



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

II-117 - ESTUDO DA DISPOSIÇÃO FINAL DE EFLUENTES SANITÁRIOS NA BAÍA DE GUANABARA, REGIÃO DO CANAL DO CUNHA

Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha (1)

Engenheira Civil formada na Universidade Estadual do Estado do Rio de Janeiro. MSc e DSc. em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ na área de Recursos Hídricos. Pesquisadora visitante no Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental da Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz (ENSP/FIOCRUZ). Professora da Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ).

Aldo Pacheco Ferreira

Biólogo formado pela Universidade Gama Filho e Engenheiro Biomédico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. MSc e DSc em Engenharia Biomédica pela Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Pesquisador Titular da Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ). Professor da Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ).

Paulo Cesar Colonna Rosman

Engenheiro Civil formado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Mestre em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ e Doutor em Engenharia Civil pelo Massachusetts Institute of Technology, M.I.T., Cambridge, Estados Unidos. Professor Adjunto do Programa de Engenharia Oceânica na área de Engenharia Costeira & Oceanográfica na COPPE/ UFRJ.

Teófilo Carlos do Nascimento Monteiro

Engenheiro Civil, Especialista em Engenharia de Saúde Pública pela FIOCRUZ, Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento na USP e Doutor em Engenharia Civil pela University of Strathclyde, Glasgow, Escócia. Pesquisador Titular no Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental da ENSP/FIOCRUZ. Atualmente Assessor Regional de Desenvolvimento Local e Urbano da OPAS em Washington-DC.

Endereço(1): Escola Nacional de Saúde Pública / Fiocruz, 5a andar. Rua Leopoldo Bulhões, 1480 - Manguinhos – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21041-210 - Brasil - Tel: (21) 2598-2747

 cynara@ensp.fiocruz.br.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da poluição por esgoto sanitário na Baía de Guanabara, contribuindo para a solução de problemas ambientais, a partir do uso da modelagem computacional. O estudo é realizado a partir de simulações computacionais realizadas no modelo de qualidade de água. Esta ferramenta permite monitorar parâmetros de qualidade de água nos rios e na Baía, buscando soluções para resolver problemas graves relacionados à qualidade de vida e saúde ambiental em regiões sujeitas à contaminação por esgoto sanitário. As simulações foram realizadas usando como parâmetros de qualidade da água, o OD (Oxigênio Dissolvido) e a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio). Tal escolha foi motivada pela disponibilidade de dados existentes. Com estas simulações é possível avaliar os impactos ambientais que o lançamento de efluentes sanitários provoca na Baía, estudar qual a melhor solução de tratamento ou estratégia de lançamento e desenvolver níveis de monitoramento específicos, considerando que a modelagem computacional responde mais rapidamente a variações de concentrações dos efluentes do que medições analíticas feitas em laboratório. Os resultados mostram que os esgotos lançados nos rios e canais chegam à Baía, acumulam-se ao longo das regiões próximas aos estuários e comprometem em muito a qualidade da água da Baía de Guanabara; na região mais externa da Baía, o comprometimento é menor.

PALAVRAS-CHAVE: Baía de Guanabara, Modelagem Computacional, Modelo de Qualidade de Água, Ciclo do Oxigênio e Controle de Poluição.

INTRODUÇÃO

O Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental da Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca (ENSP) desenvolve um projeto com o objetivo de estudar a dispersão de alguns parâmetros de qualidade da água na Baía de Guanabara, através do desenvolvimento de um modelo de qualidade da água considerando várias espécies. O modelo utilizado faz parte do Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental, denominado SisBahia, desenvolvido pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. O SisBahia é capaz de realizar modelagem ambiental de corpos d'água costeiros e é constituído por um modelo de circulação hidrodinâmica para corpos d'água rasos, um modelo de transporte Euleriano Advectivo-Difusivo, um modelo de transporte Lagrangeano Advectivo-Difusivo e um modelo de Qualidade de Água. Para maiores informações sobre o SisBahia o leitor deve repostar-se a Rosman, 2000.

A gestão múltipla dos recursos hídricos, para a garantia de seu uso de forma saudável e com disponibilidade suficiente para atender as populações futuras, é de fundamental importância. Muitas vezes os impactos negativos sobre os cursos d'água urbanos estão relacionados a ações que teriam como objetivo promover o saneamento, numa visão higienista isolada, cuja predominância se dava, na prática, somente no afastamento dos dejetos, em desacordo com os conceitos atuais de saneamento ambiental.

Verifica-se no Brasil que os sistemas de abastecimento de água cobrem cerca 93% dos domicílios urbanos brasileiros e 25% dos domicílios em áreas rurais; segundo PNAD/1999-IBGE. A cobertura da população servida por rede de esgoto é de 44 %; menos de 20% deste volume tem tratamento adequado, reforçando a idéia do afastamento como prática na maioria dos casos, com crescente deterioração dos recursos hídricos enquanto corpos receptores. O destino final dos resíduos sólidos também tem contribuído de forma importante para a degradação dos recursos hídricos, já que a cobertura nacional é de 74 %, segundo PNAD 1999-IBGE. Além do elevado déficit de cobertura na coleta, os destinos finais têm impactos maiores sobre os recursos hídricos, ou por lançamento direto ou por práticas que deterioram as suas condições, como no caso dos lixões que, em grande parte, estão localizados às margens dos rios e em encostas e próximos a aglomerações urbanas, resultando em um grave problema de degradação ambiental, ou seja, na contaminação dos cursos d'água.

O presente trabalho apresenta um estudo da poluição por esgoto sanitário na Baía de Guanabara, contribuindo para a solução de problemas ambientais, a partir do uso da modelagem computacional. Esta ferramenta permite monitorar parâmetros de qualidade de água nos rios e na Baía, buscando soluções para resolver problemas graves relacionados à qualidade de vida e saúde ambiental em regiões sujeitas à contaminação por esgoto sanitário. Modelos ambientais que estudam a dispersão de poluentes em corpos d'água têm sido usados como suporte para tomada de decisões estratégicas no que se refere ao lançamento de efluentes sanitários em rios e, também, em regiões costeiras, que sofrem influência direta do aporte de poluição de origem continental.

O estudo da poluição por esgoto sanitário na região do canal do Cunha, na Baía de Guanabara, mostrado neste trabalho, é realizado a partir de simulações computacionais realizadas no modelo de qualidade de água. Estas simulações foram realizadas usando como parâmetros de qualidade da água, o OD (Oxigênio Dissolvido) e a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), apesar do modelo permitir que outras substâncias, como nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato e biomassa, possam ser simuladas. Tal escolha foi motivada pela disponibilidade de dados existentes. Com estas simulações é possível avaliar os impactos ambientais que o lançamento de efluentes sanitários provoca na Baía, estudar qual a melhor solução de tratamento ou estratégia de lançamento e desenvolver níveis de monitoramento específicos, considerando que a modelagem computacional responde mais rapidamente a variações de concentrações dos efluentes do que medições analíticas feitas em laboratório.

A avaliação dos efeitos da poluição das águas decorrentes de despejos de esgoto sanitário pode ser feita através do monitoramento de alguns parâmetros químicos de qualidade das águas, como, por exemplo, nitrogênio amoniacal, que indica a presença de esgoto doméstico lançado recentemente, nitrogênio nitrato, OD e DBO. Neste sentido, modelos computacionais de qualidade de água que contemplem fontes/sumidouros destes parâmetros, o transporte ao longo do corpo d'água e a sua reação com outras substâncias são ferramentas importantes no monitoramento ambiental, onde a principal fonte de poluição é o lançamento de esgoto doméstico (Bach *et al.*, 1995).

O transporte de uma dada substância em um corpo d'água é dominado pela advecção, sugerindo assim uma enorme dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte (Oliveira *et al.*, 2000). Neste contexto, a

correta caracterização da circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara é o primeiro passo no estudo da dispersão de escalares passivos. Neste trabalho, caracterização da circulação hidrodinâmica da Baía, que será usada posteriormente no estudo da dispersão de poluentes ao longo da Baía de Guanabara, é apresentada.

