

IMPACTOS NOS PROCESSOS DE ASSOREAMENTO NA BAÍA DE SEPETIBA-RJ,
DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DA BACIA CONTRIBUINTE E DE DRAGAGENS
PORTUÁRIAS

Patrícia Ney de Montezuma

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. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

Prof^a. Enise Maria Salgado Valentini, D.Sc.

Prof^a Thereza Christina de Almeida Rosso, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

MONTEZUMA, PATRÍCIA NEY DE

Impacto nos Processos de Assoreamento
na Baía de Sepetiba-RJ, de Sedimentos Ori-
undos da Bacia Contribuinte e de Dragagens
Portuárias [Rio de Janeiro] 2007

XI, 94 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Baía de Sepetiba
2. Porto de Sepetiba
3. Assoreamento
4. Transporte de sedimentos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me permitido desenvolver e concluir este trabalho. Para isto, contei com a ajuda de algumas pessoas que não posso deixar de agradecer. Meus pais, padrasto e madrasta também, sempre me motivando, transmitindo o orgulho que sentiam de eu estar cursando o Mestrado. Meu marido, que no início de tudo era o meu namorado de longa data, e que em todos os momentos soube entender que o mestrado tinha prioridade entre tantas coisas que precisávamos resolver no início de nossa vida a dois. E queria muito que eu me tornasse uma engenheira M.Sc. como ele. Meus amigos da Costeira, que me ajudaram em tantos momentos que eu nem posso resumir aqui. Incluem-se neste grupo três grandes amigas, muito queridas e competentes: Valéria, Marise e Glace. E também alguns outros amigos de fora, de todas as horas, que eu sei que sinceramente torceram por mim. Meus professores, todos aqueles que desde a graduação fizeram surgir em mim o interesse em estudar o meio ambiente e tudo relacionado aos recursos hídricos, ao mar e à todas as águas da natureza. E que também me serviram de exemplo para a atividade que exerço hoje, agora que sou uma professora principiante. Meu orientador, professor Rosman, por todo o conhecimento, entusiasmo, compreensão nos momentos difíceis e conselhos para a vida. E também o professor Fialho, por toda ajuda e orientação, mesmo sem ser formalmente meu orientador titular. E, ainda, à CAPES, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos cedida durante o curso.

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

IMPACTOS NOS PROCESSOS DE ASSOREAMENTO NA BAÍA DE SEPETIBA-RJ,
DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DA BACIA CONTRIBUINTE E DE DRAGAGENS
PORTUÁRIAS

Patrícia Ney de Montezuma

Junho/2007

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho estuda as prováveis causas do processo de assoreamento em praias do litoral nordeste da Baía de Sepetiba, RJ. A pesquisa foi desenvolvida com auxílio de modelagem computacional do transporte de sedimentos na baía. Os cenários de modelagem consideraram as duas prováveis origens dos sedimentos causadores do processo de assoreamento: 1. Cargas de sedimentos trazidas pelos rios que deságuam na baía. 2. Sedimentos provenientes de bota-fora, no interior da baía, de dragagens concernentes ao Porto de Sepetiba.

Os resultados das modelagens realizadas possibilitaram a elaboração de mapas mostrando a mobilidade e deriva de sedimentos, e reproduziram a tendência observada de deposição de sedimentos finos ao longo da zona costeira nordeste da Baía. As análises levaram à conclusão de que a contribuição maior para o problema tem origem nos sedimentos trazidos pelos rios, evidenciando a necessidade de medidas corretivas para diminuição da carga sólida em tais rios.

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

IMPACTS OF SEDIMENTS FROM CONTRIBUTING WATERSHED AND PORT
DREDGING IN THE PROCESS OF SILTING IN SEPETIBA BAY-RJ

Patrícia Ney de Montezuma

June/2007

Advisors: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

This work studies the probable causes of the shoaling processes occurring along the Northeastern littoral of Sepetiba Bay, RJ. The research was developed with the aid of computational modeling of sediment transport in the bay. The modeling scenarios considered the two probable origins of the sediments causing the shoaling process: 1. Sediment load carried by the rivers that outflow into the bay. 2. Sediments from the dumping site within the bay of dredging works concerning the Sepetiba Port.

The modeling results allowed the elaboration of maps showing the mobility and the drift of sediments, and reproduced the trend of fine sediments deposition along the northeastern coastal area of the bay. The analyses bring to the conclusion that the major contribution for the problem comes from the sediments carried by the rivers, indicating the need of corrective measures to decrease the sediment loads in such rivers.

Índice do Texto

1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO</u>	3
2.1. A BAÍA DE SEPETIBA	3
2.2. A BACIA DE SEPETIBA	7
2.2.1. HISTÓRICO	9
2.2.2. PRINCIPAIS CURSOS D'ÁGUA DA BACIA.....	11
2.3. PORTO DE SEPETIBA.....	14
3. <u>SOBRE A ORIGEM DOS SEDIMENTOS</u>	16
3.1. PRIMEIRA HIPÓTESE: SEDIMENTOS ORIUNDOS DA BACIA CONTRIBUINTE	17
3.1.1. OCUPAÇÃO URBANA E INDUSTRIAL	17
3.1.2. ESGOTOS E RESÍDUOS SÓLIDOS	21
3.1.3. EROÇÃO DA CALHA DOS RIOS	23
3.2. SEGUNDA HIPÓTESE: SEDIMENTOS ORIUNDOS DO BOTA-FORA DO PORTO	24
3.2.1. SOBRE AS OBRAS DE DRAGAGEM DO PORTO	25
3.3. SOBRE O PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS NA BAÍA DE SEPETIBA	29
4. <u>METODOLOGIA ADOTADA</u>	32
4.1. SISTEMA DE MODELOS ADOTADOS.....	32
4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO HIDRODINÂMICO.....	35
4.2.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO HIDRODINÂMICO	36
4.3. MÓDULO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO, TIPO LAGRANGEANO	37
4.3.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO	39
4.3.2. SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES CONTAMINANTES	39
4.4. MÓDULO DE GERAÇÃO DE ONDAS.....	40
5. <u>MODELAGEM DA BAÍA DE SEPETIBA</u>	42
5.1. DOMÍNIO MODELADO	42
5.2. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	43
5.3. DADOS DE ENTRADA	44

5.3.1. BATIMETRIA.....	44
5.3.2. RUGOSIDADE EQUIVALENTE DO FUNDO.....	45
5.3.3. MARÉ.....	46
5.3.4. VENTOS	48
5.3.5. CONDIÇÃO INICIAL	51
5.3.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	52
5.3.7. OUTROS PARÂMETROS	53
5.4. MODELO DE GERAÇÃO DE ONDAS.....	54
5.5. MODELAGEM DE TRANSPORTE	54
5.5.1. CONDIÇÕES PARA MOBILIDADE DE SEDIMENTOS NO FUNDO	55
5.5.2. SOBRE TRANSPORTE CONDICIONADO NO SISBAHIA	58
5.6. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	60
5.6.1. CENÁRIOS CSF E CSF VS	60
5.6.2. CENÁRIOS BF E BF VS.....	63
5.6.3. CENÁRIO 7R	63
<u>6. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE.....</u>	<u>65</u>
6.1. SOBRE A CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA	65
6.2. CIRCULAÇÃO RESIDUAL EULERIANA	66
6.3. MAPAS DE TENSÕES NO FUNDO E MOBILIDADE DE SEDIMENTOS DEVIDO ÀS CORRENTES DE MARÉ.....	68
6.4. ONDAS DE VENTO NA BAÍA DE SEPETIBA	72
6.5. TENSÕES OSCILATÓRIAS E MOBILIDADE DE SEDIMENTOS NO FUNDO DEVIDO À AÇÃO DE ONDAS DE VENTO	75
6.6. MOBILIDADE DE SEDIMENTOS POR AÇÃO CONJUNTA DE ONDAS E CORRENTES.....	77
6.7. DERIVA CONDICIONADA DE SEDIMENTOS.....	80
6.7.1. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DA BACIA – CENÁRIOS CSF	80
6.7.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO BOTA-FORA DO PORTO – CENÁRIOS BF	83
6.7.3. TRANSPORTE SIMULTÂNEO DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DOS PRINCIPAIS RIOS DA BACIA – CENÁRIO 7R.....	88
<u>7. CONCLUSÕES.....</u>	<u>90</u>
<u>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>93</u>

Índice de Figuras

Figura 1 - Imagem de satélite da Baía de Sepetiba.	3
Figura 2 - Trecho assoreado da Praia de Sepetiba (extraída em Dez/2004 de: www.serla.rj.gov.br/serlagoa_sepetiba.asp).....	6
Figura 3 - Delimitação da bacia contribuinte à Baía de Sepetiba [1].....	8
Figura 4 - Reprodução da Carta Náutica 1622, edição de 1999; o círculo vermelho indica a localização do Porto na Baía de Sepetiba.	15
Figura 5 - Vista aérea do Porto de Sepetiba	15
Figura 6 - Parte da bacia contribuinte à baía de Sepetiba, destacada em amarelo, utilizada para análise de ocupação urbana.	18
Figura 7 - Variação relativa da população entre 1996 e 2000 na região destacada.	19
Figura 8 - Lixo e esgoto comumente jogado num dos canais que deságua em Barra de Guaratiba (foto de Junho/2007, cedida pelo prof. Cláudio Neves).....	22
Figura 9 - Um dos maiores areais da Baixada, no município de Seropédica (fonte: www.globo.com/rjtv).	23
Figura 10 - Os pescadores afirmam que a lama veio para as praias depois que a companhia Docas, que administra o Porto de Sepetiba, alargou o canal para que grandes embarcações pudessem entrar e sair (fonte: www.globo.com/rjtv).....	25
Figura 11 - Região dragada do canal de acesso e bota-fora (EIA/RIMA nº82,1997- [3]).	28
Figura 12 - Mapa de distribuição espacial de sedimentos na Baía de Sepetiba em porcentagem de argila (vermelho), silte (azul) e areia (amarelo) em amostras coletadas pela FEEMA em 41 pontos do corpo hídrico. [2].....	30
Figura 13 – Malha de elementos finitos definida para o domínio modelado.	43
Figura 14 - Mapa de batimetria.....	45
Figura 15 - Mapa de rugosidade.....	45
Figura 16 - Série temporal de elevação para 90 dias devido a maré astronômica.	47
Figura 17 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Março/2007.	49
Figura 18 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Abril/2007.....	50
Figura 19 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Maio/2007.	51
Figura 20 - Hidrograma do Canal de São Francisco a jusante da Estação de Tratamento do Guandu.....	53
Figura 21 - Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica $\tau_{o,c} = \sqrt{(u_*'/\phi)}$, pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água.	56

Figura 22 - Tensão crítica para mobilidade, τ_o , em água salgada ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$), em função do diâmetro do grão em unidades ϕ , conforme Tabela 8, calculada pelo diagrama de Shields modificado.....	56
Figura 23 – Divisão do hidrograma do canal de São Francisco em 3 períodos de vazões constantes.	61
Figura 24 - Velocidade residual Euleriana em maré de sizígia.	67
Figura 25 - Velocidade residual Euleriana em maré de quadratura.	67
Figura 26 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré enchente de sizígia.....	68
Figura 27 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré vazante de sizígia.	69
Figura 28 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré enchente de quadratura.....	69
Figura 29 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré vazante de quadratura.....	70
Figura 30 - Mapa de isolinhas de probabilidade de transporte condicionado por corrente, de sedimentos com tensão crítica para mobilidade superior a $0,15 \text{ N/m}^2$. Em verde, destaca-se a região do bota-fora do Porto.	71
Figura 31 - Exemplo da variação do clima de ondas ao longo de um dia. A seqüência de 3 figuras retrata a variação das 01:00h às 09:00h, a cada 4 horas, no dia 13/Março/07. Os ventos geradores das ondas estão na Figura 17.....	73
Figura 32 - Exemplo da variação do clima de ondas ao longo de um dia. A seqüência de 6 figuras retrata a variação das 13:00h às 21:00h, a cada 4 horas, no dia 13/Março/07. Os ventos geradores das ondas estão na Figura 17.....	74
Figura 33 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas geradas por ventos em situação de meia maré enchente de sizígia.....	75
Figura 34 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas geradas por ventos em situação de meia maré vazante de sizígia.....	75
Figura 35 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas geradas por ventos em situação de meia maré enchente de quadratura.	76
Figura 36 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas geradas por ventos em situação de meia maré vazante de quadratura.....	76
Figura 37 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré enchente de sizígia.	78
Figura 38 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré vazante de sizígia.....	78

Figura 39 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré enchente de quadratura.	79
Figura 40 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré vazante de quadratura.	79
Figura 41 – Partículas remanescentes na água para o cenário CSF vs após 90 dias de simulação.....	80
Figura 42 – Zona de sedimentação do cenário CSF vs após 90 dias de simulação....	81
Figura 43 – Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário CSF vs após 90 dias de simulação.....	81
Figura 44 - Partículas remanescentes na água para o cenário CSF após 90 dias de simulação.....	82
Figura 45 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário CSF após 90 dias de simulação.	82
Figura 46 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 30 dias de simulação.	83
Figura 47 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 60 dias de simulação.	84
Figura 48 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 90 dias de simulação.	84
Figura 49 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário BF vs após 90 dias de simulação.	85
Figura 50 - Nuvens classificadas de partículas de areia, silte e argila após 30 dias de simulação no cenário BF.	86
Figura 51 - Nuvens classificadas de partículas de areia, silte e argila após 60 dias de simulação no cenário BF.	86
Figura 52 - Nuvens classificadas de partículas de areia, silte e argila após 90 dias de simulação no cenário BF.	87
Figura 53 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário BF após 90 dias de simulação.	87
Figura 54 - Partículas na água para o cenário 7R após 64 horas de simulação.....	88
Figura 55 - Partículas na água para o cenário 7R após 90 dias de simulação.	89
Figura 56 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário 7R e zona de sedimentação após 90 dias de simulação.	89

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Municípios integrantes da bacia contribuinte à baía de Sepetiba – fonte SEMADS Macropiano de Gestão e Saneamento Ambiental, 1998. [1].....	8
Tabela 2 - Distribuição da população nas RA do município do Rio de Janeiro pertencentes à bacia de Sepetiba.	18
Tabela 3 - Comparativo de número de domicílios particulares permanentes entre 1991 e 2000 (fonte: Censo de 1991 e 2000, dados extraídos do IPP).....	19
Tabela 4 – Variáveis obtidas quando da geração de clima de ondas no SisBAHIA [9].	41
Tabela 5 - Informações da malha fornecidas pelo SisBAHIA.....	44
Tabela 6 - Constantes harmônicas - catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras – FEMAR.....	47
Tabela 7 - Vazões dos principais rios que deságuam na baía.....	53
Tabela 8 - Tensões críticas para mobilidade de sedimentos arenosos na BTS, baseada na função de Shields.	57
Tabela 9 - Tensões críticas adotadas e faixa de transporte probabilístico para tolerância igual a 20%.	62
Tabela 10 - Concentração efluente de cada fonte no cenário 7R [1].	64

1. Introdução

Na região nordeste da baía de Sepetiba, no Estado do Rio de Janeiro, especialmente ao longo do litoral do município de Sepetiba, verifica-se significativo processo de assoreamento por material predominantemente coesivo (lama). A população local acredita que o assoreamento está vinculado às obras de dragagens do Porto de Sepetiba, sua bacia de evolução, áreas acostáveis e principalmente de seu canal de acesso.

Entretanto, uma análise preliminar indica ser mais provável que os sedimentos que assoreiam a praia de Sepetiba e cercanias são originados na bacia contribuinte à baía. Esta hipótese é baseada principalmente no aumento de carga sólida que é despejada diariamente na bacia, observados nos últimos 30 anos. Contribuiu para isso a mudança da forma de ocupação do solo na bacia, consequência da expansão industrial em direção a baixada de Sepetiba, do aumento populacional e da falta de infra-estrutura adequada para acompanhar este processo.

Foram investigados efeitos de alterações em diversos aspectos da bacia de Sepetiba sobre a contribuição de descarga sólida que chega à baía pelos rios. Dentre estes aspectos, estão aqueles que possam causar poluição ou aumento de carga sólida contribuinte ao corpo d'água costeiro, como uso do solo, crescimento populacional, presença de redes de drenagem e coletora de esgotos, presença de indústrias, erosão das margens dos rios da bacia e retificações de calha de rios.

Considerou-se também a hipótese defendida pelos pescadores da região, de que os sedimentos dos depósitos de assoreamento têm origem na região destinada ao botafora das obras de dragagem do Porto de Sepetiba, que estariam sendo constantemente mobilizados para coluna d'água e sendo transportados pelas correntes para as praias. Para isso, foram utilizadas informações sobre as dragagens realizadas no Porto, como volume e características do material dragado, e áreas de retirada e de disposição final deste material.

Desta forma, o estudo proposto, de cunho ambiental, consiste em estabelecer condições de mobilidade para os sedimentos da baía, bem como cenários de transporte de sedimentos na baía, considerando as duas hipóteses acima, e obter, através de modelagem computacional, uma tendência de deposição de sedimentos.

Para se estabelecer condições para mobilidade do sedimento da baía, foram observados o tipo de sedimento que se encontra lá depositado, sendo estabelecidos critérios, com base na prática usual de engenharia costeira, para ressuspensão de tais sedimentos, sendo feitas algumas considerações pertinentes sobre o corpo hídrico. O principal parâmetro considerado foi a tensão de atrito no fundo crítica para mobilidade.

As simulações em modelagem computacional que serão apresentadas foram obtidas através do sistema de modelos SisBAHIA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica, e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da COPPE/UFRJ.

Tais simulações englobam a hidrodinâmica local, o efeito de ventos na geração de ondas na baía e o efeito conjunto de ondas e correntes de maré na tensão de atrito observada no fundo da baía. Também foi levada em conta a velocidade de sedimentação dos sedimentos em suspensão na baía, tanto dos que chegam pelos rios da bacia, como daqueles que possam ter sido mobilizados na região do bota-fora do Porto. Este último parâmetro foi inserido na simulação do transporte Lagrangeano de partículas na água, que apresenta com o um de seus resultados, a tendência de deriva dos sedimentos transportados pela circulação hidrodinâmica. A simulação do transporte Lagrangeano permite ainda obter dados probabilísticos de passagem de partículas transportadas sobre as regiões de interesse durante todos os 90 dias de simulação.

Assim, a partir da análise dos resultados obtidos, deseja-se chegar a um diagnóstico qualitativo da provável origem do problema, indicando a principal origem do atual processo de assoreamento na região. Deseja-se, com isso, que este estudo sirva de contribuição no sentido de orientar e motivar estudos que envolvam decisões do futuro ambiental da Baía e da Bacia de Sepetiba.

2. Características da Região

Neste item será feita uma breve apresentação da atual situação da Baía de Sepetiba e bacia contribuinte sob os aspectos que serão considerados no estudo, destacando a presença do Porto de Sepetiba.

2.1. A Baía de Sepetiba

Localizada na região sudoeste do Estado do Rio de Janeiro, a Baía de Sepetiba é um corpo d'água que comunica-se com o oceano Atlântico por meio de duas passagens: na parte oeste, entre os cordões de ilhas limitadas pela ponta da Restinga da Marambaia e, na extremidade leste por meio de pequenos canais com baixas profundidades que deságuam na Barra de Guaratiba.

Com aproximadamente 470 km² de área e 3,25 x 10⁹ m³ de volume de águas, apresenta zonas estuarinas e de mangue, que constituem criadouro natural para as diversas espécies de moluscos, crustáceos e peixes existentes neste ambiente. Apresenta ainda 49 ilhas e ilhotas.

A restinga da Marambaia é uma imensa barragem de areia que, apesar de seus poucos metros acima do nível do mar, funciona como um dique, isolando a baía. Tem 40 km de extensão e largura máxima de 5 km.



Figura 1 - Imagem de satélite da Baía de Sepetiba.

A distribuição de salinidade nas águas da baía sofre influência significativa das correntes de maré, que trazem águas do oceano, e do aporte fluvial do canal de São Francisco. De forma geral, a salinidade está compreendida entre 20 e 34‰, sendo que o fundo da baía (parte mais a leste) e as áreas costeiras apresentam salinidade

inferior a 30%. Na parte central, e próximo ao cordão rochoso de Jaguanum, a salinidade varia entre 30 e 34%.

A baía de Sepetiba apresenta características sedimentológicas diversas: são encontrados bancos arenosos, siltosos e argilosos. Os sedimentos dominantes são finos, argilo-siltosos e areno-sílticos, sendo que cerca de 70% da área de distribuição dos sedimentos é composta de silte e argila. Em alguns trechos os sedimentos são arenosos e mais grosseiros, principalmente nas seguintes áreas: próximo às áreas onde se faz a ligação com o mar; ao longo da restinga; junto à foz do canal de São Francisco, onde se forma pequeno delta e atuam processos fluviais [1].

Embora os sedimentos grosseiros permaneçam constantes, a distribuição dos sedimentos finos (silte e argila) alterou-se longo dos anos. Observa-se, atualmente, a formação de um assoreamento extenso nas desembocaduras dos rios em direção a Barra de Guaratiba e também grande parte da baía tem um acréscimo sedimentar no tamanho dos sedimentos. As taxas de acumulação nos últimos 20 anos vêm variando de forma crescente, apresentando de 0,10 – 2,00 cm/ano, no limite da área de distribuição de argila, até 0,40 – 1,2 cm/ano nos bancos de assoreamento. Altas taxas de acúmulo de argila na área nordeste causaram mudanças na linha de costa da Baía, com progradação de 400 m em direção contrária desde 1868. [2]

Os processos de acumulação de sedimentos em áreas costeiras podem ser afetados pela atividade humana, sendo assim modificados em seu balanço natural. A baía de Sepetiba, uma área rica de ecossistemas naturais como é a Baía de Sepetiba e seu cordão de manguezais, tem recebido durante anos, junto às suas margens, rejeitos domésticos na forma de esgotos e lixo, bem como rejeitos industriais constituídos de altas concentrações de metais pesados, principalmente o zinco e o cádmio. Atualmente, sofre com problemas de eutroficação¹, especialmente em pequenas enseadas, nas áreas mais próximas à linha de costa e nas áreas de influência das desembocaduras dos rios, afetada diretamente pela poluição orgânica.

A presença de metais pesados nos sedimentos depositados na baía é significativa. Considerando uma taxa média de sedimentação de 1 cm/ano para a Baía de Sepetiba,

¹ Aumento da quantidade de nutrientes disponíveis no ambiente causado pelo lançamento de dejetos humanos nos corpos d'água. Permite grande proliferação de bactérias aeróbicas, que consomem rapidamente todo o oxigênio existente na água.

pode-se estimar que, a partir dos 40 cm começam a aparecer evidências de contaminação nas camadas de sedimento por metais pesados, crescente até a superfície [2].

Pode-se relacionar essa contaminação com o início das atividades da Cia. Mercantil Ingá na região. A indústria, situada na ilha da Madeira desde 1966, realizava o beneficiamento de zinco e lançava os rejeitos sólidos e líquidos do processo no antigo mangue, constituído por um braço d'água do Saco do Engenho. Por esta razão, a Ingá é considerada responsável, pela presença de zinco e cádmio nos sedimentos da baía de Sepetiba [2].

Como solução para os problemas de poluição, foram implantados sistemas de contenção na bacia de acumulação de resíduos e estação de tratamento de seus efluentes. Porém, tais sistemas de contenção não são suficientes na prevenção de vazamentos acidentais, principalmente quando da ocorrência de fortes chuvas.

Em fevereiro de 1996 ocorreu um acidente, provocado por altos índices pluviométricos na região, que resultou no extravasamento de parte desse resíduo. Vazaram 50 milhões de litros de resíduos tóxicos para a baía de Sepetiba, com conseqüências detectadas através do monitoramento do sedimento, água e principalmente na biota aquática. Outro significativo vazamento ocorreu em 2005, também devido às fortes chuvas.

A quantidade de zinco nos sedimentos de superfície na Baía de Sepetiba era, em 2005, 300 vezes maior que a tolerada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, segundo o Instituto de Química da UFRJ. As concentrações mais altas estão próximas à fonte de lançamento, com distribuição decrescendo de forma acentuada, no sentido leste, devido à predominância das correntes, do tipo de sedimento existente e a rápida adsorção aos sedimentos finos em suspensão.

Já o cádmio apresenta uma distribuição mais uniforme em toda a área da baía de Sepetiba, tendendo a permanecer por mais tempo na água dissolvido em virtude de sua menor capacidade de se adsorver aos sólidos, o que permite maior mobilidade no ambiente. Observa-se que, à medida que, aumenta o percentual de areia, as concentrações tendem a decrescer de forma gradual.

Há ainda uma relação que pode ser estabelecida entre a presença de metais pesados na baía e as obras de dragagens do Porto de Sepetiba. Quando se comparam os dados obtidos na amostragem de fevereiro de 1996, que precedeu às atividades de dragagem, com os resultados da campanha de julho de 1997, pode-se observar uma modificação significativa da qualidade desses sedimentos. A interação de várias componentes tais como a hidrodinâmica da Baía, mobilidade dos metais, variações entre as fases de marés, a própria programação de dragagem e a disposição final deste material podem ser indicadores dessas alterações.

No que se refere às praias mais prejudicadas pelo atual processo de assoreamento, observa-se que a praia de Sepetiba, por estar localizada no fundo da Baía, apresenta as características típicas de um assoreamento natural e permanente. Nota-se que, nos últimos 30 anos, houve a elevação do fundo em toda a sua extensão.

Segundo informações da SERLA – Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas, o trecho de praia em Sepetiba apresenta uma extensão de 2.000m, dos quais aproximadamente 1.700 encontram-se assoreados, conforme pode ser visto na Figura 2. Informações recolhidas com pescadores do local indicam que a praia originalmente era composta de areia grossa, similar àquela ainda encontrada em poucos trechos da praia, e possuía uma faixa de aproximadamente 40 m de largura.



Figura 2 - Trecho assoreado da Praia de Sepetiba (extraída em Dez/2004 de: www.serla.rj.gov.br/serlagoa_sepsetiba.asp).

Nos primeiros 400m da praia, junto à Ponta e Ilha da Pescaria, o assoreamento é mais evidente, alargando-se por até 300m, devido às condições de baixas velocidades das correntes marinhas, propiciando um desenvolvimento natural de vegetação de mangue.

Apesar da degradação lenta da qualidade das águas e dos sedimentos da baía de Sepetiba durante os últimos 30 anos, seu corpo d'água ainda se constitui em um criadouro natural de várias espécies de relevante interesse comercial, a citar, o camarão e peixes como a tainha, parati, pescada, pescadinha, corvina, etc. Assim, a atividade pesqueira constitui importante suporte econômico e social para a região.

Existem três Colônias de Pesca: a de Pedra de Guaratiba, a de Sepetiba e a de Itacuruçá, com aproximadamente 3.500 pescadores registrados e 1.500 não associados, o que caracteriza um papel importante na economia regional (dados de 2001).

Outra atividade econômica importante é o turismo, destacando-se as ilhas da Madeira, Martins e Jaguanum, parte da ilha de Itacuruçá e três cachoeiras: Mazomba, Itimirim e Bicão. Das ilhas inseridas na Baía de Sepetiba, Itacuruçá apresenta o maior número de habitantes fixos e o maior índice de ocupação em relação às demais.

2.2. A Bacia de Sepetiba

A bacia contribuinte à baía de Sepetiba, mostrada na Figura 3, possui aproximadamente 2500 km² de área, e está inserida em dois conjuntos fisiográficos distintos: vertente da Serra do Mar e uma extensa área de baixada, recortada por inúmeros rios, composta de 22 sub-bacias. Suas cotas altimétricas variam entre 0 e 1800m, na Serra do Couto. Faz divisa ao norte com a bacia do rio Paraíba do Sul.

A bacia de Sepetiba, estando localizada no mais importante entorno geoeconômico do Brasil, que abrange as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Vitória, onde, num raio de 500 km, concentra as maiores atividades sócio econômicas da população, vem, por isso mesmo, sendo considerada uma área potencialmente catalisadora de desenvolvimento do país; a região desponta, ainda, como um dos pólos industriais do Estado do Rio de Janeiro. Os municípios integrantes da bacia aparecem listados na Tabela 1.

Além das águas provenientes das sub-bacias hidrográficas, a bacia de Sepetiba recebe, por transposição de bacia, parte das águas do rio Paraíba do Sul, aproximadamente 160 m³/s, que são desviadas na barragem de Santa Cecilia, vindo depois atingir o Ribeirão das Lajes, um dos formadores do rio Guandu e do canal de São Francisco.



Figura 3 - Delimitação da bacia contribuinte à Baía de Sepetiba [1].

