerenciamento Costeiro

transição entre o rio e o mar e que, portanto, sofrem influência direta de ações antrópicas e naturais ocorridas na bacia hidrográfica a montante.

O estudo tem com objetivo também mostrar como a modelagem computacional pode se tornar uma ferramenta de grande valia dentro nessa iniciativa, principalmente no processo de tomada de decisão.

Através da modelagem computacional de cinco diferentes cenários pretende-se descrever os padrões de circulação hidrodinâmica e a intrusão salina no complexo estuarino fluvial, em situação de maré usual sem vento e com posterior inclusão de maré meteorológica, para períodos de sizígia e quadratura. Enquanto com a modelagem hidrodinâmica busca-se avaliar o comportamento do trecho sob a influência da maré, com o modelamento da intrusão salina pretende-se determinar o alcance da frente de sal dentro do estuário, já que esse é um fator limitante dentro do processo de outorga do uso da água, cujas diretrizes estão contidas na Lei 9433/97<sup>3</sup>. A inclusão da maré meteorológica em um dos cenários em condição de sizígia buscou simular o limite máximo de intrusão.

Com as informações sobre a região reunidas e os resultados obtidos através da modelagem tem-se por fim contribuir para a formação do Sistema de Informações de Recursos Hídricos da bacia do rio Macaé, identificar as lacunas de informação no sistema da bacia, recomendando-se medidas para saná-las, a fim de contribuir para a melhora da gestão integrada da bacia do rio Macaé.

Através das análises dos resultados tem-se como objetivo a identificação das lacunas de informação no sistema da bacia e a recomendação de medidas para saná-las, bem como medidas para melhorar a gestão integrada da bacia do Rio Macaé.

### 3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Aa necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente de corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas<sup>4</sup>. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

A gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais requer dados ambientais, os quais, devido ao alto custo para seu levantamento, geralmente são escassos. Através de modelos calibrados, bem capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fez medições, podem-se interpolar e extrapolar espacial e temporalmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos para toda a área de interesse, o que permite uma melhor interpretação das medições isoladas, como por exemplo, fornecendo uma noção do trajeto das plumas de contaminantes<sup>4</sup>.

Além disso, a aplicação de modelos numéricos para a estimativa de padrões de circulação e transporte fluido em corpos d'água costeiros é de importância fundamental, tanto no que se refere à sua poderosa contribuição na avaliação de impactos ambientais como na identificação e definição das estratégias para a operacionalização e gerenciamento de programas de monitoramento ambiental<sup>4</sup>.

ROSMAN<sup>4</sup> ainda enfatiza que o entendimento e bom uso das informações pelo modelador depende do conhecimento por parte deste, do fenômeno de interesse. Modelos conceptuais dos fenômenos de interesse são fundamentais ao modelador, para que este possa fazer pleno uso das informações apresentadas, julgando a qualidade das informações recebidas e rejeitando-as, se necessário.

### **3.1 Princípios da modelagem estuarina**

#### **Modelos de circulação hidrodinâmica**

As equações gerais que representam os escoamentos naturais dos corpos d'água são não lineares e não possuem solução analítica conhecida para os domínios e condições de contorno existentes. Para que seja possível a solução destas equações, utiliza-se soluções numéricas, substituindo o domínio contínuo por um domínio discreto, o que resulta em equações algébricas cujas soluções podem ser obtidas através de algoritmos computacionais<sup>5</sup>.

A modelagem hidrodinâmica consiste na determinação de níveis e velocidades, o que permite definir os padrões de correntes.

No caso do rio Macaé, a escolha do modelo foi feita antes de tudo por uma questão da relação custo/benefício. De acordo com os perfis de salinidade obtidos para o estuário do Rio Macaé, este pode ser classificado como bem misturado, ou seja, apresenta padrões de quase homogeneidade ao longo da coluna d'água. Com base nessa informação, pode-se perfeitamente aplicar o modelo hidrodinâmico 3D simples para fluidos homogêneos ou mesmo o modelo promediado na vertical (2DH) para a avaliação do comportamento médio das correntes e a previsão das elevações da superfície livre no interior do estuário.

Optou-se então pela utilização de um modelo 2DH, pois é possível reduzir a dimensionabilidade do problema e ainda a determinar o padrão de circulação médio na vertical no estuário do rio Macaé, levando a uma economia de tempo e recurso computacional, sem prejudicar os resultados de interesse, já que não há necessidade de obtenção dos campos de velocidade tridimensionais.

A modelagem computacional foi realizada utilizando-se o programa SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), um sistema de modelos elaborado na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. Esse sistema utiliza para o seu módulo 2DH as equações governantes do modelo 3D integradas analiticamente na dimensão vertical.

#### **Modelo euleriano de transporte advectivo difusivo 2DH para transporte de sal**

Conforme as características hidrodinâmicas do estuário do rio Macaé, um modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical é bastante adequado para a simulação da distribuição de salinidade.

O modelo euleriano utilizado faz parte do sistema SisBAHIA e utiliza resultados do padrão de circulação (U e V) obtidos no módulo hidrodinâmico<sup>6,7</sup>.

### **4 CENÁRIOS SIMULADOS**

O estudo do padrão de circulação no corpo d'água em estudo é feito através de três simulações, caracterizando diferentes situações de vazão fluvial e maré.

Estas simulações têm como objetivos principais o conhecimento da hidrodinâmica da região em estudo, bem como avaliar o comportamento do transporte de sal dentro do estuário.

Para a modelagem do estuário do rio Macaé são considerados cinco cenários, oriundos das simulações realizadas:

Tabela 1 – Cenários simulados

Cenário	Maré		Vazão	
	quadratura	sizígia	estiagem	cheia
1	x			x
2		x		x
3	x		x	
4		x	x	
5		x + meteorológica	x	

Foram simulados no modelo hidrodinâmico períodos de 15 dias para todos os cenários, a fim de representar um período de sizígia e outro de quadratura. Nos modelos eulerianos foram simulados períodos de 30 dias, através da introdução de ciclos dentro do modelo hidrodinâmico acoplado, baseados nas elevações de nível d'água obtidas. Esses ciclos englobam períodos de quadratura e sizígia, tendo os tempos inicial e final do ciclo elevações muito próximas.

Em cada um dos cenários foram identificados os períodos mais críticos, com base nos resultados obtidos na modelagem do transporte de sal.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo adotada compreende o trecho inferior da bacia do rio Macaé, incluindo a parte final estritamente fluvial, toda zona estuarina da bacia, bem como a zona costeira adjacente. A seguir é apresentado um resumo das características da região de estudo. Para maiores detalhes consultar [8].



Figura 1 – Mapa da América do Sul com destaque para o estado do Rio de Janeiro.

