



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO
Dragagem – Baía de Sepetiba - LLX

/Dragagem – Baía de Sepetiba - LLX

Preparado para:
Ecology Brasil

Preparado por:
Bruna Cerrone
Francisco dos Santos
Mauricio Fragoso
Julio Pellegrini

15 de agosto de 2008

PROOCEANO

AV. RIO BRANCO, 311 / 1224 CENTRO
CEP 20.0040-009 RIO DE JANEIRO RJ
TEL | FAX +55 21 2532-5666
WWW.PROOCEANO.COM.BR

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]

MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

Dragagem Baía de Sepetiba - LLX

Preparado para:
Ecology Brasil

Preparado por:
Bruna Cerrone
Francisco dos santos
Mauricio Fragoso
Julio Pellegrini

15 de agosto de 2008

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	5
II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE	5
III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO	8
IV. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO UTILIZADO	9
IV.1. DOMÍNIO DO MODELO	13
IV.2. Condições de contorno	17
<i>IV.2.1. Condição de Contorno de Fundo</i>	<i>17</i>
<i>IV.2.2. Condição de Contorno de Superfície</i>	<i>18</i>
<i>IV.2.3. Condição de Contorno Lateral</i>	<i>19</i>
IV.3. Resultados.....	21
<i>IV.3.1. Avaliação do Modelo</i>	<i>21</i>
<i>IV.3.2. Campanha de Medição de Dados de Corrente</i>	<i>25</i>
<i>IV.3.3. Comparação com Modelo</i>	<i>33</i>
IV.4. Considerações sobre a modelagem hidrodinâmica.....	42
V. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM	43
V.1. Modelo Adotado.....	43
V.2. Cenários Simulados	43
V.3. Dados de entrada	44
V.4. Construção da Matriz de Sólidos.....	45
V.5. Duração das simulações	46
VI. RESULTADOS	48
VI.1. CDF.....	48

VI.1.1. <i>W_QUA_CDF</i>	49
VI.1.2. <i>W_SIZ_CDF</i>	56
VI.1.2. <i>E_SIZ_CDF</i>	69
VI.2. BOTA-FORA	75
VI.2.1. <i>W_QUA_BTf</i>	75
VI.2.5. <i>Pilha de Deposição</i>	95
VII. CONCLUSÕES	97
VIII. BIBLIOGRAFIA	98

I. INTRODUÇÃO

Este relatório estuda, através da modelagem numérica, o comportamento do material a ser descartado por atividade de dragagem em áreas da Baía de Sepetiba e adjacências, litoral sul do estado do Rio de Janeiro.

O objetivo desse estudo é subsidiar a empresa Ecology and Environment do Brasil Ltda. na elaboração do Estudo de Impactos Ambientais – EIA referente à implementação do Porto Sudeste, projeto da empresa LLX Logística S.A. na Baía de Sepetiba e que tem a necessidade de implementar uma atividade de dragagem.

Todas as informações operacionais foram fornecidas pela empresa Ecology, sendo de responsabilidade desta ou, em última análise, da empresa LLX, ficando sob responsabilidade da Prooceano a implementação dos modelos computacionais utilizados assim como a definição dos cenários ambientais a serem considerados.

Informações ambientais, como granulometria dos sedimentos e total de sólidos em suspensão (TSS) na coluna d'água e no material dragado, também foram informações encaminhadas pela empresa Ecology.

No presente relatório é apresentada uma breve descrição da atividade e da área de estudo. Nos itens seguintes apresenta-se os modelos utilizados, a metodologia e os resultados propriamente ditos.

II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

A descrição detalhada da atividade de dragagem está apresentada em capítulo específico do Estudo de Impactos Ambientais - EIA.

Entretanto, cabe ressaltar que se pretende utilizar duas técnicas distintas para descarte do material dragado: Área de Disposição Confinada (CDF na sigla do inglês "*confined disposal facility*") e Descarte em Área Aberta (bota-fora).

A Área de Disposição Confinada está situada no interior da baía de Sepetiba (Figura 1) e receberá o material dragado que apresente algum tipo de contaminação. Esta área é recoberta por uma camada de sedimentos que mantém indisponível ao meio marinho o sedimento contaminado. As coordenadas desse ponto são 22°55'58"S e 43°51'47'W.

Neste ponto, a operação de dragagem ocorre de forma contínua, de modo que a draga aspira o sedimento e o conduz - por meio de tubulação - até o ponto de descarte, na área previamente escavada. Na extremidade da tubulação, posicionada em profundidade, é

fixado um dispersor com a finalidade de proporcionar um escoamento laminar do material dragado, minimizando a ressuspensão dos grãos mais finos.



Figura 1: Pontos de descarte do material dragado. CDF no interior da baía e Bota-fora na região costeira adjacente.

O Descarte em Área Aberta (bota-fora) deverá ocorrer em localização externa à baía de Sepetiba (Figura 1), onde serão descartados os sedimentos não-contaminados oriundos do processo de construção do CDF. As coordenadas desse ponto são: 23° 11' 00.00"S e 43° 54' 30.00"W.

Neste ponto, o material dragado é transportado por meio de balsas e descartado próximo à superfície, de forma instantânea, em intervalos regulares de cerca de 4 horas.

Um resumo das características dos descartes, em cada localidade, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos descartes previstos nas duas localidades.

Parâmetros	unidade	CDF	BOTA-FORA
profundidade de descarte	m	1 m acima do fundo	1 m abaixo da superfície
diâmetro do tubo de descarte	m	0,75	fundo da balsa
orientação do tubo de descarte	°	-45	-90
capacidade da balsa	m3	em regime contínuo	11300
Vazão do descarte	m3/h	400	40000
tempo de descarte	h	1625	0,2825
densidade média do sedimento	kg/m3	2120	2120

III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO

Localizadas no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro (entre as latitudes de 22° 55' S e 23° 25' S e entre as longitudes de 44° 42' W e 43° 34' W), ocupando aproximadamente 3100 Km², as Baías de Sepetiba e Ilha Grande formam um complexo sistema estuarino. Estas duas baías são separadas por uma constrição formada entre o continente e a Ilha Grande, constituindo um sistema de dois corpos d'água ligados por um canal (Figura 2).