Tabela 1 - Municípios integrantes da bacia contribuinte à baía de Sepetiba – fonte SEMADS Macroplano de Gestão e Saneamento Ambiental, 1998. [1]

Município	Data de Instalação	Área km ²	Área Incluída na Bacia			Atividades Econômicas	Sede Municipal
			km ²	% do Município	% da Bacia		
Engº P. de Frontin	18/01/1964	139,4	57,6	41,3	2,1	Ind. e Com.	Dentro da Bacia
Itaguaí	11/02/1820	292,3	292,3	100,0	10,8	Ind. e Com.	Dentro da Bacia
Japeri	01/01/1993	82,9	82,9	100,0	3,1	Comércio	Dentro da Bacia
Mangaratiba	24/03/1833	360,7	360,7	100,0	13,3	Com. e Serv.	Dentro da Bacia
Miguel Pereira	25/10/1955	288,1	252,4	87,6	9,3	Agrop.Com e Serviços.	Fora da Bacia
Nova Iguaçu	29/07/1833	566,6	245,8	43,4	9,1	Ind. e Com.	Parcialmente na Bacia
Paracambi	13/11/1960	179,3	179,3	100,0	6,6	Com. e Serv.	Dentro da Bacia
Pirai	11/11/1838	583,7	116,9	20,0	4,3	Comércio	Fora da Bacia
Queimados	01/01/1993	78,0	78,0	100,0	2,9	Ind. e Com.	Dentro da Bacia
Rio Claro	01/01/1850	843,5	318,7	37,8	11,8	Agropec.	Fora da Bacia
Rio de Janeiro	15/08/1567	1255,3	459,7	36,6	17,0	Ind., Com. e Serviços	Parcialmente na Bacia
Seropédica	01/01/1997	253,6	253,6	100,0	9,4	Agrop.e Com.	Dentro da Bacia
Vassouras	22/04/1883	553,8	12,9	2,3	0,5		Fora da Bacia

2.2.1. Histórico

A baixada de Sepetiba é formada por uma planície cujas terras foram doadas no início do século XVIII à Companhia de Jesus, contribuindo para a sua primeira ocupação efetiva [4]. Os padres jesuítas que viveram na bacia entre 1616 e 1759, iniciaram as obras de saneamento dos rios.

À época foram realizadas obras hidráulicas de dragagem, retificação de canais, comportas e obras civis como pontes e edificações. Foram abertas a Vala do Itá e a Vala do São Francisco para extravasar as águas do Guandu e ainda uma ponte com quatro comportas. Após a expulsão dos jesuítas, todas as obras foram abandonadas, e a paralisação dos trabalhos de manutenção acarretou o assoreamento dos cursos d'água, ocorrendo inundações periódicas em toda a baixada.

Pouco foi realizado até que Getúlio Vargas, em 1933, criou a Comissão de Saneamento da Baixada Fluminense, que traçou planos com a finalidade de dessecar as terras encharcadas e promover a colonização das áreas conquistadas, através da agricultura [6].

Entre 1935 e 1941, o DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento), executor de ações da Comissão, realizou obras em praticamente todos os trechos fluviais de baixada. Entre as obras de saneamento, foram executadas diversas obras de engenharia hidráulica, como a abertura de canais de irrigação, retificação de trechos e canalização de rios. Foram também executados cerca de 80km de diques marginais, sistemas de comportas, desvios de água para irrigação, canais de cintura e *podles* (áreas de alagamento contida por diques), representando 270km de canais, 620km de valetas e 50km de diques erguidos [1]. Em termos ambientais, estas obras eliminaram ou reduziram drasticamente as várzeas alagadas.

A bacia foi também objeto de grandes obras de geração de energia. Em 1905 foi construída a Barragem e o Reservatório de Lajes, no Ribeirão das Lajes, bem como a Usina Hidrelétrica de Fontes, executada pela Cia Light, cujo canal de fuga descarrega no Ribeirão das Lajes, que mais a jusante vai formar o rio Guandu.

Com a crescente urbanização, aumentou a demanda por energia elétrica, de modo que em 1952 foram concluídas obras de desvio do Rio Paraíba do Sul-Piraí, e em 1954 inaugurava-se a usina subterrânea de Nilo Peçanha, passando o conjunto de

Ribeirão das Lajes a constituir, na época, o maior centro produtor de energia do país. A movimentação desta usina só se tornou possível graças às águas desviadas do Rio Paraíba do Sul, em Santa Cecília, com uma vazão de $160\text{m}^3/\text{s}$, que após movimentarem as turbinas, escoam para o Ribeirão das Lajes, no rio Guandu e canal de São Francisco.

Em 1952, foram iniciadas as obras de captação, tratamento e adução de águas do rio Guandu para reforço do suprimento da cidade do Rio de Janeiro. Assim deu-se a construção do chamado Sistema Guandu, que deveria produzir $13,8\text{ m}^3/\text{s}$, sendo posteriormente ampliado para $24\text{ m}^3/\text{s}$. No período de 1978/82, foi novamente ampliada para $40\text{m}^3/\text{s}$ após a fusão dos estados da Guanabara e do Rio de Janeiro. Em 2000, a capacidade do Sistema já havia sido ampliada para adução de $47\text{m}^3/\text{s}$ e tratamento de $42\text{m}^3/\text{s}$ [1].

No entanto, tais obras não foram acompanhadas de um eficiente programa de colonização, incentivo e apoio técnico por parte do governo federal que gerasse a ocupação agrícola pretendida, ficando a maior parte da região da baixada sub-utilizada ou abandonada.

Com a decadência da citricultura associada ao êxodo rural no país, esse quadro resultou, já nos anos 50, numa desenfreada especulação imobiliária da região. A criação e venda de loteamentos não respeitavam as mínimas condições de habitabilidade, constituindo-se em cidades dormitórios para um grande contingente populacional de baixa renda, que vinha na sua maioria do interior e do Nordeste em busca de trabalho na então capital da República. A crescente impermeabilização dos solos com o advento dos núcleos urbanos, em grande escala modificaram as características dos canais de irrigação que passaram a ser elementos importantes para o escoamento de águas pluviais.

Com o decorrer do tempo, cresceu ainda mais o número de ocupações, a essa altura, de forma totalmente irregular avançando sobre áreas sem infra-estrutura urbana, próxima aos cursos d'água, dentro de áreas destinadas ao espraiamento dos rios e até nas suas calhas, fazendo com que a região que originariamente já era área de inundação tivesse suas condições agravadas, tornando praticamente inócuas as obras de saneamento do DNOS.

Dessa forma, os cursos d'água da região, tanto aqueles primitivamente existentes como os canais executados posteriormente, passaram a fazer parte do sistema geral de drenagem da área. Acrescenta-se a esta função o fato de servirem como corpo receptor e condutor dos despejos domésticos e industriais dos núcleos urbanos existentes ou a serem implantados.

Em meados da década de 90, a prefeitura detalhou projetos de dragagem e canalização dos rios da Baixada de Sepetiba, iniciando sua implementação. O projeto, realizado pela Concremat Engenharia e Tecnologia S.A., abrangeu toda a extensão dos canais do Itá, Guandu, São Fernando, sendo este último desviado para o canal do Guandu, além de diversos outros rios de menores dimensões.

2.2.2. Principais Cursos d'água da Bacia

Como visto, devido às inundações constantes a que estava sujeita a região por causa de sua topografia plana, desde o século XVII os rios que deságuam na baía de Sepetiba vêm sendo retificados, dragados, canalizados, unidos por valões, etc. Portanto, a maioria apresenta, atualmente, seus baixos cursos bastante modificados em relação ao que eram originalmente.

Na baixada da baía de Sepetiba, os rios sofrem influência dos regimes das marés, e apresentam condições de degradação avançada. O período de águas altas vai de dezembro a março, ocorrendo as maiores vazões em janeiro. O período de águas baixas vai de junho a setembro, como vazões mínimas em julho. A precipitação média anual na bacia situa-se entre 1.000mm e mais de 2.230mm [2].

Em relação à qualidade do ecossistema, pode-se dizer que os rios menos degradados apresentam melhor qualidade de água nos seus altos cursos e em regiões de ocupação rarefeita. Todavia, os rios que atravessam as áreas urbanizadas mais densamente povoadas, são verdadeiras canalizações de esgoto a céu aberto, recebendo grandes contribuições de esgotos domésticos e, também, de despejos industriais e lixo.

As informações contidas nos itens que se seguem foram extraídas, em sua maioria, das referências [4] e [6].

▪ Rio Guandu e Canal de São Francisco

O rio Guandu é basicamente alimentado pelas águas do rio Paraíba do Sul, que atravessam as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, através de transposição de bacia por bombeamento em Santa Cecília, Município de Barra do Piraí.

No Ribeirão das Lajes, o rio Guandu tem a melhor qualidade de água da bacia e é fonte de abastecimento público com captação da CEDAE na ETA-Guandu. Sua vazão natural é de 20 m³/s. Entretanto, após a descarga da barragem de Ponte Coberta, no ribeirão das Lajes, tem as suas vazões aumentadas, variando de 120 a 330 m³/s, de acordo com o regime operacional da usina hidrelétrica.

Pouco à montante da ponte da antiga estrada Rio-São Paulo, onde o Guandu se divide em dois braços, há barragens da CEDAE que fazem parte da estrutura de captação do Sistema Guandu. No braço leste encontra-se a Lagoa do Guandu, corpo d'água formado por uma das barragens. Nesta lagoa desembocam o Rio dos Poços e o Ipiranga, ambos bastante poluídos por esgoto, efluentes industriais e lixo. Foi relatado que ocorrem mortandades de peixes e por diversas vezes a operação de bombeamento foi interrompida para deixar passar, conforme depoimentos de técnicos da CEDAE, “a onda de lixo”.

Apesar da poluição proveniente do rio Paraíba do Sul se fazer presente no rio Guandu de forma atenuada, fato devido ao tempo de trânsito das águas e sedimentação nos reservatórios do sistema Rio Light, considera-se que a maior ameaça à tomada d'água da CEDAE, no rio Guandu se deva às atividades humanas exercidas na própria bacia hidrográfica, visto que o impacto provocado por esta poluição é muito mais imediato, não existindo qualquer mecanismo de mitigação de acidentes e/ou contaminação sistemática.

Pouco antes de adentrar o canal de São Francisco, próximo à margem direita, em área pertencente à Bacia do Rio da Guarda, está uma zona de concentração de areais de cava. Há indícios de que algumas estejam bastante próximas ao curso d'água, podendo ocasionar a contribuição de sedimentos para o Rio Guandu.

O canal de São Francisco segue por 15 km até desaguar na Baía de Sepetiba, cruzando áreas agrícolas e no trecho final, o Distrito Industrial de Santa Cruz. Suas

margens são tomadas de estreitas faixas de macrófitas. A água é barrenta, há sinais de solapamento de barranca.

O deságüe do canal de São Francisco na Baía de Sepetiba se dá próximo a desembocadura do Rio da Guarda. A zona da foz é revestida por manguezais e nela encontra-se um delta em formação.

Uma considerável expansão demográfica, associada a um desenvolvimento industrial intenso e diversificado, contribuiu para a sua extrema vulnerabilidade enquanto manancial, resultando em problemas de poluição de origem industrial e doméstica, bem como no risco de poluição por acidentes com produtos de alta periculosidade.

As margens do rio Guandu e de seus tributários têm sido tradicionalmente usadas como área de vazadouro de lixo urbano, por várias municipalidades ribeirinhas. Superpondo-se e complementando o quadro das fontes de agressão, acrescenta-se a ação de desmatamento e o conseqüente desequilíbrio, onde se incluem a erosão, o empobrecimento do solo, o assoreamento e as enchentes.

▪ **Rio Mazomba - Cação**

No passado, o Rio Mazomba era o principal formador do Rio da Guarda. O DNOS realizou, em 1941, a derivação as águas do Rio Mazomba para o Rio Cação. O Rio Mazomba e seus afluentes foram todos dragados nessa época, e posteriormente, passando a constituir um rio isolado, o Mazomba-Cação.

O alto curso do rio Mazomba é caracterizado por leito rochoso, margens íngremes, em sua maior parte desprotegidas, com muitas residências estabelecidas. No seu baixo curso o rio é, inicialmente, largo e extremamente raso, com grande quantidade de sedimentos na calha, passando em seguida a mais aprofundado e com largura menor. Verifica-se deposição de lixo em alguns trechos de suas margens e contribuição de esgoto no seu leito.

Em determinado ponto o rio verte suas águas em dois canais, o Rio Cação e o Canal Arapucaia. O fluxo do rio segue pelo Rio Cação até desaguar em um manguezal a oeste da Ilha da Madeira. O Canal Arapucaia, com pouco mais de 2km, tem sua foz nas imediações do Porto de Sepetiba, e aparentemente está todo obstruído e não atua mais como extravasor de águas.

Próximo à foz do Rio Caçãõ encontra-se instalada a Ingá Mercantil, que é a indústria com maior passivo ambiental de toda a bacia, conforme mencionado anteriormente.

- **Rio da Guarda**

O Rio da Guarda era um afluente do baixo curso do Guandu. Grande parte da área central e inferior era inundada, onde formavam-se várias lagoas. Durante as obras do DNOS, todos os rios desta sub-bacia foram desobstruídos, dragados e canalizados.

A proximidade com o litoral aliada à baixa declividade e ao assoreamento, favorece a ocorrência de enchentes. Diversos pontos de estrangulamento, acarretados por aterros e fundações para a construção das pontes do sistema rodo-ferroviário, agravam a situação.

Alguns dos afluentes deste rio são verdadeiras valas negras. Um deles, o Valão dos Bois, um longo canal que apresenta águas escurecidas e lixo, encontra-se bastante assoreado, contribuindo para isso a falta manutenção em seu leito, os aterros das margens, o lançamento de lixo e, nas últimas décadas, o lançamento de rejeitos da atividade de mineração de areia.

- **Rio Piraquê**

O Rio Piraquê-Cabuçu nasce como o nome de Gatos no Parque Estadual da Pedra Branca, e percorre cerca de 23km, atravessa o grande centro de Campo Grande, área de alta densidade populacional, até desaguar na Baía de Sepetiba. Na região de sua desembocadura, forma um extenso manguezal.

Quando das obras de canalização e dragagem dos rios da bacia de Sepetiba, teve seu alinhamento pouco alterado em relação ao existente.

2.3. Porto de Sepetiba

Inaugurado em 1982, o Porto de Sepetiba está localizado em parte no Município de Itaguaí e também no Município de Mangaratiba, na costa norte da Baía, ao sul e a leste da Ilha da Madeira. Ocupando uma área de 10,4 km², e é administrado pela Companhia Docas do Rio de Janeiro. Possui terminais para cargas a granel (minério, carvão, enxofre, alumínio, etc...) e containeres.

Encontra-se em uma região que, num raio de 500km, concentrava em 2005, cerca de 70% do PIB brasileiro, segundo o então presidente da Firjan, Augusto Franco.

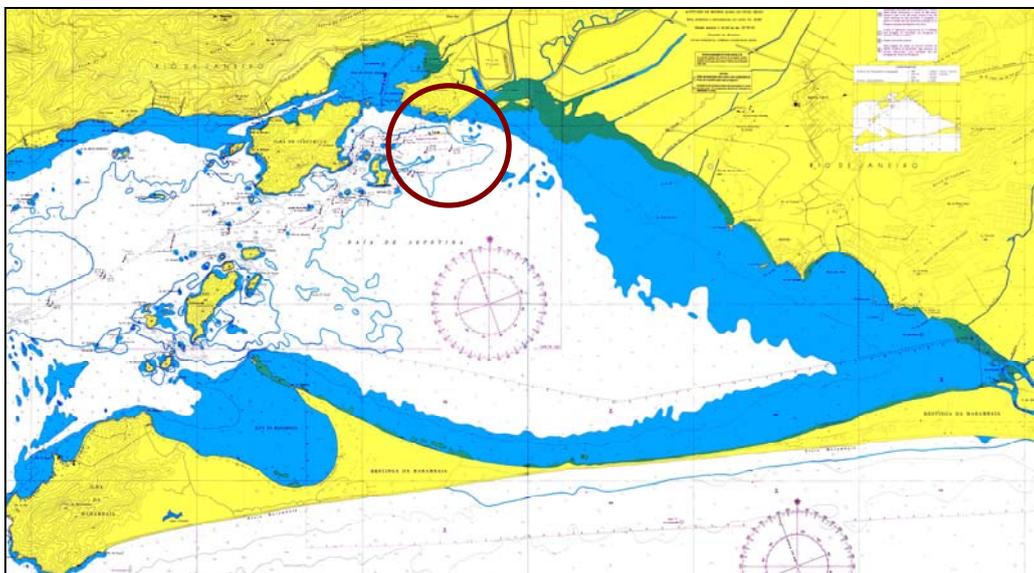


Figura 4 - Reprodução da Carta Náutica 1622, edição de 1999; o círculo vermelho indica a localização do Porto na Baía de Sepetiba.

Em 1997 teve início a fase de ampliação do porto com o objetivo de transformá-lo no primeiro Hub Port (porto concentrador de carga) do Atlântico Sul. Para isto, já foram realizadas obras de dragagens que, hoje, permitem que o porto tenha capacidade para receber grandes navios intercontinentais (cape size), apropriados para o transporte de minérios, grãos, containeres e, futuramente, permitirão também o transporte de carga geral.

Isto só foi possível devido à realização de vultosas dragagens para o aprofundamento do canal, o que normalmente significa uma intervenção potencialmente poluidora devido ao revolvimento dos sedimentos e possível remobilização de metais, além de um aumento significativo de futuras atividades, igualmente com elevado potencial poluidor.



Figura 5 - Vista aérea do Porto de Sepetiba

As preocupações ambientais em relação à qualidade de água da baía tornaram-se maiores devido ao projeto dos governos Estadual e Federal de ampliação e modernização do Porto de Sepetiba. Este novo porto, graças à sua característica única de possuir águas abrigadas, deve ser capaz de receber, depois das obras de dragagem, grandes navios intercontinentais (cape size), apropriados para o transporte de minérios, grãos, containers e, num futuro próximo, o transporte de carga geral.

As operações de dragagem na Baía de Sepetiba ocasionaram um espalhamento dos sedimentos finos, silte e argila ocorrendo, conseqüentemente, a redistribuição de sedimentos contaminados por metais pesados.

A ampliação e a modernização do Porto de Sepetiba constituem, até hoje, metas de desenvolvimento dos governos Federal e Estadual. O PAC – Programa de Aceleração do Crescimento –, do atual governo Lula, prevê incentivos para a região ligada às atividades do Porto, e investimentos em infra-estrutura para interligá-lo às principais rodovias federais. Além de investimentos no Pólo Petroquímico de Itaboraí, e programas de habitação e saneamento, cabendo às prefeituras elaborar os projetos.

3. Sobre a Origem dos Sedimentos

Para investigação das causas da atual situação de assoreamento na baía de Sepetiba, foi feita uma análise detalhada de alguns fatores que podem ter contribuições significativas para o problema no que diz respeito à origem dos sedimentos.

Primeiramente, serão destacados fatores como a mudança da forma de ocupação do solo na região da bacia contribuinte a baía de Sepetiba, o aumento da descarga sólida lançada na baía, principalmente através de seus rios, bem como a erosão na calha dos mesmos. Todos eles estão relacionados a alterações na bacia, e serão analisados como uma única hipótese, onde considera-se que a contribuição de carga sólida da bacia seja a principal causa do assoreamento no litoral da baía.

Em seguida, serão analisados outros fatores, que, por sua vez, estão relacionados às obras de dragagem do Porto de Sepetiba. A obra de maior vulto realizada foi a dragagem do canal de acesso, e deve ser levada em conta devido ao volume de material dragado e à possibilidade dos mesmos terem sido mobilizados para a coluna d'água. Esta hipótese é sustentada pela maioria dos pescadores que trabalham nas

praias de Sepetiba e cercanias, que foram prejudicados no desenvolvimento de suas atividades pelas conseqüências geradas pelo assoreamento.

Ambas as hipóteses consideradas serão analisadas neste capítulo, e posteriormente serão utilizadas em simulações da hidrodinâmica local e do transporte de sedimentos realizadas através de modelagem computacional. São estas simulações que vão dizer em qual das hipóteses consideradas os sedimentos têm maior chance de atingir a região assoreada.

3.1. Primeira Hipótese: sedimentos oriundos da bacia contribuinte

Os processos de acumulação de sedimentos em áreas costeiras podem ser afetados pela atividade humana, sendo assim modificados em seu balanço natural. O aumento desordenado da população, o grande volume de resíduos industriais e o uso, ainda que moderado, de agrotóxicos nas atividades agrícolas, representam fontes poluidoras para as águas da bacia.

Considera-se nesta hipótese que a principal causa do assoreamento da Baía de Sepetiba esteja relacionada ao aumento da produção de carga sólida na bacia que é lançada no copo hídrico. As razões que sustentam esta hipótese são apresentadas nos itens a seguir.

3.1.1. Ocupação urbana e industrial

Para auxiliar a análise da ocupação urbana da bacia contribuinte à baía de Sepetiba, foram utilizados dados dos censos demográficos de 1991 e 2000, realizados pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, extraídos de mapas elaborados pelo IPP – Instituto Pereira Passos – para a região pertencente ao município do Rio de Janeiro.

A Tabela 2 mostra como a distribuição populacional aumentou de 1970 a 1991 nas Regiões Administrativas de Guaratiba, Campo Grande e Santa Cruz, que correspondem à parte da do Município do Rio de Janeiro que contribui para a Baía de Sepetiba, destacada com uma linha amarela na Figura 6.

Tabela 2 - Distribuição da população nas RA do município do Rio de Janeiro pertencentes à bacia de Sepetiba.

RA	Nº habitantes (x mil) em cada ano		
	1970	1980	1991
Campo Grande	100 a 200	200 e 300	Mais de 300
Santa Cruz	50 a 100	100 e 200	200 e 300
Guaratiba	Até 50	Até 50	50 e 100



Figura 6 - Parte da bacia contribuinte à baía de Sepetiba, destacada em amarelo, utilizada para análise de ocupação urbana.

Nas figuras que se seguem, que apresentam dados separados por bairros, foi destacada a parte que está inserida na bacia de interesse, conforme Figura 6, que corresponde à área drenante ao litoral leste da baía, até o limite do município de Santa Cruz, próximo ao deságüe do canal de São Francisco.

Pela Figura 7 abaixo, nota-se que houve crescimento da população em quase toda a região em destaque do ano de 1996 a 2000. A bacia abrigava em 1996 uma população estimada em 1,33 milhões de habitantes, da qual cerca de 60% concentrada na região destacada, porção pertencente ao Município do Rio de Janeiro [1].

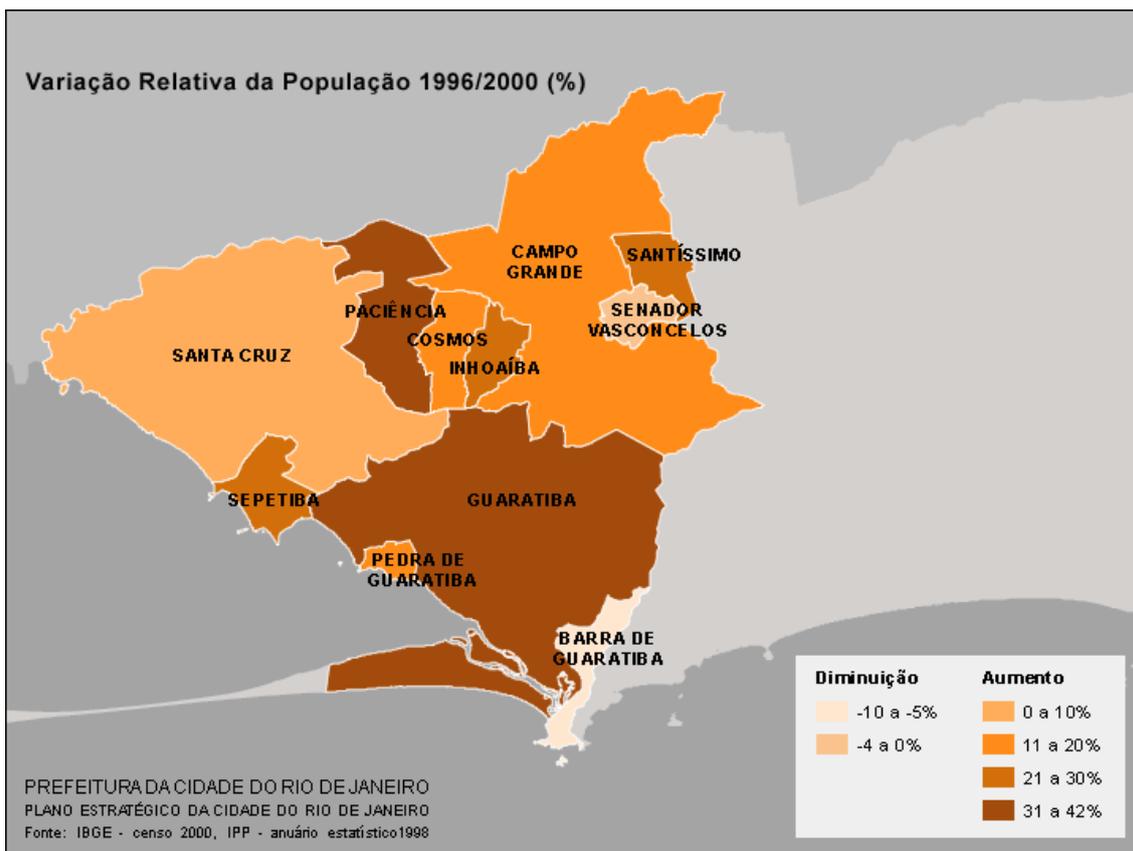


Figura 7 - Variação relativa da população entre 1996 e 2000 na região destacada.

O aumento da ocupação urbana pode ser notado também pelo número de domicílios particulares permanentes, que teve um acréscimo de 46% entre os anos de 1991 e 2000, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo de número de domicílios particulares permanentes entre 1991 e 2000 (fonte: Censo de 1991 e 2000, dados extraídos do IPP).

Ano	Domicílios particulares permanentes
1991	15114
2000	27907

É importante ressaltar que os dados de distribuição de renda nesta região (censo de 2000) mostram que sua maior parte é ocupada por pessoas que, em média, não recebem mais que 9 salários mínimos por mês, sendo que boa parte dos moradores não ultrapassa os 4 salários mínimos mensais.

Este fato denuncia a desvalorização do local, uma das conseqüências da ocupação do solo ter ocorrido de forma desordenada e com o aumento da concentração

populacional em torno das sedes municipais, não tendo sido acompanhado dos devidos investimentos em infra-estrutura, particularmente no setor de saneamento básico.

O aumento da carga sólida que chega à baía de Sepetiba observado nos últimos anos pode ser relacionado à expansão industrial na direção oeste da região metropolitana. O aumento do número de oportunidades de emprego e o baixo preço da terra loteada acarretaram um significativo crescimento populacional na região hidrográfica. A política de polarizar o crescimento industrial para áreas menos congestionadas levou o Governo do Estado a criar na região os distritos industriais de Santa Cruz, Campo Grande, Nova Iguaçu e Itaguaí.

Já sendo considerada um importante pólo industrial do estado, a bacia de Sepetiba é responsável pelo lançamento de várias substâncias potencialmente tóxicas na baía, destacando-se os metais pesados.

Entre as indústrias destaca-se, inicialmente a Cia Mercantil Ingá, em situação falimentar, que tem, em termos de passivo ambiental, um peso considerável sobre o ecossistema da região da Baía de Sepetiba. Seus estoques de resíduos, acumulados há mais de 30 anos no local de produção, ameaçam e fragilizam o equilíbrio ecológico da Baía de Sepetiba, sendo de responsabilidade da empresa a contaminação dos sedimentos marinhos por metais pesados.

É importante considerar que o movimento das marés pode transportar para a zona estuarina os poluentes presentes nas águas da bacia, provenientes da Ingá, como também de outras empresas. Na época em que ainda operava, a administração da Ingá tinha a intenção de transferir os resíduos para um local de disposição final, localizado em Seropédica a cerca de 25 km da fonte geradora, que foi licenciado pela FEEMA, apesar da opinião contrária daquela municipalidade.

Porém, o processo falimentar da indústria interrompeu a implantação das medidas de controle e deixou um passivo ambiental significativo às margens da Baía de Sepetiba, cuja solução de manejo adequado precisa ser encontrada, visto que se constitui em uma fonte de contaminação do lençol freático, por percolação no solo, e em função da lixiviação gerada pelas águas.

Outra indústria que merece ser citada é a COSIGUA — Companhia Siderúrgica Guanabara. Em termos de poluição hídrica, responde por 94% do potencial de toxicidade de efluentes líquidos do conjunto do setor industrial da Bacia, decorrente, tanto pela combinação dos tipos de poluentes inerentes ao setor siderúrgico, quanto pela magnitude da vazão de efluentes líquidos por ela lançados no canal de São Francisco, em torno de 119.000 m³ / dia.

O Distrito Industrial de Nova Iguaçu constitui-se em outra grande ameaça à tomada d'água do Guandu, principalmente devido a sua localização, a apenas 7 km a montante da captação, estando a desembocadura do rio Queimados, seu corpo receptor, a apenas 300 metros da tomada d'água, não existindo, portanto, tempo suficiente para mistura completa de suas águas com as do rio Guandu. Esse rio recebe os dejetos da área urbana de Queimados e está na zona de influência de projetos agrícolas.

As áreas drenantes à Baía de Sepetiba, situadas a jusante da captação do Guandu, estão sujeitas à influência crescente de atividades urbanas e industriais da região do Grande Rio. Pode-se considerar uma concentração populacional, localizada principalmente na área urbana, de cerca de 1,7 milhões de habitantes. Estes fatores resultam em sério comprometimento do solo e, maior ainda, dos corpos d'água.