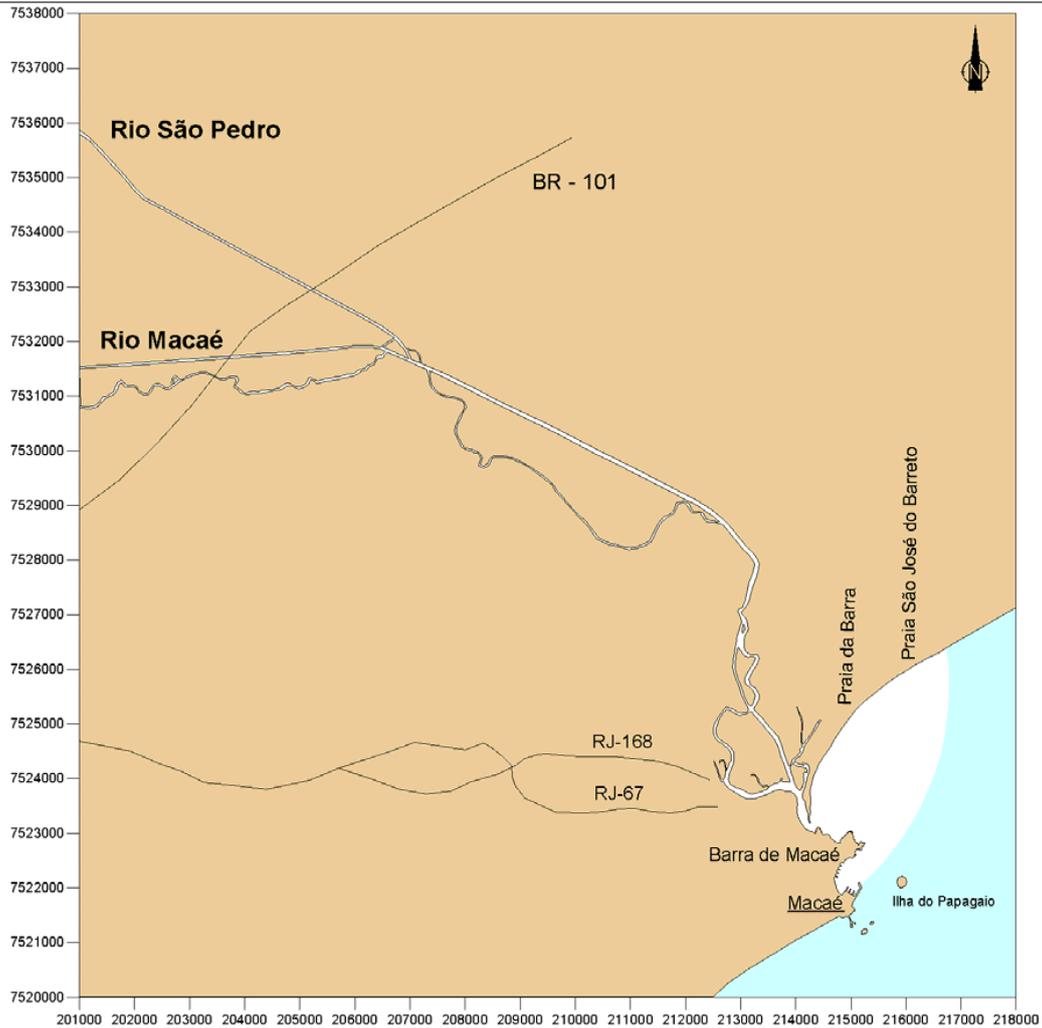


Figura 2 – Detalhe do domínio de estudo compreendendo o trecho desde a foz do rio Macaé até a BR-101, litoral do estado do Rio de Janeiro.

### 5.1 Características morfológicas

Baseado na campanha realizada em dezembro de 2001<sup>9</sup>, pode-se afirmar que o rio Macaé não apresenta grandes variações de profundidade. A largura do rio fica entre 40 e 50m a montante da confluência com o rio São Pedro e aumentando para, em média, 80m a jusante da confluência, com uma seção mais larga próxima à embocadura do estuário de aproximadamente 150m de largura.

De acordo com o levantamento topobatimétrico realizado em 27 e 28 de dezembro de 2001, a profundidade média na parte fluvial antes da confluência com o rio São Pedro é de 2m. Após a confluência, essa profundidade passa a ser de aproximadamente 4m.

A única seção levantada no rio São Pedro indica profundidade de aproximadamente 2m.

De acordo com a carta náutica nº 1507, as profundidades mínimas na Enseada de Macaé variam de 2,4 a 4m e no Porto de Imbetiba tem-se de 6 a 8m de profundidade.

## 5.2 Características hidrológicas

O ensaio realizado em setembro de 2001, mostra que ocorreu uma intrusão salina no trecho estuarino até uma distância de 13100m a jusante da BR-101.

Os perfis da salinidade mostram que o estuário pode ser considerado como bem misturado, pois o perfil vertical de salinidade é praticamente homogêneo.

A temperatura média da água medida neste período foi de 25,5°.

Os dados de vazão para a constituição dos Cenários 1 e 2, correspondem ao levantamento topobatimétrico utilizado na modelagem computacional, os quais foram resultantes de duas medições realizadas no dia 28 de dezembro de 2001, com o auxílio de molinetes HEL79817, uma no rio Macaé a jusante da ponte da BR-101 e outra no rio São Pedro a montante da ponte da BR-101. Essas vazões correspondem a 45,40 m<sup>3</sup>/s e 37,00 m<sup>3</sup>/s, para os rios Macaé e São Pedro, respectivamente.

Os dados de vazão para a constituição do Cenário 3, 4 e 5 foram retirados do resumo das medições de vazão nos rios Macaé e São Pedro, realizadas em pontos a jusante da BR-101 num período de aproximadamente dois anos e correspondem, respectivamente a 6,00 m<sup>3</sup>/s e 1,80 m<sup>3</sup>/s.

Detalhes sobre os dados dos ensaios podem ser obtidos em [8].

## 6 PARÂMETROS DO MODELO HIDRODINÂMICO

### 6.1 Parâmetros ambientais

#### Batimetria

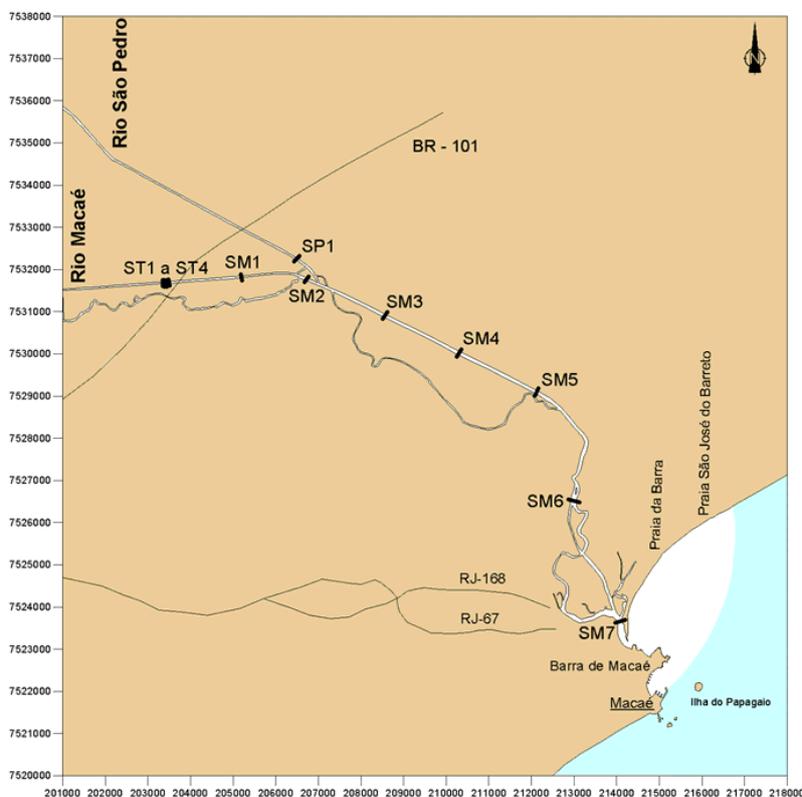


Figura 3 – Mapa com a localização das seções levantadas em campo.