Uma das consequências da descarga de efluentes sanitários no meio ambiente é o déficit de oxigênio, que é causado pelo consumo de oxigênio pelas bactérias para oxidar a matéria orgânica presente no esgoto (Thomann & Muller, 1987). Como fonte de oxigênio pode-se citar a aeração natural e o oxigênio produzido pelos organismos fotossintéticos. Os processos naturais que influenciam as concentrações de OD e DBO são numerosos. O modelo utiliza os seguintes processos de transformação: reaeração, oxidação, nitrificação, respiração e desnitrificação e fotossíntese. Em sua maior parte, estes processos são modelados usando reações de primeira ordem, com coeficientes calculados através de experimentos de campo, adquirindo valores dentro de uma faixa específica. Com isso, são grandes as incertezas sobre estes processos de transformações. A calibração do modelo de qualidade de água passa obrigatoriamente pela correta definição destes coeficientes. Em adição a estes processos, são considerados os processos de advecção e difusão, que também afetam a concentração de OD e DBO.

A primeira seção deste trabalho apresenta uma descrição da Baía de Guanabara. A seguir são mostradas as fontes de poluição e uma avaliação da qualidade das águas dos rios contribuintes da Baía, definindo assim o cenário ambiental da Baía. Na seção seguinte é mostrada a aplicação da modelagem ambiental, bem como as condições de contorno utilizadas. Os resultados e as análises da modelagem da hidrodinâmica e de qualidade de água são apresentadas nas seções seguintes. Não será descrito neste trabalho os modelos matemáticos usado para simular a circulação hidrodinâmica bidimensional e os parâmetros de qualidade de água, bem como o modelo numérico e as condições de contorno envolvidas. Maiores informações sobre os modelos podem ser obtidas em Rosman, 2000 e Cunha *et al.* 2003.

ASPECTOS GERAIS DA BAÍA DE GUANABARA

A Baía de Guanabara está localizada próxima à região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e é uma, entre as muitas baías, que podem ser encontradas ao longo da costa do Estado do Rio de Janeiro. A Baía de Guanabara situa-se entre as latitudes $22^{\circ}40'S$ e $23^{\circ}00'S$, e as longitudes $43^{\circ}00'W$ e $43^{\circ}17'W$, representando uma área de aproximadamente 371 Km^2 , considerando o limite da Baía, a oeste, a Ponta do Leme/Pão de Açúcar, a leste, a enseada de Jurujuba, em Niterói. Segundo Amador, 1997, a superfície da Baía de Guanabara, que no ano de 1500 era de 454 Km^2 , recuou cerca de 83 km^2 , o que equivale a uma perda de 18,3%. Mede 27 Km, de leste a oeste, e 28 Km, de norte a sul, com um perímetro de aproximadamente 131 Km. A profundidade média é de 5,7 m, podendo chegar a 50 m nas proximidades da seção de entrada da Baía. No canal principal, as profundidades variam entre 15 e 20 m. O volume médio é $2,15 \times 10^9 \text{ m}^3$.

A bacia hidrográfica contribuinte da Baía de Guanabara possui uma área de aproximadamente 4080 Km^2 , em grande parte coincidente com a região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, com uma população de cerca de 8.200.000 habitantes. A região engloba 15 municípios: Duque de Caxias, São João do Meriti, Belford Roxo, Nilópolis, São Gonçalo, Magé, Guapimirim, Itaboraí, Tanguá, Rio de Janeiro, Niterói, Nova Iguaçu, Cachoeiras de Macacu, Rio Bonito e Petrópolis.

FONTES DE POLUIÇÃO

A principal fonte de poluição orgânica na Baía de Guanabara é o lançamento de esgoto doméstico não tratado, produzido pela população que vive no seu entorno. A carga orgânica produzida pela bacia de contribuição, constituída de 32 bacias hidrográfica, de cerca de 383.000 kg DBO/dia, é lançada, na prática, sem qualquer tratamento, nos rios e canais que deságuam suas águas na Baía; cerca de 15% dos esgotos domésticos lançados na Baía são tratados. A carga orgânica proveniente dos esgotos domésticos chega à Baía de Guanabara de forma mais concentrada na porção oeste e noroeste, gerando 78% da carga orgânica total de origem doméstica. A Tabela 1 mostra os percentuais de contribuição de cargas orgânica, de nitrogênio total e da vazão líquida dos principais cursos d'água no período de 1992 e 1993 (Costa, 1998).

Pode-se resumir o lançamento de carga orgânica proveniente de efluentes sanitários nas seguintes bacias:

- Bacia de Ramos: é composta pelo rio Ramos, que nasce na Serra da Misericórdia e atravessa uma região altamente poluída e densamente urbanizada, onde se encontra o Complexo do Alemão.
- Bacia de Irajá: recebe como contribuinte o canal da Penha, que foi construído paralelamente à Av. Brasil, com a

finalidade de captar as águas dos rios Nunes, Escorremão e Gruçui, ainda recebe como efluentes os rios Arapoji e Quitungo.

- Bacia do Canal do Cunha: coleta as águas dos rios que nascem na Serra dos Pretos Forros e no Maciço da Tijuca e atravessam áreas densamente povoadas como: Cascadura, Piedade, Lins de Vasconcelos, Engenho de Dentro, Inhaúma, Maria da Graça, Refinaria de Manguinhos, São Cristovão, até alcançar o Canal do Cunha e desaguar na Baía de Guanabara na altura da Ilha do Fundão. Além destes, desembocam no canal alguns rios como o Benfica, Jacaré, Faria, Timbó e Salgado. Esta bacia recebe também despejos industriais e a carga poluidora originada nas atividades da zona portuária.
- Bacia Acari, Pavuan e Meriti: formada pelo rio Meriti, atravessa zonas urbanas altamente povoadas e zonas industriais.
- Bacia do Rio Caceribu : O rio Caceribu é um dos principais contribuintes da Baía de Guanabara., com cerca de 20,7% de toda a área da região hidrográfica. Esta bacia tem problemas menores que as da zona oeste da Baía, no entanto, na última década teve um crescimento populacional superior ao da região da baía de Guanabara. O setor de serviço tem crescido com a urbanização, que por sua vez agravou os problemas de saneamento e a devastação das áreas verdes.
- Bacia do Rio Macacu: o rio Macacu nasce na serra dos Órgãos e junta com o rio Guapimirim, logo após o canal de Imunana, construído com o objetivo de drenar as áreas adjacentes freqüentemente inundadas. Com a construção do canal, o curso natural do rio Macacu foi desviado e se uniu ao rio Guapimirim. A bacia do rio Macacu é responsável pelo abastecimento de cerca de 2,5 milhões de pessoas. Suas águas também são usadas para irrigação e piscicultura.
- Bacia dos Rios Estrela e Inhomirim: O rio Inhomirim nasce na serra do Mar e após receber o rio Saracuruna, passa a chamar-se Estrela, até sua desembocadura na Baía de Guanabara Na bacia dos rios Estrela e Inhomirim vivem cerca de 600 mil pessoas. O alto grau de urbanização ocorre principalmente nas partes média e baixa da bacia. Nesta bacia encontra-se o vazadouro de resíduos sólidos do município de Magé, com um volume de cerca de 190 toneladas/dia.
- Bacia dos Rios Iguaçu e Sarapuí: O rio Iguaçu nasce na serra do Tinguá e deságua suas águas na Baía de Guanabara, tendo como principal afluente o rio Sarapuí. O rio Sarapuí nasce na serra de Bangu e passou a pertencer a bacia do rio Iguaçu por ocasião da retificação do curso médio e inferior, que teve sua foz desviada para o curso inferior do rio Iguaçu. Nesta bacia encontra-se o aterro sanitário de Gramacho, que recebe cerca de 5,5 mil toneladas/dia de lixo produzido pela região hidrográfica da Baía de Guanabara. Na bacia dos rios Iguaçu e Sarapuí vivem cerca de 2,1 milhões de pessoas`.