O crescimento populacional, aliado ao desenvolvimento industrial, além da poluição inerente, trouxe também questões como a destruição dos ecossistemas periféricos à Baía, os aterros, o uso desordenado do solo e seus efeitos impactantes, em termos de assoreamento, sedimentação e inundação.

Todos esses fatores afetam a vocação natural da região para o turismo e a pesca, que são ambos diretamente afetados pelas alterações no meio ambiente que vêm sofrendo a bacia. No contexto sócio-econômico atual, a região pode ser considerada em fase transitória em relação ao potencial industrial. Nesse processo, o que se projetar deve ser pensado de forma bastante abrangente, do contrário, os usos pesqueiro e turístico poderão vir a criar conflitos.

3.1.2. Esgotos e resíduos sólidos

Atualmente, estima-se uma população da ordem de 1.6 milhões habitantes, cujos esgotos domiciliares produzidos degradam diretamente a qualidade sanitária das

águas que fluem no lençol freático (águas subterrâneas mais próximas ao nível do solo) através de sistemas individuais de fossas sépticas e sumidouros ou, quando lançados sem tratamento em valões, córregos ou rios acabam afetando a qualidade das águas, não somente destes, mas, da própria Baía de Sepetiba, que é o receptor final.



Figura 8 - Lixo e esgoto comumente jogado num dos canais que deságua em Barra de Guaratiba (foto de Junho/2007, cedida pelo prof. Cláudio Neves).

A grande parte dos municípios, compreendidos na bacia da Baía de Sepetiba, não conta com serviços de coleta de resíduos sólidos. Observam-se os baixos índices de atendimento de coleta de lixo urbano, e mais precária ainda é a situação de disposição final desses resíduos, sendo comum o lançamento em lixões, que em grande parte estão localizados às margens dos rios e em encostas e próximos a aglomerações urbanas, resultando em uma grave degradação ambiental. A situação mais grave encontrada é a do lixão de Japeri.

Nas áreas desprovidas de esgotamento sanitário, situação em que se encontra a maior parte da bacia, os efluentes são conduzidos a fossas sépticas individuais, geralmente sem sumidouro, ou, na maioria dos casos, para as galerias de águas pluviais, acarretando o lançamento direto para valas ou para fundos de vale e cursos de água locais.

Além disso, a ocupação urbana da bacia do rio Guandu contribui significativamente para a poluição do rio e seus afluentes, traduzido principalmente pelos altos teores de coliformes fecais encontrados. Devido à presença de esgotos sanitários e de resíduos sólidos urbanos, a região contribuinte à Baía de Sepetiba vem sofrendo sérios problemas de saúde pública.

3.1.3. Erosão da calha dos rios

A região da baixada de Sepetiba é formada por uma extensa planície flúvio-marinha, atravessada por rios que desembocam na baía, vindo a formar as planícies costeiras juntamente com a Restinga de Marambaia. As declividades acentuadas das encostas, os elevados índices de pluviosidade e a degradação da cobertura vegetal proporcionam alta suscetibilidade à erosão por movimentos de massa (escorregamento de solo e rocha, quedas de blocos e lascas de rocha) deixando cicatrizes erosivas associadas a esses eventos [1].

Durante muito tempo, a estratégia da engenharia fluvial e hidráulica esteve orientada no sentido de retificar o leito dos rios para que suas vazões fossem dirigidas para jusante pelo caminho mais curto e com maior velocidade de escoamento. Dentre os objetivos principais destacam-se obras realizadas por pressões exercidas pelo aparecimento de novas áreas de ocupação e outras implantadas para minimizar os efeitos locais das cheias.

A invasão das áreas marginal dos rios fez também, com que os processos de erosão e desbarrancamento promovessem o aumento da vazão sólida nos cursos d'água, causando o assoreamento em trechos dos rios com menor velocidade de escoamento e também nos seus deitas.

Além, disso, a atividade de extração de areia na sub-bacia do rio Guandu vem se processando de forma inadequada, com destruição das margens originais, induzindo a um processo contínuo de alterações do alinhamento, com largura aumentada e aprofundamento da calha dos rios, com modificações graves no regime hidráulico, formação de bolsões e abertura de crateras no leito do rio, como mostrado na Figura 9.



Figura 9 - Um dos maiores areais da Baixada, no município de Seropédica (fonte: www.globo.com/rjtv).

Em 1979, estudo promovido pela SERLA atestou que a retirada de areia era indiscriminada, chegando em certos trechos a exaurir a capacidade de reposição do rio, prosseguindo então com o solapamento das margens. Ainda de acordo com o estudo, a atividade provoca o rebaixamento do fundo da calha, abalando obras de arte e alterando as condições de fluxo dos rios.

Ultimamente a atividade de extração de areia no leito e nas margens do rio Guandu vem alterando as suas seções transversais provocando sensíveis modificações do ecossistema aquático. Todo o rio Guandu e o canal de São Francisco sofrem os efeitos da exploração de areia, que, em alguns pontos, promove a desfiguração da calha, desmontando a barranca e abrindo buracos e enseadas laterais. Durante o processo de extração há a liberação de grande quantidade de particulado fino em suspensão, que fica por muito tempo disponível na coluna d'água, sendo facilmente transportado.

Outras fontes de agressão, como a ação de desmatamento e suas conseqüências, onde se incluem a erosão, o empobrecimento do solo, o assoreamento, as enchentes e as secas, vêm contribuindo ainda mais para a degradação do ecossistema.

3.2. Segunda Hipótese: sedimentos oriundos do bota-fora do Porto

Em virtude do volume de material dragado, a obra de dragagem do canal de acesso deve ser considerada ao se fazer um estudo de assoreamento na Baía de Sepetiba, tendo em vista a possibilidade dos sedimentos terem sido mobilizados para a coluna d'água.

Além disso, por se tratar de obras de grande vulto, e conseqüentemente pela possibilidade de haver um grande impacto ambiental associado, a mesma chamou a atenção dos moradores das regiões assoreadas, em especial da maioria dos pescadores que trabalham naquelas praias (Figura 9), que fazem uma associação direta entre tais obras e o atual processo de assoreamento das praias.



Figura 10 - Os pescadores afirmam que a lama veio para as praias depois que a companhia Docas, que administra o Porto de Sepetiba, alargou o canal para que grandes embarcações pudessem entrar e sair (fonte: www.globo.com/rjtv).

As atividades de dragagem causam um aumento da turbidez da água, que é um dos indicadores potenciais de impacto no ecossistema assim como a ressuspensão dos sedimentos, e pode provocar vários tipos de efeitos adversos. Isso inclui o transporte de sedimento e a possibilidade dos contaminantes adsorvidos migrarem da área dragada para outras não contaminadas, a liberação de nutrientes, depleção do oxigênio dissolvido na água, remobilização de contaminantes e a diminuição da produtividade primária, devido à redução da transparência da coluna d'água. Impactos nos organismos bentônicos podem ocorrer com relativa e menor importância no local de dragagem, do que no local de disposição final.

Deve-se considerar que as obras de dragagens, em especial aquelas mais próximas da costa, onde o sedimento é muito fino com uma parte significativa de matéria orgânica adsorvida, disponibilizam e mobilizam para a coluna d'água parte desta contaminação. Na Baía de Sepetiba foram observados fenômenos de grandes florações de algas nos verões de 1997 e 1998, modificando a cor da baía [2].

Após as obras de dragagem, verificou-se que os percentuais de argila e silte aumentaram na parte noroeste da Baía em estações onde predominantemente encontrava-se um percentual muito maior de areia, aumentando assim a quantidade de metais adsorvidos. Na área de acesso ao Porto de Sepetiba, foi verificada contaminação por metais nos locais onde foram efetuadas as dragagens. Cádmio e zinco apresentaram um aumento de concentração na parte nordeste, próximo a Pedra de Guaratiba. Como avaliação preliminar pode-se dizer que houve um espalhamento geral de contaminantes dos sedimentos.

3.2.1. Sobre as obras de dragagem do Porto

As informações contidas aqui foram obtidas através das referências [3], [7] e [13].

O Porto de Sepetiba, já existente para carga a granel (minério, carvão, enxofre, etc...), iniciou sua fase de ampliação, com previsão de recebimento de navios de cabotagem de até 150.000 toneladas, tendo sido necessária a realização de vultosas obras de dragagem, para o aprofundamento do canal, o que significa uma intervenção potencialmente poluidora, devido ao revolvimento dos sedimentos e possível remobilização de metais e, também, um aumento significativo de futuras atividades, igualmente com elevado potencial poluidor.

Durante as obras de dragagem do canal de acesso, que visavam permitir o acesso ao porto de navios de maior deslocamento, dois tipos de dragas foram utilizadas: auto-transportadoras de arrasto, do tipo Hopper, e de sucção e recalque. O primeiro tipo, por ser bastante versátil, é comumente utilizado em dragagem de manutenção de canais de acesso de portos, e para remoção de materiais moles. São dotadas de cisternas que recebem o material aspirado do fundo por sucção e são esvaziadas através de portas de fundo no local de descarga. O segundo tipo é o mais conhecido, pois opera comumente em regiões próximas a costas.

Durante a descarga do material dragado em corpos hídricos abertos, como em enseadas e baías, há inicialmente o que se chama de descida convectiva, onde a queda do material é determinada pela gravidade, comportando-se como um jato. Quando este jato atinge o fundo, ocorre a formação de uma protuberância de altura variável. A maior parcela do material atinge o fundo, formando um depósito, onde os finos dão origem a taludes, que podem se estender de dez a cem metros.

Logo em seguida inicia-se a dispersão passiva, onde os sedimentos finos que permanecem na coluna d'água são dispersos lateralmente, formando uma pluma suspensa por ações das correntes locais, das ondas e da maré. As plumas podem perdurar por diversas horas após a descarga, pois os sedimentos finos apresentam velocidades de sedimentação pequenas. Contudo, observa-se que na prática apenas uma parcela pequena destes sólidos é exposta a correntes capazes de deslocá-los para fora dos limites do local de deposição projetado.

Em longo prazo, o depósito pode se estabilizar ou pode ocorrer o transporte e a re-deposição do material erodido no depósito. Os principais fatores que afetam a estabilidade do depósito de sedimentos são a consolidação e a erosão. A consolidação é causada pelo peso próprio e, durante este processo, uma parcela da água retida nos vazios é expelida, diminuindo o volume do material dragado. Para

sedimentos finos, uma redução de até 50% do volume inicial é bastante comum após a consolidação.

Os fenômenos de ressuspensão e erosão podem ser produzidos por correntes, gradientes de densidade, ondas, ventos, tráfego de navios e tempestades. Ressalta-se que os sedimentos originados de dragagens hidráulicas possuem um potencial de erosão maior devido ao elevado conteúdo de água presente nos mesmos. Eventualmente, o material do depósito pode se estabilizar em um ambiente de baixa energia, ou se integrar no processo natural de transporte de sedimentos da região.

As ações erosivas, à medida que as partículas mais finas depositadas nas camadas superiores do depósito são deslocadas, tendem a se tornar menos expressivas. Isto acontece porque as partículas inferiores do depósito são mais pesadas e, portanto, menos suscetíveis a deslocamentos. Uma vez que o equilíbrio é atingido, o depósito tende a ser erodido unicamente por grandes tempestades.

A questão da disposição de sedimentos dragados na baía de Sepetiba vem sendo estudada há longo tempo. Em 1977, o INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – juntamente com o IPR – Instituto de Pesquisas Radioativas da Nuclebrás/UFMG, estudaram as características de deposição de sedimentos lançados às águas da Baía com o emprego de sedimentos marcados com traçadores radioativos na área designada para bota-fora de materiais dragados.

Alguns outros estudos relacionados aos sedimentos foram realizados na região. Em 1992, foram elaborados pela Multiservice Estudo e Relatório de Impacto Ambiental para segunda fase de implantação do porto, que tratava da ampliação o terminal de minérios. Tais documentos foram aprovados pela FEEMA, e contém algumas conclusões obtidas com ajuda daquele estudo realizado em 1977. Verificou-se que, por ocasião da disposição de sedimentos dragados, não foi observada significativa porção destes sedimentos permanecendo em suspensão nas águas marinhas receptoras; entre 80 e 100% dos sedimentos descarregados pela draga depositam-se na área de despejo, e cerca de 60 a 80% tendem a se manter no fundo, na área de disposição.

Os dados referidos acima também serviram de base para elaboração, em 1997, do Estudo e do Relatório de Impacto Ambiental para dragagem do canal de acesso do porto. Neste estudo, tentou-se estabelecer em que condições os materiais dragados

no canal de acesso, sedimentariam na área selecionada para bota-fora e se poderia ser dali transportado para outras áreas da baía de Sepetiba. Na modelagem da dispersão de sedimentos, o volume dragado considerado foi de 17.266.000m³, sendo a área do bota-fora dividida em 25x45=1125 compartimentos de 100x100m, sendo os centros dos compartimentos externos ligados por um contorno retangular de 2.400x4.400m, conforme Figura 11.

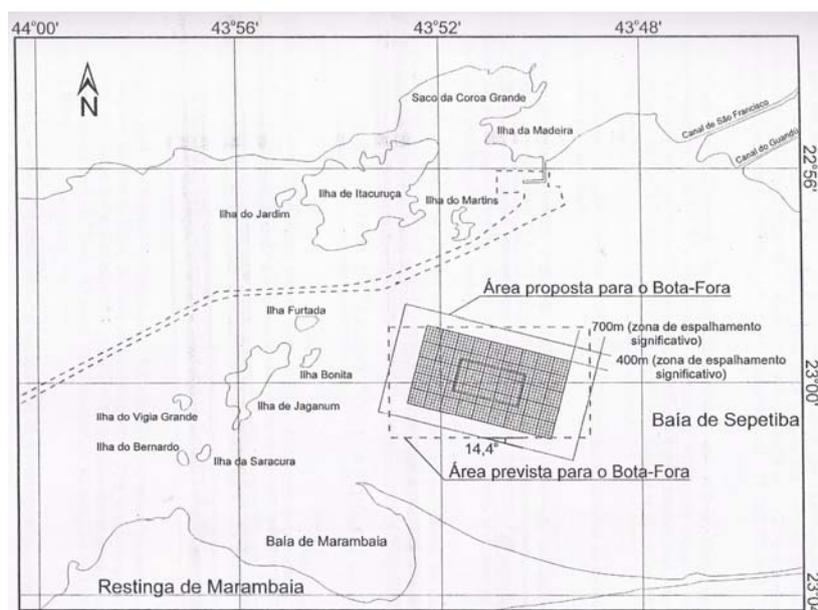


Figura 11 - Região dragada do canal de acesso e bota-fora (EIA/RIMA nº82,1997- [3]).

Verificou-se que os sedimentos dragados se depositariam no solo marinho, e que a zona externa a esse quadrilátero que poderia ser influenciada pela sedimentação de partículas oriundas das operações de despejo, é formada por uma faixa de 400x700m ao longo da área selecionada para bota-fora. Assim, afirmou-se que a área de influência das operações realizadas seria delimitada por um retângulo de 3.200x5.800m.

A concentração de metais pesados no material em suspensão é de 2 a 20 vezes maior que em sedimentos de fundo, daí a sua importância como principal carreador de metais na baía. Estudo sobre a dinâmica de sedimentos na baía de Sepetiba estimou a velocidade de deposição de partículas em suspensão na região do bota-fora de cerca de 1 a 4m/dia (aproximadamente 10⁻⁵m/s). Assim, uma vez remobilizados pela dragagem, os metais terão grande probabilidade de entrar na cadeia alimentar, enquanto na coluna d'água.

3.3. Sobre o processo de deposição de sedimentos na Baía de Sepetiba

As características de deposição dependem de processos ocorridos no passado e no presente. Associados a esses processos, o transporte de sedimento e posterior deposição dependem diretamente da quantidade de sedimento disponível, das correntes marinhas, da densidade das águas e de características intrínsecas dos sedimentos. A deposição no fundo ocorre por movimentos verticais do material em suspensão na água e, também, por movimentos quase horizontais do sedimento depositado no fundo, que pode entrar novamente em suspensão pela ação das correntes [2].

Nas áreas caracterizadas de baixa intensidade de correntes, há ocorrência de sedimentos mais finos, principalmente do tipo argila/silte. Já nas áreas de forte intensidade de correntes, há predomínio de sedimentos grossos que podem apresentar diferentes granulometrias.

Assim, existe uma correlação entre o tamanho do sedimento, tipo de coesão do fundo e as velocidades das correntes atuantes, ou seja, é um somatório de variáveis que atuam de forma interativa na dinâmica sedimentar, influenciando na relação e na taxa de deposição dos sedimentos.

É o que se observa na Figura 12, onde verifica-se um maior percentual de sedimentos de granulometria mais grosseira na entrada principal de águas na baía, onde a intensidade das correntes não permite que o material fino permaneça no fundo por muito tempo; já a região entre a ilha de Jaguanum até o interior da Baía apresenta um quadro diverso, onde predominam sedimentos mais finos, devido principalmente à correntes mais fracas atuantes nesta região.

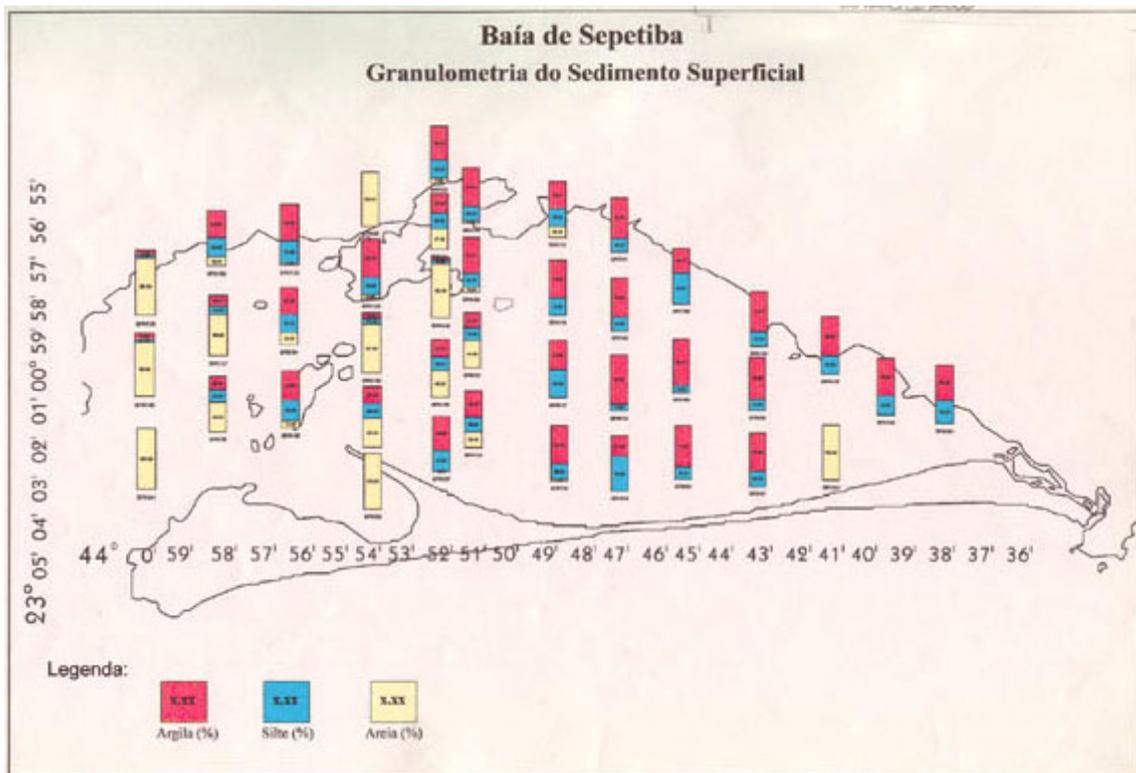


Figura 12 - Mapa de distribuição espacial de sedimentos na Baía de Sepetiba em porcentagem de argila (vermelho), silte (azul) e areia (amarelo) em amostras coletadas pela FEEMA em 41 pontos do corpo hídrico. [2]

Na baía de Sepetiba, intervenções na bacia hidrográfica e na própria baía vêm ocorrendo de modo a produzir efeitos que alteram os padrões de sedimentação e, com isso, mudanças nas taxas de sedimentação. E as mudanças nos processos de acumulação de sedimentos podem ser identificadas por meio de análises de sedimentos superficiais.

Sabe-se que a distribuição dos sedimentos finos na baía vem sendo alterada. Ultimamente, as partículas de argila cobrem uma área muito maior do que a previamente encontrada e relatada pela literatura específica. Com isso, forma-se uma região de assoreamento nas desembocaduras dos rios, com no tamanho dos sedimentos devido à matéria orgânica aderida. Como consequência, já se observa mudanças na linha de costa da Baía, conforme citado anteriormente.

Os rejeitos domésticos e industriais, com altas concentrações de metais pesados, também afetam o processo de deposição de sedimentos, alterando principalmente sua densidade. Neste estudo, não foram levadas em conta alterações na densidade do

sedimento no que diz respeito à influência que poderia exercer na tensão de atrito necessária para mobilizar uma partícula.

Vale ressaltar também que, no presente estudo, é feita uma análise do transporte de sedimentos existentes no fundo da baía, conforme apresentado na Figura 12, não sendo levado em conta o lixo sólido despejado nos rios, muito embora os mesmos tenham contribuição na contaminação dos sedimentos que lá se depositam.

O que se quer mostrar aqui é a influência da hidrodinâmica local, bem como todos os fatores geradores associados, na definição do local onde os sedimentos em suspensão na baía, independente de sua origem, tendem a se depositar. E para levar em conta estes efeitos, optou-se pela utilização de modelagem computacional do transporte de sedimentos, sendo realizadas diferentes simulações com base nas hipóteses consideradas.

Assim, nos próximos capítulos serão definidos os modelos adotados nas simulações, as condições hidrodinâmicas e as características dos sedimentos utilizados para obtenção dos resultados apresentados neste estudo.

4. Metodologia adotada

Foram realizadas simulações qualitativas de transporte de sedimentos ao longo da costa, com o objetivo de obter uma tendência de deposição de sedimentos que chegam à Baía pelos principais rios da bacia contribuinte, bem como pelo sedimentos mobilizados da região de bota-fota das obras do canal de acesso do porto para a coluna d'água.

Com vistas à análise de aspectos da dinâmica sedimentológica na Baía de Sepetiba, deve-se considerar que as tensões no fundo e mobilizações dos sedimentos são provocadas pelos seguintes agentes hidráulicos:

- A ação das correntes causadas por marés e ventos;
- A ação das ondas geradas por ventos no interior da Baía.

A ação apenas das correntes geradas por marés e ventos geralmente não é suficiente para mobilizar os sedimentos depositados em baías. As ondas, por causarem movimento oscilatório no fundo, proporcionam pouco transporte efetivo de sedimentos. Entretanto, a sinergia das ondas com as correntes pode resultar em uma elevada capacidade de transporte de sedimentos. Nesta ação conjunta, as ondas exercem tensões de atrito que podem mobilizar e ressuspender os sedimentos, que então são facilmente transportados pelas correntes.

O critério fundamental para determinação da mobilidade de sedimentos de fundo consiste na comparação entre a tensão de arrasto no fundo causada pela ação conjunta de correntes e ondas em um dado local, τ , e a tensão crítica para mobilização dos sedimentos em questão, τ_0 . Se $\tau > \tau_0$ admite-se que os sedimentos no local são mobilizados, podendo haver erosão e transporte pelas correntes, caso contrário os sedimentos permanecem em repouso ou tendem a se depositar.

4.1. Sistema de modelos adotados

Os modelos adotados na execução deste trabalho fazem parte do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, SisBAHIA[®], desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica, e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da COPPE/UFRJ [11].

Novas versões do SisBAHIA[®] têm sido continuamente implementadas na COPPE/UFRJ desde 1987, com ampliações de escopo e aperfeiçoamentos introduzidos através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec, envolvendo modelagem de corpos d'água naturais.

A versão atual do SisBAHIA[®] apresenta as seguintes características:

- **Modelo Hidrodinâmico:** Trata-se de um sistema de modelagem de corpos d'água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - Large Eddy Simulation). O sistema de discretização espacial é otimizado para corpos d'água naturais, permitindo excepcional detalhamento de contornos recortados e batimetrias complexas, como usual em tais corpos d'água. A discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos. A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, de forma que a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível Z da transformação. O esquema de discretização temporal se dá via esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem. Os resultados podem ser 3D, 2DH (promediado na vertical), ou ambos, dependendo dos dados de entrada. Utilizando esta ferramenta, pode-se simular a circulação hidrodinâmica em corpos d'água naturais sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres.
- **Modelo de Transporte Euleriano:** é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D, ideal para simular o transporte de escalares que se encontram dissolvidos na coluna de água, tais como substâncias genéricas, contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água. Por não se aplicar a este caso, conforme explicado mais à frente, no item 5.1.2, este modelo não foi utilizado neste trabalho.
- **Modelos de Qualidade de Água:** trata-se de um conjunto de modelos de transporte Euleriano, para simulação acoplada de parâmetros de qualidade de água: sal, temperatura, OD-DBO, compostos de nitrogênio, compostos de fósforo e biomassa. Tais modelos podem ser aplicados para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D.

- Modelo de Transporte Lagrangeano: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Utiliza o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, e é especialmente adequado para simulações de derrames de óleo ou do campo afastado de plumas de contaminantes. O modelo permite optar por transporte condicionado ou não, podendo ser condicionado por valores mínimos de velocidade, ou de tensão no fundo exercida só por correntes, ou de tensão no fundo exercida conjuntamente por ondas e correntes.
- Modelo de Transporte Lagrangeano - Probabilístico: acoplado ao modelo anterior, permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou no tempo. Exemplos de resultados: probabilidade de toque no litoral, probabilidade de passagem de manchas ou plumas contaminantes, probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite, probabilidade de passagem com tempo de vida inferior a um limite dado, etc. Os principais resultados apresentados neste estudo foram gerados a partir deste modelo.
- Modelo de Geração de Ondas: é um modelo para geração de ondas por campos de vento permanentes ou variáveis. Os campos de vento são supostos uniformes no domínio de interesse. O modelo determina se a geração de ondas será limitada pela pista ou pela duração do vento. Permite calcular, ao longo do tempo, a distribuição espacial no domínio de parâmetros do clima de ondas gerado tais como: alturas significativas e médias quadráticas, períodos de pico, tensões oscilatórias no fundo devido a ondas, etc.

Todos os modelos são integrados em uma interface amigável. Saídas gráficas e animações podem ser geradas com modelos rodando. Várias ferramentas de edição de malha são disponíveis na interface. Maiores detalhes técnicos sobre a formulação dos modelos do SisBAHIA, pertinentes aos esquemas numéricos adotados e a sua formulação matemática, podem ser encontrados nas referências [10] e [9].

Para a metodologia do trabalho aqui proposto, serão usados os seguintes modelos do SisBAHIA:

- Modelo Hidrodinâmico
- Modelo de Transporte Lagrangeano e Lagrangeano - Probabilístico
- Modelo de Geração de Ondas

Através do modelo hidrodinâmico obtêm-se as correntes instantâneas geradas na Baía por marés, ventos e vazões fluviais, as tensões geradas no fundo e as correntes residuais Eulerianas. Já no modelo de transporte Lagrangeano, obtêm-se tanto as correntes residuais Lagrangeanas, como as simulações de tendência de transporte de sedimentos mais graúdos junto ao fundo, e de sedimentos mais finos em suspensão na coluna de água. E, através do modelo de geração de ondas, obtêm-se a distribuição espacial das alturas e períodos de ondas e das respectivas tensões oscilatórias no fundo [12].

Os dados de entrada requeridos para uso dos modelos são: maré, ventos, vazão afluente de rios (condição de contorno), distribuição da granulometria média dos sedimentos na Baía e definição de tensão crítica para mobilidade.

4.2. Considerações sobre o modelo hidrodinâmico

As informações reunidas neste item foram adaptadas da referência [11].

Através da modelagem hidrodinâmica é possível obter em cada instante de tempo o padrão de circulação de um corpo d'água. Considerando a extrema complexidade dos sistemas naturais, o conceito de modelagem faz uso de aproximações que simplifiquem o caso em estudo, centrando a atenção nos principais fenômenos que atuam no corpo d'água.

De acordo com os casos de interesse, os modelos hidrodinâmicos podem ser:

- Modelos tridimensionais - Podem se dividir em modelos que incluem ou não termos baroclínicos que representam a influência de gradientes de densidade no escoamento. Tais modelos possuem as dimensões x , y , z , t . Modelos 3D sem termos baroclínicos são aplicáveis a corpos d'água nos quais os escoamentos não sofrem influência apreciável de gradientes de densidade.
- Modelos bidimensionais - São modelos onde é feita a promediação das variáveis do modelo tridimensional. Podem ser bidimensionais em planta (2DH), e bidimensionais em perfil (2DV). Nos modelos 2DH são promediadas as variáveis verticais, restando as dimensões x , y e t . Estes modelos são aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados tendendo a verticalmente homogêneos. Os modelos 2DV se aplicam mais a corpos d'água com variação

vertical de densidade, onde as promediações são feitas sobre as variáveis laterais, restando as dimensões x , z e t .