A batimetria do rio Macaé foi obtida com auxílio de dados de campo levantados com a finalidade de realizar estudos hidrológicos no rio Macaé para subsidiar o projeto da tomada d'água da Usina Termelétrica Norte Fluminense. Nesse ensaio foram levantadas 12 seções topobatimétricas, das quais 4 (quatro) estão localizadas próximo ao local de instalação da Usina Termelétrica Norte Fluminense (ST1 a ST4), 7 (sete) distribuídas a jusante desse ponto ao longo do rio Macaé até sua foz (SM1 A SM7) e 1 (uma) localizada no rio São Pedro (SP1), principal afluente do rio Macaé, como indicado na Figura 3.

Para o trecho estuarino, além dos dados do levantamento topobatimétrico, a batimetria foi obtida também através da carta náutica nº 1507, que representa a Enseada de Macaé e Proximidades e os detalhes contidos no verso da mesma.

O arquivo contendo os pontos da batimetria e suas respectivas profundidades é importado pelo modelo e este faz a interpolação dos valores de profundidade para cada ponto pertencente à malha de elementos finitos, a partir das coordenadas (x, y, z) fornecidas.

Para evitar que o nível de água durante o processamento do modelo alcance valores negativos, o que é denominado "secagem", foi preciso impor valores mínimos de profundidade aos registros batimétricos, obtidos a partir da série temporal de elevação do nível do mar na entrada do estuário. O valor calculado considerou as principais componentes harmônicas da maré astronômica no Porto de Macaé. A amplitude encontrada para o intervalo de tempo inicial foi de 74,28 cm. Sendo assim, adotou-se este valor como valor inicial mínimo de profundidade dentro do canal.

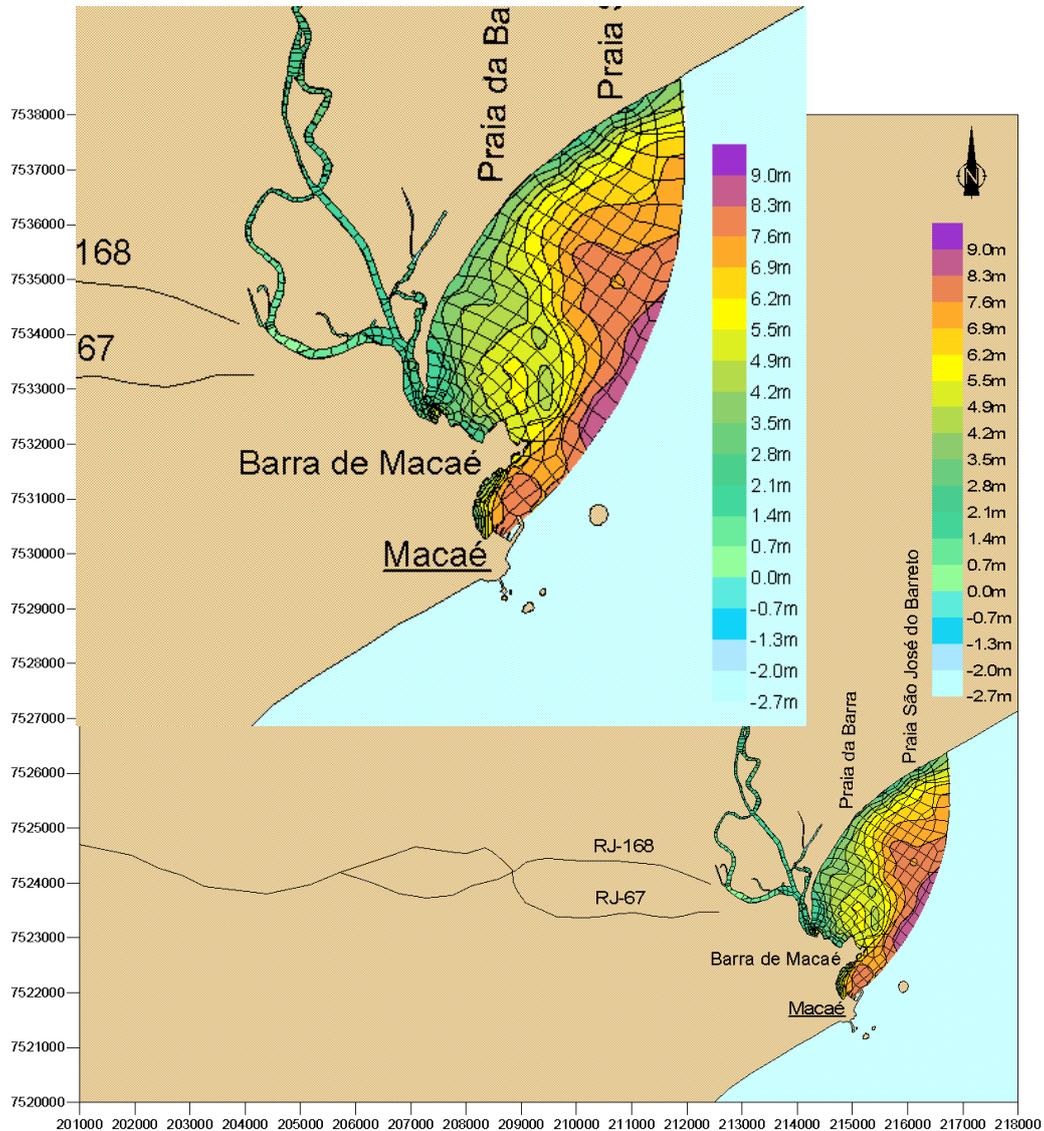


Figura 4 - Região de interesse do complexo estuarino fluvial, mostrando a batimetria considerada no domínio modelado, após interpolação realizada pelo modelo. Detalhe da batimetria na região estuarina.

### Rugosidade Equivalente de Fundo

De acordo com a ficha descritiva do posto fluviométrico instalado na margem direita do rio Macaé, localizado 50m a jusante da ponte da BR-101, para realização de campanhas de medição de vazão no ano de 2000 pela firma Engevix, a natureza do leito do rio é arenosa. Com base nesta informação e devido à falta de dados sedimentológicos, o valor adotado para a rugosidade equivalente de fundo é de  $\varepsilon = 0,03\text{m}^{10}$ .