Tabela 1- Percentuais de contribuição de cargas orgânica, de nitrogênio total e da vazão líquida dos principais cursos d'água no período de 1992 e 1993.

Curso d'água	% contribuição de vazão	% contribuição de carga orgânica	% contribuição de nitrogênio total
Canal do Manguê	2,0	7,1	2,7
Canal do Cunha	3,5	14,0	3,7
Rio Irajá	1,2	4,5	1,7
Rio S. J. do Meriti	12,3	18,2	19,6
Rio Iguaçu	26,0	24,4	23,2
Rio Estrela	12,7	12,8	10,7
Rio Guapi-Macacu	20,8	3,8	15,7
Rio Caceribu	13,7	9,1	7,1

Outra fonte de poluição são os efluentes provenientes da atividade industrial. Cerca de 80.000 kg DBO/dia é lançado na Baía, proveniente do parque industrial. Existem ainda as fontes não pontuais, decorrentes da lavagem, pelas águas de chuvas, dos logradouros públicos, cujos os detritos são despejados na Baía através dos cursos d'água.

Outras fontes de degradação dos recursos hídricos da bacia da baía de Guanabara são:

- Escoamento superficial de áreas urbanas,
- Efluentes industriais,
- Efluentes oleosos,

- Lançamento de lixo,
- Efluentes e resíduos de atividades agropecuárias,
- Processos erosivos generalizados nos solos das bacias hidrográficas,
- Retificação, canalização e dragagem de cursos d'água,
- Aterros e drenagem de alagadiços e lagoas marginais e
- Ocupação de margens de rios e lagoas.

Como impactos decorrentes podemos considerar:

- Poluição orgânica de águas e sedimentos,
- Adição de substâncias tóxicas, metais pesados e óleo nas águas e sedimentos,
- Elevação da turbidez e assorimento da calha,
- Presença de lixo flutuante e no sedimento,
- Enchentes e
- Diminuição/Eliminação das matas marginais.

APLICAÇÃO DO MODELO AMBIENTAL À BAÍA DE GUANABARA

O domínio definido na modelagem é mostrado na Figura 1, onde também pode ser observada a malha de elementos finitos quadráticos usada na discretização do domínio, a partir de elementos quadrangulares sub-paramétricos Lagrangeanos. A batimetria da Baía, apresentada na Figura 3.

Na simulação do padrão de circulação hidrodinâmico foi considerada a maré medida na Ilha Fiscal entre os dias 01/06/93 e 30/06/93, fornecidas pela DHN, como o principal forçante, uma vez que a circulação é regida principalmente pelo afluxo e efluxo da maré. Na Figura 2 é mostrada a curva de nível d'água medida na Ilha Fiscal. Pode-se observar períodos de maré de sizígia e quadratura. A imposição da curva de maré é feita ao longo dos contornos abertos do domínio modelado (Fischer, 1979).

O coeficiente de atrito do fundo pode ser calculado via coeficiente de Chèzy. Este coeficiente depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo (Abbot e Basco, 1989). A distribuição de sedimentos no fundo da Baía é caracterizada pela presença de areia. O fundo da Baía é coberto por uma camada de material mais fino. Na região próxima a Ilha do Governador e nos trechos mais profundos do canal central, o fundo é arenoso. O aporte de sedimentos tem crescido de forma substancial devido ao desmatamento e a retificação dos canais. A Figura 4 mostra a distribuição espacial da amplitude da rugosidade de fundo no domínio de modelagem.

A descarga média mensal de todos os rios que desembocam na Baía de Guanabara é estimada em 280 m³/s, incluindo os 25 m³/s provenientes das águas transferidos pelo Paraíba do Sul através da captação no rio Guandu. A água oriunda da transposição de bacias é distribuída para os domicílios e indústrias, transformando-se em esgoto e efluentes líquidos, os quais acabam tendo como destino final os rios. Do volume total captado no rio Guandu, parte é consumida na própria bacia da baía de Sepetiba, outra é transferida para atendimento do setor oeste da bacia da Baía de Guanabara e a terceira é levada as bacias de Jacarepaguá, Lagoa Rodrigo de Freitas e microbacias de São Conrado, Copacabana, Leme e Urca.

Foram considerados ainda os rios afluentes na região modelada da Baía de Guanabara. As vazões médias adotadas podem ser observadas na Tabela 2. A localização dos rios pode ser observada na Figura 1. Não foi considerado para nesta simulação o vento como forçante do escoamento.

As simulações para avaliar a poluição provocada pelos efluentes sanitário na Baía de Guanabara, região do canal do Cunha, foram realizadas considerando como indicativo desta poluição as concentrações de OD e DBO; sendo assim, as condições de contorno devem ser impostas para estas duas substâncias. Os valores considerados representam as concentrações medidas nos rios pela FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente) e podem ser observadas na Tabela 2.

Para o modelo de qualidade de água, foram utilizados os seguintes parâmetros gerais na simulação numérica:

$K_{1D} = 0,1$ /dia, $K_D = 0,38$ /dia, $K_{DBO} = 0,001$ mg O₂/l, $V_{s3} = 0,0$ m/dia, $K_{2D} = 0,09$ /dia, $K_{NO3} = 0,1$ mg N/l, $K_a = 0,2517$ /dia, $K_{12} = 0,22$ /dia, $K_{NIT} = 0,2$ mg N/l, $GPI = 3,63$ /dia e $K_{1R} = 0,16$ /dia, onde: K_{1D} : coeficiente de decaimento da biomassa (dia⁻¹), K_D : coeficiente de desoxigenação em 20°C (dia⁻¹), K_{DBO} : constante de meia-

saturação para oxidação da DBO (mg O₂/l), V_{S3} : velocidade de deposição de substância orgânica (m/dia), K_{2D} : coeficiente de desnitrificação em 20⁰C (dia⁻¹), K_{NO3}: metade da constante de saturação para OD(mg N/l), K_a : coeficiente de reaeração em 20⁰C (dia⁻¹), K₁₂ : coeficiente de nitrificação em 20⁰C (dia⁻¹), K_{NIT}: metade da constante de saturação para OD limitado pelo processo de nitrificação (mg O₂/l), GPI : taxa de crescimento (dia⁻¹) e K_{1R} : coeficiente de respiração da biomassa em 20⁰C (dia⁻¹).

As condições iniciais devem relacionar todas as substâncias, embora o cálculo seja feito apenas para OD e DBO. As condições iniciais para o caso são:

- $C_s(x, 0) = 33,0 \text{ mg/l}$,
- $C_T(x, 0) = 25,0 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- $C_1(x, 0) = 0,1 \text{ mg/l}$,
- $C_2(x, 0) = 0,04 \text{ mg/l}$,
- $C_4(x, 0) = 0,0 \text{ mg/l}$,
- $C_5(x, 0) = 4,0 \text{ mg/l}$ e
- $C_6(x, 0) = 0,0 \text{ mg/l}$

onde: C_s é a concentração de sal (mg/l), C_T é a temperatura da água (⁰C), C₁ é a concentração de nitrogênio amônia (mg/l), C₂ é a concentração de nitrogênio nitrato (mg/l), C₄ é a concentração de biomassa (mg/l), C₅ é a concentração de DBO (mg/l) e C₆ é a concentração de oxigênio dissolvido (mg/l). As simulações foram realizadas no período de 15 dias, usando o padrão de circulação hidrodinâmico simulado pelo SisBahia.

Tabela 2 – Vazões e concentrações de OD e DBO nos rios afluentes ao domínio da Baía de Guanabara, usadas na simulação dos parâmetros de qualidade de água (Costa, 1998).