- Modelo Unidimensional - São modelos aplicáveis a corpos d'água com seção transversal homogênea, possuindo variáveis médias na seção transversal. Possuem dimensões x e t .

Os tipos de modelos hidrodinâmicos mais adequados para modelagem de um dado problema em um corpo d'água dependem fortemente do tipo de escoamento relevante para o problema em questão, e das características da estrutura vertical da coluna de água, principalmente no que tange as condições de estratificação.

A modelagem do escoamento para fins de transporte de sedimentos pode ser feita com boa acurácia, sem considerar efeitos baroclínicos (termos de gradientes de pressão originados pelas diferenças de densidade). Além disso, a obtenção de condições de contorno adequadas para a parte baroclínica do modelo, bem como sua efetiva calibração, também são consideravelmente mais complexas do que as da parte barotrópica (os termos barotrópicos são aqueles relacionados a variação de nível a superfície).

No caso específico da Baía de Sepetiba, a inclusão de termos baroclínicos é irrelevante, pois trata-se de um sistema estuarino verticalmente homogêneo, onde geralmente observa-se condições de estuário parcialmente misturado. Por conseguinte, a inclusão de termos baroclínicos na modelagem dos problemas em questão seria injustificável considerando: o esforço computacional adicional, as dificuldades para obtenção de condições de contorno corretas, a inexistência de dados que permitam uma efetiva calibração baroclínica, e a pouca significância de efeitos baroclínicos na circulação geral das baías, principalmente para eventos com escalas temporais inferiores a um a semana.

4.2.1. Condições de contorno do modelo hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico, há dois tipos básicos de condições de contorno: as terrestres e as abertas.

As condições de contorno terrestres definem as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes ou efluentes ao longo das mesmas, sendo necessário prescrever vazões ou velocidades normais ao contorno nos casos em que houver fluxo. É comum

considerar-se a margem como impermeável, impondo-se valor zero à vazão afluyente ou efluente naquele elemento da malha.

O modelo também pode estimar a vazão normal de efluxo e afluxo decorrente de alagamentos laterais. Neste caso, o modelo estima os valores em função do talude das áreas alagáveis, que pode ser imposto ou estimado a partir da topo-hidrografia dada. Nos trechos de contorno terrestre representando rios ou canais em afluxo, além da prescrição da vazão normal ao trecho de fronteira em questão, há também que se prescrever a componente tangencial, usualmente zero. A direção do fluxo entrando pela fronteira de terra pode ser calculada automaticamente pelo modelo em função da geometria local fornecida, ou pode ser imposta.

As condições de contorno abertas caracterizam normalmente encontro de massas d'água, representando um limite do domínio do modelo, mas não um limite real do corpo d'água. Ao longo das fronteiras abertas usualmente prescreve-se elevações de nível d'água. Em situações de efluxo, basta prescrever uma condição de contorno, que é a variação do nível da água. Entretanto, nas situações de afluxo há necessidade de outra condição além da anterior, sendo freqüente a imposição da componente da velocidade tangencial ao contorno como sendo nula. Como no caso dos contornos terrestres, a direção do fluxo entrando pelo contorno aberto pode ser calculada automaticamente pelo modelo em função da geometria local fornecida, ou pode ser imposta.

4.3. Módulo de transporte advectivo difusivo, tipo Lagrangeano

Trata-se de um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas, cuja técnica aplica-se à simulação do transporte de escalares que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água. Esse é o modelo mais adequado para simular o transporte de sedimentos, como é o objeto deste trabalho. Pode incluir qualquer processo cinético de ganho ou perda de quantidade do escalar sendo transportado, que seja função do tempo transcorrido após o lançamento da parcela de contaminante em questão.

Esse tipo de modelo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, sem estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Portanto, pode ser eficientemente aplicado a

problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes.

Com o modelo Lagrangeano, em geral, as fontes contaminantes são representadas por um dado número de partículas lançadas na região fonte, em intervalos de tempos regulares. As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico.

A forma da mancha individual depende da função de distribuição de massa adotada. Como as manchas individuais são usualmente muito pequenas em comparação com o domínio de interesse, estas podem ser consideradas localmente homogêneas, mas não necessariamente isotrópicas.

Com uma dada função de distribuição, e um dado valor mínimo de concentração detectável, pode-se calcular o tamanho da mancha individual e compará-la com o tamanho da célula da grade de distribuição. Se a mancha individual for menor do que a célula da grade, então toda a massa da mancha individual pode ficar em uma única célula da grade. Contudo, se a mancha individual for maior que a célula da grade, sua massa deverá ser distribuída pelas células da grade cobertas pela mesma, numa proporção definida pela função de distribuição adotada. A célula da grade que contém o centróide da mancha individual deverá receber a maior parte da massa da mesma. Cada partícula representa, na verdade, o centróide de uma mancha individual.

Existem várias maneiras de se determinar o campo de concentração, uma vez que a pluma, nuvem ou mancha de partículas é definida. Um ponto importante é a definição da malha na qual a massa de cada partícula será distribuída em cada célula. A dimensão da malha é que irá definir o tamanho de cada célula, e deve ser pequena em comparação à escala espacial da pluma ou mancha. A depender dessa escala, a malha do modelo hidrodinâmico pode ser utilizada, embora, geralmente, a escala de discretização do modelo hidrodinâmico seja muito grande para representar uma pluma ou nuvem de contaminantes. Depois que todas as partículas tiverem suas massas distribuídas pelas células da malha, a concentração de cada substância em uma dada célula torna-se simplesmente a quantidade de massa daquela substância presente na célula, dividida pelo volume da célula.

Na modelagem do transporte de substâncias presentes no meio, a primeira questão é a definição das substâncias de interesse, onde a principal delas é a água. A

modelagem do transporte de escalares é a determinação da concentração de substâncias ou outras propriedades escalares. Quando os escalares de interesse são parâmetros que qualificam a água, os modelos de qualidade de água descrevem o transporte advectivo-difusivo e eventuais reações cinéticas de escalares, que são utilizados como parâmetros indicadores de qualidade da água.

Os fatores de ganho em modelagens com o modelo do tipo Lagrangeano, em geral, são de 10 a 100 vezes maiores que os obtidos com o modelo hidrodinâmico.

4.3.1. Condições de Contorno para o Modelo de Transporte Lagrangeano

As condições de contorno para o modelo de transporte Lagrangeano de partículas podem também ser de dois tipos: ao longo dos contornos abertos ou ao longo de contornos de terra.

O primeiro considera que, quando uma partícula atravessa um segmento de contorno, ela sai do domínio modelado, e conseqüentemente é perdida. Isso quer dizer que o contorno aberto deve estar suficientemente afastado da região fonte, de tal forma que, se as partículas deixarem o domínio, não causarão perdas sensíveis para o problema sendo modelado. Por esse motivo, não se deve usar o modelo Lagrangeano para regiões-fonte próximas aos limites de contornos abertos.

O segundo tipo ocorre ao longo de contornos de terra, podendo ser consideradas duas situações: a partícula que atinge a fronteira retorna ao meio sem sofrer qualquer perda de massa; a partícula retorna ao meio, mas tem parte de sua massa retida no trecho da fronteira atingido. Tal variação depende da definição de um coeficiente de absorção ao longo das fronteiras de terra.

4.3.2. Sobre a caracterização das fontes contaminantes

O lançamento de contaminante numa dada região fonte pode ocorrer de maneira instantânea ou por intervalo especificado ou contínuo, inclusive com vazão variável. O número de regiões fonte a serem simuladas simultaneamente é praticamente ilimitado.

As fontes contaminantes são, em sua maior parte, pontos de lançamento com uma dada carga. Mas, por vezes, há uma grande quantidade de pequenos pontos ao longo de um trecho, que mais adequadamente podem ser considerados como uma linha

contaminante com uma dada carga por metro linha. A forma como tais cargas contaminantes entram no modelo Lagrangeano é através da definição de uma região fonte.

Regiões fonte são sempre volumes prismáticos, com seção horizontal elíptica ou retangular definida pelo usuário. A altura do prisma pode ser constante ou variável. Será constante quando o contaminante ocupa apenas uma faixa da coluna de água. Mas, é usual ocorrerem casos em que o contaminante fica bem misturado na coluna de água, especialmente quando a região fonte está na zona de arrebentação das ondas. Nestes casos, ao longo da região fonte a profundidade, e, portanto a altura do volume prismático, será variável no tempo, seguindo o nível da maré, e no espaço seguindo a batimetria local.

Embora a região fonte sempre seja um volume prismático, com o grau de liberdade oferecido, compete ao usuário definir adequadamente regiões fonte que, em proporção à escala do domínio de interesse, funcionarão como fontes pontuais, em linha, em plano ou volumétricas. Por conta disto, em qualquer procedimento de modelagem é imprescindível que o usuário tenha uma boa concepção das escalas de interesse no domínio modelado, não apenas para bem definir a região fonte, mas também para ter uma idéia clara do que é ou não relevante nas escalas de interesse.

4.4. Módulo de Geração de Ondas

Este módulo é responsável por calcular a distribuição de alturas de onda e respectivas tensões no fundo variáveis no tempo. Isto é, dado um domínio de modelagem, um registro de vento e especificada a duração ou persistência de vento desejada, o modelo calcula a cada intervalo de tempo especificado o clima de ondas no domínio.

Parâmetros considerados:

- Viscosidade Cinemática da Água: o valor padrão já apresentado pelo modelo é $1.1900E-06$ m²/s (água salgada). Este dado pode ser editado pelo usuário (exemplo: para água doce utilize $1.0000E-06$ m²/s).
- Duração do vento: representa o período de atuação do vento sobre o domínio de modelagem utilizado para o cálculo da tensão em todos os nós da malha.

É mais comum alimentar o modelo com dados de vento variáveis no tempo, mas uniformes no espaço.

Se o usuário selecionar 'Variável', deverá informar o intervalo de tempo entre as informações de vento. É solicitada ao usuário uma tabela que lista as informações de vento que serão utilizadas para todos os elementos da malha. A primeira coluna representa o tempo, a segunda a velocidade do vento 10 metros acima do nível do mar (em m/s) e a terceira coluna representa o ângulo entre o vetor velocidade do vento e o sentido positivo do eixo x. O usuário poderá preparar este arquivo e importar no SisBAHIA

Para utilizar o modelo de transporte Lagrangeano condicionado por tensão no fundo causado por ondas e correntes, os dados do modelo de geração de onda devem estar sincronizados com o modelo hidrodinâmico. Os dados de vento do modelo hidrodinâmico devem ser os mesmos do modelo de geração de onda, assim como o tempo inicial e o tempo final de simulação. Sugere-se que o intervalo de tempo de resultados seja o mesmo em ambos os modelos. Nos resultados, podem ser gerados mapas de isolinhas no Surfer.

Quando se usa o modelo para gerar climas de onda variáveis no tempo, obtêm-se para cada nó da malha de discretização do domínio de interesse resultados para seis variáveis. As variáveis resultantes em cada nó da malha são:

Tabela 4 – Variáveis obtidas quando da geração de clima de ondas no SisBAHIA [9].

Pista (m):	Comprimento da pista de vento disponível para gerar ondas em direção ao nó.
Tp (s):	Período de pico do clima de ondas.
Hs (m):	Altura significativa do clima de ondas.
Hrms (m):	Altura média quadrática do clima de ondas.
Tensão Hs (N/m ²):	Tensão oscilatória exercida no fundo pelas ondas com altura Hs.
Tensão Hrms (N/m ²):	Tensão oscilatória exercida no fundo pelas ondas com altura Hrms.

5. Modelagem da Baía de Sepetiba

Neste capítulo será apresentada uma visão detalhada da elaboração da modelagem da Baía de Sepetiba. Serão apresentados o domínio modelado, a malha de discretização utilizada para a região de estudo, os dados de entrada necessários à aplicação do modelo hidrodinâmico, com as condições iniciais e de contorno, e, por fim, os cenários de simulação do transporte de sedimentos.

Conforme mencionado anteriormente, o modelo hidrodinâmico é a base fundamental para o conhecimento do comportamento da circulação hidrodinâmica sob condições diversas de marés, ventos e contribuição fluvial. Com o intuito de analisar o padrão de correntes da Baía de Sepetiba, utilizou-se o modelo hidrodinâmico em simulações de 90 dias para a simulação do transporte Lagrangeano de sedimentos.

5.1. Domínio modelado

Para seleção do domínio modelado, faz-se necessário que as fronteiras abertas com o mar estejam longe da região de interesse, pois é comum haver incertezas quanto às condições de contorno a serem prescritas. Por isso, a região de interesse deve ficar suficientemente afastada para que o próprio escoamento modelado possa se ajustar às condições topo-hidrográficas existentes, dissipando em grande parte as incertezas presentes nas fronteiras. Tal procedimento é comum na modelagem de baías e estuários, no quais o escoamento no interior é relativamente pouco sensível às pequenas inaccurácias porventura existentes nas especificações de condições de contorno externas aos recintos mais abrigados. Os aspectos relativos às condições de contorno internas do modelo serão apresentados mais adiante.

Sabe-se que a Baía de Sepetiba é a parte Leste de uma grande Baía composta pelo conjunto Ilha Grande – Sepetiba. Para modelar a circulação hidrodinâmica em uma das partes, seria ideal considerar o sistema completo. Entretanto, como o interesse está em definir padrões de circulação hidrodinâmica e transporte de sedimentos, em pontos internos da Baía, é adequado considerar apenas a Baía de Sepetiba, propriamente dita. Desta forma, considerou-se como domínio de modelagem a área ilustrada na Figura 13, que aparece no item a seguir.

Foram considerados também os principais rios afluentes da baía, sendo discretizada a malha também na região fluvial que contribui com maior descarga sólida para a baía,

A Tabela 5 apresenta algumas informações sobre a malha:

Tabela 5 - Informações da malha fornecidas pelo SisBAHIA.

Elementos totais		1052
Nós totais		4890
Nós	Internos	3486
	Contorno Terra	1383
	Contorno Aberto	27
	Terra/Aberto	6
Banda Máxima		273
Domínio discretizado	Área (km ²)	479.574
	Volume (m ³)	3249700424.251
	Profund. Média (m)	6.776

5.3. Dados de entrada

Neste item apresenta-se uma descrição dos dados utilizados na modelagem hidrodinâmica da Baía de Sepetiba. Estes dados compreendem: batimetria do domínio modelado, rugosidade equivalente do fundo, marés, ventos e vazões dos principais rios afluentes.

5.3.1. Batimetria

Os dados referentes à batimetria utilizados na elaboração da malha foram obtidos a partir das seguintes cartas náuticas, editadas e publicadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN, Marinha do Brasil:

1622 BAÍA DE SEPETIBA 1:40 122 – edição: 1999

1622 BAÍA DE SEPETIBA 1:40 122 – última edição: 2003

Além destas fontes, foram utilizadas também imagens de satélite de 2003, obtidas junto ao laboratório de Geografia da UFRJ, com escala de 1:5000 , e também imagens aéreas obtidas na internet, através do programa Google Earth.

A Figura 14 ilustra a batimetria do domínio modelado, obtida através da interpolação dos valores pontuais (x, y e z) realizada pelo programa Surfer.

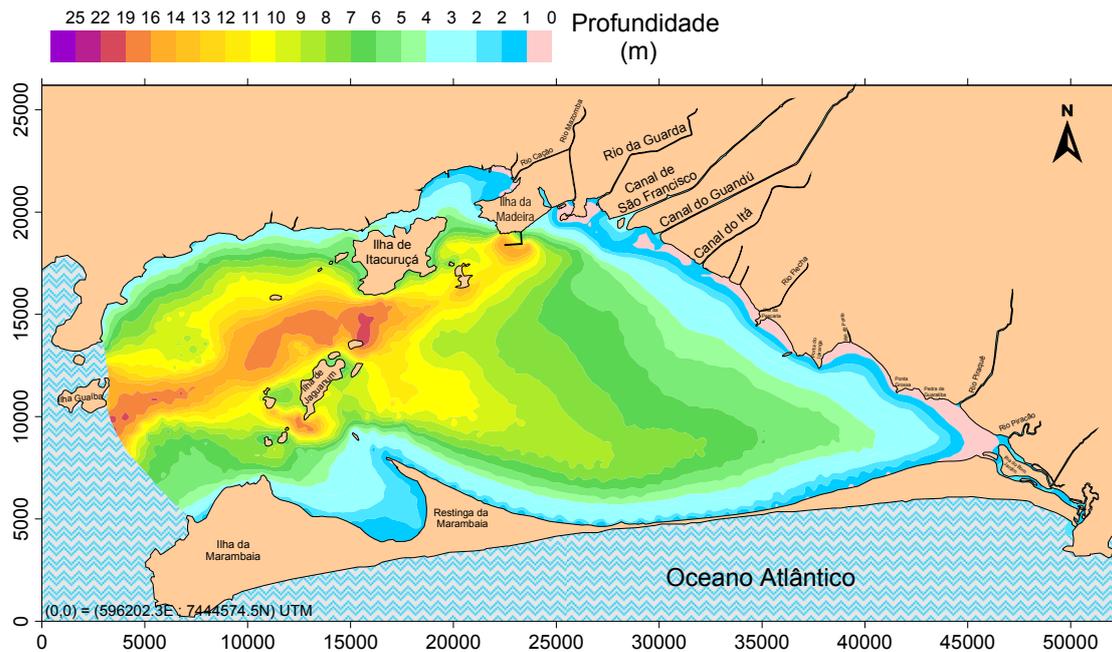


Figura 14 - Mapa de batimetria.

5.3.2. Rugosidade equivalente do fundo

As principais forças que governam os escoamentos de interesse que ocorrem na Baía de Sepetiba são oriundas dos gradientes de pressão, da ação do vento e do atrito no fundo. As tensões geradas por este último são conhecidas a partir da determinação do coeficiente de Chézy, que por sua vez depende do valor da rugosidade equivalente ϵ do fundo.

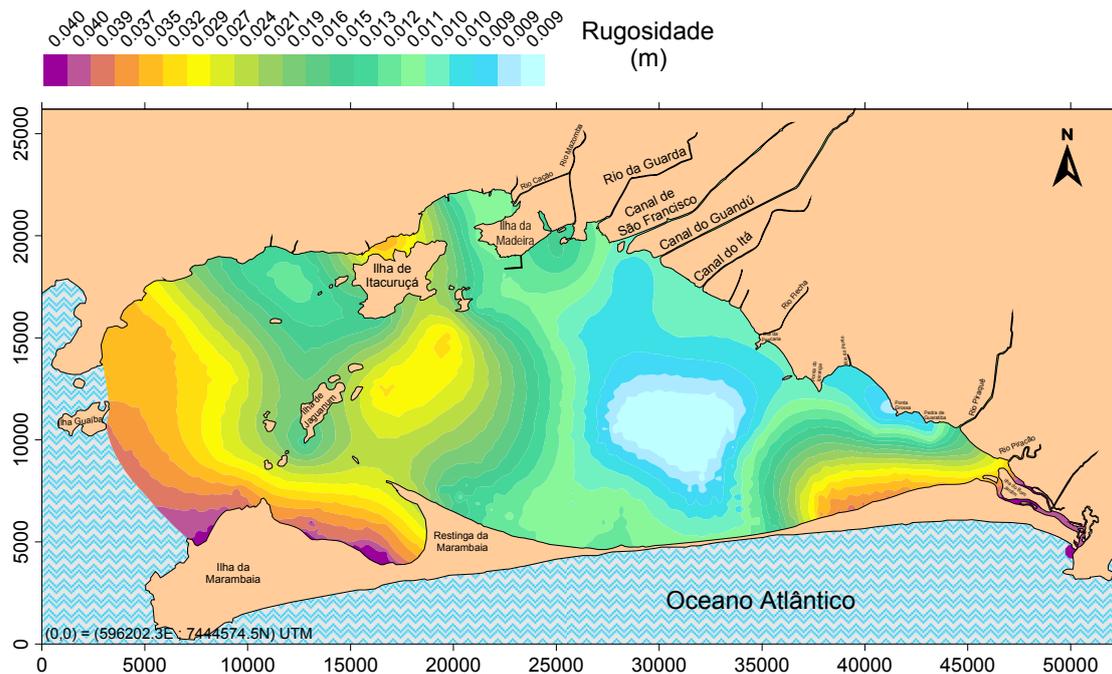


Figura 15 - Mapa de rugosidade

Como a rugosidade depende do tipo de material que compõe o leito do corpo d' água, deve-se conhecer a distribuição de sedimentos no fundo, a fim de prescrever amplitudes de rugosidade equivalente condizentes com a realidade. Neste estudo, foi utilizada a distribuição de sedimentos apresentada previamente na Figura 12, adotando-se os seguintes valores de rugosidade equivalente para os sedimentos descritos: argila=0,008; silte=0,015; e areia=0,040. Obteve-se, assim, a Figura 15.

5.3.3. Maré

A maré é uma das forçantes mais importantes inseridas na modelagem da circulação hidrodinâmica da região de estudo. As diferenças de nível d'água originam o escoamento ao longo do domínio modelado.

Em simulações gerais, pode-se adotar marés astronômicas geradas a partir das principais constantes harmônicas referentes a uma estação maregráfica representativa, aplicando-se os devidos coeficientes de correção.

A maré astronômica foi inserida no modelo com base nos registros da DHN das principais constantes harmônicas das estações maregráficas de Ilha Guaíba (Terminal MBR), Castelhanos e Recreio dos Bandeirantes, disponíveis no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da FEMAR – Fundação de Estudos do Mar. Um ajuste em tais constantes é feito de modo a transferi-las para as condições externas do modelo de modo apropriado. Dentre as dezenas de constantes harmônicas pertinentes, foram usadas as que apresentam maiores amplitudes, com valores ajustados aos contornos externos do domínio modelado.

A seguir, a Tabela 6 apresenta as constantes harmônicas utilizadas como dados de entrada para o modelo. A Figura 16 ilustra a série temporal de nível d'água para um período de 30 dias devido a esta maré astronômica.

Não há dados prontos que permitam fazer uma análise estatística de ocorrências de marés meteorológicas na Baía de Sepetiba. Fazendo uma relação com os dados disponíveis para a Baía de Guanabara, considerando os efeitos meteorológicos nas baías de Guanabara, Sepetiba e Ilha Grande similares, pode-se dizer que: marés meteorológicas com amplitudes de 40cm ou mais ocorram em cerca de 18% do tempo, e 80cm ou mais ocorram em cerca de 2% do tempo.

Tabela 6 - Constantes harmônicas - catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras – FEMAR

Constante	Período (seg.)	Amplitude (m)	Fase (rad)
2N2	46459.3481	0.017	2.219
K1	86164.0908	0.059	2.541
K2	43082.0452	0.057	1.403
L2	43889.8327	0.023	0.919
M2	44714.1644	0.329	1.518
M3	29809.4429	0.013	3.598
M4	22357.0822	0.077	1.682
MN4	22569.0261	0.032	0.842
MS4	21972.0214	0.034	3.335
N2	45570.0537	0.044	2.27
O1	92949.6300	0.111	1.537
P1	86637.2046	0.021	2.367
Q1	96726.0840	0.025	1.101
S2	43200	0.192	1.623
T2	43259.2171	0.008	1.814

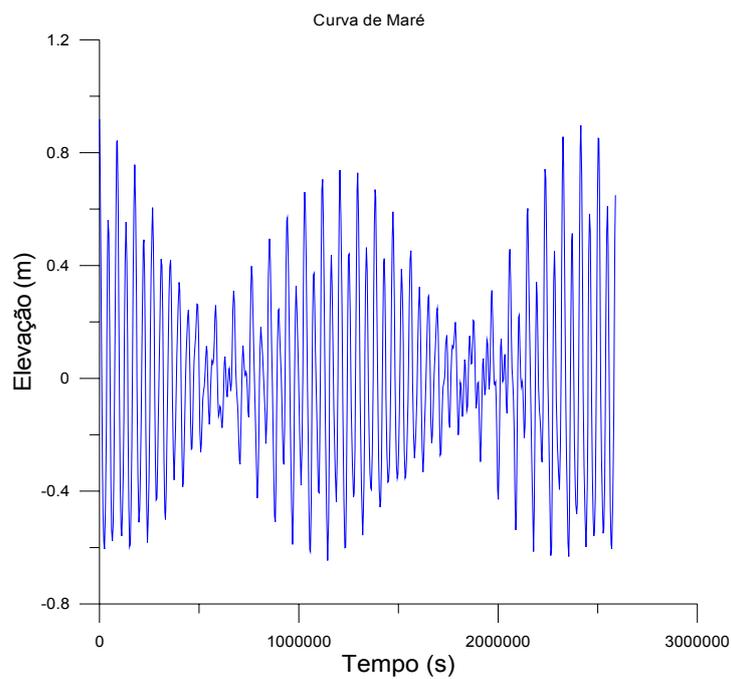


Figura 16 - Série temporal de elevação para 90 dias devido a maré astronômica.

Para representar a maré meteorológica, foi calculada a diferença de fase entre as fronteiras abertas definidas, sendo esta defasagem inserida no modelo de modo a representar o atraso ou adianto no tempo de um ponto em relação a outro.

Para isto, foram utilizados dados referentes à componente harmônica de maior amplitude, no caso M2, medidos nas estações maregráficas anteriormente citadas. Estes dados foram os ângulos de fase com que M2 atinge cada estação e a distância percorrida entre as mesmas. Desta forma, obteve-se uma defasagem entre a estação do Recreio dos Bandeirantes, mais próxima da fronteira leste, e a estação de Castelhanos, próxima à fronteira oeste, e posteriormente, a defasagem desta última em relação à estação da Ilha Guaíba, que pertence à fronteira aberta.

Assim, chegou-se à defasagem total entre as fronteiras de aproximadamente 12 minutos, estando a maré adiantada na fronteira aberta a leste em relação à fronteira oeste.

5.3.4. Ventos

Em virtude do relevo e da proximidade com o oceano, o vento apresenta, como primeira predominância, os quadrantes sul e oeste-sudoeste e, como segunda predominância, os quadrantes norte-nordeste e leste-nordeste. Quanto à velocidade do vento, segundo dados da estação meteorológica de superfície da Base Aérea de Santa Cruz, no período de 1981/89, o percentual de calmas (19,4%) é consideravelmente inferior ao de ventos com velocidade na faixa de 1,5 a 5 m/s (67,7%) [1].

Os dados utilizados neste projeto foram obtidos através de medições de velocidade e direção de vento, realizadas pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia – entre os dias 01/03/2007 e 29/05/2007, na estação automática da Marambaia. Tais medições são realizadas a aproximadamente 10 metros de altura em relação ao nível do mar. Representam ventos usuais, e foram inseridos no modelo para simular o efeito do vento na circulação hidrodinâmica da baía.

Para a inserção destes dados no modelo, os ventos locais foram considerados variáveis no tempo e uniformes no espaço.

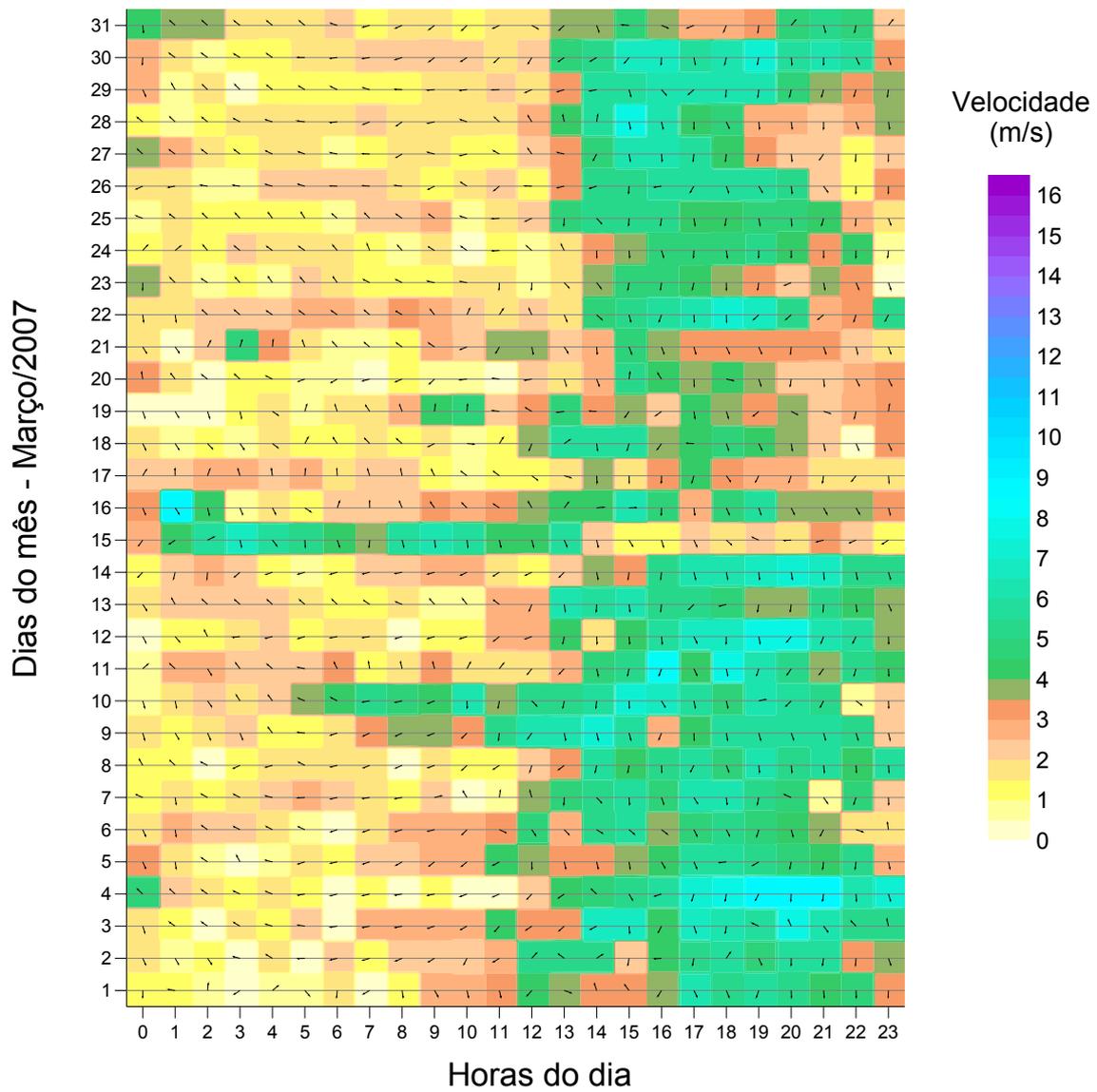


Figura 17 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Março/2007.