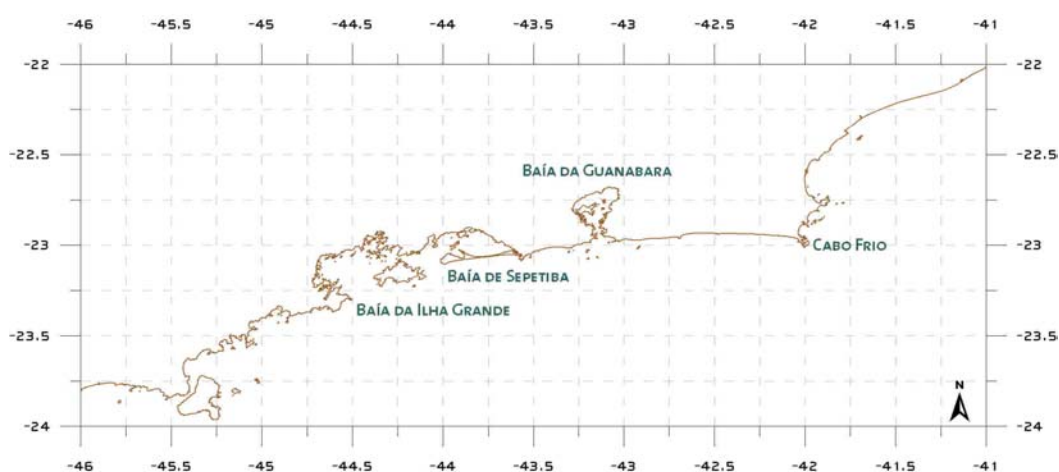


Figura 2: Baía da Ilha Grande, litoral sul do Estado do Rio de Janeiro.

Esta região abriga em seu litoral um terminal de petróleo (Terminal da Baía da Ilha Grande - TEBIG), duas usinas nucleares (Angra I e II) e o Porto de Sepetiba, (um dos maiores da América Latina), além de várias outras indústrias, tais como de construção naval e minérios. Tudo isto localizado numa área de grande importância ecológica, que abriga reservas biológicas, como a da Restinga da Marambáia e áreas de proteção ambiental, como a da Ilha Grande, e que apresenta relevância turística e pesqueira, possuindo uma alta produtividade biológica (Tomasi et al, 1972). Esta é portanto, uma região de valiosos interesses, tanto econômicos e comerciais, quanto ambientais e ecológicos. Desta forma, deve-se procurar manter o complexo equilíbrio entre as atividades ali exercidas e o meio ambiente que as cerca (Fragoso, 1999).

Apesar de serem corpos d'água adjacentes, as Baías de Sepetiba e Ilha Grande apresentam comportamento hidrodinâmico e hidrográfico distinto. A Baía de Sepetiba é fortemente influenciada pela descarga de água doce proveniente de canais e rios e além disso, a troca de águas com o oceano adjacente é dificultada pela barreira formada por uma grande restinga, a Restinga da Marambáia. Já a Baía da Ilha Grande, por ser mais profunda e apresentar uma abertura mais franca para o oceano, sofre maior influência de águas da Plataforma Continental, mais frias e salgadas (Signorini, 1980a).

Na Baía de Sepetiba, o principal mecanismo responsável pela geração de correntes é a maré (Signorini, 1980a e b, Fragoso, 1995). Signorini (1980a) aponta um grande contraste entre a circulação gerada pela maré nas duas baías, estudando resultados obtidos por correntômetros e por simulação numérica (Signorini, 1980b). Enquanto na Baía de Sepetiba, o sinal de maré nas correntes é bastante evidente, com velocidades máximas da ordem de 1 m/s, na Baía da Ilha Grande este sinal é muito pequeno. Fragoso (1999) sugere que tal fato está relacionado à propagação da onda de maré no sistema de baías, que faz com que o nível do mar na Baía da Ilha Grande oscile em fase, enquanto que na Baía de Sepetiba existe uma defasagem da onda de maré entre a entrada e o fundo da baía, o que gera acentuados gradientes de elevação do nível do mar, resultando em fortes correntes de maré nesse local.

IV. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO UTILIZADO

Para as simulações hidrodinâmicas da região da Baía da Ilha Grande foi utilizado o modelo conhecido como Princeton Ocean Model - POM (Blumberg & Mellor, 1987). O POM é um modelo numérico hidrodinâmico não-linear, de equações primitivas, com superfície livre, tridimensional, de diferenças finitas, projetado para simular correntes costeiras e oceânicas. O tratamento dos efeitos turbulentos é realizado com o modelo de fechamento turbulento de segunda ordem, nível 2.5 de Mellor e Yamada (1982), o que permite uma representação mais realística das camadas de Ekman de superfície e de fundo (Blumberg e Mellor, 1987). Como este modelo foi projetado para incluir os efeitos decorrentes de profundidades irregulares, o sistema de coordenadas cartesianas é modificado com a introdução do conceito da coordenada generalizada sigma, no qual a coordenada vertical z , orientada no sentido contrário à aceleração da gravidade, é substituída pela coordenada sigma (σ), que tem como referência, ao mesmo tempo, o fundo e a superfície livre do mar. Os modelo de coordenada sigma, ou "seguidores-de-terreno" são especialmente adequados em regiões com topografia de fundo variável e nas quais os processos de interação com a camada-limite de fundo são importantes. A principal atração de tais modelos reside na representação suave da topografia e em sua habilidade em simular as interações entre o fluxo e a batimetria (Ezer et al., 2002). A transformação de z para sigma é realizada conforme indicado a seguir:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta},$$

onde η é a elevação da superfície livre e H é a profundidade local. Assim, σ varia de 0, na superfície, a -1 , no fundo. Desta maneira, o modelo consegue representar bem os efeitos do relevo de fundo e do contorno de costa sobre a circulação (Figura 3), o que é importante quando se está modelando regiões onde ocorra variações topográficas significativas.