	Vazão média (m ³ /s)	Concentração de OD (mg/l O ₂)	Concentração de DBO (mg/l)
Canal do Canto do Rio	1,0	0,6	40,0
Rio Bomba	0,1	0,1	60,0
Rio Imboaçu	3,8	0,4	30,0
Rio Alcântara	0,1	3,0	150,0
Rio Mutondo	0,2	0,4	50,0
Rio Guaxindiba	0,1	0,1	16,0
Rio Cacerebu	35,2	5,2	2,0
Rio Guapimirim	53,3	3,2	4,4
Rio Macacu	8,8	8,0	2,0
Rio Soberbo	1,5	5,4	9,6
Canal de Magé	0,5	0,1	20,0
Rio Roncador	8,3	5,5	2,2
Rio Iriri	0,4	1,2	8,0
Rio Surui	4,4	4,5	4,0
Rio Estrela	32,8	1,4	6,0
Rio Inhomirim	2,7	2,7	4,4
Rio Saracuruna	3,0	1,1	4,0
Rio Iguaçu	43,1	0,1	20,0
Rio Sarapuí	31,7	0,1	26,0
Rio São João de Meriti	24,0	0,1	30,0
Rio Acari	7,0	0,1	30,0

Rio Irajá	3,0	0,4	30,0
Canal da Penha	1,1	0,1	60,0
Canal do Cunha	8,9	0,1	30,0
Canal do Mangue	5,1	0,1	40,0

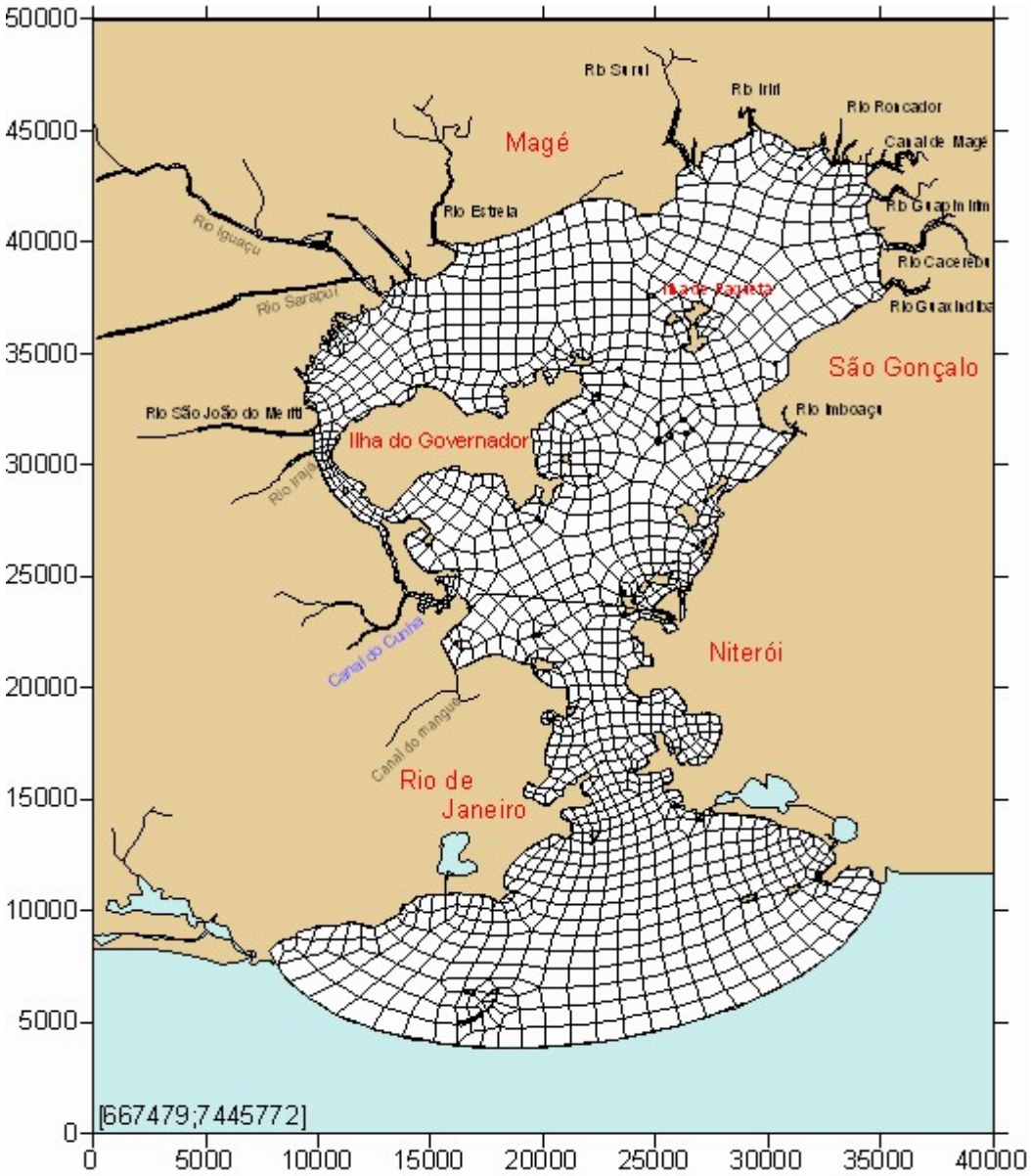


Figura 1 - Domínio de modelagem para a Baía de Guanabara, mostrando a malha com 1494 elementos finitos e 7011 nós .

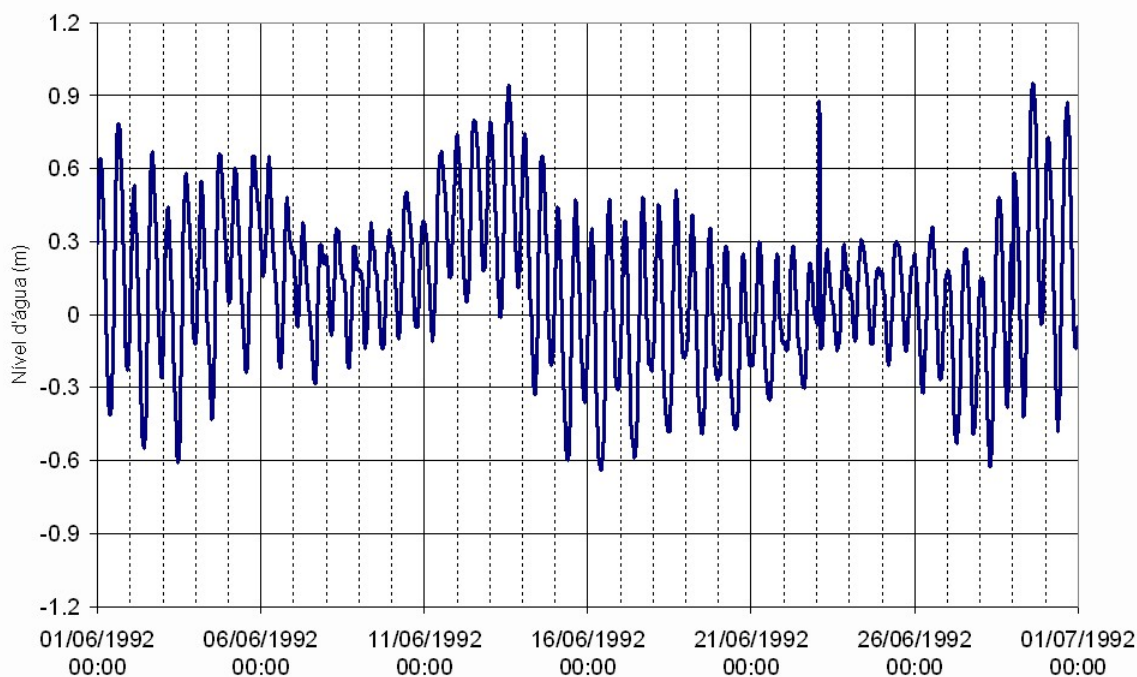


Figura 2 - Curva de maré utilizada na modelagem, obtida a partir de dados fornecidos pela DHN na Ilha Fiscal.