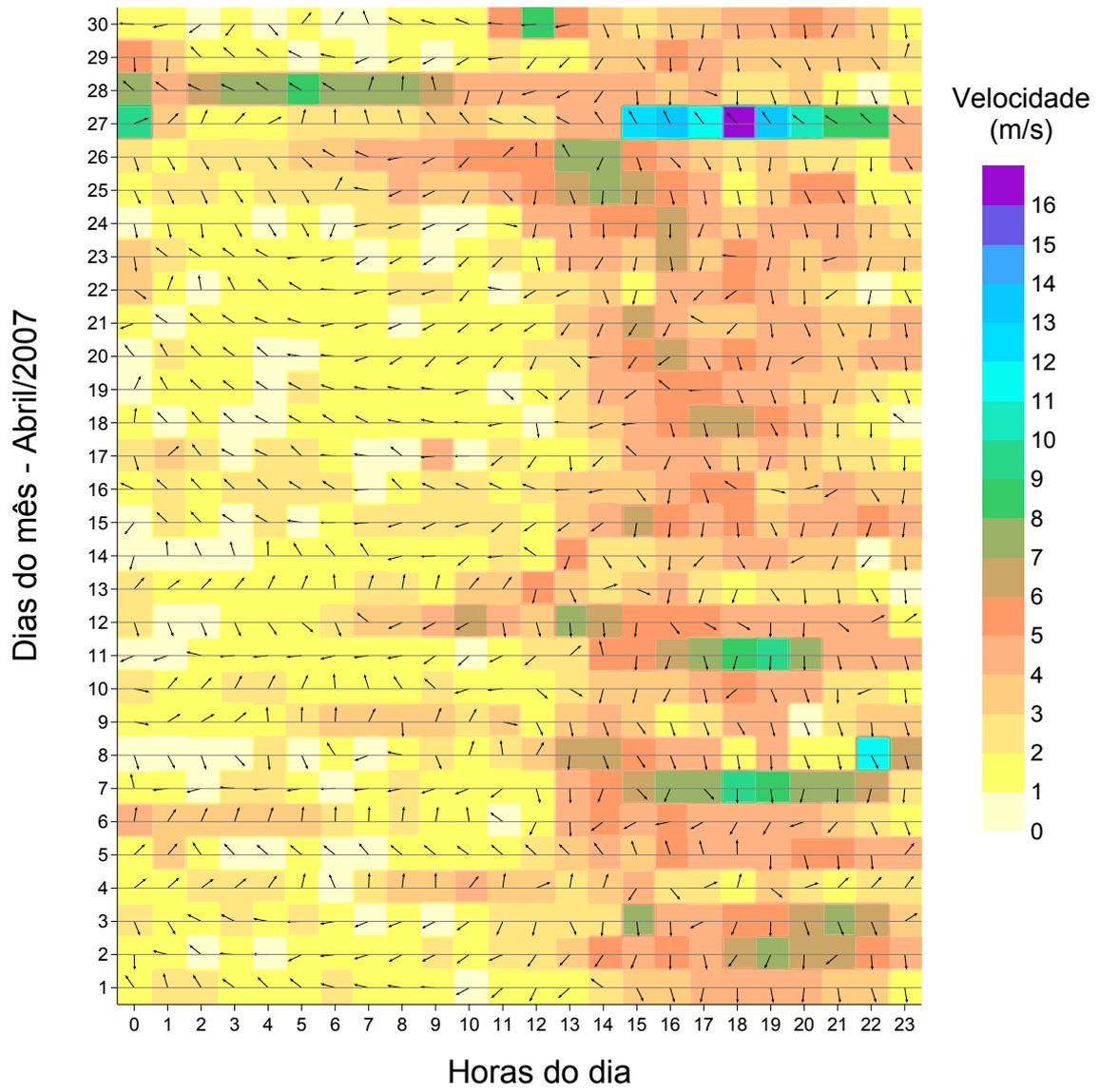


Figura 18 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Abril/2007.

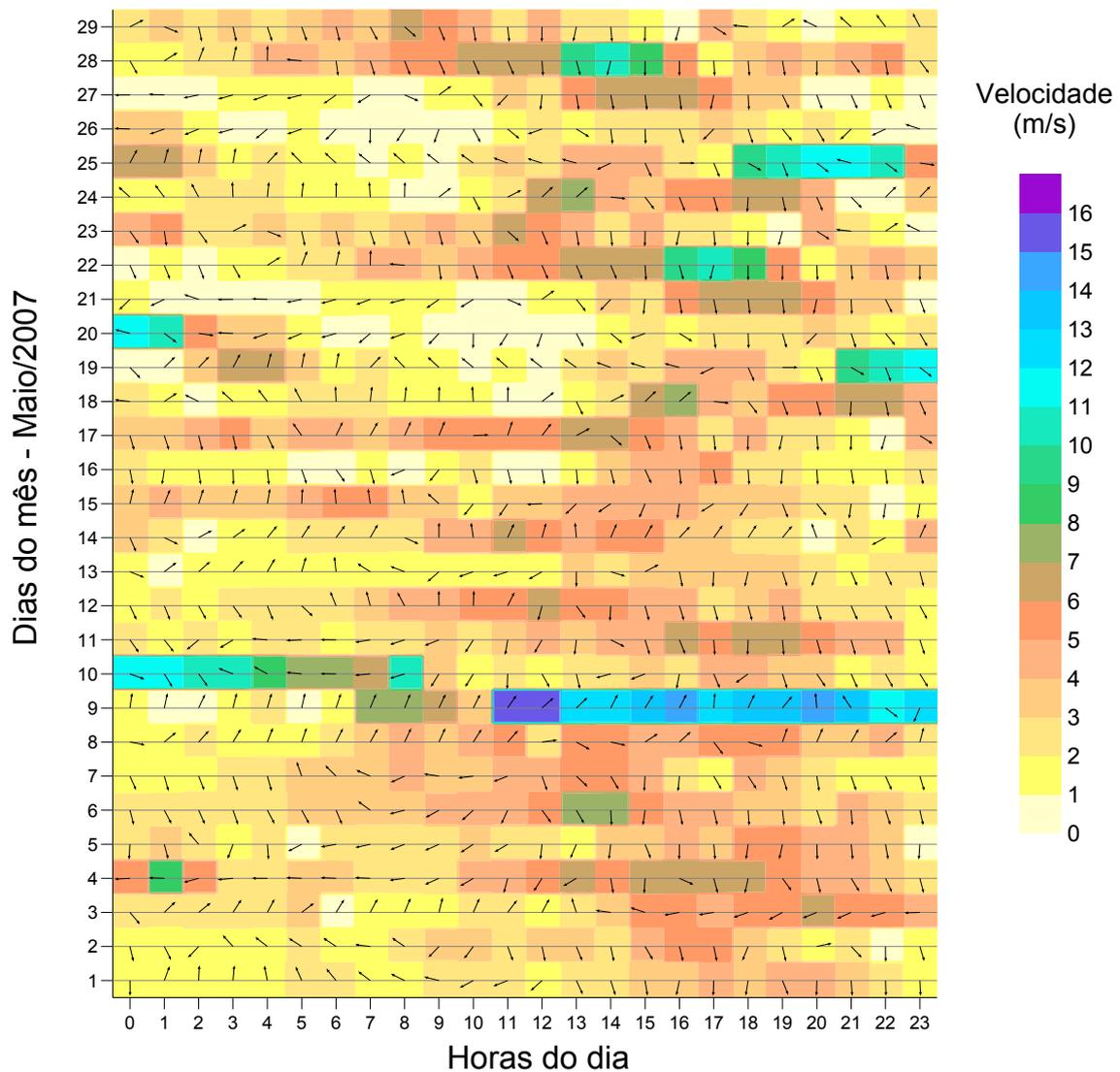


Figura 19 - Dados de intensidade e direção do vento para o mês de Maio/2007.

5.3.5. Condição inicial

As condições iniciais necessárias à simulação da circulação hidrodinâmica através do SisBAHIA são os valores das componentes horizontais de velocidade u e v , e elevação da superfície livre (ζ) para todos os nós do domínio modelado.

No instante inicial de simulação não se tem conhecimento de nenhum resultado prévio para ser usado como condição inicial. Por isso, certos cuidados devem ser tomados na determinação desta condição. Um deles é garantir que esta satisfaça as equações governantes. Além disso, deve-se evitar discrepâncias entre os valores de condição inicial e condições de contorno no primeiro passo de tempo.

Para modelagem da circulação hidrodinâmica da região em estudo, prescreveu-se como condição inicial velocidades u e v nulas e o valor 0,92m para elevação da superfície livre, condições para todos os nós. Esta elevação correspondente à primeira preamar de sizígia, conforme visto na figurada série temporal.

Esta condição inicial estabelece o início do modelo em uma situação de saída de águas na baía, por apresentar um nível mais alto que a fronteira externa, que está em zero. Usar um valor constante de ζ (elevação) e valores nulos para u e v é uma condição bastante adequada para condições de maré com características estacionárias predominantes, conforme observado no corpo d'água em questão.

5.3.6. Condições de contorno

As condições de contorno transmitem ao modelo informações do que ocorre fora do domínio modelado, já que o modelo calcula apenas o que ocorre no seu interior. Trata-se de uma necessidade matemática que confere unicidade a solução do problema. Os contornos definidos são os contornos fechados, denominados contornos de terra, e os contornos abertos, que representam um limite de conveniência demarcando o domínio em água.

Neste trabalho foram consideradas como condições de contorno terrestres as margens impermeáveis e os afluxos dos principais rios, isto é, que contribuem com vazões significativas para o modelo, conforme Tabela 7. O canal de São Francisco também aparece na tabela, no entanto sua vazão foi inserida no modelo através de uma seqüência de dados horários que representam a variação da vazão no tempo de acordo com o hidrograma do rio, mostrado na Figura 20.

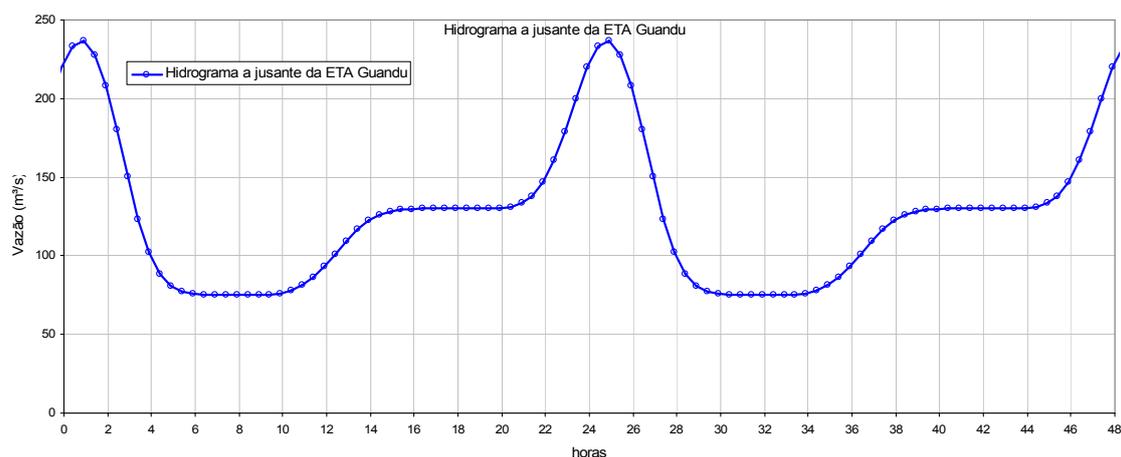
As elevações de nível d'água na fronteira aberta foram prescritas mediante a imposição de uma "maré calibrada" ao longo dos nós da fronteira, utilizando as componentes harmônicas alteradas por coeficientes de correção, levando em conta a defasagem entre nós distantes entre si.

Além disso, os elementos fechados da malha que definem ilhas foram listados no modelo como ilhas nodais, de forma que o modelo os interpretasse como contornos de terra.

Tabela 7 - Vazões dos principais rios que deságuam na baía.

Corpos fluviais afluentes	Vazão (m ³ /s)
Rio Piraquê	-4,9
Canal do Guandu	-8,8
Canal de São Francisco	*
Rio da Guarda	-19,1
Rio Cação	-0,5
Rio Mazomba	-0,5
Canal do Itá	-3.2

Figura 20 - Hidrograma do Canal de São Francisco a jusante da Estação de Tratamento do Guandu.



5.3.7. Outros parâmetros

Além dos parâmetros e condições descritas anteriormente e que servem como base para a modelagem da circulação hidrodinâmica de um sistema estuarino, faz-se necessária a fixação de determinados parâmetros que, juntamente com estes, são necessários à caracterização física da região de estudo e obtenção de resultados mais próximos da realidade. Neste sentido, adotou-se:

- massa específica da água o valor de 1025 kg/m³ (correspondente aos valores de salinidade atualmente observados);
- 1,2 kg/m³ para a massa específica do ar;
- 9,81 m/s² para a aceleração da gravidade.
- O sistema de modelagem utilizado permite a alteração destes valores.

5.4. Modelo de geração de ondas

Para este modelo, simulado também para 90 dias, foram utilizados os mesmos dados de vento inseridos no modelo hidrodinâmico, sendo adotada a viscosidade cinemática da água = $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e calculada a duração do vento em 4 horas. Este cálculo foi feito através da seguinte expressão, recomendada pelo Coastal Engineering Manual, parte II, capítulo 2 [15]:

$$D = 77,23 * \left[\frac{\text{pista}^{0.67}}{U_{10}^{0.34} * g^{0.33}} \right]$$

onde U_{10} velocidade média do vento á 10m de altitude e $g=9,81\text{m/s}^2$.

Assim, foram obtidos parâmetros necessários para que o modelo de transporte possa simular o tendência de deriva dos sedimentos considerando o efeito de ondas geradas na baía, como também o seu efeito sobre a tensão no fundo.

5.5. Modelagem de transporte

Utilizando os modelos hidrodinâmico e de geração de ondas já rodados, foi criado, então, um modelo de transporte Lagrangeano para simular o transporte de sólidos na baía.

Antes de descrever os cenários estabelecidos para simulação do fenômeno de interesse, o que será feito no próximo item, devem ser feitas algumas considerações:

- Fontes são regiões pré-estabelecidas a partir das quais descargas são lançadas no modelo. Cada fonte possui um valor de vazão efluente e uma concentração efluente de algum material que se deseje simular o transporte no corpo hídrico em que está sendo lançado. Possuem informação de tensão mínima no fundo, que serve como parâmetro de tensão crítica para mobilidade das partículas, velocidade de sedimentação e curva de decaimento. Sua localização e forma podem ser definidas individualmente.
- O instante inicial de simulação, que é o instante em que as primeiras fontes começam a lançar partículas, deve ser igual ou maior que o primeiro instante em que há resultados do modelo de geração de ondas.
- Coeficiente de absorção é um valor em porcentagem de massa de partículas que, ao tocarem o litoral, ficará retida no mesmo, deixando de ser transportada pelo modelo. A parte do litoral quem que houver partículas absorvidas ficará

marcada nos resultados. Nos cenários simulados neste estudo, foi marcado apenas o litoral da praia de Sepetiba, com coeficiente de absorção de 20%.

5.5.1. Condições para mobilidade de sedimentos no fundo

As informações a seguir foram adaptadas da referência [12].

Para uma determinada granulometria do leito, o processo de erosão e/ou assoreamento depende da denominada *tensão crítica de mobilidade*. Valores da tensão no leito acima deste valor crítico podem promover a erosão de grãos enquanto que para valores inferiores à esta tensão, os grãos permanecem imóveis, ou, se em movimento, tenderão a depositar.

No caso de sedimentos predominantemente arenosos, o critério de mobilidade usualmente empregado baseia-se na chamada função de Shields, Ψ , que tem a seguinte expressão:

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\gamma(S_s - 1)d} = f\left(\frac{d u_*}{\nu}\right) \quad ; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma}$$

onde:

- τ_o = tensão crítica de arrasto no leito
- γ_s = peso específico aparente do grão
- γ, γ_a = peso específico da água = $g\rho_a$
- g = aceleração da gravidade
- ρ_a = massa específica da água
- d = diâmetro do grão
- u_* = velocidade de atrito no leito
- ν = viscosidade cinemática da água

A aplicação do critério baseado na função de Shields consiste na comparação entre a tensão de arrasto no fundo causada pelos agentes hidráulicos (ondas e correntes) em um dado local, τ , e a tensão crítica para o mesmo local, τ_o . Se $\tau > \tau_o$ admite-se que os sedimentos no local são mobilizados e eventualmente transportados pelas correntes, caso contrário os sedimentos permanecem em repouso.

Como se mostra no item a seguir, o critério de transporte adotado no SisBAHIA[®] é mais sofisticado, pois considera um efeito probabilístico na decisão de haver ou não transporte quando a tensão no fundo τ tem valor próximo do valor crítico τ_o .

Apresenta-se a seguir (Figura 21) um diagrama modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida apenas a partir da caracterização do sedimento e da água.

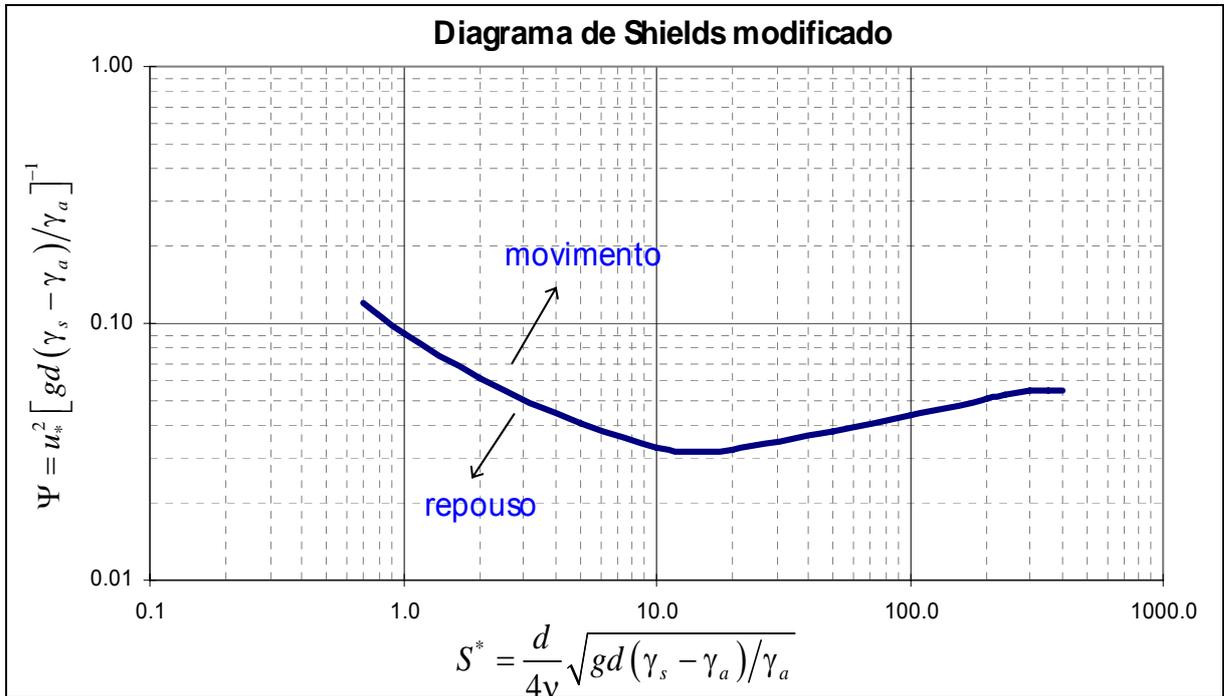


Figura 21 - Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica $\tau_o = \sqrt{(u_*\rho)}$, pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água.

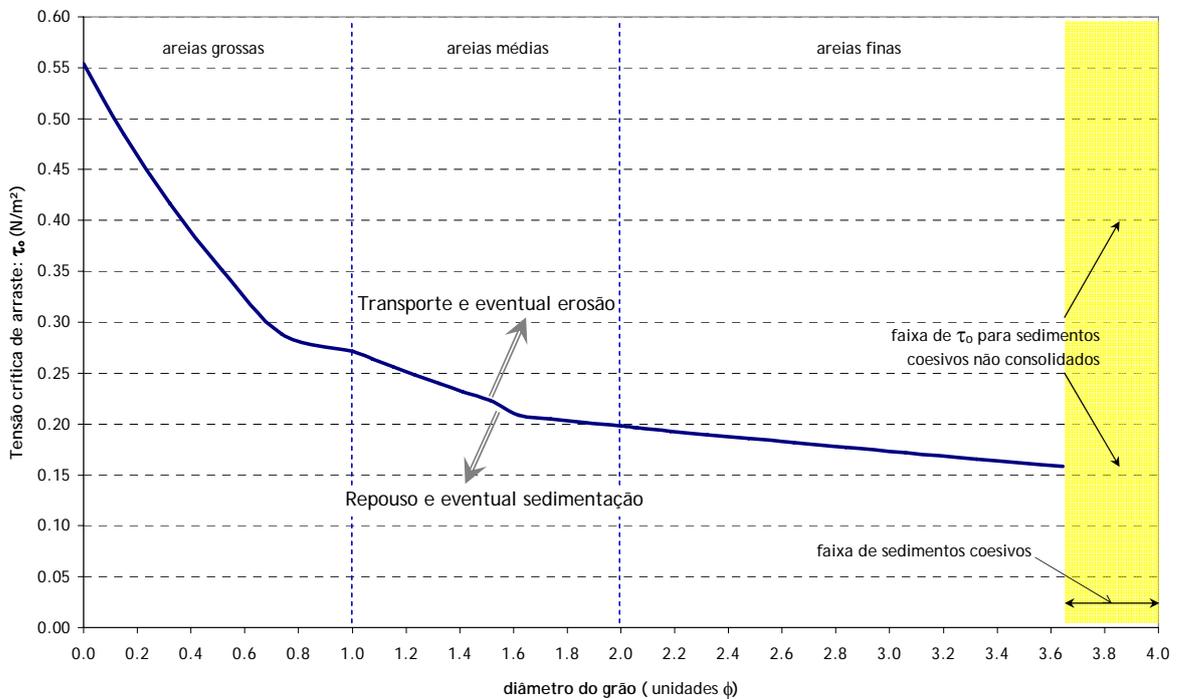


Figura 22 - Tensão crítica para mobilidade, τ_o , em água salgada ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$), em função do diâmetro do grão em unidades ϕ , conforme Tabela 8, calculada pelo diagrama de Shields modificado.

Sedimentos	d (mm)	d (ϕ)	S*	Ψ	τ_o (N/m ²)
Areia fina	0.080	3.64	0.59	0.124	0.159
	0.100	3.32	0.83	0.104	0.166
	0.120	3.06	1.09	0.090	0.172
	0.140	2.84	1.37	0.079	0.177
	0.160	2.64	1.68	0.071	0.182
	0.180	2.47	2.00	0.065	0.186
	0.200	2.32	2.34	0.059	0.190
	0.220	2.18	2.70	0.055	0.193
Areia média	0.240	2.06	3.08	0.051	0.196
	0.250	2.00	3.27	0.050	0.198
	0.275	1.86	3.78	0.046	0.202
	0.300	1.74	4.31	0.043	0.205
	0.325	1.62	4.85	0.040	0.208
	0.350	1.51	5.42	0.040	0.223
	0.375	1.42	6.02	0.039	0.232
	0.400	1.32	6.63	0.038	0.240
	0.425	1.23	7.26	0.037	0.248
	0.450	1.15	7.91	0.036	0.256
	0.475	1.07	8.58	0.035	0.264
Areia grossa	0.500	1.00	9.26	0.034	0.272
	0.600	0.74	12.18	0.030	0.288
	0.700	0.51	15.34	0.031	0.351
	0.800	0.32	18.75	0.033	0.416
	0.900	0.15	22.37	0.034	0.484
	1.000	0.00	26.20	0.035	0.554
	2.000	-1.00	74.10	0.042	1.343

Tabela 8 - Tensões críticas para mobilidade de sedimentos arenosos na BTS, baseada na função de Shields.

Vale observar que, nos cálculos que resultaram na Figura 22 e na Tabela 8, usou-se massa específica da água $\rho_a = 1025 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade cinemática $\nu = 1.19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Para conversão de unidades de diâmetro de sedimentos em milímetros (mm) para unidades ϕ , utiliza-se a fórmula:

$$d_\phi = -\ln(d_{\text{mm}})/\ln(2)$$

No caso da Baía de Sepetiba, deve-se considerar que as tensões no fundo e mobilização dos sedimentos são provocados pelos seguintes agentes hidráulicos:

- A ação das correntes causadas por marés e ventos;
- A ação das ondas geradas por ventos no interior da baía.

Para sedimentos predominantemente arenosos a tensão de atrito necessária é obtida através da função de Shields, apresentada a seguir. Pode-se ver no diagrama (Figura 21) que, para sedimentos arenosos, as tensões de atrito críticas para mobilização ficam usualmente na faixa de 0.15 a 1.0 N/m².

Para sedimentos coesivos consolidados o valor da tensão crítica pode ser significativamente maior que 1.0 N/m^2 , e depende de vários processos, inclusive reológicos. A estimativa da tensão crítica em tais situações só é possível com medições específicas in situ, ou perfeita caracterização do sedimento e suas condições de consolidação.

Para sedimentos predominantemente lamosos ou coesivos não consolidados, tipicamente, a tensão de atrito no fundo necessária para mobilização dos sedimentos situa-se na faixa de 0.15 a 0.4 N/m^2 , como indicado na Figura 21. No presente estudo, os sedimentos finos foram considerados não consolidados.

Considerar apenas a ação das correntes de maré, só seria realista durante situações de calmaria, onde as ondas de vento têm pouco efeito. Por sua vez considerar a ação isolada das ondas de vento, só seria realista em condições de estufa de maré, tipicamente no entorno das horas de baixamar e preamar, onde as correntes têm suas velocidade se aproximando de um valor nulo para mudar de direção.

Entretanto, a sinergia das ondas com as correntes pode resultar em uma elevada capacidade de transporte de sedimentos. Nesta ação conjunta, as ondas exercem tensões de atrito que mobilizam os sedimentos ressuspensando-os, sendo então facilmente transportados pelas correntes praticamente em qualquer situação de maré. Portanto, a ação conjunta de ondas e correntes é a mais comum na Baía de Sepetiba.

5.5.2. Sobre transporte condicionado no SisBAHIA

O modelo Lagrangeano do SisBAHIA[®] permite a simulação de transporte condicionado. O usuário pode selecionar o modo de condicionar o transporte através dos seguintes parâmetros hidrodinâmicos:

- Tensão de atrito no fundo causada por ondas e correntes.
- Tensão de atrito no fundo causada apenas por correntes.
- Velocidade da corrente.

Dado um valor condicionante V_c com uma tolerância de $t\%$ e considerando que, em um dado local e em um dado instante, o parâmetro hidrodinâmico condicionado tem valor V , o transporte ocorrerá ou não nas seguintes condições:

$$\left| \frac{V}{V_c} \right| \geq 1 + t_{\%} \quad \rightarrow \text{ocorre transporte.}$$

$$\left| \frac{V}{V_c} \right| < 1 - t_{\%} \quad \rightarrow \text{não ocorre transporte.}$$

$$1 - t_{\%} \leq \left| \frac{V}{V_c} \right| < 1 + t_{\%} \quad \rightarrow \text{transporte probabilístico.}$$

No caso de transporte probabilístico, o modelo gera um número aleatório entre 0 e 1, A_0^1 , e decide sobre a ocorrência ou não de transporte pelo seguinte critério:

$$\left| \frac{V}{V_c} \right| - 1 + t_{\%} \geq 2t_{\%} \times A_0^1 \quad \rightarrow \text{ocorre transporte.}$$

Note que se $V = V_c$ a probabilidade de ocorrer transporte é de 50%. O SisBAHIA[®] admite valores da tolerância $t_{\%}$ entre 0 e 50%, sendo usual valores na faixa de 20%. No caso do transporte de sedimentos, mecanismos de deposição e ressuspensão não são considerados diretamente. Entretanto, ao menos em parte, os efeitos de deposição e ressuspensão são indiretamente representados na fase de transporte probabilístico.