### Maré

A série temporal de elevação do nível d'água devido à maré astronômica adotada neste estudo corresponde a registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para o Porto de Macaé,

localizado no Terminal de Imbetiba da Petrobrás, que compreendem 17 componentes harmônicas.

Devido à falta de registros dos efeitos meteorológicos considerados no Cenário 5, optou-se por utilizar uma onda com período de 7 dias e com 0,50m de amplitude. Na Figura 5, tem-se a maré meteorológica separadamente da maré astronômica e também a representação da variação temporal da elevação do nível d'água decorrente da sobreposição das duas marés no período de sizígia, que foi denominada maré final.

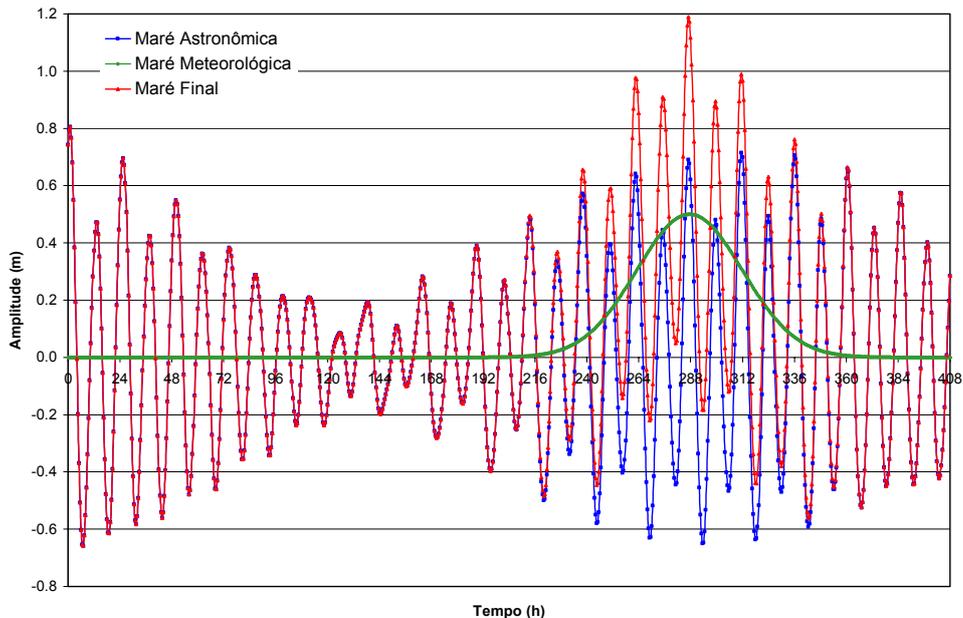


Figura 5 - Séries temporais da elevação do nível d'água devido à maré astronômica, meteorológica e sobreposição no Porto de Macaé.

### Temperatura

O rio Macaé não apresenta variações de temperatura ao longo da coluna d'água.

### Vento

Os dados de vento não foram implementados no modelo, pois como a área de estudo já possui um sentido escoamento bem definido, a influência do vento pode ser considerada insignificante.

### Outros parâmetros

Além dos parâmetros e condições descritas anteriormente, na simulação do mecanismo de circulação hidrodinâmica de um sistema estuarino fluvial são adotados a massa específica da água, com valor de  $1025 \text{ kg/m}^3$  (correspondente aos valores de salinidade atualmente observados), a massa específica do ar, com  $1,20 \text{ kg/m}^3$ , e a aceleração da gravidade, com  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

## 6.2 Características da malha adotada

A malha utilizada para a modelagem do estuário do rio Macaé respeita os contornos limites do domínio a ser estudado, totalizando 457 elementos quadráticos e 2335 nós.

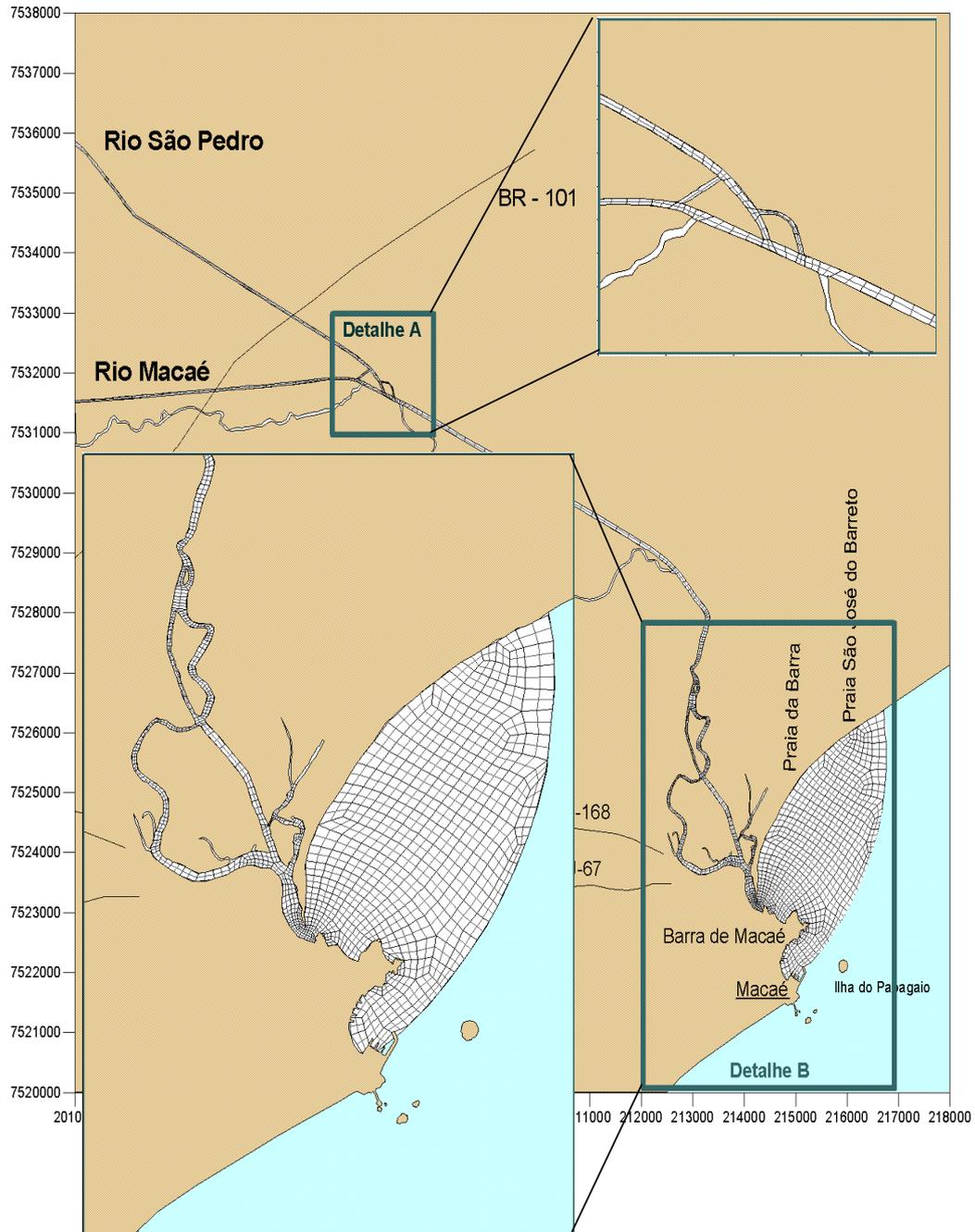


Figura 6 - Malha de discretização dos rios Macaé, São Pedro e parte estuarina, coordenadas em UTM. Os detalhes A e B representam a região fluvial e estuarina, respectivamente.