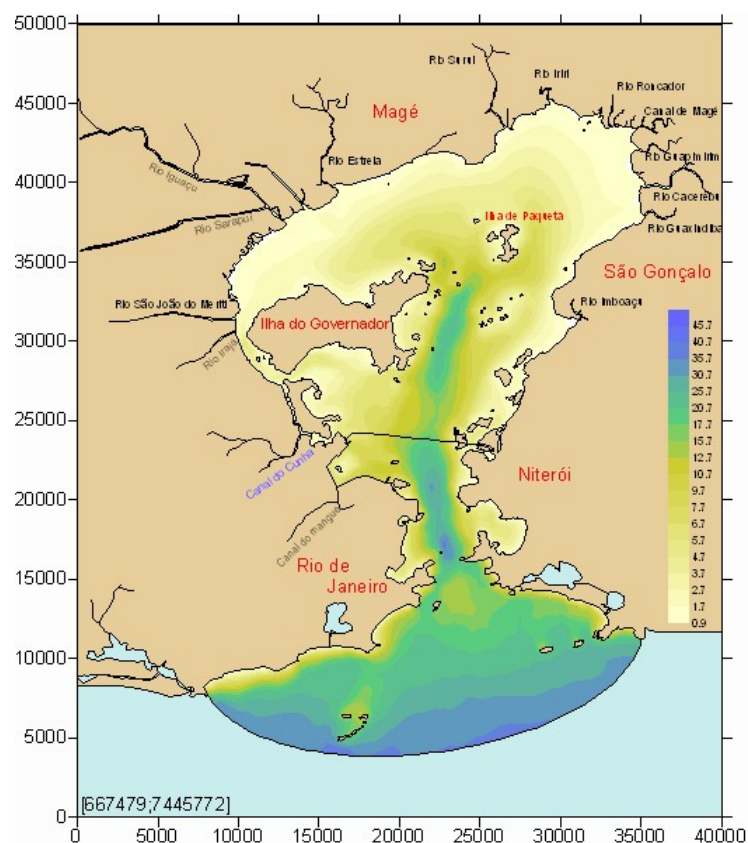


Figura 3 - Visualização da topografia de fundo do domínio de modelagem a partir da discretização apresentada Figura 1.

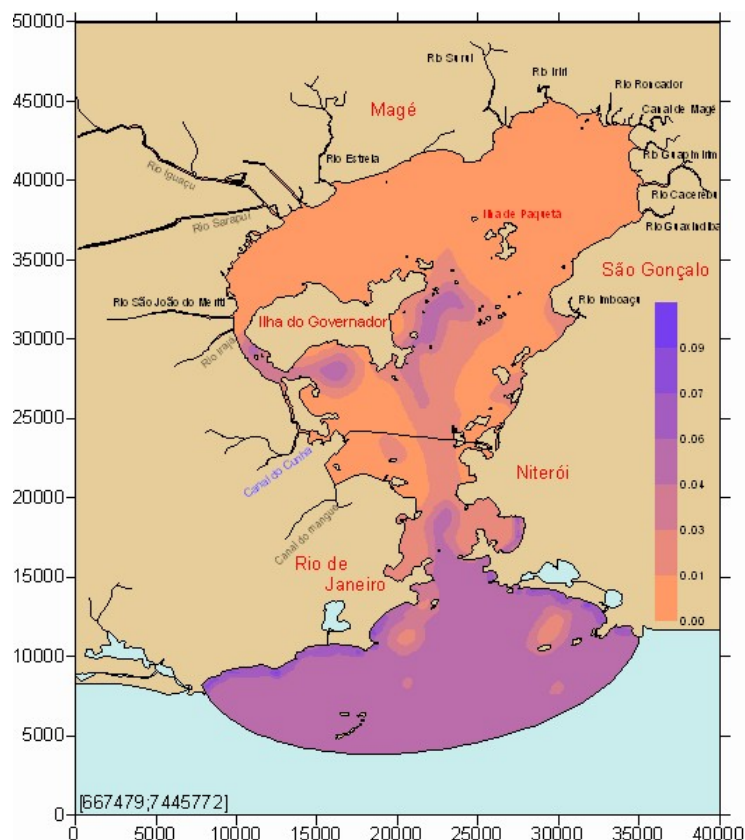


Figura 4 - Visualização da amplitude da rugosidade do fundo do domínio de modelagem a partir da discretização apresentada Figura 1.

RESULTADOS DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Os resultados da modelagem da circulação hidrodinâmica da Baía de Guanabara, apresentados nesta seção, devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível fazer a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. Como as medições disponíveis para comparação referem-se ao ano de 1992, seria necessário alimentar o modelo com dados referentes a este período. Neste caso, a batimetria deveria ser aquela observada no período; as vazões dos rios teriam que ser variáveis. Vale, no entanto, ressaltar que, como foram usados dados de maré medidos nas mesmas datas em que campanhas de medição foram efetuadas pela FEEMA. A simulação foi realizada entre os dias 01/06/93 e 30/06/93. Neste intervalo pode-se observar dois cenários distintos: cenário 1, situação de maré de sizígia e cenário 2, maré de quadratura.

De modo a ilustrar o padrão espacial de correntes em diferentes situações de maré, mostra-se na Figura 5, a cada três horas, o padrão de correntes na região próxima ao canal do Cunha, correspondendo ao ciclo de maré de sizígia (cenário 1), que se inicia no instante de meia-maré enchente, às 12:00 do dia 01/06, e prolonga para os instantes de preamar, meia-maré vazante e baixa-mar. Pode-se observar que o canal formado pela Ilha do Governador e o continente tende a guiar o campo de correntes na direção paralela ao contorno, intensificando seus valores. Na enchente as correntes são ligeiramente mais fortes que na vazante, principalmente nas regiões estranguladas. No fundo da Baía, ao norte, as correntes são fracas, apresentando um comportamento bastante semelhante tanto na enchente quanto na vazante.

A Figura 6 retrata o cenário 2, com condição de maré de quadratura, em instantes semelhantes. Pode-se observar que não há alteração do padrão de circulação hidrodinâmica, apenas os valores das velocidades são reduzidos. Os resultados apresentados nesta seção mostram que a simulação numérica usada caracterizar a circulação hidrodinâmica da Baía de Guanabara é adequada e pode ser usada de modo qualitativo para simular padrões de qualidade de água.