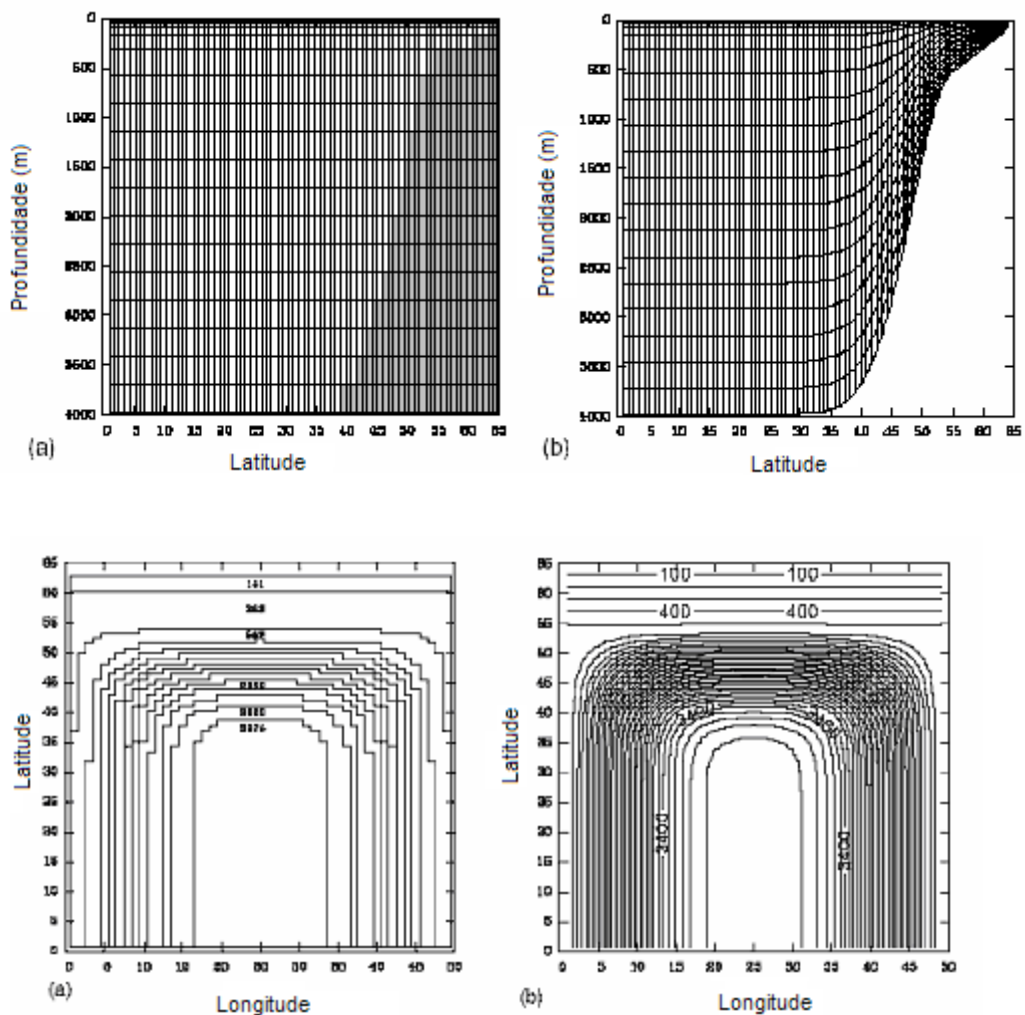


Figura 3: Representação da topografia de fundo em perfil (painel superior) e em planta (painel inferior) em grades com coordenada vertical cartesiana Z (a) e coordenada vertical sigma (b). Fonte: Ezer & Mellor, (2004).

O POM é portanto, um modelo adequado para simular as correntes em baías, estuários, regiões costeiras e Plataforma Continental, embora várias simulações de regiões de bacias oceânicas tenham sido realizadas com sucesso (Ezer & Mellor, 1994; Gan et al., 1998; Ezer, 2001).

O conjunto de equações governantes do POM é formado pelas equações primitivas do movimento, fazendo uso das aproximações de Boussinesq, plano β e hidrostática. Referenciando-se a um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais com valores positivos de x no sentido leste e de y no sentido norte e realizando a transformação para coordenada sigma, tem-se o conjunto de equações básicas utilizadas pelo POM (Mellor, 2004).

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y$$

Equação da conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta U}{\partial x} + \frac{\partial \theta V}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] + F_{\theta} - \frac{\partial R}{\partial z}$$

Equação da conservação de sal:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial SU}{\partial x} + \frac{\partial SV}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S$$

Equação de estado da água do mar:

$$\rho = \rho(S, \theta, P)$$

Nestas equações $D = H + \eta$, U e V são os componentes zonal e meridional da velocidade, respectivamente, f é o parâmetro de Coriolis, g é a aceleração da gravidade, ρ é a densidade, ρ_0 é a densidade de referência, ρ' é a anomalia de densidade, θ é a temperatura potencial, S é a salinidade, K_M é o coeficiente de viscosidade cinemática

vertical, K_H é o coeficiente de difusão de calor vertical, $\frac{\partial R}{\partial z}$ é o termo de fluxo de calor radiativo e ω é a velocidade vertical transformada, correspondente à componente de velocidade normal às superfícies sigma. Essa transformação se dá segundo:

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial \sigma}$$

Os termos F_x , F_y , F_θ e F_S (atrito turbulento) são os chamados termos sub-grade, ou seja, com resolução menor do que a grade, sendo então necessárias parametrizações para resolvê-los (Calado, 2000), representadas a seguir:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial x} \right)$$

$$F_{S,\theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_H \frac{\partial (S, \theta)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_H \frac{\partial (S, \theta)}{\partial y} \right]$$

O termo A_M é resolvido utilizando a solução de Smagorinsky:

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

onde C é a constante de Smagorinsky e A_H é o coeficiente de difusão de calor horizontal.