### 6.3 Condições de contorno

No estudo do estuário do rio Macaé foram consideradas como condições de contorno terrestres as margens impermeáveis e o afluxo dos rios Macaé e São Pedro, cujas vazões correspondentes são de 45,49 m<sup>3</sup>/s e 37,03 m<sup>3</sup>/s nos Cenários 1 e 2 e 6,00 m<sup>3</sup>/s e 1,80 m<sup>3</sup>/s nos Cenários 3, 4 e 5, respectivamente.

Como a entrada de vazões no SisBAHIA é feita por metro linear, nos Cenários 1 e 2, para o rio Macaé (com uma largura  $L = 41,41$  m), a vazão de entrada é igual a 1,10 m<sup>3</sup>/s.m e para o rio São Pedro (com uma largura  $L = 40,46$  m), a vazão de entrada é de 0,92 m<sup>3</sup>/s.m. Já para os Cenários 3, 4 e 5 a vazão de entrada no rio Macaé ( $L = 38$  m) é de 0,16 m<sup>3</sup>/s.m e no rio São Pedro ( $L = 23$  m), 0,08 m<sup>3</sup>/s.m.

Nos pequenos canais próximos à região estuarina não foi considerado nenhum tipo de afluxo, pois os canais já encontram-se assoreados e sofrem somente o efeito da maré.

Como condição de contorno na fronteira aberta utilizou-se, após um prévio “enchimento” do modelo, as constantes harmônicas já mencionadas.

Para o modelo de transporte euleriano, as condições de contorno impostas nos nós de fronteira aberta foi a salinidade de 35‰ e nos nós onde foi prescrita uma vazão nodal fluvial, salinidade de 0‰.

### 6.4 Condição inicial

Para o caso em estudo, foi necessário realizar um prévio “enchimento” do modelo. O resultado desse “enchimento” foi então utilizado como condição inicial para simulação dos cenários propostos. Nesta etapa prévia, foram criados arquivos específicos para os nós de entrada de vazão nos rios e para a fronteira aberta, procurando atingir elevações de nível d’água coerentes em cada fronteira. A condição obtida através do “enchimento” foi utilizada como condição inicial para o processamento do modelo hidrodinâmico com a introdução das constantes harmônicas dadas para o Porto de Macaé.

Para facilitar a observação dos resultados foram distribuídas algumas estações ao longo da região em estudo, de forma a contemplar todas as possíveis variações no escoamento, englobando o trecho fluvial, estuarino e marítimo. As estações em vermelho estão relacionadas ao modelo hidrodinâmico.

Tabela 2 - Identificação das estações.

Estação	Identificação
1	Estação Rio São Pedro
2	Estação Rio Macaé
3	Estação Jusante Confluência
4	Estação Antes Ilha Menor
5	Estação SM6
6	Estação Nova Holanda
7	Malvinas
8	Estação Montante Boca
9	Estação Boca
10	Estação Porto
11	Estação Mar

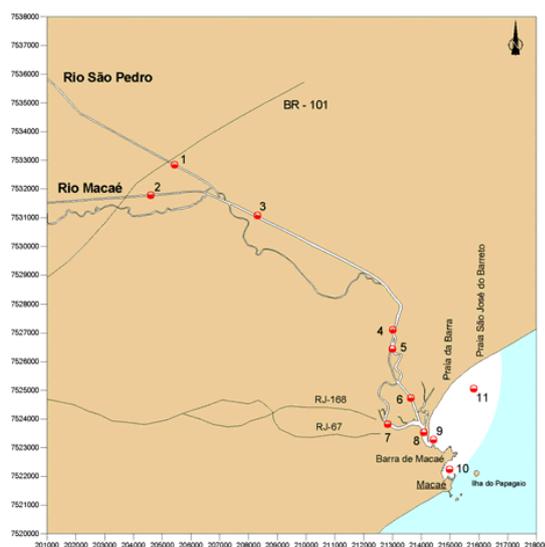


Figura 7 – Mapa base com identificação das estações.

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste artigo serão apresentados somente os resultados e análises para o Cenário 5, considerado como mais crítico dentro do gerenciamento de Recursos Hídricos, pois fornece o limite de intrusão da cunha salina no estuário, informação essencial na determinação da vazão fluvial a ser outorgada.

Os demais resultados e análises se encontram em [8].

### 7.1 Circulação hidrodinâmica no estuário do rio Macaé

A apresentação dos resultados é feita no instante em que a frente de sal se encontra mais avançada dentro do estuário.

A determinação dos padrões das correntes é feita utilizando-se os resultados fornecidos pelo modelo 2DH, através de campos de vetores representativos da velocidade. Estes vetores são resultantes das componentes em  $x$  e  $y$ , promediada ao longo da coluna d'água, e têm como intensidade o módulo destas componentes. Desta forma, a observação dos campos de vetores permite avaliar o escoamento médio das águas no interior do estuário.

#### **Cenário 5 (maré de sizígia com vazões fluviais de estiagem e inclusão de maré meteorológica)**

A Figura 8 contém as séries temporais no período de um dia das elevações e velocidades para estações distribuídas ao longo da região em estudo.

De acordo com a Figura 8, pode-se concluir o efeito da maré meteorológica não atinge o trecho do rio Macaé localizado a montante da confluência com o rio São Pedro, permanecendo este com as mesmas características do Cenário 4 (maré de sizígia com vazões fluviais de estiagem).

A jusante da confluência ocorre um aumento significativo na elevação da preamar em relação do Cenário 4, passando de 0,90 m para 1,20 m. Nesta estação ocorre a inversão de correntes. As velocidades na enchente são muito próximas de zero e na vazante ficam em torno de 0,15 m/s.

Na Estação SM6, as velocidades ficam em torno de 0,18 m/s como no Cenário 4. A elevação máxima de preamar passa de 0,85 m no Cenário 4 para 1,20 m neste cenário. No período de inversão das correntes, o módulo da velocidade se iguala à componente Norte-Sul da velocidade. A estofa de enchente coincide com o instante de preamar, enquanto a estofa de vazante ocorre 0,5 h atrasada em relação à baixa-mar.

A montante da boca, as velocidades de enchente e vazante têm o mesmo módulo (aproximadamente 0,35 m/s). No entanto, ocorre uma diferença significativa na elevação do nível de água em relação ao Cenário 4, passando de 0,80 m para 1,20 m. A estofa de enchente coincide com o instante da preamar e a estofa de vazante acontece 1 h atrasada em relação à baixa-mar.