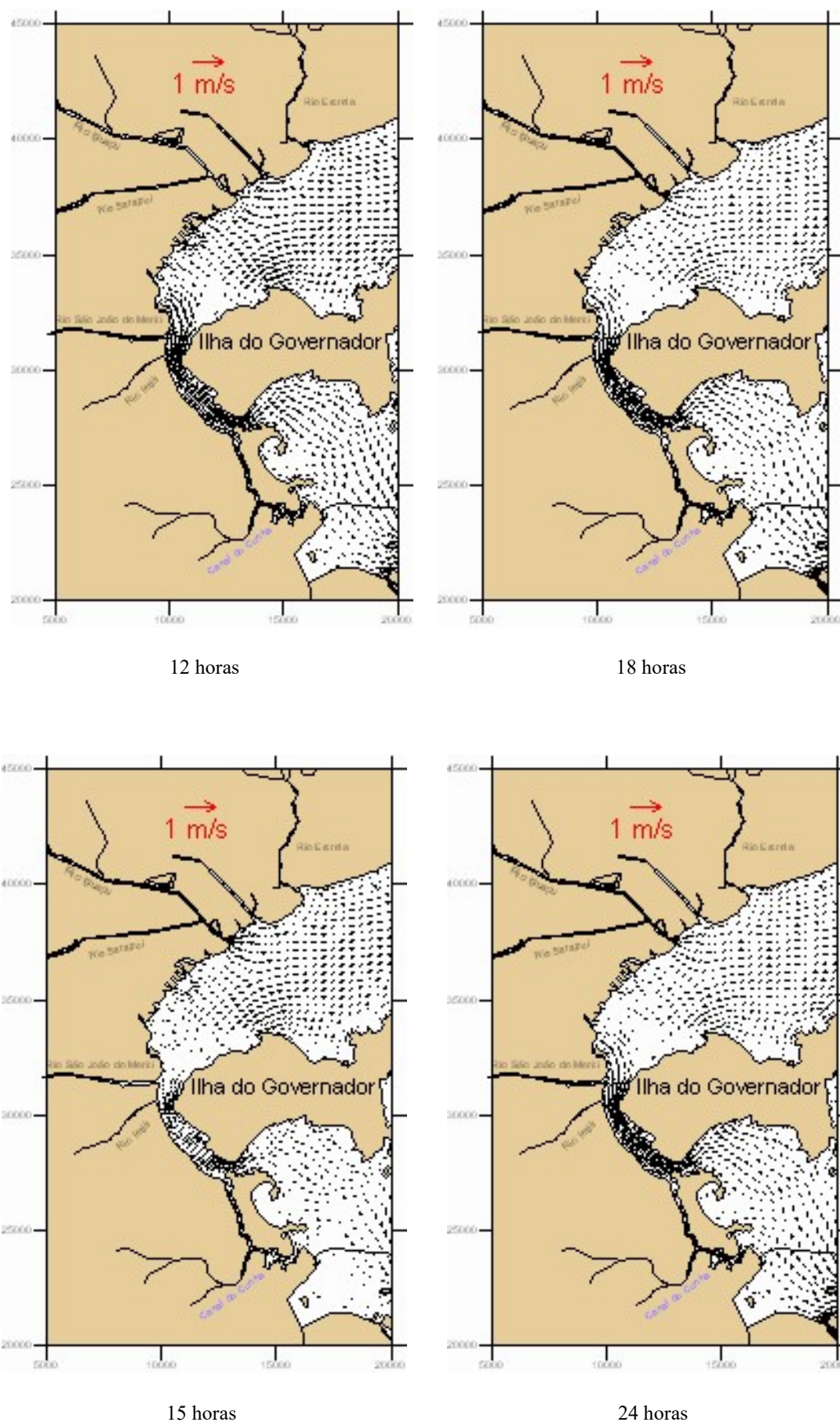


Figura 5 – Padrão de circulação na região de detalhe no dia 01 de junho de 1992.

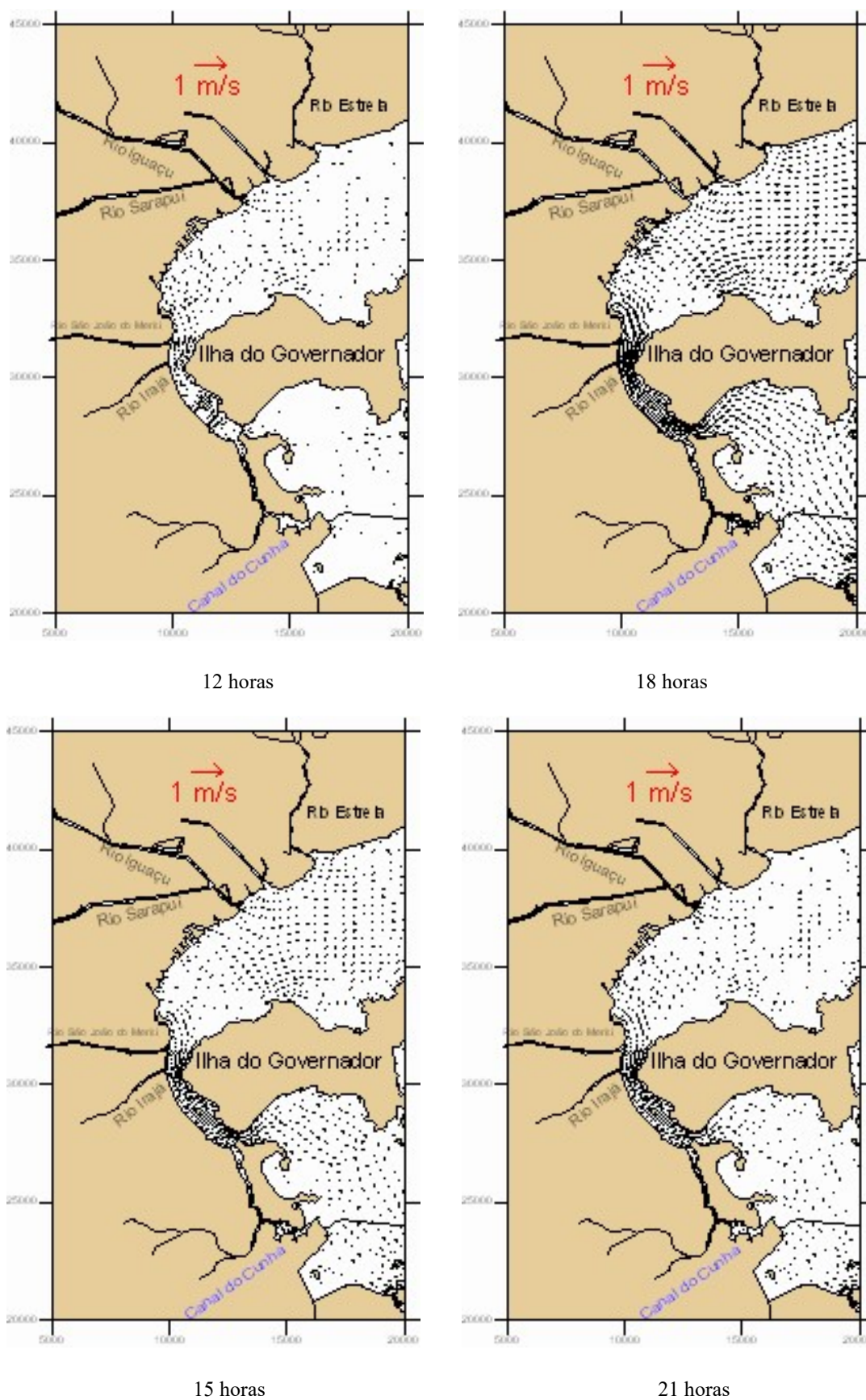


Figura 6 – Padrão de circulação na região de detalhe no dia 07 de junho de 1992.

RESULTADOS OBTIDOS PELO MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA

A região de estudo, o canal do Cunha na Baía de Guanabara, pode ser observado em detalhe na Figura 7, com as estações de medição operadas pela FEEMA, na baía e nos rios contribuintes da região. Na Tabela 3 podem ser observadas as coordenadas e os valores medianos, máximos e mínimos das concentrações de OD e DBO coletadas nestas estações durante o período de 1998 a 2001.

Observando os valores medianos das concentrações de OD, verifica-se que são superiores a 6,0 mg/l O₂, para as estações localizadas na Baía, fora do influência do canal do Cunha e do rio São João do Meriti. No entanto, nas estações localizadas próximas ao canal do Cunha as concentrações são inferiores a 3,5 mg/l O₂. No que se refere as concentrações de DBO, apresentam um comportamento semelhante ao das concentrações de OD, com valores máximos de 60 mg/l, para as estações dentro da Baía e 150 mg/l, para estações localizadas nos rios e canais. Estas estações possuem alto índice de degradação, diferentemente das estações localizadas na Baía, que apresenta concentrações de DBO menos elevadas.

Segundo a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, N^o 20 de 1986 (Conama, 1992) que estabelece os limites de parâmetros ou indicadores de modo a assegurar a utilização das águas para os usos específicos, as concentrações de OD não devem ser inferiores a 6 mg/l e as concentrações de DBO não devem ser superiores a 3 mg/l, para as águas destinadas ao abastecimento doméstico e à recreação de contato primário, classe 1. Considerando os valores medianos coletados pela FEEMA no período de 1998 a 2001, as concentrações de OD são sempre superiores a 6 mg/l nas estações localizadas na Baía, fora do influência do canal do Cunha e do rio São João do Meriti. No entanto, na região próxima ao canal do Cunha e ao rio São João do Meriti, as concentrações de OD são inferiores ao limite estabelecido pelo CONAMA. Analisando as concentrações de DBO, observa-se que em toda a região observada da Baía, os valores medianos das concentrações encontram-se superiores ao valor permitido. Pode-se concluir que a Baía de Guanabara, que funciona como corpo d'água receptor dos efluentes sanitários lançados diretamente nos rios e canais, tem a qualidade de suas águas comprometidas em um grande região próxima dos estuários destes rio.