Os valores V , do parâmetro hidrodinâmico condicionado, variam no tempo e no espaço, sendo calculados em cada passo de tempo na posição de cada partícula.

A tensão no fundo relativa às ondas é obtida através do modelo de geração de ondas que faz parte do SisBAHIA[®]. A geração de ondas é feita com o mesmo campo de ventos usado no modelo hidrodinâmico, de modo que se tenha um perfeito sincronismo entre as correntes geradas por marés e ventos e as ondas de vento geradas no interior da BTS.

No caso em questão, os valores condicionantes, V_c , para simular a deriva condicionada de sedimentos foram as tensões críticas no fundo, que serão definidas nos cenários a seguir. O parâmetro hidrodinâmico condicionado foi a tensão no fundo gerada conjuntamente por ondas e correntes.

5.6. Cenários de simulação

Para simulação do transporte de sedimentos na baía, foram definidos os seguintes cenários:

- CSF
- CSF vs
- BF
- BF vs
- 7R

5.6.1. Cenários CSF e CSF vs

A sigla CSF indica o caso do cenário CSF – Canal de São Francisco – simulado sem a imposição de um valor de velocidade de sedimentação. Com os resultados obtidos para este caso, objetiva-se apenas mostrar a tendência de movimento dos sedimentos oriundos do canal de São Francisco caso as mesmas, hipoteticamente, nunca sedimentassem.

Para contornar o problema de excesso de partículas acumuladas no modelo, o que dificultaria a visualização dos resultados, adotou-se um artifício de considerar um valor de $t_{90}=15$ dias funcionando apenas como um fator redutor de massa, diminuindo assim o número de partículas no modelo. Com isso, após 45 dias de simulação, as primeiras partículas lançadas no modelo já desapareceram do domínio.

Já a sigla CSF vs indica o caso em que foram considerados os valores de velocidade de sedimentação que serão apresentados a seguir.

Em ambos os cenários CSF, considerou-se apenas o canal de São Francisco como fonte de sedimentos, já que é o corpo fluvial que despeja maior carga sólida na baía, com valor total estimado em 862.000 t/ano, cerca de 6 vezes superior à soma das descargas dos seis principais rios da bacia. Para simular uma descarga contínua de sedimentos, foram criadas fontes localizadas na foz do canal com valores de descarga variando de acordo com o horário do lançamento. Essa divisão foi baseada na curva do hidrograma do rio, apresentada na Figura 23.

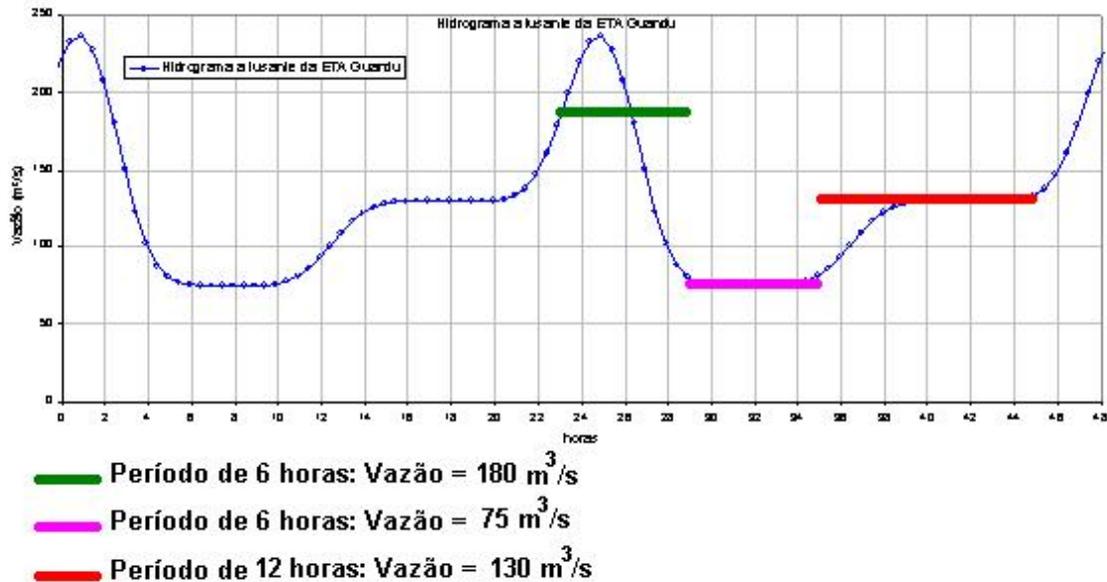


Figura 23 – Divisão do hidrograma do canal de São Francisco em 3 períodos de vazões constantes.

Por aproximação, dividiu-se o hidrograma no tempo em 3 partes, sendo atribuídas a cada período um valor constante de vazão. Para este valor, foi calculada a concentração efluente da fonte, considerando que a descarga sólida total diária é de 2361t. A relação utilizada para este cálculo é:

$$C_e = \frac{Q_s}{Q_f}$$

onde, C_e = concentração efluente, Q_s = vazão sólida e Q_f = vazão fluvial.

Além disso, cada um destes valores encontrados para cada período do dia foi dividido ainda em outras três fontes, de modo a diferenciar o sedimento em argila, silte e areia. Essa divisão foi feita considerando a porcentagem de cada sedimento presente na região de desembocadura do canal, conforme dados coletados pela FEEMA e apresentados no capítulo 1, Figura 12.

Assim, tomando um ponto próximo à desembocadura do CSF, 15% da concentração efluente calculada para o primeiro período do dia foi considerado como sendo a descarga da fonte 1, que corresponde à parcela de areia da descarga do primeiro período. Outros 35% da concentração efluente foi considerado descarga da fonte 2, que corresponde à parcela de silte da descarga do mesmo período, e os 50% restante representam conseqüentemente a descarga de argila.

Assim, para cada dia há 9 fontes ativas, sendo a descarga total das nove igual a descarga sólida diária do canal de São Francisco.

Para diferenciar cada sedimento foram adotados valores distintos de tensão crítica para mobilidade do grão: para areia (fonte 1), foi adotado $\tau = 0,22$; para silte (fonte 2), $\tau = 0,16$; e para argila (fonte 3), $\tau = 0,12$. Tais valores foram escolhidos de acordo com o diagrama de Shields, cujos valores de tensão crítica são apresentados na Tabela 8, utilizando o seguinte critério: para tolerância igual a 20%, significa que o modelo decidirá probabilisticamente se ocorrerá transporte dentro de uma faixa de valores calculada para esta tolerância. Para os valores de τ adotados, esta faixa varia de acordo com a Tabela 9, conforme explicado anteriormente no item sobre transporte condicionado no SisBAHIA®.

Tabela 9 - Tensões críticas adotadas e faixa de transporte probabilístico para tolerância igual a 20%.

Sedimento	τ	tolerância	faixa transp. probabilístico		
areia	0.22	0.2	0.176	a	0.264
silte	0.16	0.2	0.128	a	0.192
argila	0.12	0.2	0.096	a	0.144

Para o caso da areia, a faixa de valores obtida abrange sedimentos que, de acordo com a distribuição de Shields, variam de uma areia fina a uma areia média.

Vale ressaltar que para sedimentos finos, o diagrama de Shields não é válido, porém existem formulações que permitem uma aproximação para estes valores, como a recomendada pelo Coastal Engineering Manual.

Além disso, foram considerados também valores distintos de velocidade de sedimentação para cada tipo de grão, sendo 10^{-3} m/s para areia, 10^{-4} m/s para silte e 10^{-5} m/s para argila.

Assim, as fontes 1, 2 e 3 começam a lançar sedimentos em $t=14400s$ (primeiro instante em que há resultado do modelo de geração de ondas) e são interrompidas em $t=36000s$, instante em que imediatamente inicia-se o lançamento das fontes 4, 5 e 6. Essas últimas são, por sua vez, interrompidas em $t=57600s$, instante em que se inicia o lançamento das fontes 7, 8 e 9. Ao término do lançamento destas, encerra-se o

primeiro dia de simulação, iniciando-se o segundo dia com as fontes 10, 11 e 12, iniciando novamente o ciclo diário de lançamento de mais 9 fontes.

Este raciocínio foi utilizado para elaborar um planilha dados de entrada para o SisBAHIA de modo a simular o transporte de sedimentos provenientes do canal durante 90 dias ininterruptos. O modelo onde foram inseridos tais dados rodou acoplado ao modelo hidrodinâmico, também rodado para 90 dias, e acoplado também aos resultados do modelo de geração de ondas, onde foram utilizados 90 dias de dados de vento. Este último permite ao modelo de transporte simular o efeito de tensão no fundo, sendo então transporte gerado por onda e corrente.

5.6.2. Cenários BF e BF vs

Tanto o cenário BF como o cenário BF vs simulam a tendência de deriva de sedimentos depositados na região do Bota-Fora das recentes obras de dragagem canal de acesso do Porto de Sepetiba. Em ambos os cenários, ao invés de criar fontes, a região foi marcada para que se pudesse avaliar o destino dos sedimentos que possivelmente fossem transportados pelas águas da baía. Na verdade, a mesma região foi marcada três vezes para que se tivesse a mesma dividida em três tipos de sedimentos diferentes, areia, silte e argila.

O que diferencia cada região é apenas a tensão crítica para mobilidade do grão, que recebeu mesmos valores calculados para o Cenário SF: 0,22 para areia, 0,16 para silte e 0,12 para argila. No caso BF não foram inseridos valores de velocidade de sedimentação para que se pudesse avaliar a tendência do movimento de cada tipo de sedimento ao longo do tempo, e a hipótese de que estes sedimentos não se depositam retrata o pior caso que pode ocorrer, ou seja, todas as partículas do bota-fora mobilizadas para a coluna d'água poderiam atingir as regiões para onde a hidrodinâmica local tende a transportá-las. Já o caso BF vs difere do primeiro apenas no que se refere a velocidade de sedimentação, que neste caso, apresentará os mesmos valores adotados nos cenários CSF, diferenciados por sedimento: 10^{-3} m/s para areia, 10^{-4} m/s para silte e 10^{-5} m/s para argila.

5.6.3. Cenário 7R

Aqui foram considerados conjuntamente as descargas sólidas dos 7 principais rios contribuintes à baía, inseridos como fontes no modelo. À título de comparação, foram,

então, uniformizados os valores de tensão e velocidade de sedimentação adotados para os 7 rios.

Assim, utilizou-se tensão de atrito crítica para mobilidade $\tau = 0,15\text{N/m}^2$, e velocidade de sedimentação $w = 10^{-5}\text{m/s}$, sendo a concentração efluente de cada um dos 7 rios (inclusive o canal de São Francisco) constante e calculada para valores constantes de vazão sólida e vazão fluvial, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Concentração efluente de cada fonte no cenário 7R [1].

Fontes	Corpos fluviais	Qf (m ³ /s)	Qs (kg/seg)	Ce (qq/m ³)
1	Rio Mazomba	0,5	0.12684	0.25368
2	Rio Cação	0,5	0.12684	0.25368
3	Rio da Guarda	19,1	2.31481	0.12119
4	Canal de São Francisco	187	27.33384	0.14617
5	Canal do Guandu	8,8	0.98300	0.11170
6	Canal do Itá	3,2	0.25368	0.07927
7	Rio Piraquê	4,9	0.38052	0.07766

6. Resultados Obtidos e Análise

Apresentam-se nesta seção os resultados obtidos com a modelagem computacional objetivando observar a deriva de sedimentos devido ao efeito de ondas e correntes, bem como a tendência de deposição dos mesmos na Baía de Sepetiba.

Os resultados obtidos permitem:

- Indicar os padrões de correntes residuais Eulerianas, em diferentes situações de marés;
- Indicar a distribuição de tensões no fundo exercidas pelos escoamentos em diferentes situações de marés;
- Indicar a distribuição de alturas de ondas geradas por ventos no interior da baía e as respectivas distribuições de tensões oscilatórias exercida por tais ondas no fundo;
- Indicar as áreas na processos de sedimentação a partir do valores de tensões críticas para mobilidade adotados nos cenários: regiões com forte mobilidade tendem a erodir; sem mobilidade, tendem a assorear.

6.1. Sobre a Circulação Hidrodinâmica

A circulação de águas na baía é regida predominantemente pelo fluxo e refluxo de maré, com um regime semi-diurno. Como na maioria das baías e estuários, a onda de maré na Baía de Sepetiba é do tipo estacionária, que não depende tanto da profundidade, mas sim da amplitude e de outros fatores físicos como ventos, morfologia de fundo e configuração de canais. São fatores determinantes do padrão de circulação existente na Baía de Sepetiba: a amplitude de maré, as morfologias costeira e de fundo, o regime dos ventos e o aporte de água doce proveniente da bacia hidrográfica.

As características morfológicas influenciam, tanto na direção, quanto na intensidade das correntes. Entre as ilhas de Itacuruçá, Jaguanum e a Ponta da Pombeba (extremidade mais ao Norte da Restinga da Marambaia), formam-se duas passagens principais das correntes geradas pelo fluxo de maré. O estreitamento de sua largura nas proximidades da ilha Guaíba provoca uma diminuição na área de passagem das águas, o que promove um aumento de velocidade nas correntes, até a área próxima à ilha de Jaguanum, havendo, a partir desse ponto, uma gradual diminuição das correntes, que se tornam fracas em direção ao fundo da Baía.

Apesar de possuir profundidades em torno de 20 metros, a Baía possui cerca de 40% de sua área com profundidades menores que 5 metros. Pelo fato da topografia de fundo possuir um canal natural de maior profundidade em sua parte central, o escoamento é todo induzido para esta área, gerando correntes mais intensas. Na parte mais interna da Baía, onde as profundidades são menores, há uma perda progressiva de carga na circulação, acarretando uma mistura das águas oceânicas e internas.

6.2. Circulação Residual Euleriana

As correntes residuais Eulerianas são aproximações usuais das efetivas correntes de deriva, entretanto são importantes porque são as que se pode calcular através de medições em pontos de medição fixos.

Nas figuras que seguem são mostradas as correntes residuais Eulerianas médias na vertical, já que a deriva de substâncias bem dissolvidas ou em suspensão na coluna de água, como sedimentos finos, pode ser aproximada pelo padrão de correntes residuais médias na vertical.

São apresentados mapas de correntes residuais em marés de quadratura e de sizígia. Todas as correntes residuais foram computadas ao longo de 25 horas. Portanto representam situações típicas ao longo de um dia para ventos e marés.

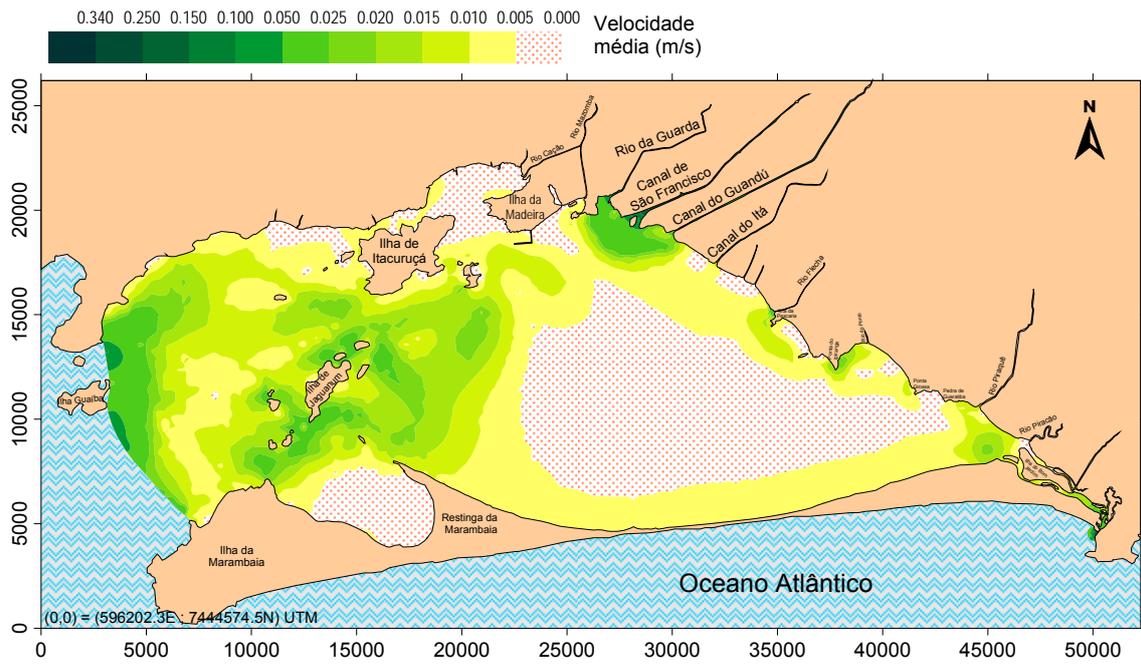


Figura 24 - Velocidade residual Euleriana em maré de sizígia.

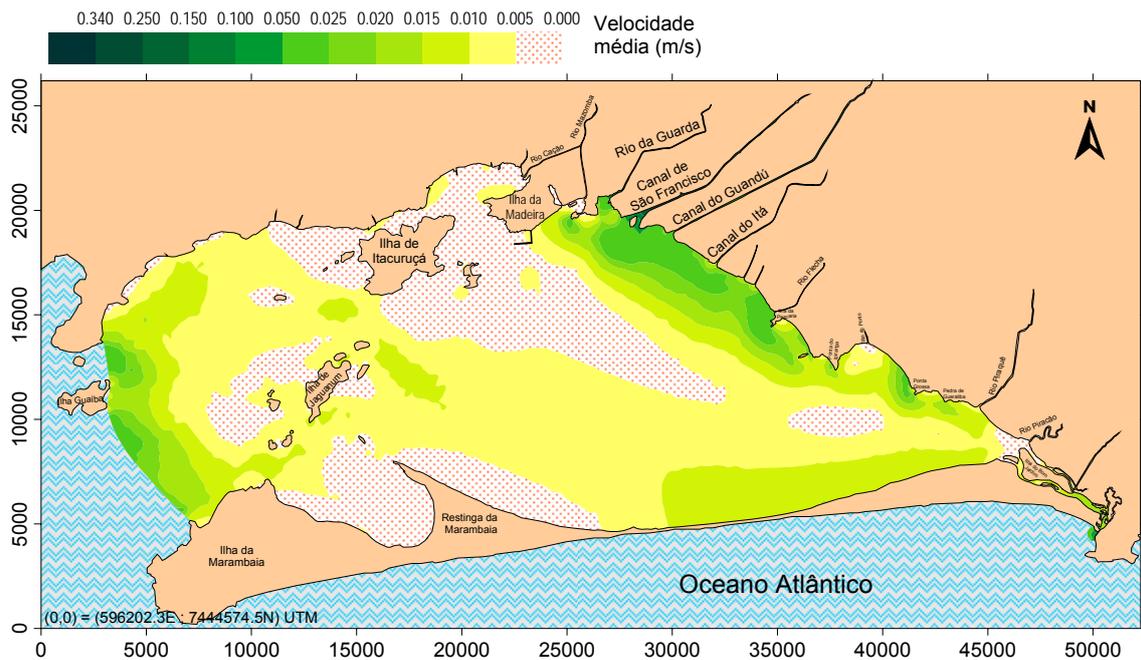


Figura 25 - Velocidade residual Euleriana em maré de quadratura.

Na Figura 24 e na Figura 25, o valor máximo da escala apresentada é observado apenas no trecho final do Canal de São Francisco.

6.3. Mapas de tensões no fundo e mobilidade de sedimentos devido às correntes de maré

As quatro figuras a seguir mostram a distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré enchente e vazante, de sizígia e quadratura.

As áreas pontilhadas dos mapas correspondem aos locais onde a tensão no fundo é nula para cada situação apresentada. É o caso de quase todo o litoral assoreado da baía, tanto na maré de sizígia como de quadratura. Nota-se, assim, que as correntes não são capazes de mobilizar os sedimentos depositados ali para a coluna d'água.

A pior situação em termos de mobilidade é observada na maré vazante de quadratura. Praticamente em toda a baía não há tensões suficientes para mobilizar os grãos para serem transportados.

Conclui-se que há maior tendência de haver mobilização de sedimentos para transporte na condição de maré enchente de sizígia, principalmente próximo às entradas da baía.

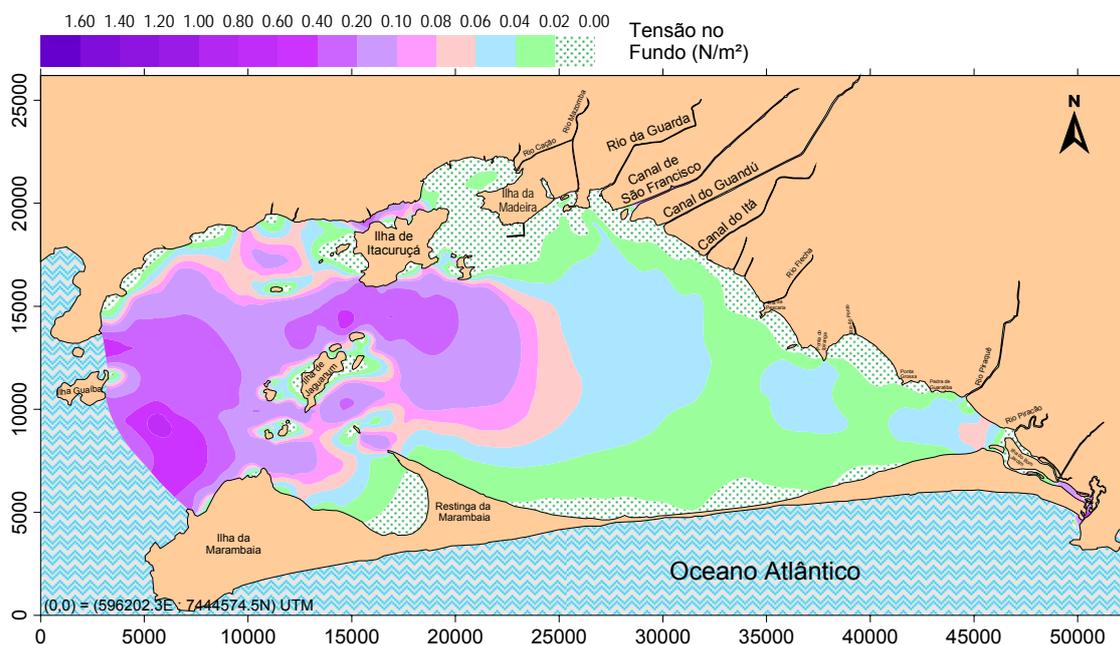


Figura 26 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré enchente de sizígia.

Na Figura 26, o valor máximo observado de 1,4 N/m² próximo ao deságüe de Barra de Guaratiba.

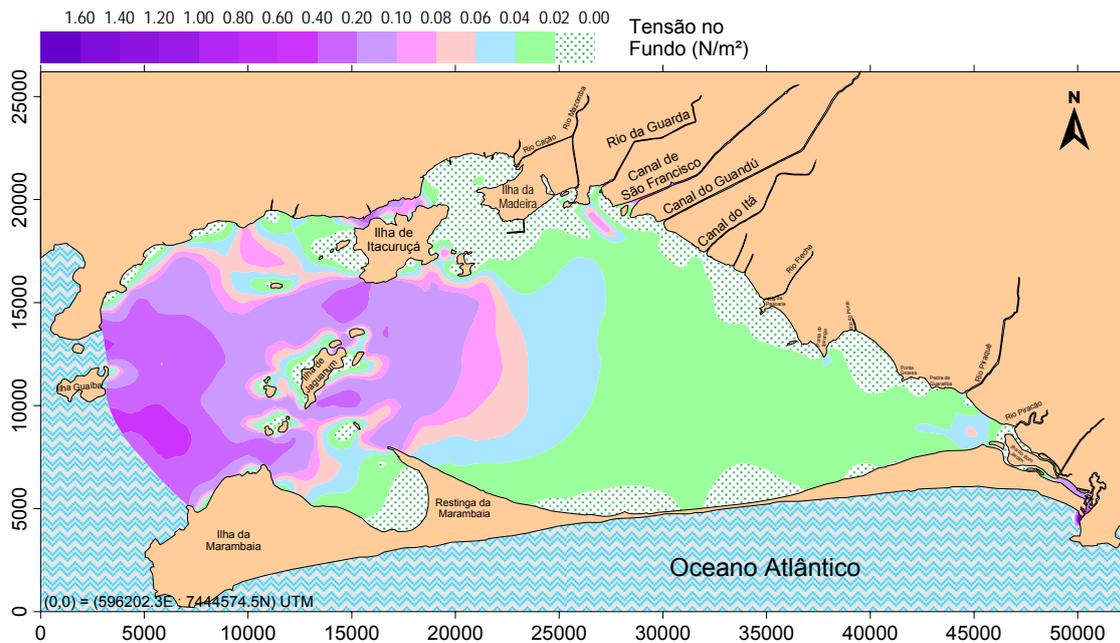


Figura 27 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré vazante de sizígia.

Na Figura 27, o valor máximo observado de $1,6 \text{ N/m}^2$ próximo ao deságüe de Barra de Guaratiba.

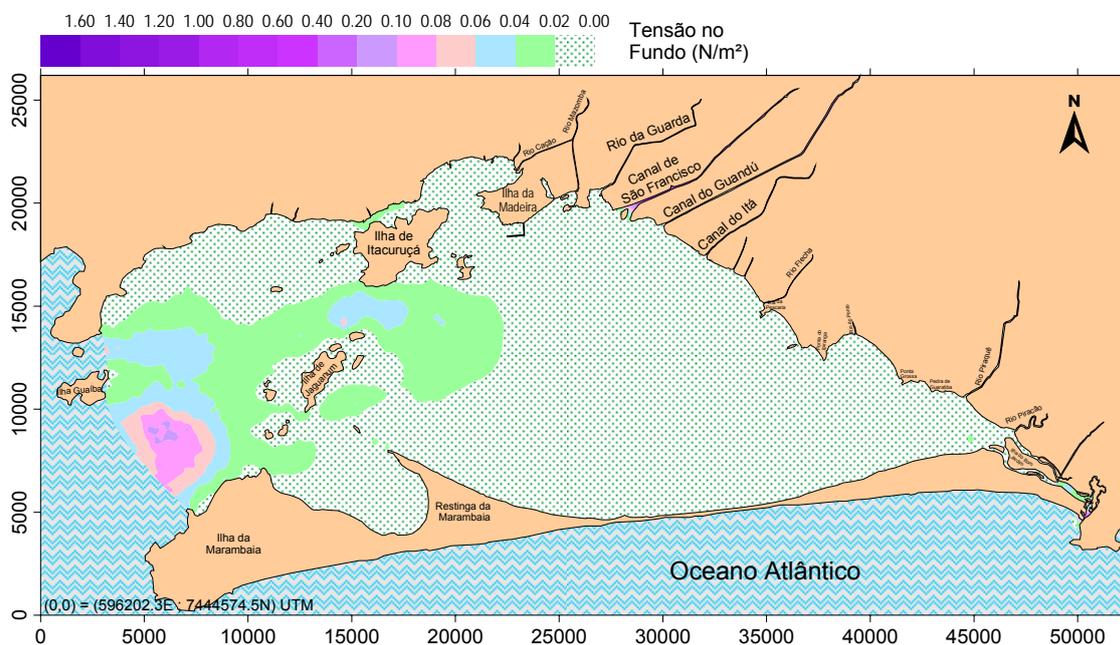


Figura 28 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré enchente de quadratura.

Na Figura 28, o valor máximo observado de $0,4 \text{ N/m}^2$ próximo à foz do Canal de São Francisco.

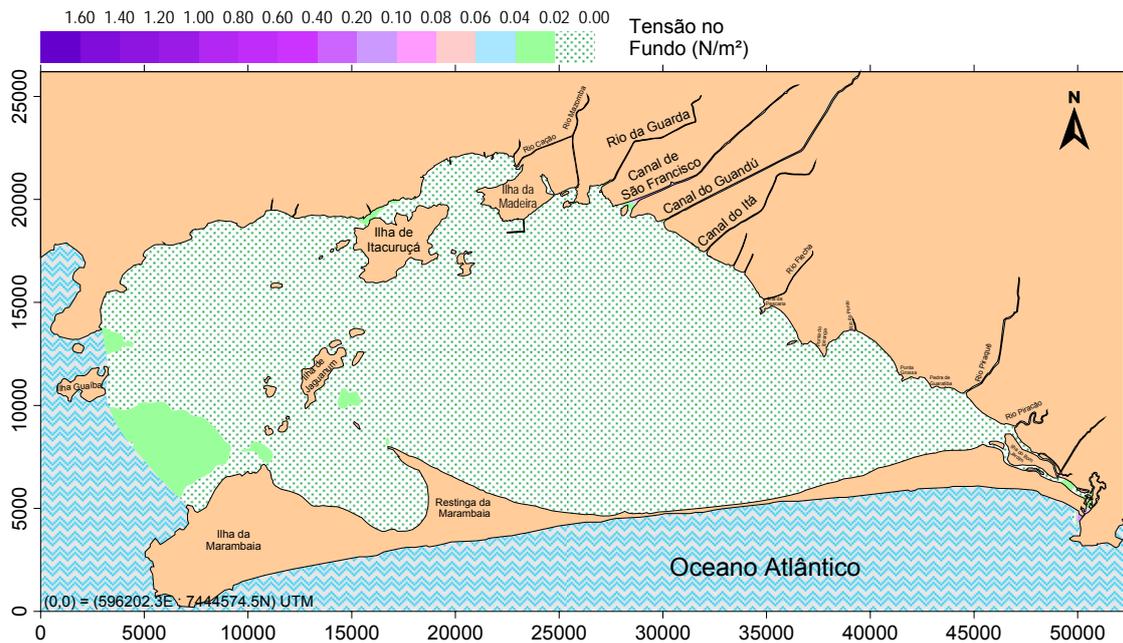


Figura 29 - Distribuição da tensão média no fundo causada por corrente de maré vazante de quadratura.