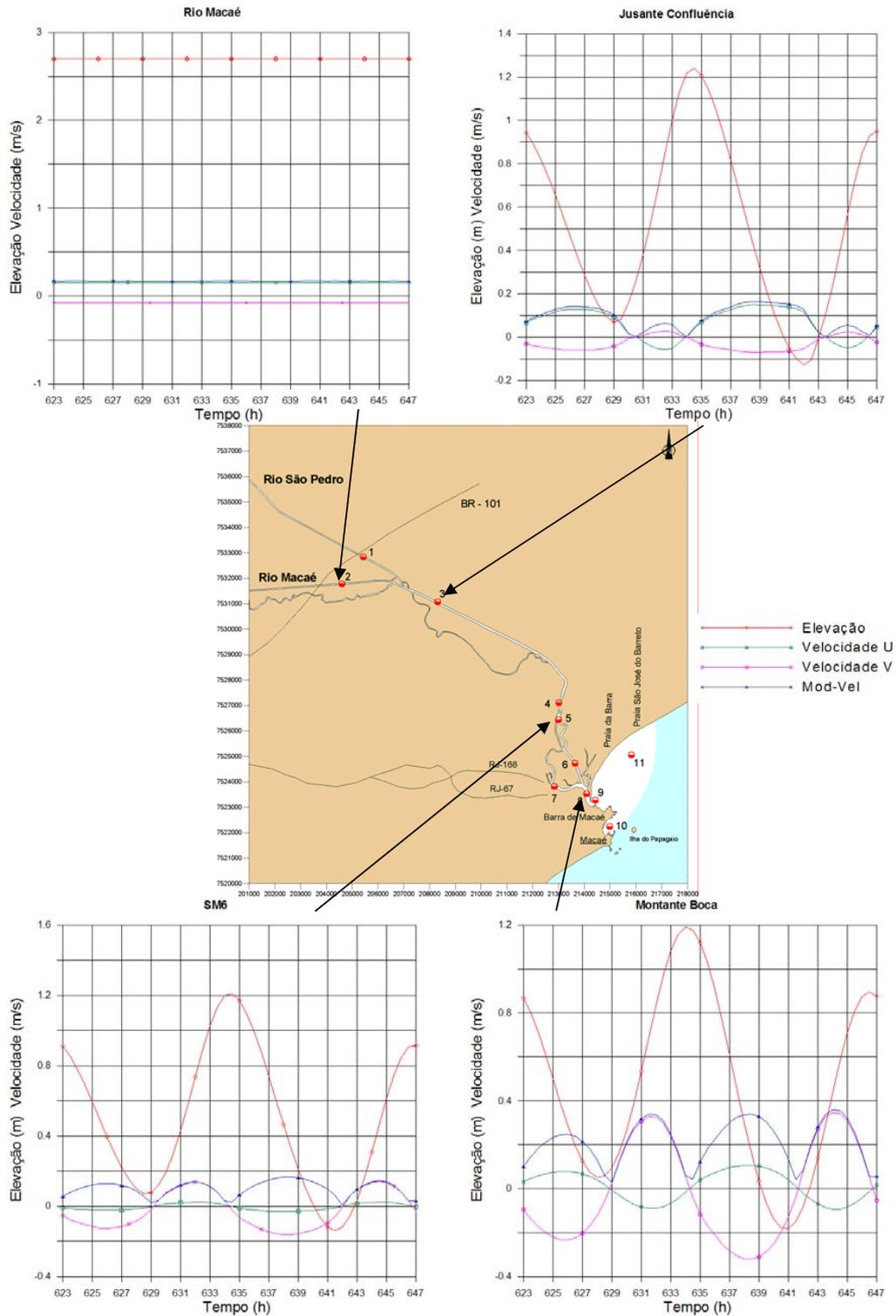


Figura 8 - Séries temporais de elevação do nível d'água e velocidades para Cenário 5.

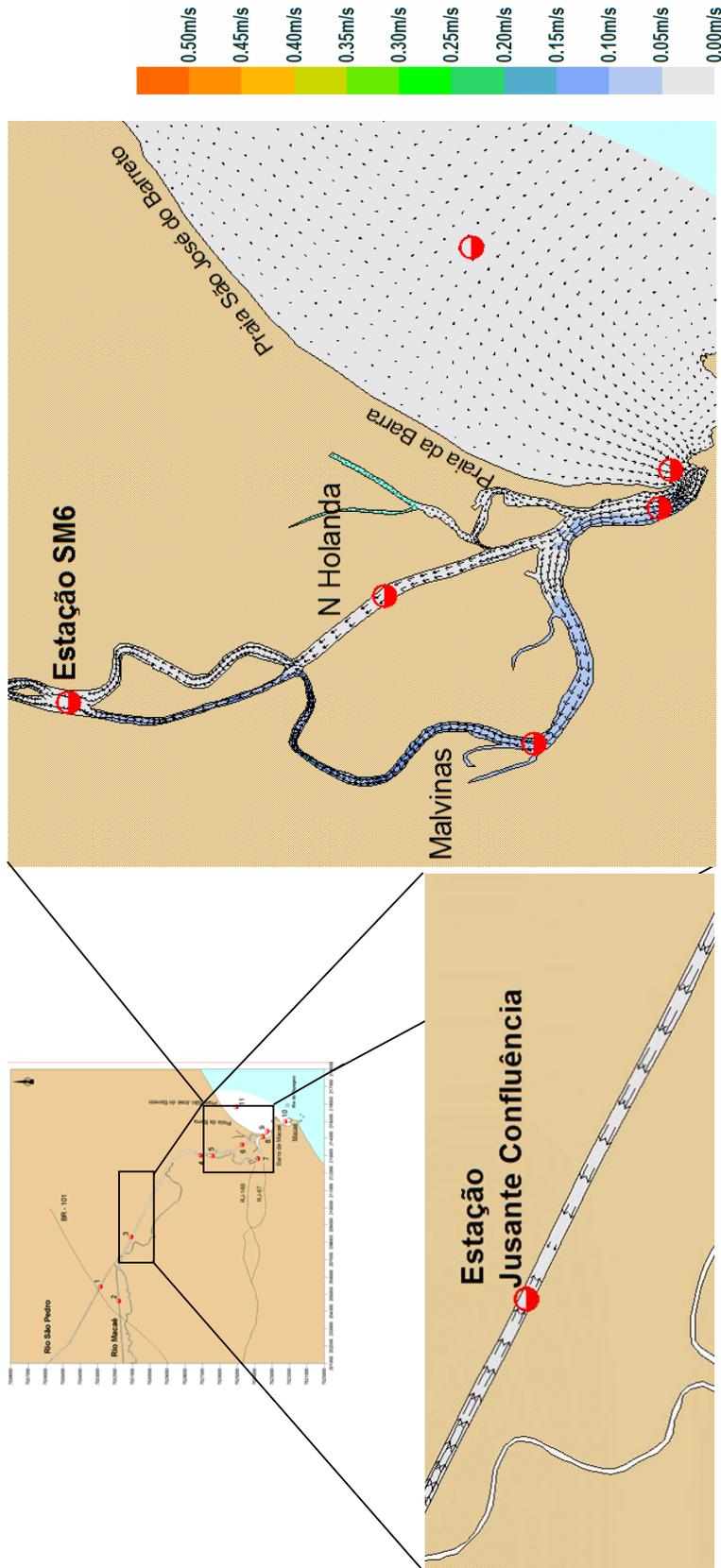


Figura 9 - A estampa de esquerda representa um detalhe da estação limite de inversão de correntes para o instante  $t = 634$  h com as isolinhas de velocidade. A estampa da direita representa as isolinhas de velocidade para o mesmo instante próximo à boca do estuário.