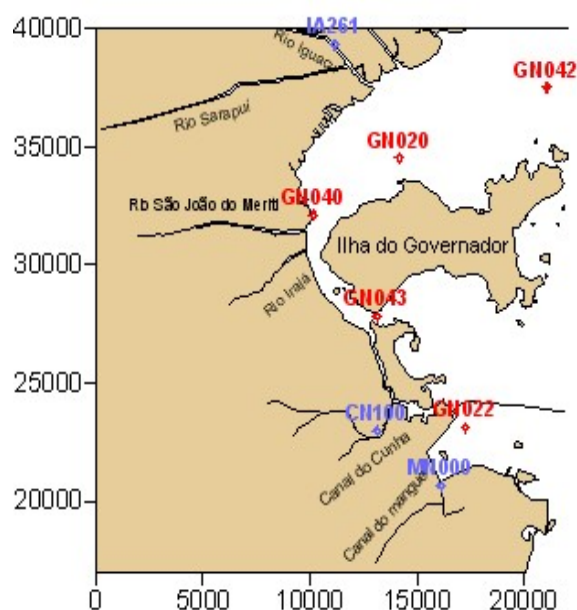


Figura 7 – Detalhe da região do canal do Cunha, com as estações de monitoramento operadas pela FEEMA.

As simulações das concentrações de OD e DBO realizadas pelo modelo de qualidade de água, SisBahia, usam como condição de contorno as concentrações medidas nos rios, mostradas na Tabela 2. Uma comparação entre as concentrações de OD e DBO obtidas pelo SisBahia, com os valores medianos, coletados pela FEEMA pode ser observada na Tabela 4. Os resultados da modelagem, apresentados nesta seção, devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível fazer a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. Seria necessário alimentar o modelo com os coeficientes do modelo de qualidade de água relativos à Baía de Guanabara, baseados em registros em pontos da Baía; assim, não seria necessário estimar tais valores a partir de dados da literatura. A calibração do modelo de qualidade de água passa obrigatoriamente pela correta definição destes coeficientes. Tais fatos podem explicar a diferença encontrada entre os valores medidos e os calculados pelo modelo. Com um trabalho de ajustamentos pode-se obter uma melhor concordância entre os resultados, aumentando assim o caráter qualitativo da modelagem. No entanto, em algumas estações, as variações entre os dados e os resultados são

muito pequenas, indicando que o modelo de qualidade de água, bem calibrado, pode "reproduzir" a distribuição dos parâmetros de qualidade de água de um determinado corpo d'água.

Tabela 3 – Coordenadas das estações de medição operadas pela FEEMA e valores medianos, máximos e mínimos das concentrações de OD e DBO coletados durante o período de 1998 e 2001.

Estação	Latitude	Longitude	Concentração de OD			Concentração de DBO		
			(mg/l O ₂)			(mg/l)		
			Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
GN043	220 50' 09" S	430 14' 24" W	0,2	3,5	11,9	2,0	8,8	40,0
GN042	220 44' 50" S	430 09' 50" W	3,5	8,6	16,3	2,2	8,0	30,0
GN040	220 47' 50" S	430 16' 10" W	0,3	3,1	19,9	3,6	17,5	45,0
GN022	220 52' 40" S	430 11' 57" W	2,7	6,9	14,1	2,0	4,7	13,2
GN020	220 46' 30" S	430 13' 50" W	0,5	6,2	21,5	2,7	10,0	60,0
MN000	220 54' 01" S	430 12' 36" W	0,1	0,1	1,7	5,8	40,0	150,0
IA261	220 43' 55" S	420 15' 38" W	0,1	0,1	0,8	4,0	60,0	60,0
CN100	220 52' 46" S	430 14' 22" W	0,1	0,1	0,9	10,0	30,0	120,0

Tabela 4 –Valores medianos das concentrações de OD e DBO nas estações operadas pela FEEMA e obtidas pelo SisBahia nas estações de monitoramento mostradas na Figura 7.

Estação	Concentrações de OD		Concentrações de DBO	
	(mg/l O ₂)		(mg/l)	
	FEEMA	SisBahia	FEEMA	SisBahia
GN043	3,5	6,6	8,8	23,6
GN042	8,6	8,7	8,0	8,8
GN040	3,1	6,6	17,5	23,6
GN022	6,9		4,7	
GN020	6,2	1,6	10,0	29,2
IA261	0,1	3,5	60,0	22,8
CN100	0,1	3,9	30,0	46,1

As Figuras 8 e 9 mostram a evolução temporal das concentrações de OD e DBO nas estações do canal do Cunha (CN100) e do rio Iguaçu (IA261), obtidas pelo SisBahia. Verifica-se uma dispersão dos resultados em torno dos valores medianos, o que confirma a influência da circulação oscilatória sobre as variações de concentrações. Analisando as concentrações de OD, observa-se o consumo de oxigênio pelas bactérias para oxidar a matéria orgânica presente, fazendo com que as variações das concentrações de OD sejam complementares as variações das concentrações de DBO. As fontes de oxigênio, principalmente a aeração natural, voltam a restabelecer o valor da concentração de OD, sendo novamente consumido pelas bactérias. Já as variações de DBO podem ser explicadas pela variação de volume que acontece na calha do rio ao longo de um ciclo de maré, reforçando assim a influência da circulação oscilatória sobre as variações de concentrações.

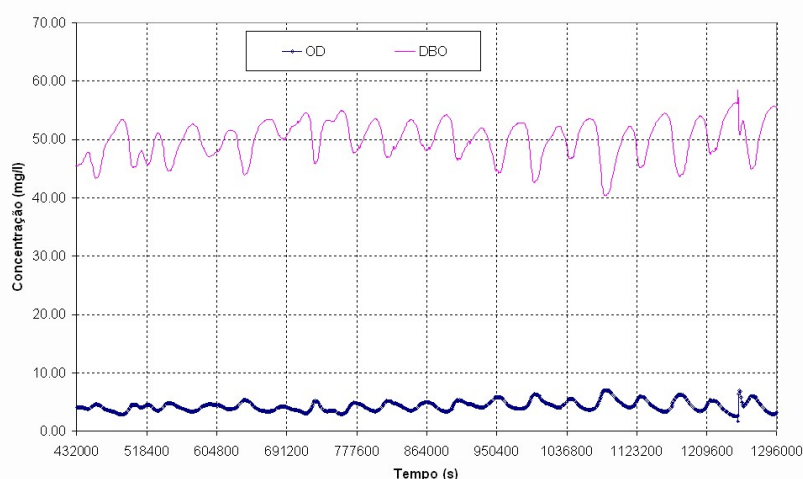


Figura 8 – Concentrações de OD e DBO obtidas pelo SisBahia na estação CN100.