Na Figura 29, o valor máximo observado de $0,6 \text{ N/m}^2$ próximo à foz do Canal de São Francisco.

O modelo hidrodinâmico fornece os valores de tensão no fundo da baía a cada instante em que são gerados resultados, em cada nó da malha. Com estes valores, que, no caso deste estudo, foram gerados a cada hora, pode-se traçar um mapa com isolinhas de probabilidade de se ter valores de tensão no fundo maiores que um determinado valor.

Assim, obteve-se o mapa a seguir, que mostra probabilidade da tensão no fundo ser maior que $0,15 \text{ N/m}^2$, valor utilizado como tensão crítica para mobilidade de grãos finos no cenário 7R e representa também um valor médio de referência para a mobilidade dos demais cenários, que têm sedimentos diferenciados.

A Figura 29 mostra a probabilidade de ocorrência de tensão no fundo superior a $0,15 \text{ N/m}^2$, e os valores indicados na escala à direita da figura indicam a porcentagem do tempo de simulação em a tensão no fundo alcançou valores maiores que $0,15 \text{ N/m}^2$ nas regiões pintadas no mapa com a cor correspondente àquela porcentagem na escala.

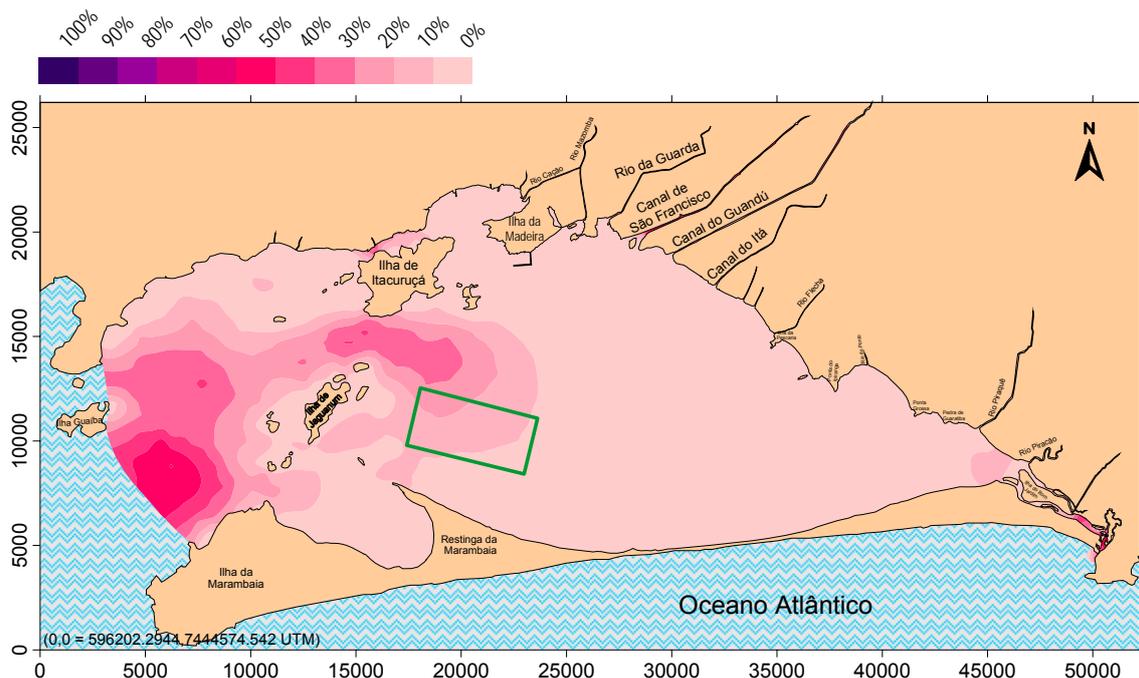


Figura 30 - Mapa de isolinhas de probabilidade de transporte condicionado por corrente, de sedimentos com tensão crítica para mobilidade superior a $0,15 \text{ N/m}^2$. Em verde, destaca-se a região do bota-fora do Porto.

Assim, esse mapa representa a probabilidade de haver transporte de sedimentos, **condicionados apenas pela corrente** (ainda não está sendo considerado o efeito das ondas geradas por ventos), cuja tensão crítica de mobilidade seja superior a esse valor limite adotado.

Verifica-se probabilidades maiores nas entradas de fluxo no corpo d'água, tanto nas fronteiras abertas como à montante dos rios afluentes. Embora não seja possível visualizar as isolinhas nos rios, os valores mais elevados são observados nos nós onde foram inseridas suas vazões afluentes, chegando à probabilidade 98,78% no canal de São Francisco.

Observa-se também que, nas regiões assoreadas, como era de se esperar, a tendência de transporte condicionado apenas por correntes é muito pequena ou praticamente nula. Os únicos pontos onde se observa probabilidade de transporte significativo são as fozes dos rios, onde as velocidades da água são maiores. No canal de acesso ao Porto verifica-se também uma maior chance de transporte de sedimentos, o que se deve às velocidades mais altas que ocorrem nestes locais onde o escoamento é confinado entre ilhas e as profundidades são maiores.

Já na região do bota-fora do material dragado do Porto (marcada em verde), a probabilidade é maior na parte noroeste, porém não é muito alta, passando pouco dos 30%.

6.4. Ondas de vento na Baía de Sepetiba

Apresenta-se nesta seção mapas com distribuição de alturas de onda, exemplificando os resultados obtidos com o modelo de geração de ondas do SisBAHIA[®], que gera ondas ao longo do tempo a partir dos dados de vento apresentados.

O modelo de geração de ondas do SisBAHIA[®] segue a metodologia de cálculo descrita na referência [15], e calcula a distribuição de alturas de onda e respectivas tensões no fundo variáveis no tempo. Isto é, dado um domínio de modelagem, um registro de vento, conforme apresentado anteriormente, e especificada a duração ou persistência de vento desejada, o modelo calcula a cada intervalo de tempo especificado o clima de ondas no domínio.

Gerou-se ondas para ventos com duração de 4 horas. Isto é, a cada hora foi computado o clima de ondas na baía, considerando o vento médio que soprou nas 4 horas anteriores. Resultados ilustrativos dos climas de onda gerados com o modelo estão nas seqüências de figuras a seguir.

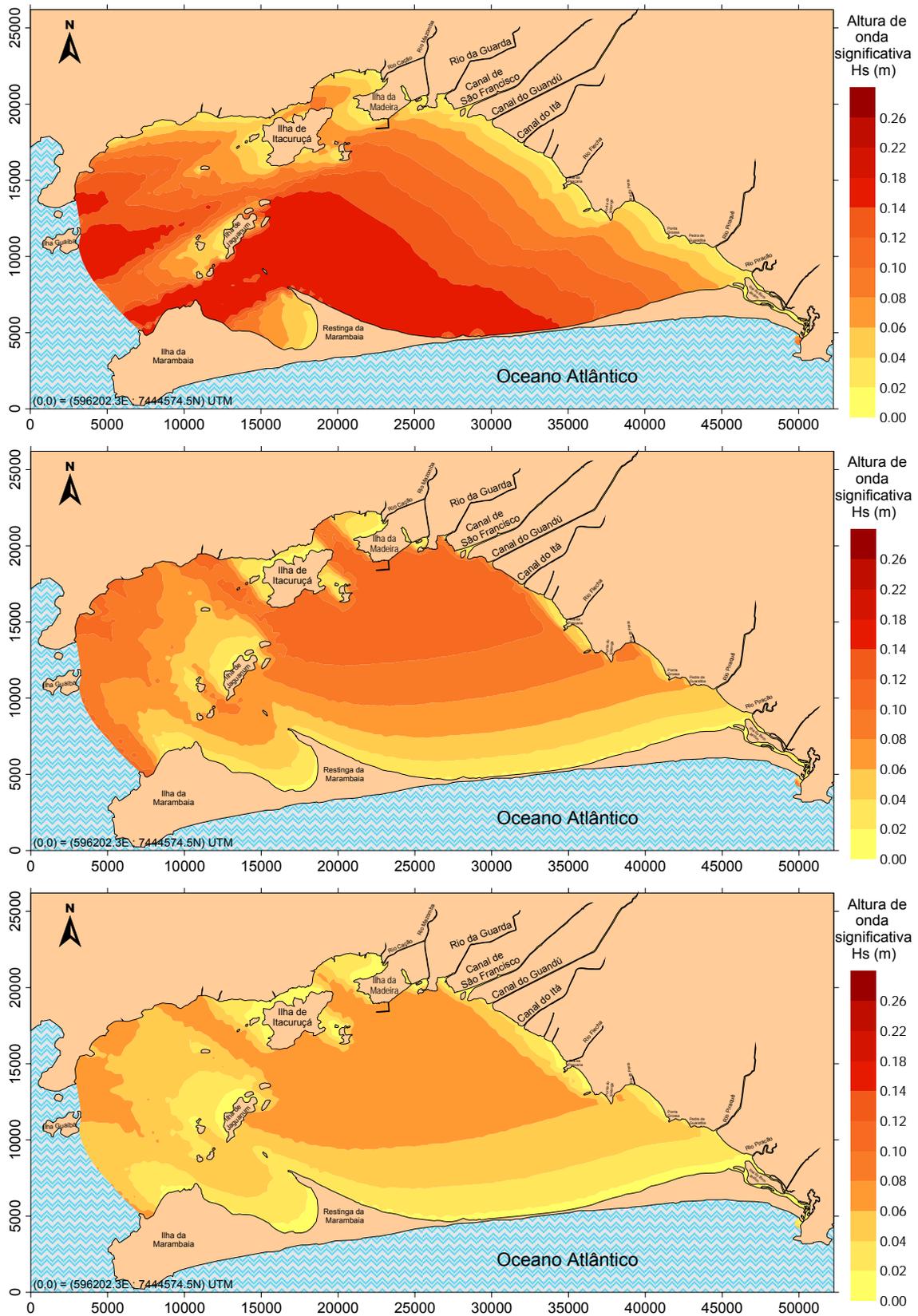


Figura 31 - Exemplo da variação do clima de ondas ao longo de um dia. A seqüência de 3 figuras retrata a variação das 01:00h às 09:00h, a cada 4 horas, no dia 13/Março/07. Os ventos geradores das ondas estão na Figura 17.

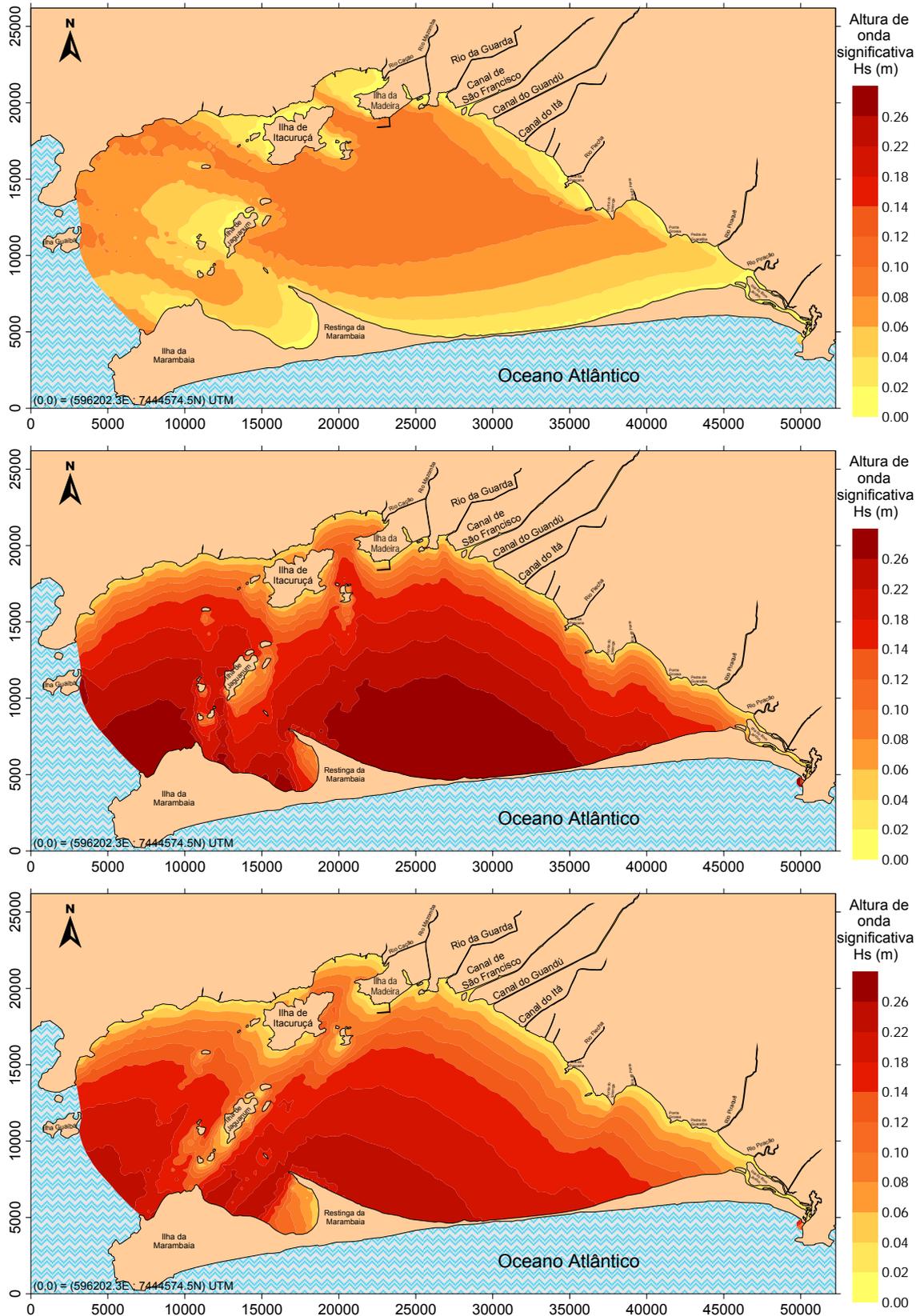


Figura 32 - Exemplo da variação do clima de ondas ao longo de um dia. A seqüência de 6 figuras retrata a variação das 13:00h às 21:00h, a cada 4 horas, no dia 13/Março/07. Os ventos geradores das ondas estão na Figura 17.

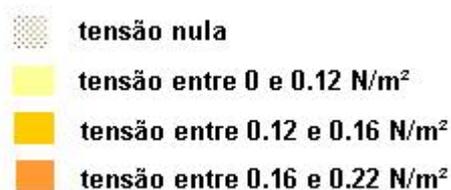
6.6. Mobilidade de sedimentos por ação conjunta de ondas e correntes

Até agora foram analisados separadamente o efeito de ondas de vento e correntes de maré sobre a tensão no fundo da Baía de Sepetiba, tendo resultados bem diversos, no entanto, esperados.

As correntes exercem maior efeito na tensão de fundo nos locais onde há maior circulação hidrodinâmica, o que ocorre nos canais de maior profundidade. Já as ondas têm maior influência nos locais onde há maior altura de onda significativa e onde é mais raso, combinando a maior energia com a maior possibilidade de o movimento oscilatório da onda atingir o fundo.

Conforme visto no item 5.5.1, a sinergia das ondas com as correntes pode resultar em uma elevada capacidade de transporte de sedimentos. Assim, as ondas mobilizam os sedimentos e as correntes os transportam praticamente em qualquer situação de maré.

As quatro figuras abaixo apresentam o efeito conjunto de onda-corrente em situações de meia maré enchente e vazante, de sizígia e de quadratura. Para mais fácil entendimento das mesmas, foi elaborada seguinte legenda:



A área pontilhada apresenta tensões nulas, que, para os cenários simulados, representa situação em que não há sedimento qualquer sendo mobilizado.

A área amarelo claro representa locais onde somente há transporte probabilístico, que depende da tolerância adotada no modelo de transporte (conforme explicado no item 5.5.2). Em termos práticos, é como se raramente houvesse transporte, já que a probabilidade de mobilização do grão é muito pequena.

A área que aparece em amarelo mais forte já tem um significado mais importante: marca as regiões onde há transporte apenas de argila, podendo haver também uma pequena parcela de silte mobilizado em função da faixa de transporte probabilístico (Tabela 9).

Seguindo o mesmo raciocínio, na parte laranja das figuras há mobilização de argila, silte e uma pequena parcela de areia, mobilizada em função da faixa de transporte probabilístico. E assim, toda a região em azul apresenta mobilidade para todo tipo de sedimento considerado nas simulações deste estudo.

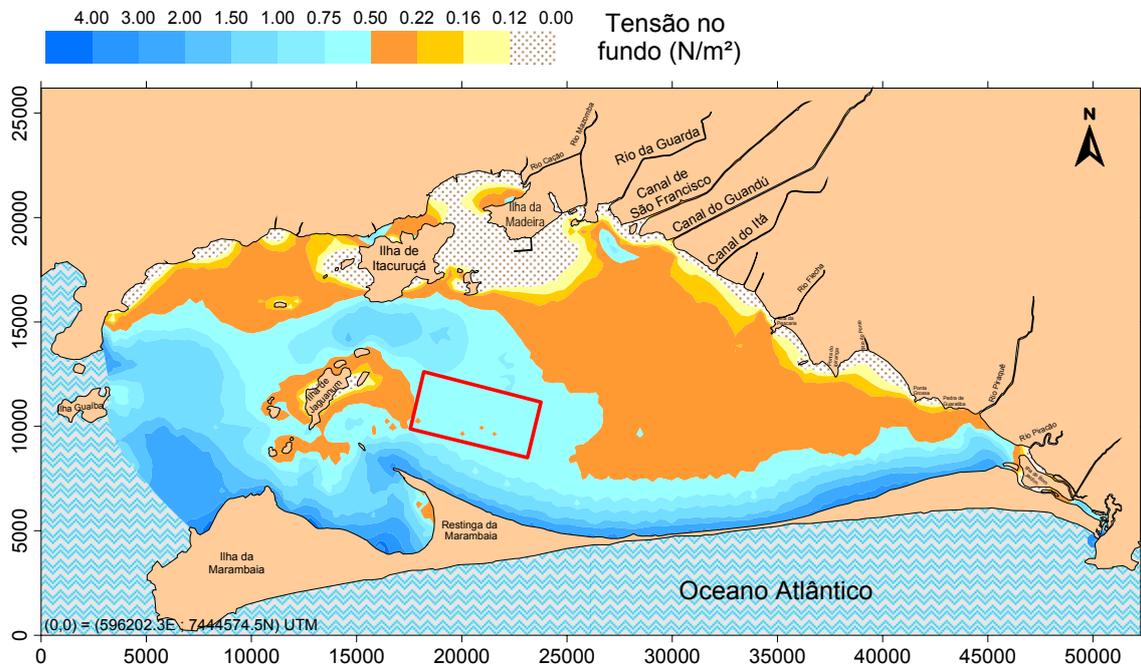


Figura 37 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré enchente de sizígia.

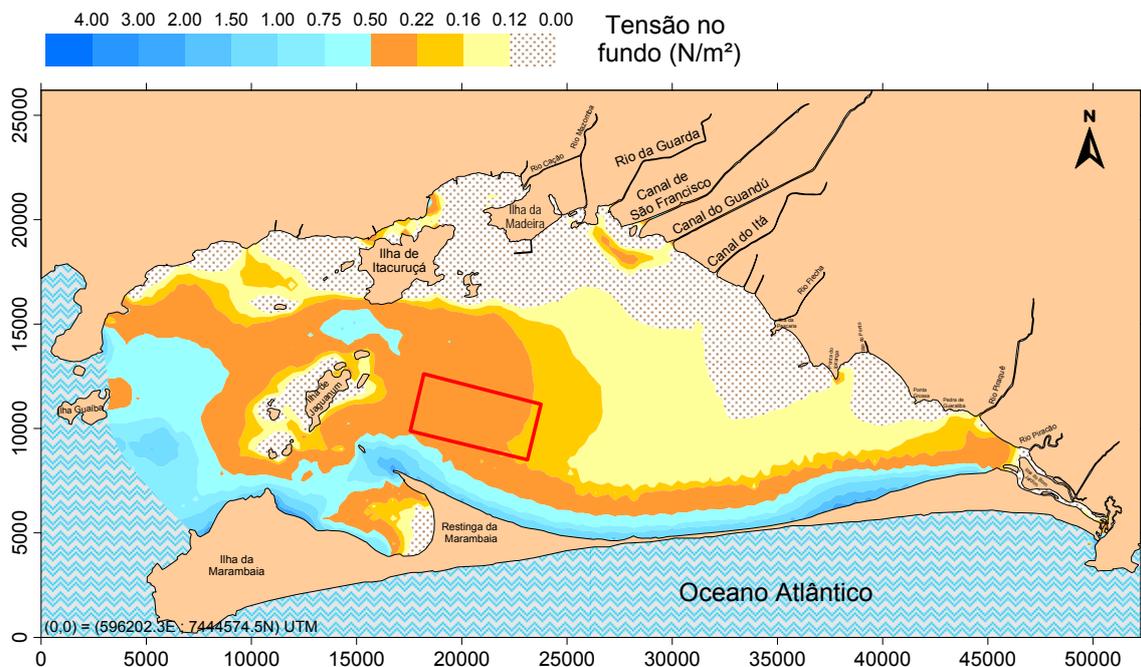


Figura 38 - Distribuição de tensões oscilatórias no fundo causadas por ondas e correntes em situação de meia maré vazante de sizígia.

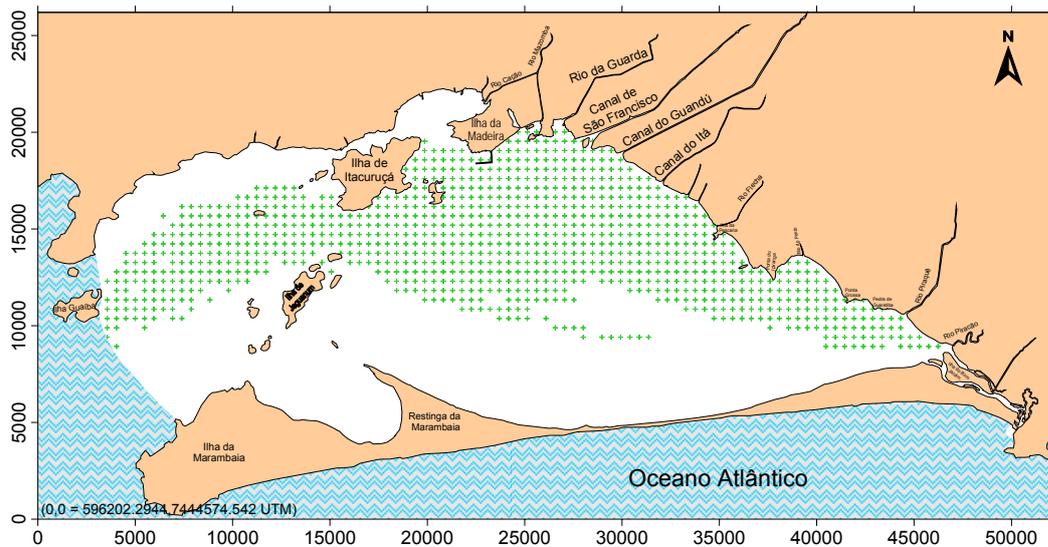


Figura 42 – Zona de sedimentação do cenário CSF vs após 90 dias de simulação.

Observando, ainda, a Figura 43, nota-se uma tendência dos sedimentos lançados na baía pelo canal de São Francisco permanecerem junto à costa na maior parte do tempo.

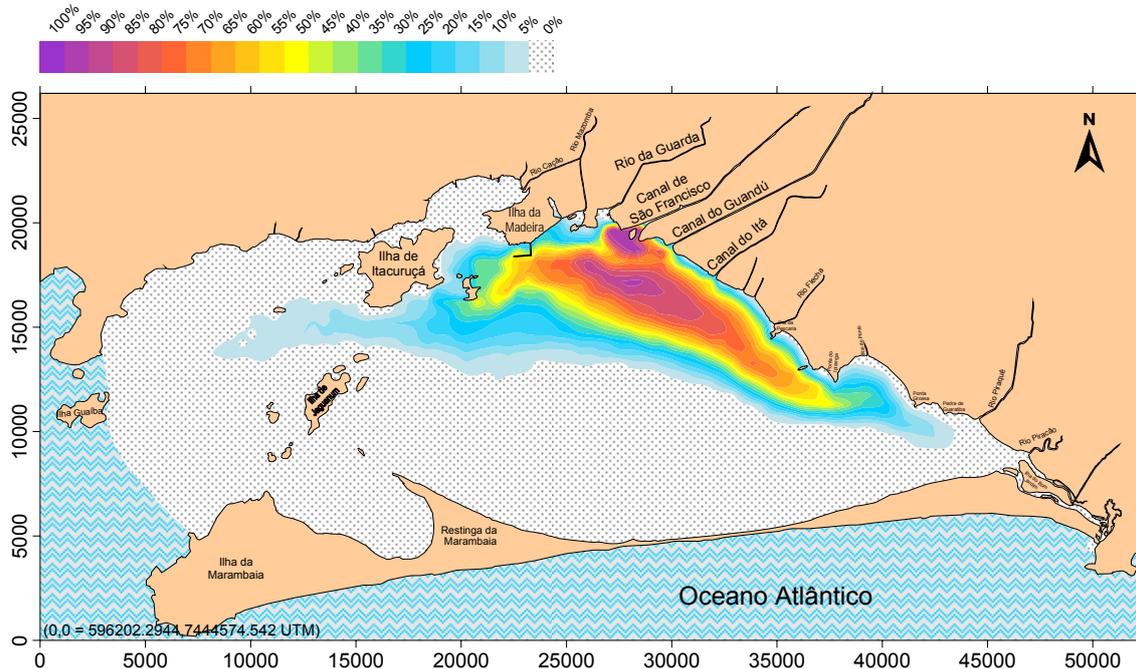


Figura 43 – Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário CSF vs após 90 dias de simulação.

Os resultados do cenário CSF servem como uma verificação de tendência do transporte de sedimentos caso não houvesse sedimentação condicionada pela tensão crítica no fundo na baía. Através destes, pode-se tirar conclusões semelhantes

àquelas obtidas no cenário CSF vs: com 90 dias de simulação há um grande espalhamento de partículas e uma tendência de deslocamento em direção à costa, seguindo seu alinhamento direção sudeste. No detalhe da Figura 44, em azul, aparece a praia de Sepetiba, já atingida pela pluma de sedimentos.

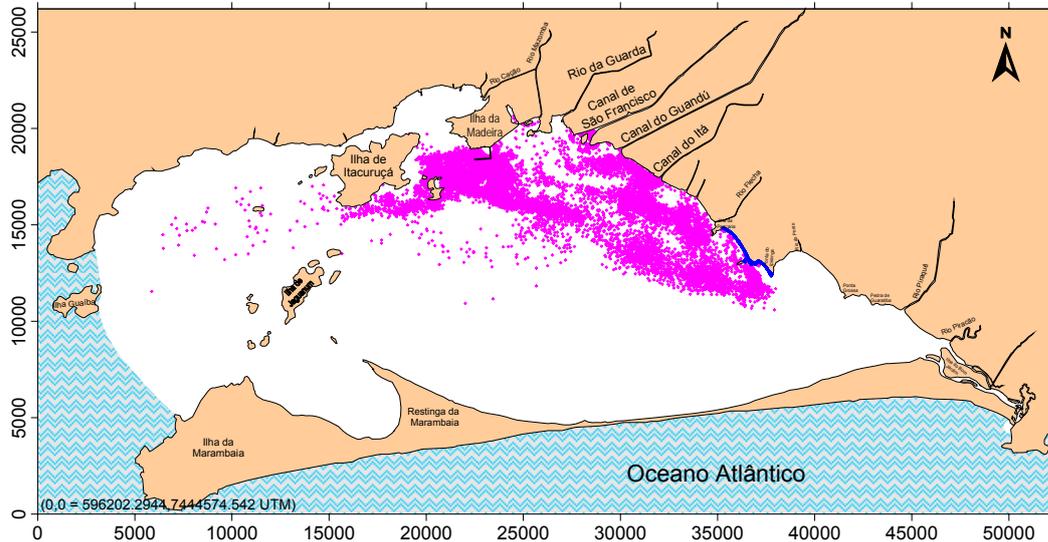


Figura 44 - Partículas remanescentes na água para o cenário CSF após 90 dias de simulação.