Esse conjunto de equações é resolvido utilizando-se uma diferenciação centrada no tempo e no espaço, também conhecida como *Leap-frog*, que é capaz de resolver apropriadamente os processos altamente dependentes do tempo e não-lineares (Blumberg e Mellor, 1987). O POM faz uso da técnica de separação de modos (*mode splitting*), na qual as equações do movimento são separadas em modo externo (ou barotrópico) e modo interno (ou baroclínico), permitindo que sejam utilizados intervalos de tempo (Δt) diferentes na integração do modelo. O intervalo de tempo para o modo interno pode ser bem maior do que a do modo externo, já que a velocidade da onda interna é bem menor do que a externa. Assim, essa técnica propicia uma economia significativa de tempo de processamento ao mesmo tempo que não compromete a estabilidade do modelo, satisfazendo a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL).

O sistema de coordenadas horizontal utiliza coordenadas ortogonais curvilíneas, que permite resolução variável de grade e o esquema de diferenciação aplicado é o conhecido como grade C de Arakawa. A linguagem de programação utilizada na versão oficial do modelo é Fortran77.

O grupo de usuários registrados do POM é constituído por mais de dois mil pesquisadores de dezenas de países, que já publicaram quase 700 artigos com aplicações do modelo para estudos da circulação em estuários, regiões costeiras, e oceano aberto, enfocando fenômenos de pequena escala até grande escala e com escalas temporais da ordem de horas até escalas sazonais.

Pode-se citar as diversas aplicações em baías como a de Blumberg (1977) na Baía de Chesapeake, Galperin et al. (1990a e 1990b) na Baía e no Rio Delaware ou ainda Hong (1998) que simulou a resposta da Baía de Deukryang à tufões utilizando o POM. O'Connor (1991) realizou simulações com maré no estuário do Rio da Prata. Galperin et al. (1992) investigaram a importância da circulação gerada por gradientes de densidade em estuários bem misturados. Marsaleix et al. (1998) investigaram a formação da pluma do Rio Reno com auxílio do POM. Camargo (1998) utilizou o POM para o estudo da circulação da Baía de Paranaguá, no Estado do Paraná enfocando a circulação gerada pela maré e a propagação das principais componentes de maré naquela região e também utilizou resultados obtidos com um modelo numérico de circulação atmosférica como condição de contorno, a fim de estudar as correntes geradas pelo vento. Fragoso (1999) estudou a circulação das Baías de Sepetiba e Ilha Grande.

IV.1. DOMÍNIO DO MODELO

A região modelada estende-se da longitude de 44° 49' W a 43° 45' W e de latitude de 24° 00' S a 22° 54' S, com dimensão aproximada de 120 Km X 140 Km. Esta área abrange a Baía de Sepetiba, estendendo-se até parte da Plataforma Continental ao sul e até a Baía da Ilha Grande a oeste (Figura 4). A resolução espacial da grade foi escolhida para resolver as feições de maior interesse, como por exemplo, o canal entre a Ilha Grande e o continente e algumas ilhas como as de Mangaratiba, Jaguanum e Guaíba. Porém, a fim de se economizar tempo de processamento e facilitar a análise dos resultados gerados pelo modelo, foi elaborada uma grade com resolução espacial variável (Figura 5 a Figura 7).

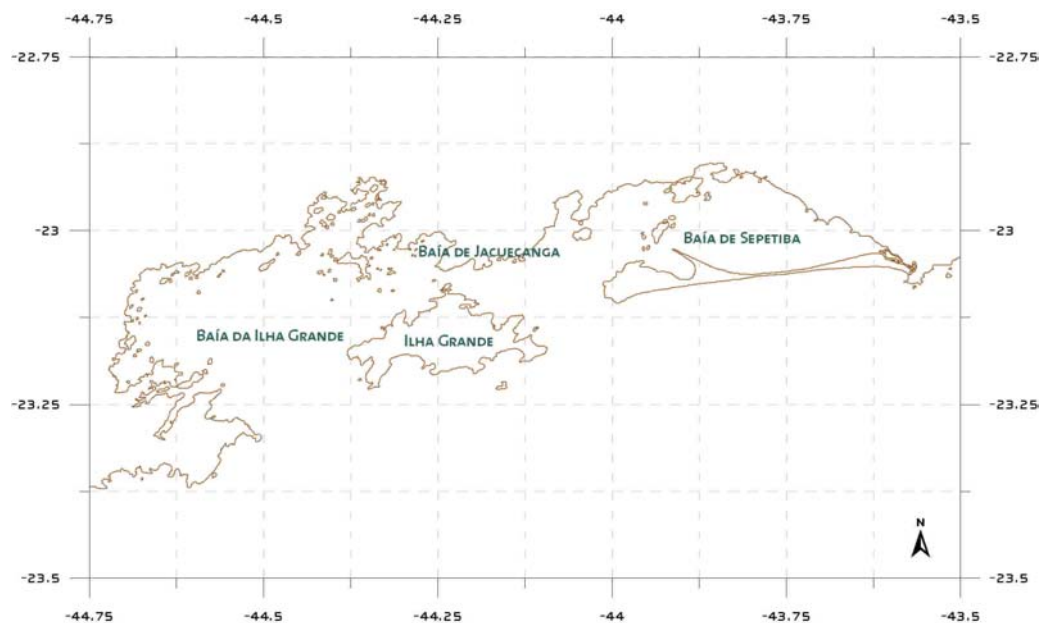


Figura 4: Região de domínio da grade do modelo.