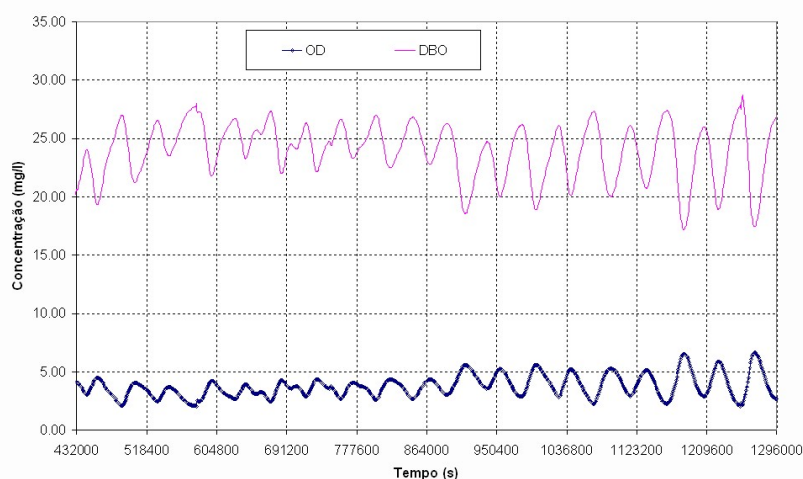


Figura 9 – Concentrações de OD e DBO obtidas pelo SisBahia na estação IA261

Foram também verificadas as variações das concentrações de OD e DBO no canal do Cunha e nas regiões da Baía próximas ao canal. Para tanto, foram escolhidas 5 estações; 3 localizadas na Baía de Guanabara e duas localizadas no próprio canal. A Figura 10 mostra a localização destas estações. São apresentados na Figura 11 as concentrações de OD e na Figura 12, os valores das concentrações de DBO obtidas pelo modelo, ao longo de oito dias do período de simulação. Observa-se que os valores de concentrações de OD são sempre superiores a 6,0 mg/l O₂, para as estações localizadas na baía, próximas ao canal do Cunha (C e D). No entanto, nas estações localizadas dentro no canal do Cunha(A, B e E), as concentrações são inferiores a 6,0 mg/l O₂. No que se refere as concentrações de DBO, verifica-se uma grande dispersão dos resultados, o que confirma a influência da circulação oscilatória sobre as variações de concentrações de DBO e OD. As concentrações de DBO apresentam um comportamento semelhante ao das concentrações de OD, com valores máximos de 53 mg/l, para as estações dentro do Canal do Cunha e 40 mg/l, para estações localizadas na baía, próximas ao canal do Cunha.

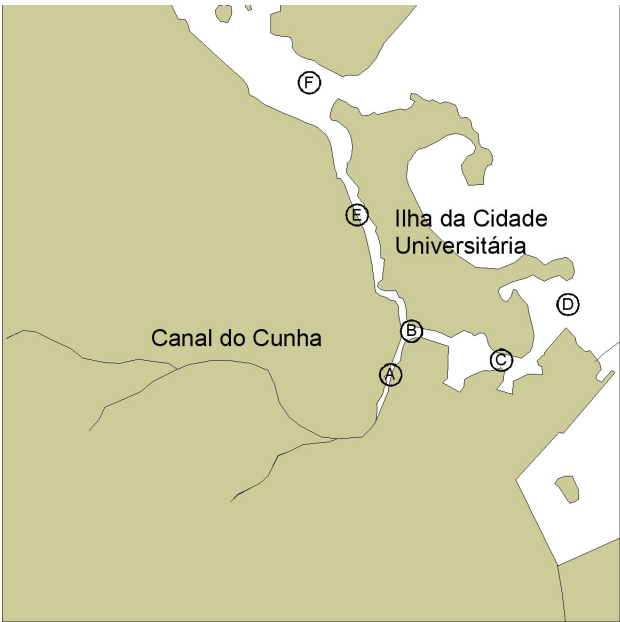


Figura 10 - Detalhe da região do Canal do Cunha, com as estações de monitoramento.

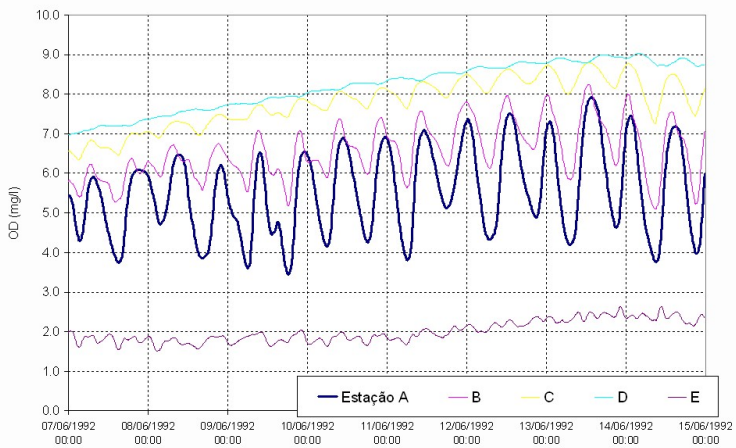


Figura 11 - Concentrações de OD obtidas pelo SisBahia nas estações de monitoramento mostradas na Figura 10.

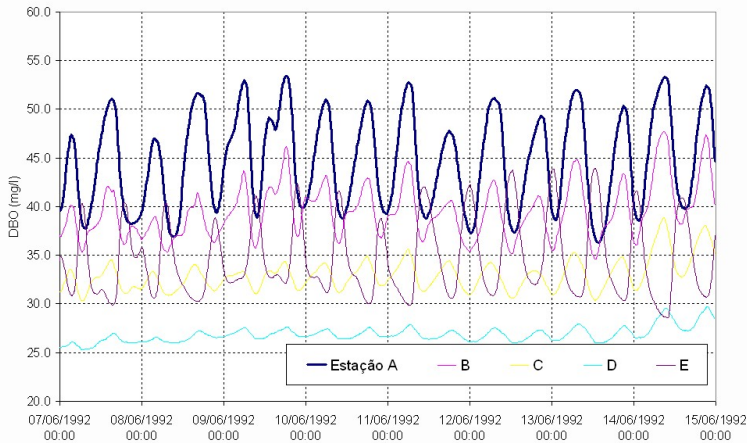


Figura 12 - Concentrações de DBO obtidas pelo SisBahia nas estações de monitoramento mostradas na Figura

10.

CONCLUSÕES

Neste trabalho mostra-se o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de qualidade de água para substâncias passivas e não-conservativas, considerando o ciclo do oxigênio, usado para avaliar a poluição por esgoto sanitário na Baía de Guanabara. Foi utilizado um modelo de qualidade de água que monitora as concentrações de OD e DBO como indicadores de matéria orgânica no corpo d'água. Considerando os resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo mostrou-se capaz de simular o transporte de contaminantes em baías, gerando resultados consistentes e mostrando, assim, toda a sua potencialidade no monitoramento ambiental. Vale lembrar que esta aplicação representa um primeiro estágio no processo de monitoramento, usando modelos de qualidade de água, em rios ou baías. Os resultados mostram ainda que os esgotos lançados nos rios e canais chegam à baía, acumulando-se ao longo das regiões próximas aos estuários e comprometem em muito a qualidade da água; na região mais externa da baía, o comprometimento é menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBOT, M. B & BASCO, R. Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering, Longman Group, UK Limited, 1989.
2. Bach, H. K., Orhon, D., Jensen, O. K. & Hansen, I. S. Environmental Model Studies for the Istanbul Master Plan. Part II: Water Quality and Eutrophication. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 32, No 2, 149-158, 1995.
3. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resoluções do Conama: 1984 a 1991. Brasília: IBAMA;1992.
4. Costa, H. Uma avaliação da qualidade da água das águas costeiras do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, FEMAR, 1998.
5. Culberson, S. D. & Piedrahita, R. H. Aquaculture pond ecosystem model: temperature and dissolved oxygen prediction mechanism and application. *Ecological Modelling*, v. 89, p. 231-258, 1996.
6. CUNHA, C. N.; ROSMAN, P. C. C. & MONTEIRO, T. C. N.. Avaliação da Poluição em Rios Usando Modelagem Computacional. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Brasil, v. 8, n. 3, p. 126-135, 2003 a.
7. FISCHER, H. B. (Ed.) Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press Inc., New York, 1979.
8. OLIVEIRA, A., FORTUNATO, A. B. & BATISTS, A. M.: 2000, Mass Balance in Eulerian-Lagrangian Transport Simulations in Estuaries, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 126, nº 08.
9. Rosman, P. C. C. Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
10. Thomann, R. V. & Muller, J. A. Principle of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper and Row, New York, 1987.