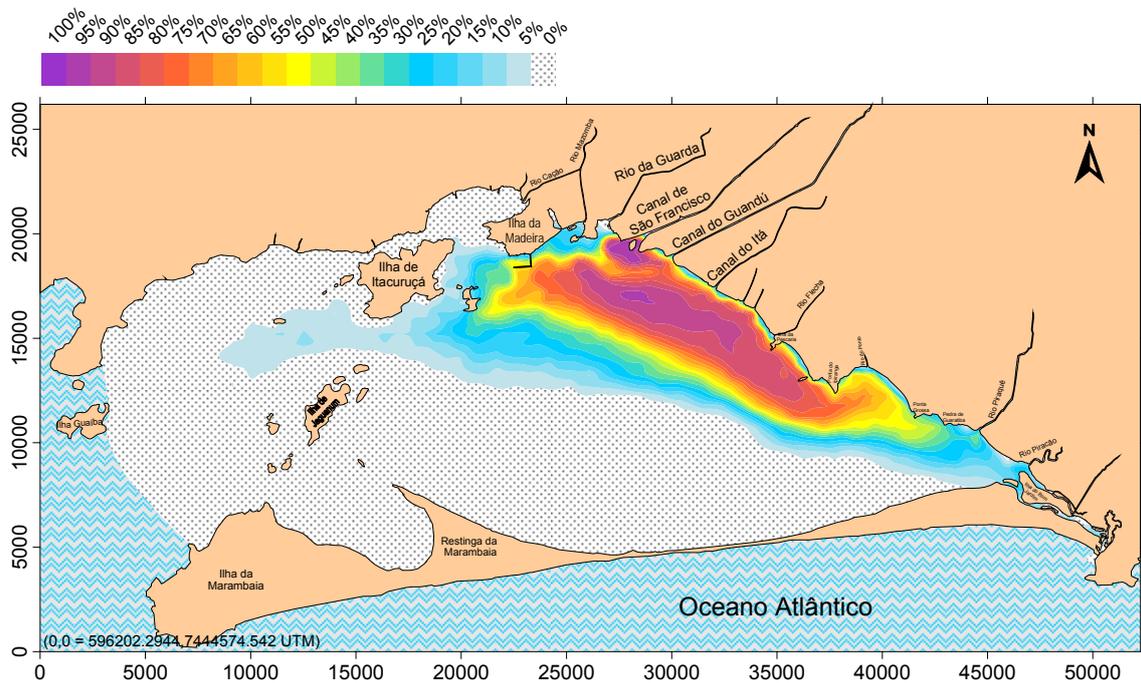


Figura 45 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário CSF após 90 dias de simulação.

Na Figura 45, destaca-se a uma porcentagem de tempo de passagem de partículas maior que no cenário CSF vs, chegando agora a atingir cerca de 50% na praia de

Sepetiba. Este número sugere uma probabilidade alta dos sedimentos e poluentes vindos da bacia passarem pela praia, e caso sejam encontradas condições para a deposição, ocorrerá um aumento de partículas assoreadas na região.

6.7.2. Transporte de sedimentos do bota-fora do Porto – Cenários BF

As figuras a seguir mostram como se dá o transporte condicionado de partículas do bota-fora nas condições simuladas. Para apresentação dos resultados do cenário BF vs, foram plotados na mesma figura partículas na água (vermelhas) e partículas sedimentadas (verdes). As partículas vermelhas representam o sedimento argila, e em todas as figuras apresentadas não aparecem silte e areia na água, pois toda sua massa se encontra depositada, como se observa já na Figura 46, que apresenta resultados de 30 dias de simulação.

Ao contrário do que se observa nos cenários CSF, há uma tendência nítida dos sedimentos serem transportados em direção à restinga, parte sul da baía, e não em direção às praias. Não se observa deposição na região mais próxima do continente, mesmo nos resultados de 90 dias de simulação, e na Figura 49, verifica-se também que em momento alguma da simulação há partículas passando nesta área da baía.

É interessante notar também que, com 90 dias de simulação já não há quase mais partículas na água, e uma grande zona de sedimentação. A continuação deste modelo mostrou que, com 97 dias de simulação, não há mais partículas na água.

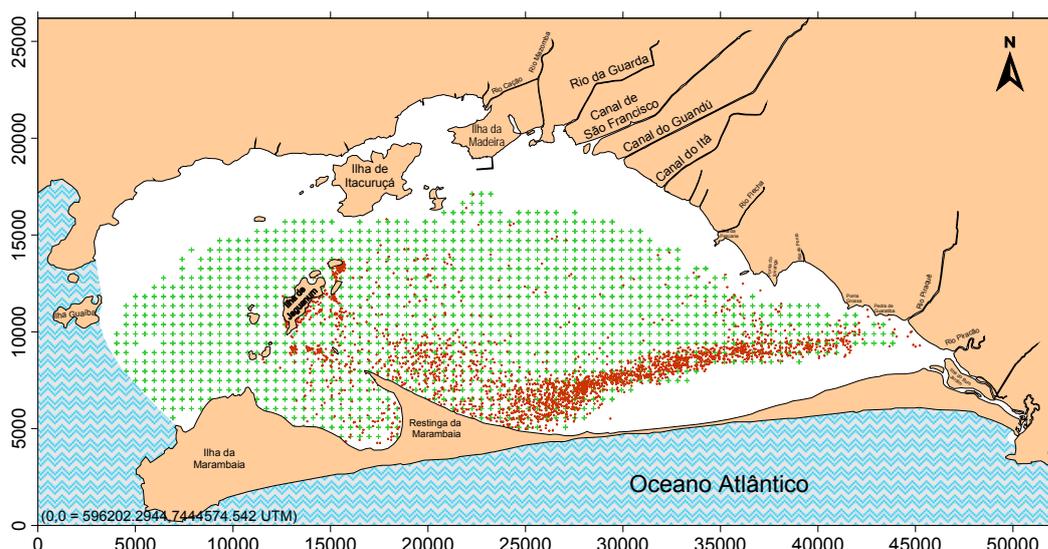


Figura 46 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 30 dias de simulação.

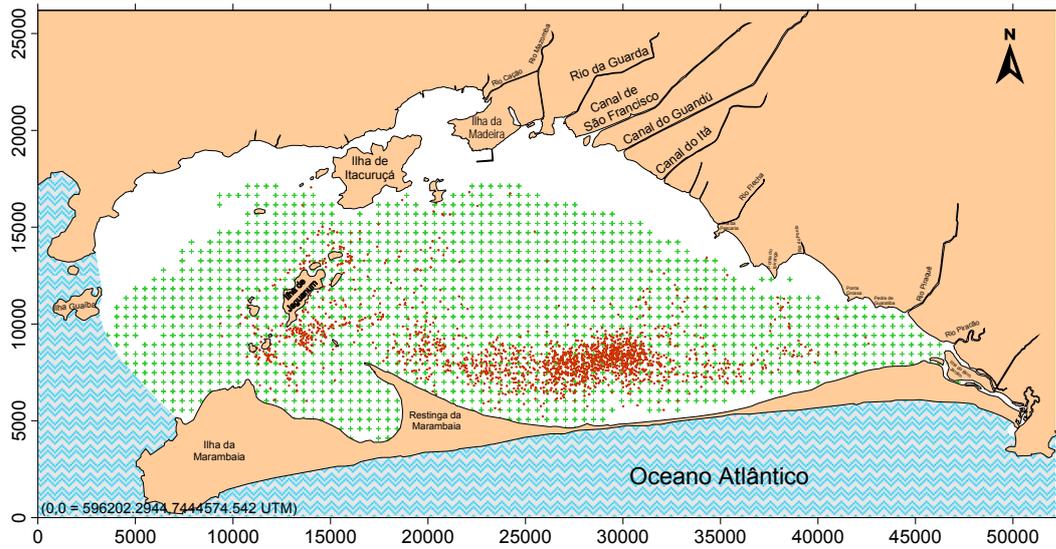


Figura 47 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 60 dias de simulação.

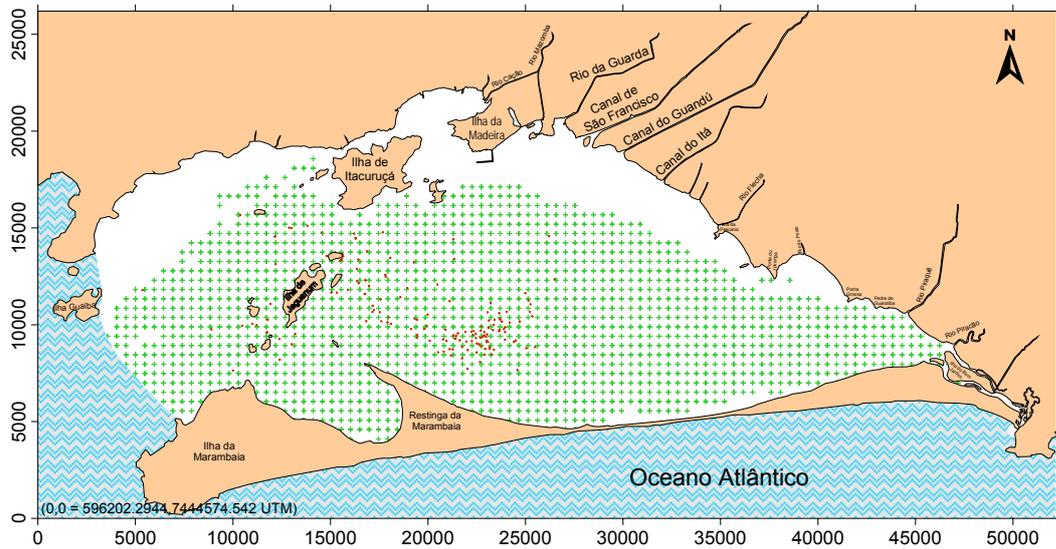


Figura 48 - Partículas remanescentes na água e zona de sedimentação para o cenário BF vs após 90 dias de simulação.

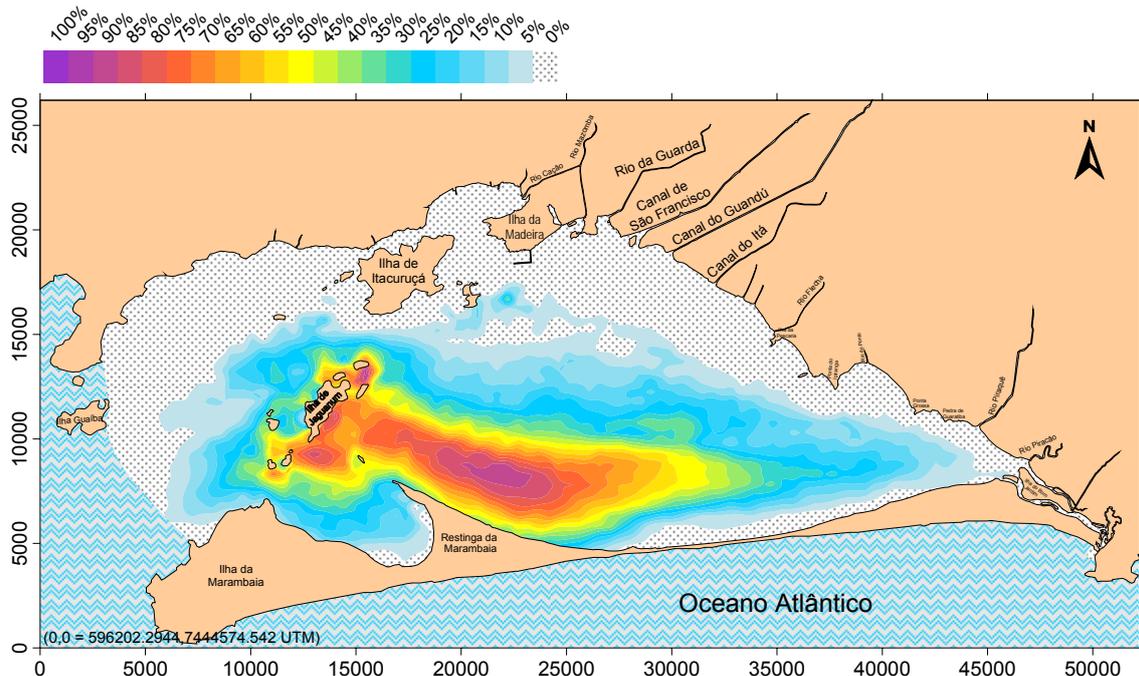


Figura 49 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário BF vs após 90 dias de simulação.

Para os resultados do cenário BF, onde não há sedimentação, vale a seguinte legenda:

Partículas roxas = partículas de areia
Partículas verdes = partículas de silte
Partículas vermelhas = partículas de argila

Neste caso, como não há sedimentação, as partículas circulam livremente de acordo com as condições de transporte fornecidas pelo modelo. Seguindo a seqüência de figuras, observa-se que há uma menor quantidade de partículas, principalmente de argila e silte (verde e vermelho), após 90 dias de simulação. Como não há deposição, isto mostra que há uma tendência natural de estes sedimentos deixarem o corpo hídrico levados pela própria circulação hidrodinâmica local.

Assim como no cenário BF vs, não se observa passagem da nuvem de partículas pelas áreas próxima à costa do continente. Isto mostra que, os sedimentos que se encontram depositados na região do bota-fora projetada, ainda que mobilizados para a coluna d'água, não tendem a se acumular nas praias que se encontram assoreadas. Pela Figura 53, verifica-se que o sedimento do bota-fora tende a permanecer na mesma região.

6.7.3. Transporte simultâneo de sedimentos oriundos dos principais rios da bacia – Cenário 7R

Somando-se a contribuição do canal de São Francisco com os demais rios que apresentam contribuição significativa para a baía, chega-se aos resultados semelhante àquele apresentados para os cenários CSF.

A Figura 54 mostra o início do lançamento das 7 fontes, uma em cada rio, diferenciadas pela cor, e a Figura 55 mostra as partículas na água 90 dias depois.

Na Figura 56, aparecem as isolinhas de porcentagem do tempo em que os sedimentos movimentados passaram ou permaneceram sobre cada região, sobreposta a região onde houve partícula sedimentada, resultados muito parecidos, de fato, com os dos cenários CSF.

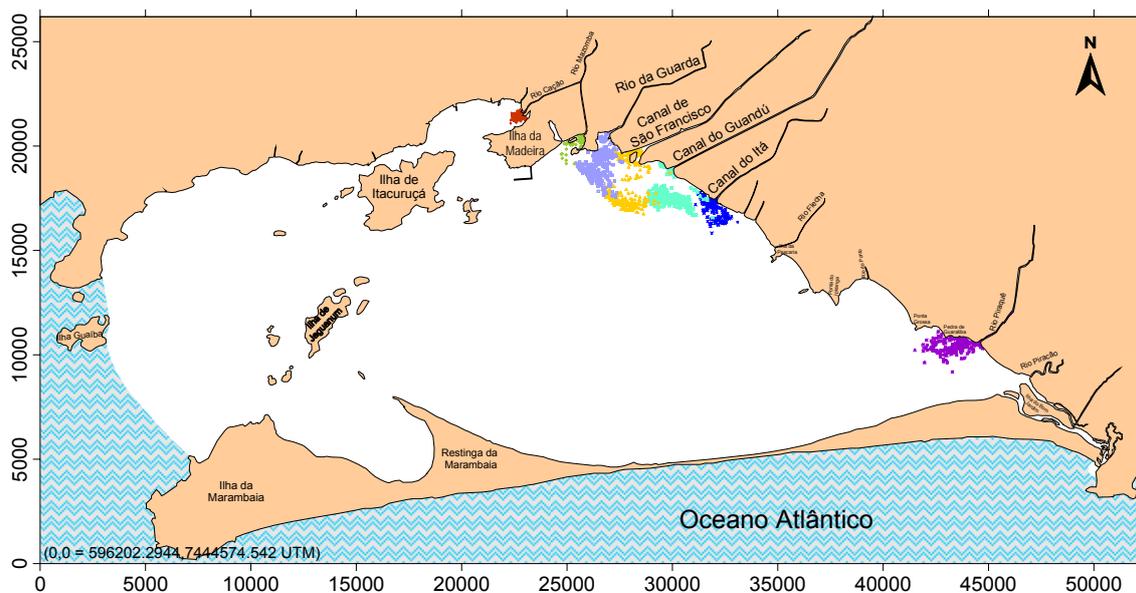


Figura 54 - Partículas na água para o cenário 7R após 64 horas de simulação.

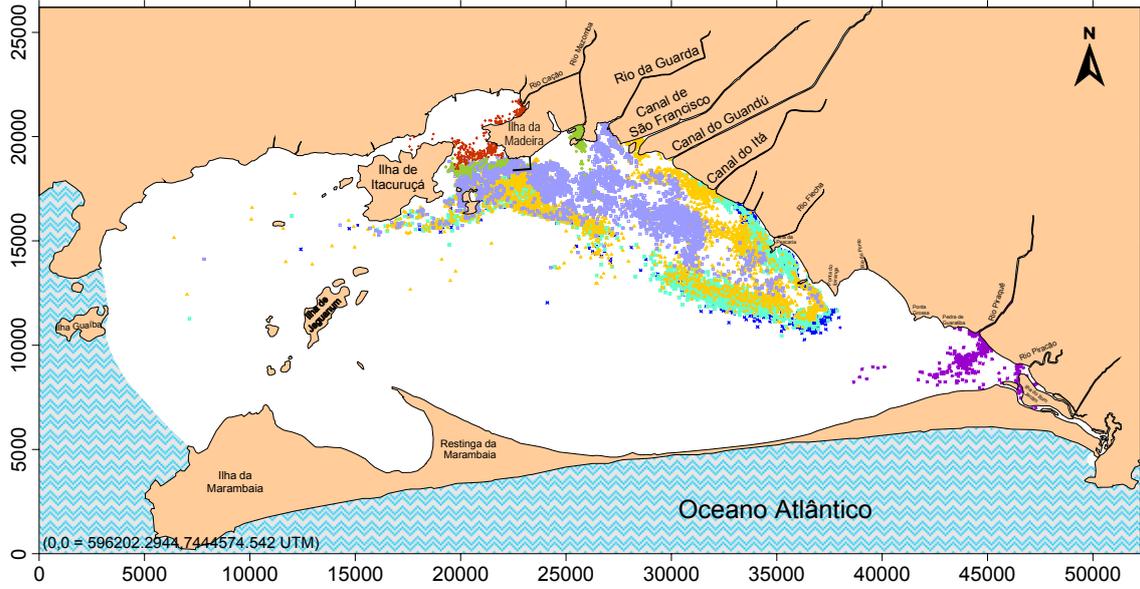


Figura 55 - Partículas na água para o cenário 7R após 90 dias de simulação.

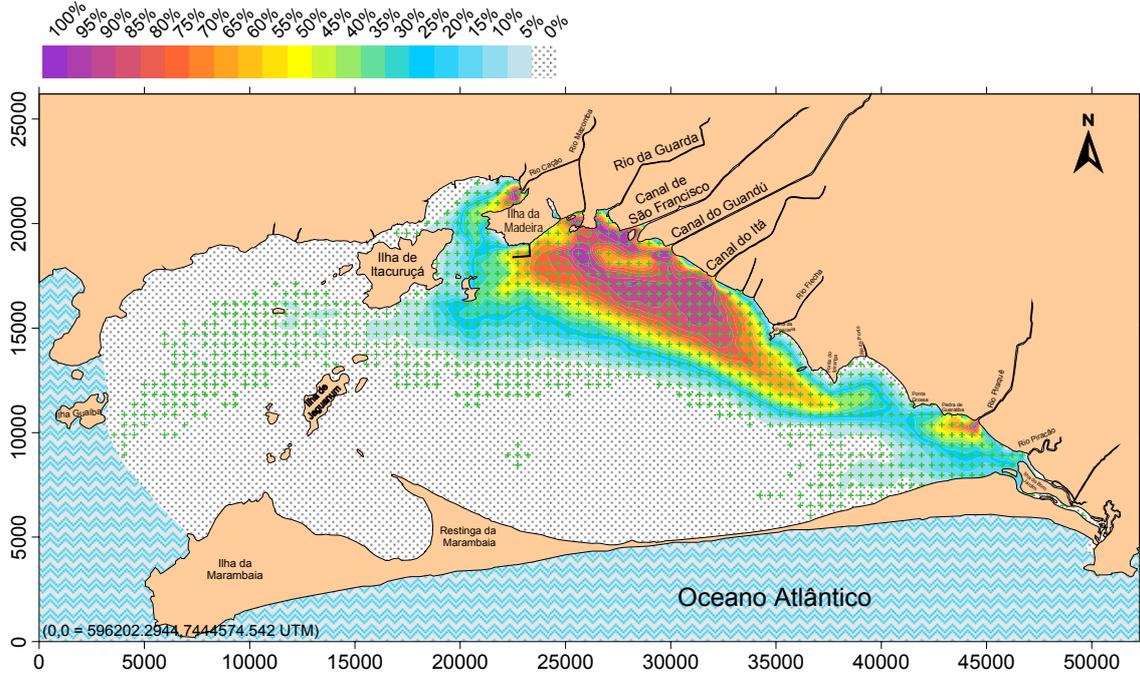


Figura 56 - Isolinhas de % no tempo de passagem de partículas para o cenário 7R e zona de sedimentação após 90 dias de simulação.

7. Conclusões

Com este trabalho, pôde-se verificar, através de simulações computacionais em modelo validado para estudo de circulação na Baía de Sepetiba, tendência de mobilidade de sedimentos depositados no fundo de todo o corpo hídrico, bem como tendência de transporte de partículas lançadas na região.

Primeiramente, nos resultados de circulação residual, observou-se que as regiões com maior chance de ter seus sedimentos ressuspensos são diferentes para situação de maré enchente e de vazante: na enchente as correntes são mais fortes nas entradas da baía, enquanto na vazante verificam-se velocidades mais expressivas na região próxima à costa.

Para os resultados de tensão gerada apenas por correntes de maré, verificou-se uma maior mobilidade de sedimentos quando da ocorrência de marés de sizígia do que de quadratura, que apresenta correntes mais fracas. E a região com maior mobilidade é aquela onde há maiores profundidades.

Este resultado difere daquele obtido para tensão gerada por ondas de ventos, onde há maiores tensões observadas as áreas junto à costa e à restinga, sendo estas as regiões com maior mobilidade. A maré de sizígia continuou sendo a situação de maior mobilidade se comparada com os resultados para situação de maré de quadratura.

Embora os efeitos isolados de onda e corrente sobre os sedimentos do fundo não sejam significativos nas mesmas regiões, a ação conjunta de ambos mostra resultados diferentes: na maré de sizígia, grande parte da baía tem seus sedimentos mobilizados para coluna d'água, principalmente na meia maré enchente, onde apenas parte do litoral não contribui para o volume de sedimentos em suspensão. Já na maré de quadratura, verifica-se quase ausência de mobilidade de sedimentos do fundo em virtude das tensões bastante baixas observadas.

Até aí, o que se pode dizer é que não apenas o sedimento do bota-fora do Porto, mas todo sedimento que já está na baía, pode ser transportado pelas correntes na ocorrência de maré de sizígia.

No entanto, a análise dos resultados de transporte juntamente com os anteriores permite tirar algumas outras conclusões bem mais interessantes. Estes mostram

tendências de transporte, condicionado pelos principais fatores que regem o movimento no interior de corpos hídricos, de sedimentos que chegam à baía pelos rios contribuintes e daqueles lançados na mesma como depósito final de rejeito de dragagem. Tudo isso para as condições adotadas, que foram escolhidas de modo a fornecer um resultado amplo e geral.

Assim, obteve-se, mapas de distribuição de sedimentos após longo período de simulação. Quando se analisa os resultados das simulações de transporte considerando a contribuição dos rios da bacia, com carga maior no Canal de São Francisco, verifica-se que estes sedimentos têm probabilidade bem maior de atingir e se depositar na região assoreada do que aquele que tem origem no bota-fora, que tende a sair da baía para o oceano. A deposição é favorecida pela mobilidade nula da região observada especialmente na maré de quadratura, que se torna, então, condição ideal para o assoreamento.

Em linhas gerais, os resultados indicam uma tendência de acúmulo dos sedimentos que vem da bacia nas regiões que atualmente se encontram assoreadas, enquanto o mesmo não ocorre com os sedimentos mobilizados no depósito de dragagem, que têm um destino bem diferente. Os mapas de probabilidade de passagem da mancha de sedimentos sobre as regiões durante os 90 dias simulados confirmam estas conclusões, mostrando que, durante a maior parte do tempo, os sedimentos do bota-fora sequer atingem as praias.

Com base em todo o histórico elaborado a respeito da bacia e sua evolução sob diversos aspectos, principalmente das formas de ocupação ao longo dos anos, este resultado era o esperado. Até porque, antes mesmo das obras de dragagem do canal de acesso do porto se iniciarem, já se notava um lento processo de assoreamento na praia de Sepetiba e seu entorno, fato que, hoje, pode ser entendido como um reflexo da resposta da natureza às alterações sofridas, tentando recuperar seu equilíbrio natural.

Porém, embora houvesse indicativos de que este resultado seria o mais provável, não havia uma comprovação prática dessas conclusões, e é esta a contribuição deixada por este trabalho. Este resultado pode servir de base para novos estudos que se pretenda desenvolver na busca de soluções para o problema, já que a causa agora é bem conhecida.

Não há dúvidas de que a solução para tal problema deve abordar uma forma de melhorar do sistema de coleta de esgotos e lixo produzido nos grandes centros populacionais da baixada de Sepetiba, já que a carga despejada nos seus rios aumentou significativamente com o crescimento da região. Para isto, seria necessária a implantação de estações de tratamento de esgotos na região, bem como a escolha de um local adequado para a disposição do lixo, de modo a evitar que toda essa carga continue poluindo as águas da baía, e conseqüentemente suas águas e praias. Os investimentos que forem feitos no sentido de se atingir esse objetivo terão retorno com a recuperação ambiental do local, que voltará a ser atraente ponto turístico, além da qualidade de vida acrescentada a população.

Espera-se que, num futuro não muito distante, as fontes causadoras, e que continuam agravando este problema do assoreamento que vem alterando drasticamente a orla de Sepetiba, como a poluição dos rios e canais que deságuam na baía, possam ser minimizadas de modo que este processo seja interrompido e o corpo hídrico consiga se recuperar, a longo prazo, dos danos causados.

8. Referências Bibliográficas

1 – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2001, “Bacias Hidrográficas e Recursos Hídricos da Macroregião 2 – Bacia da Baía de Sepetiba”, Projeto PLANÁGUA SEMADS/GTZ, Rio de Janeiro, RJ.

2 – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMADS, Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente – FEEMA, 1998 “Avaliação da Qualidade das Águas da Bacia da Baía de Sepetiba (Outubro/1995 a Julho/1998)”, GTZ, Rio de Janeiro, RJ.

3 – FEEMA, Estudos de Impacto Ambiental – EIA: *Projeto de Dragagem do Canal de Acesso ao Porto de Sepetiba - RJ*, Companhia Docas do Rio de Janeiro e Multiservice, 1997.

4 – FEEMA, Estudos de Impacto Ambiental – EIA: *Canalização e Dragagem de Rios da Bacia de Sepetiba*, vol.I, Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro e Concremat Engenharia e Tecnologia S.A., 1992.

5 – FADIGA JUNIOR, F. M., 1993, “Modelo Hidrodinâmico-Sedimentológico Unidimensional” In: FADIGA JUNIOR, F. M., *Modelos de Cálculo de Transporte de Sedimentos*, Dissertação de M.Sc., São Paulo, SP, Brasil.

6 – GOES, H. A., 1942, *Baixada de Sepetiba*. 1ed., Rio de Janeiro, RJ, Imprensa Nacional 383p.

7 – GOES FILHO, H. A., 2004, *Dragagem e Gestão de Sedimentos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

8 – van RIJN, L. C., 1993, *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, University of Utrecht, Amsterdam, The Netherlands.

9 – ROSMAN, P.C.C., 2000, *Referência Técnica do SisBAHIA*, Fundação Coppetec, Relatório PENO-565.

10 – 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.

11 – ROSMAN, P. C. C., 2001, *Estudos Referentes ao Projeto do Duto PE 03 – Baía de Guanabara* - Fundação Coppetec e PENO – Programa de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Relatório Final, Rio de Janeiro, RJ.

12 – ROSMAN, P.C.C., 2003, *Modelagem Computacional para Análise de Aspectos da Dinâmica de Sedimentos na Baía de Todos os Santos, BA*, Fundação Coppetec, Relatório Final

13 – SILVA, A. M., SCHULZ, H. E., CAMARGO, P. B., 2003, *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*, 1 ed., São Carlos, RiMa.

14 – SILVA, R. C. V., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., *Hidráulica Fluvial I*, 1ed., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2003. v. 1. 3046 p.

15 – U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2006, “Coastal Engineering Manual”.

16 – VALENTINI, E. M. S., 2004, Apostila dos cursos de “Transporte Sólido” e “Processos Litorâneos”, Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Escola de Engenharia, UFRJ.