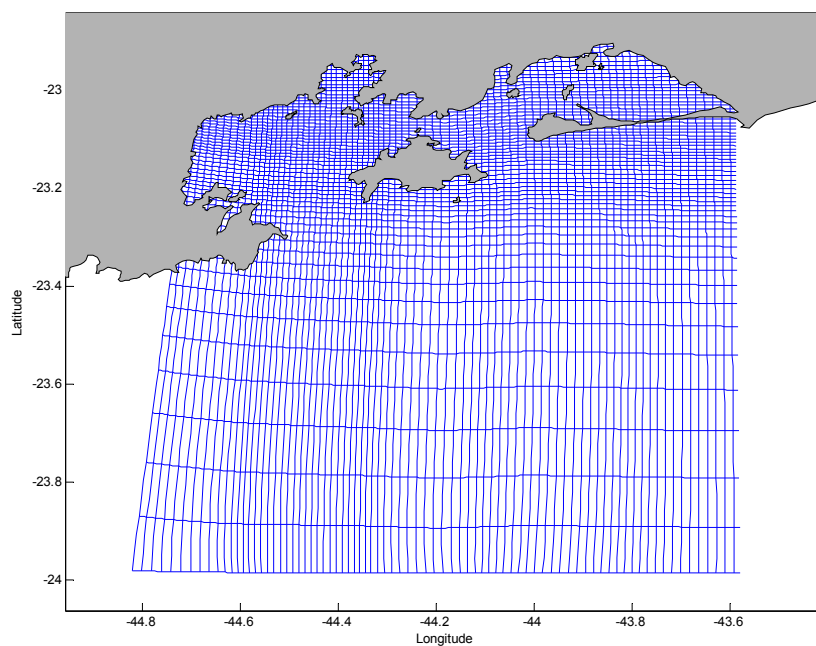


Figura 5: Configuração da grade do modelo numérico. Apenas uma em cada três colunas e linhas estão representadas pra facilitar a visualização.

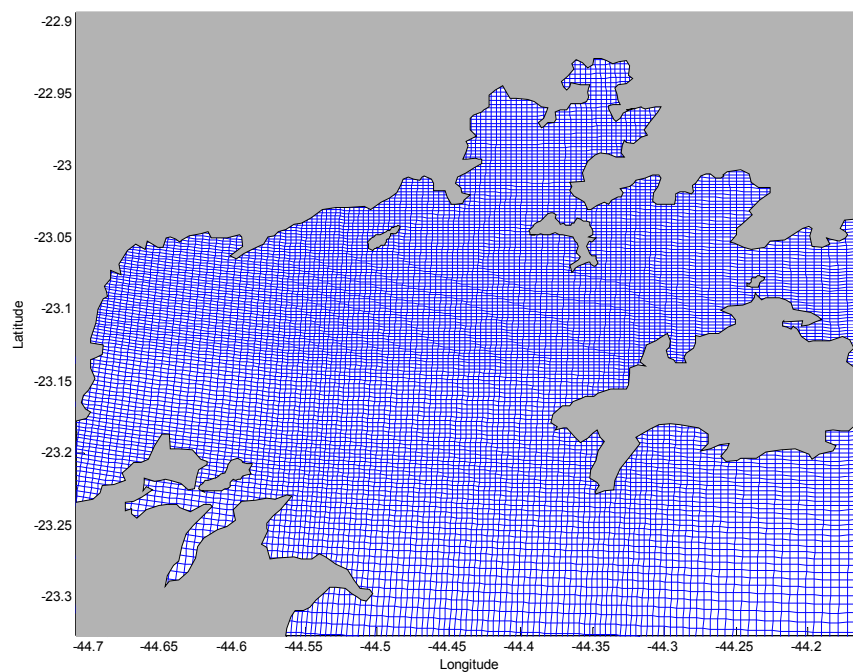


Figura 6: Detalhe da grade do modelo no interior da Baía da Ilha Grande.

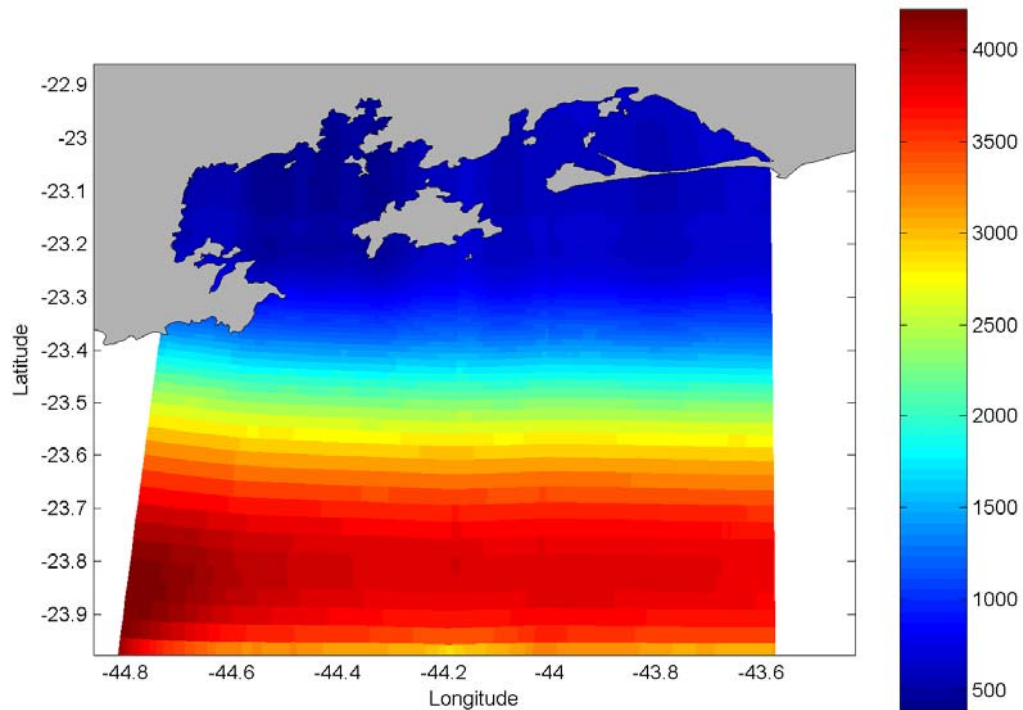


Figura 7: Resolução espacial da grade do modelo (em metros).

Esta configuração foi escolhida visando viabilizar e facilitar as simulações com o modelo numérico, tomando cuidado para que os seguintes aspectos fossem garantidos:

Extensão de pista suficiente para gerar correntes na plataforma que influenciam a circulação no interior da baía.

Número suficiente de pontos de grade comuns entre a grade do POM e a grade do modelo global de maré (que será discutido a seguir) para que se pudesse resolver de maneira adequada a propagação da onda de maré no domínio do modelo.

Fronteiras abertas longe da área de maior interesse para evitar que as condições impostas nessas fronteiras pudessem influenciar os resultados na região de maior interesse.

O modelo possui 15 camadas sigma na vertical distribuídas de maneira logarítmica, apresentando maior resolução na superfície e no fundo e menor entre esses dois locais.