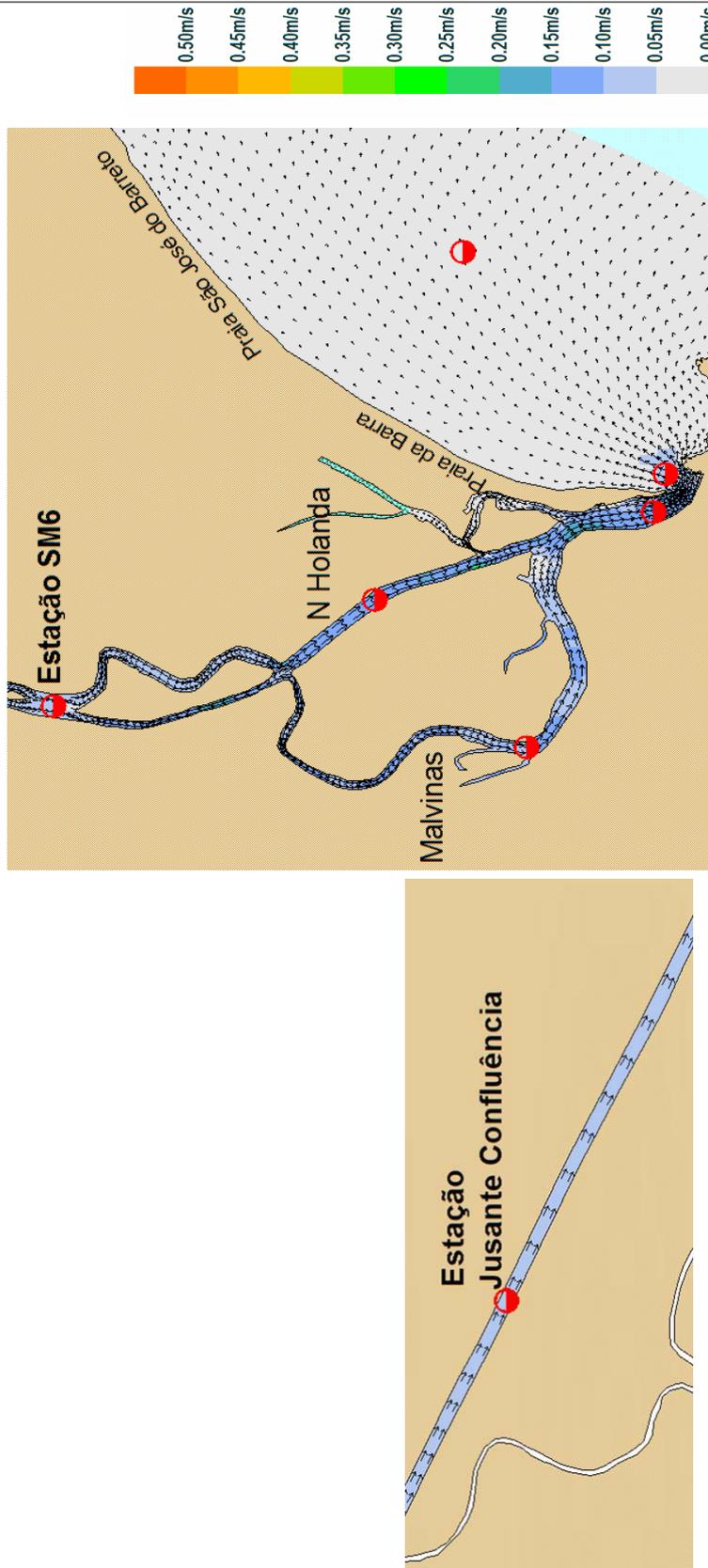


Figura 10 - A estampa de esquerda representa as isolinhas de velocidade para um detalhe da estação limite de inversão de correntes no instante em que ocorreu o pico de salinidade na Estação SM6 ( $t = 635$  h). A estampa da direita representa as isolinhas de velocidade para o mesmo instante próximo à boca do estuário.

## 7.2 Intrusão salina no estuário do rio Macaé

### Cenário 5

Para o Cenário 5 (maré de sizígia com vazões fluviais de estiagem e inclusão de maré meteorológica), o instante de tempo para análise dos resultados é aquele em que a intrusão salina na Estação SM6 é máxima. Nas estações localizadas a montante da estação SM6 não foi detectada presença de sal para este cenário. A Figura 11 **Error! Reference source not found.** mostra as isohalinas no instante de intrusão salina máxima  $t = 634,5$  h.

A salinidade máxima no limite da intrusão para este cenário foi de 2,7‰.

A partir da Figura 9 conclui-se que apesar da inversão de correntes ocorrer na Estação Jusante Confluência, a intrusão salina tem seu limite na Estação SM6.

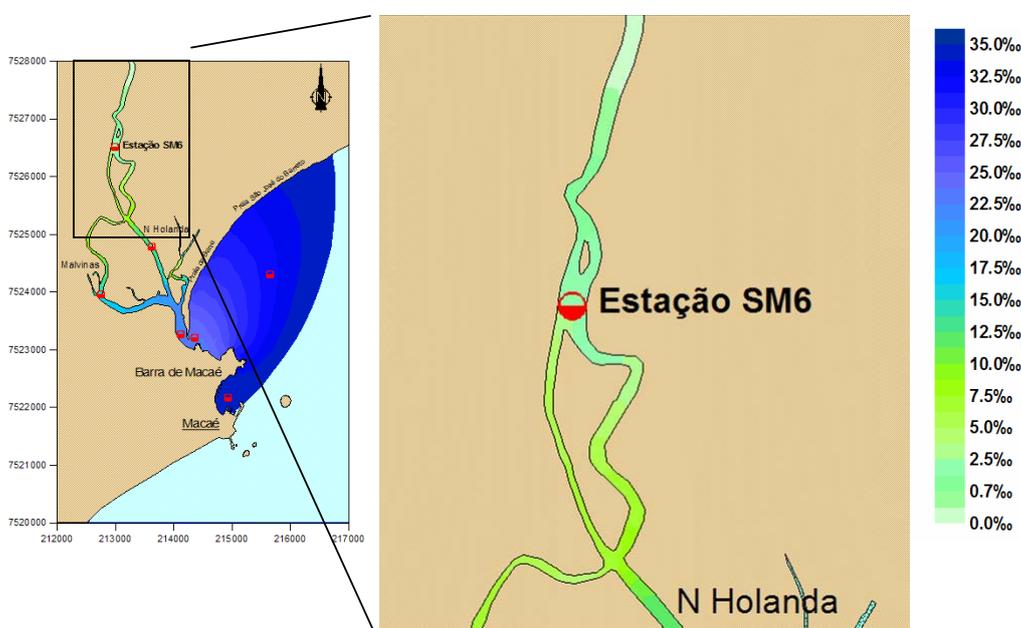


Figura 11 - Isohalinas obtidas no Cenário 5 no instante  $t = 634,5$  h com detalhe da Estação SM6 que representou o limite da intrusão salina.