IV.2. Condições de contorno

Quando se utiliza um modelo de área limitada, como é o caso do POM, um dos fatores primordiais é uma escolha adequada das condições iniciais e das condições de contorno do modelo (Figura 8). Tal escolha deve ser realizada com bastante critério, uma vez que os resultados serão consequência das condições escolhidas.

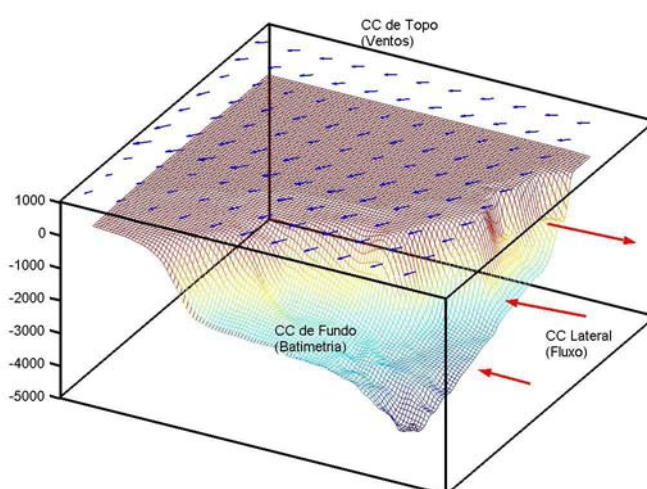


Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.

IV.2.1. Condição de Contorno de Fundo

Os dados de batimetria da região foram obtidos através da digitalização das cartas náuticas 1609, 1622 e 1600, elaboradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. Com esses dados foi então preparada uma grade batimétrica, utilizando interpolação pelo método de Kriging. Após tratamento com um filtro gaussiano bidimensional, obteve-se a matriz de topografia do fundo utilizada no modelo hidrodinâmico (Figura 9).

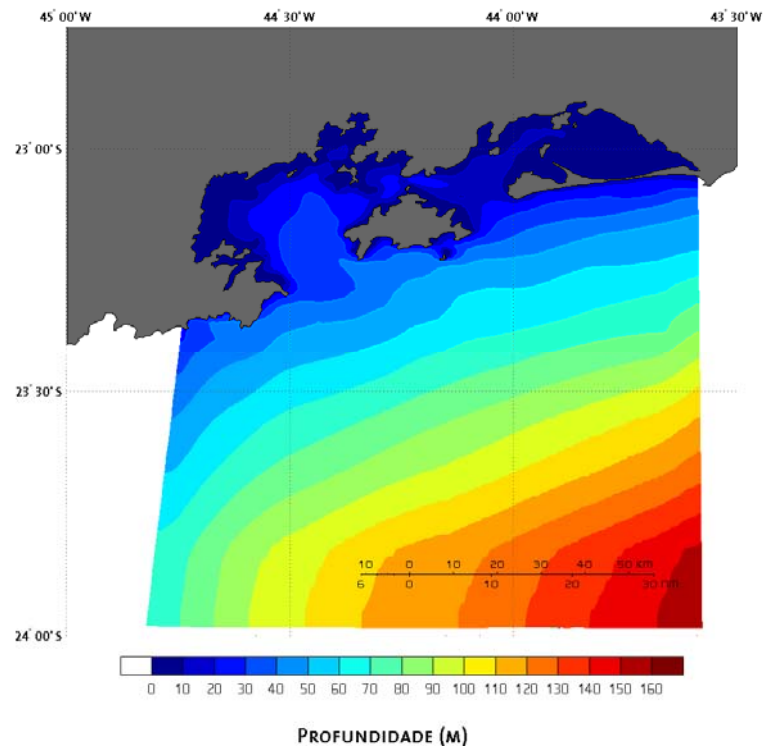


Figura 9: Batimetria utilizada no modelo hidrodinâmico.

A batimetria obtida é plenamente capaz de resolver as feições características da região como a maior profundidade da Baía da Ilha Grande em relação a Baía de Sepetiba, o canal de navegação do Porto de Sepetiba, assim como a inclinação das isobatimétricas na região da Plataforma Continental adjacente.

IV.2.2. Condição de Contorno de Superfície

O modelo utiliza dados de tensão de cisalhamento do vento (τ) como condição de contorno de superfície. Esse valor é obtido através de dados de velocidade e direção do vento, utilizando a parametrização proposta por Mascarenhas (1985), que relaciona esses dois parâmetros através da equação a seguir:

Sendo $|V|$ o módulo da velocidade (m/s) do vento a 10 m tem-se, para:

$$0 < |V| < 6 \rightarrow \tau = 0,29 + \left(\frac{3,1}{|V|} \right) + \left(\frac{7,7}{|V|^2} \right)$$

$$|V| > 6 \rightarrow \tau = 0,6 + (0.07 * |V|)$$

Daí, são obtidos os componentes zonal (τ_x) e meridional (τ_y) da tensão de cisalhamento do vento:

$$\tau_x = -u * |V| * \tau * \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}}$$

$$\tau_y = -v * |V| * \tau * \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}}$$

Onde ρ_{ar} é a densidade média do ar e $\rho_{água}$ é a densidade de referência da água do mar no local.

IV.2.3. Condição de Contorno Lateral

O modelo possui três fronteiras abertas (leste, sul e oeste) e uma fechada (norte). Na fronteira fechada foram utilizadas condições de contorno conhecidas como *no-slip*, ou seja, velocidades normais ao contorno nulas e *free-slip*, ou seja, velocidades tangenciais podendo ser diferentes de zero.

Para as fronteiras abertas, utilizou-se condições de contorno diferentes para cada variável em cada fronteira, descritas a seguir.

IV.2.3.1 Elevação do Nível do Mar

Para incluir a propagação da onda de maré, foi utilizada a condição de contorno de elevação na fronteira leste do modelo. Esses dados foram obtidos através das constantes harmônicas fornecidas pelo modelo FES95 modelo (de "Finite Element Solutions"). As equações governantes do FES95 são as equações de águas rasas, barotrópicas e não-lineares, resolvidas utilizando método de elementos finitos. Para a fricção com o fundo é utilizada parametrização quadrática, mais adequada para regiões de águas rasas. A força de maré é baseada no desenvolvimento astronômico do potencial de maré, levando em conta as correções dos efeitos de maré terrestre (*earth tides*) e maré de carga (*load tides*) sendo ainda realizada assimilação de dados de altimetria de satélite. (Le

Provost et al. 1995). A batimetria é retirada do banco de dados ETOPO5 do *National Geophysical Data Center* (NGDC) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

São simuladas oito constituintes de maré (M2, S2, N2, K2, N2, K1, O1 e Q1) em todo globo, excluindo-se alguns mares interiores e baías como a Baía de Fundy. A grade do modelo FES95 apresenta resolução variável, porém os resultados que foram colocados a disposição da comunidade científica estão em grades de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. A partir destes, foram então retirados os dados de fase e amplitude de sete componentes (M2, S2, N2, K2, K1, O1 e Q1) para os pontos da fronteira leste da grade. Com esses dados foi realizada a previsão de maré, incluída como condição de contorno de elevação no POM. Esses dados foram interpolados linearmente para que cada ponto de grade da fronteira leste possua um valor de elevação correspondente.

Nas fronteiras oeste e sul, a condição de contorno utilizada para a elevação é a de gradiente zero, representadas respectivamente pelas equações a seguir:

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

IV.2.3.2 Correntes

As condições de contorno para as velocidades nas fronteiras leste, sul e oeste são as radiativas de Orlanski:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C * \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

Onde:

ϕ representa a componente meridional ou zonal da velocidade;

C é a velocidade de propagação das ondas que atingem a fronteira;

IV.2.3.3 Temperatura

A condição para temperatura e salinidade é a advecção *upstream*:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v * \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

Onde ϕ , nesse caso, representa a temperatura ou a salinidade e v é a velocidade.

IV.3. Resultados

Foram realizadas duas simulações distintas, para que fossem contempladas as condições típicas da dinâmica marinha e atmosférica da região. Os ventos predominantes na região são de 1º e 3º quadrantes, conforme descrito na Seção 5, que trata do Diagnóstico Ambiental. Portanto, foram realizadas duas simulações hidrodinâmicas, utilizando ventos de quadrante leste e oeste, com velocidades típicas (3 e 4 m/s, respectivamente), combinados com a maré para o período de setembro de 2005, englobando então as variações de sizígia e quadratura.

IV.3.1. Avaliação do Modelo

Para que possamos saber se o comportamento do sistema de previsão é suficientemente compatível com o “sistema real” é necessário realizar uma comparação entre os resultados obtidos nos dois mundos; o “real” e o simulado.

A nomenclatura contemporânea para tal estudo é “avaliação”. Embora possa parecer um rótulo de pouca importância, os termos anteriormente utilizados para tal fim, sempre foram controversos. A primeira nomenclatura “validação” foi substituída por “comparação histórica”, a qual foi complementada com o termo “garantia de qualidade”. A dificuldade em se definir um termo reside no fato de que as palavras “validação” e “garantia” trazem em si uma expectativa de positivo e negativo em relação aos resultados. O modelo poderia ser somente válido ou não válido, garantido ou não garantido. Nesse sentido, o termo “avaliação” torna-se mais adequado, uma vez que é neutro e pode abarcar uma gama maior de definições em termos de qualificação do modelo ou sistema (Beck, 2002).

Em essência, são duas as principais perguntas que devem ser respondidas quando se avalia um modelo ou sistema:

1. O modelo foi construído com materiais aprovados, i.e. as hipóteses constituintes são consagradas e adequadas?

2. O seu comportamento se aproxima bem do observado com respeito ao “mundo real” ?

A primeira pergunta pode ser respondida com o grande número de artigos publicados em revista internacionais utilizando o POM para estudos de circulação oceânica em diversas escalas, nos mais variados corpos d’água.

Para responder à segunda pergunta foram comparados resultados obtidos pelo modelo numérico com dados observados na região, tanto de maré, quanto de correntes. Em relação às marés, foram comparadas quatro locais distintos, a saber; Angra, Ponta dos Castelhanos, Clubmed e Parati (Figura 10).

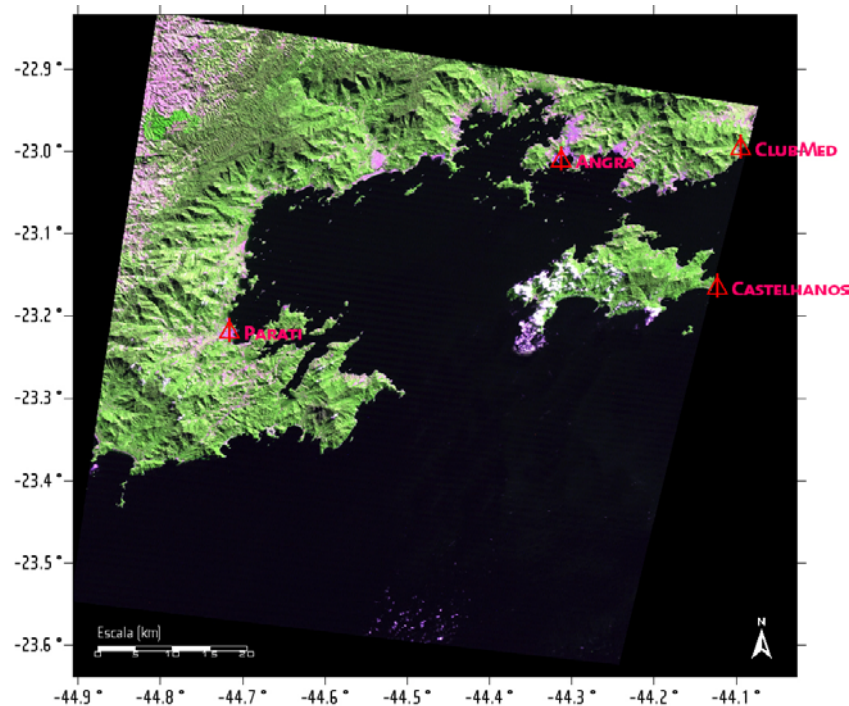


Figura 10: Localização das estações maregráficas cujos dados foram comparados com resultados do modelo numérico.