## 8 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas algumas conclusões importantes relacionadas a cada cenário. Maiores detalhes podem ser encontrados em [8].

Em todos os cenários simulados observou-se que a estação localizada no rio Macaé a montante da confluência com o rio São Pedro permaneceu estritamente fluvial, não sofrendo alterações de velocidade e elevação. Isso se deve a uma forte declividade a montante dessa confluência.

Nos cenários 1 e 2, que estão associados a vazão fluvial de cheia, não ocorreram inversões de correntes e não foi detectada uma concentração de sal que caracterize água salgada.

Nos cenários 3, 4 e 5, que estão associados a vazão fluvial de estiagem, observa-se a influência da maré com inversões de corrente.

No Cenário 5 (maré de sizígia com vazões fluviais de estiagem e inclusão de maré meteorológica), cujos resultados foram apresentados neste artigo, a inversão avança até 11 km a montante da embocadura.

Apesar de não existirem estações intermediárias entre a do rio Macaé e a da jusante da confluência, pode-se afirmar que a influência da maré não ultrapassa o ponto de encontro dos rios São Pedro e Macaé.

A inclusão da maré meteorológica no Cenário 5 não causou um avanço significativo da frente de sal, a qual permaneceu nas proximidades da Estação SM6. A concentração de sal para esta mesma estação em relação ao Cenário 4 (mesma situação de vazão e maré astronômica) sofre um aumento, passando de 1,8‰ para 2,7‰, como esperado. Variações significativas no nível de água no Cenário 5 em relação aos outros cenários são verificadas.

Quanto ao tipo de maré, o estuário do rio Macaé apresenta uma maré mista, ou seja, uma combinação de maré progressiva com estacionária.

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que no estudo de caso do rio Macaé a vazão do rio e a maré são forçantes significativos na hidrodinâmica e no transporte de sal. Essa influência resulta de interações entre forças advindas do escoamento fluvial e da variação do nível do mar, as quais apresentam uma maior ou menor contribuição, de acordo com o caso a ser estudado. A modelagem comprovou que a parte fluvial e estuarina não funcionam como blocos separados, mas estão interligados, o que impossibilita a tomada de decisões de forma fragmentada.

No entanto, comparando-se os resultados fornecidos pelo modelo com os dados do levantamento topobatimétrico contido no Apêndice A de [8], percebe-se que há uma diferença considerável entre os dados de nível e velocidade obtidos no modelo e os dados de campo. A explicação para isso pode ser dada pela falta de dados de batimetria na parte fluvial, o que levou o modelo a interpolações que não representam a realidade, além da falta de um mapeamento em escala mais detalhada da parte fluvial modelada.

O estudo foi realizado com base em campanhas de campo já existentes. As conclusões obtidas não devem sofrer alterações qualitativas, mas a precisão quantitativa dos resultados deve ser aprimorada através de campanhas que acrescentem os dados de batimetria fluvial e atualizem os dados contidos na Carta Náutica, cujo levantamento foi efetuado pela Marinha do Brasil em 1974, já que a batimetria consiste num parâmetro de grande sensibilidade na modelagem estuarina e fluvial. Campanhas para a medição sinótica da salinidade, maré e correntes em diferentes pontos fixos permitirão uma calibragem e validação do modelo hidrodinâmico e de transporte de sal, trazendo mais confiabilidade aos resultados obtidos.

Cabe ressaltar que quaisquer informações adicionais obtidas a partir de campanhas podem ser facilmente incorporadas à base de dados do modelo já existente.

Além da avaliação da intrusão salina, estudos como do tempo de residência do estuário, da dispersão de plumas contaminantes e a quantificação da vazão sólida são extremamente importantes para que se avalie previamente as conseqüências no estuário de outorgas a serem concedidas no trecho fluvial. Para isso, o passo inicial é uma análise quantitativa e qualitativa dos diversos usos existentes na bacia, para que seja possível determinar a fronteira real entre a água doce e a salgada. Com essa informação é possível uma prévia delimitação do trecho do rio para a concessão de outorgas.

Embora não abordado neste estudo, é sabido que ocorrem problemas de erosão a leste da embocadura do estuário do rio Macaé, portanto, estudos futuros devem incluir o transporte e balanço sedimentológico dessa região.

O enfoque dado na análise dos resultados do estudo foi o da Engenharia, no entanto, o ideal é que a utilização da modelagem não se restrinja a uma só área quando da análise de uma outorga, mas que ela seja feita por um grupo multidisciplinar, visando a identificação dos impactos sob as diversas áreas que se interagem.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MUÑOZ, H. R. (organizador), 2000, *Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos: desafios da Lei de Águas de 1997*, 2 ed, Brasília, Secretaria de Recursos Hídricos.
- [2] BEZERRA, M. C. L., FACCHINA, M. M., RIBAS, O. T., 2002, *Agenda 21 Brasileira – Resultado da Consulta Nacional*, MMA/PNUD, Brasília.
- [3] BARROS, A. B., 2000, *Na Gestão de Bacias Hidrográficas, é preciso respeitar o espírito da Lei 9433: a descentralização das decisões e a participação efetiva da sociedade civil*, Revista da Secretaria de Recursos Hídricos (14/03/2000), Ministério do Meio Ambiente.
- [4] ROSMAN, P. C. C., 2001, “Os Modelos para Recursos Hídricos”. In: *Magrini, A. dos Santos, M. A. (eds). Gestão Ambiental em Recursos Hídricos (Vol. 3)*, Capítulo 2 (Parte III), Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ.
- [5] ROSMAN, P. C. C., 1997, “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos”. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., CAMPOS, R. O. G., EIGER, S., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3*, 1 ed., capítulo 3, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- [6] ROSMAN, P. C. C., 2001, “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5*, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- [7] BEDFORD, K., 1994, *Diffusion Dispersion and Sub-Grid Parameterization*. Chapter 4 in “Coastal, Estuarial and Harbour Engineers’ Reference Book”. Ed. By M.B. Abbot and W.A. Price. E&FN Spon.
- [8] AMARAL, K., 2003, Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [9] HICON ENGENHARIA LTDA, 2002, *Estudos Hidrológicos no Rio Macaé*. Relatório de Estudos Hidrológicos e Hidráulicos.
- [10] ABBOT, M. B., BASCO, D. R., 1989, *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*. Logan Group, UK Limited.