As séries temporais de elevação de nível do mar observados e modelados para o mês de setembro de 2005 podem ser observados da Figura 11 a Figura 14.

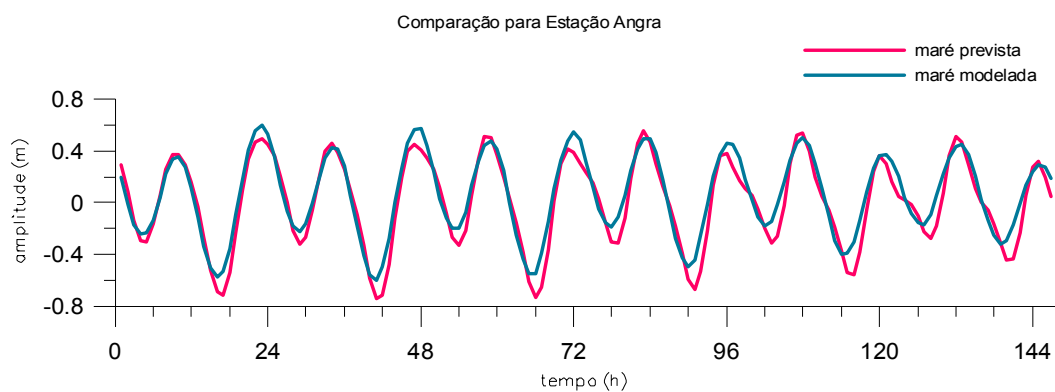


Figura 11: Séries temporais de elevação do nível do mar observado e modelado em Angra dos Reis.

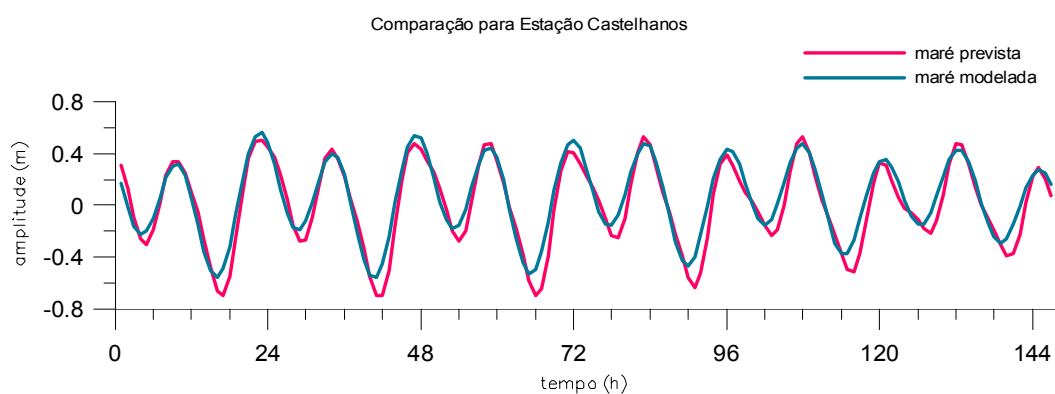


Figura 12: Séries temporais de elevação do nível do mar observado e modelado na Ponta dos Castelhanos, na Ilha Grande.

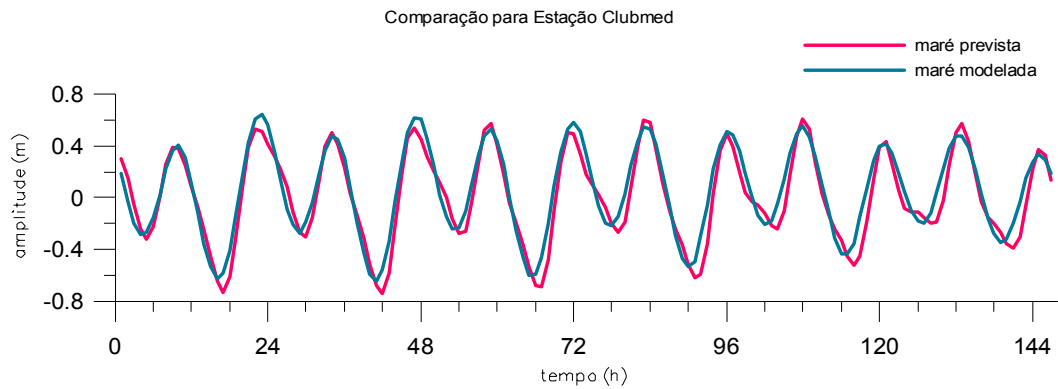


Figura 13: Séries temporais de elevação do nível do mar observado e modelado no Clubmed, Itacuruçá.

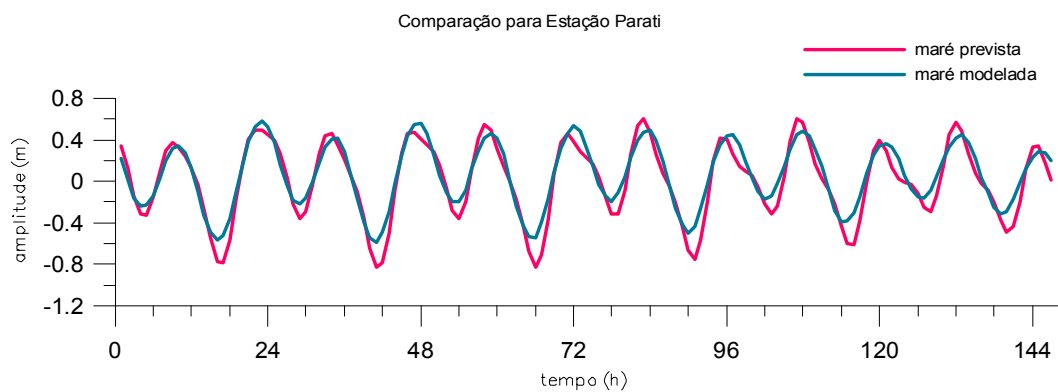


Figura 14: Séries temporais de elevação do nível do mar observado e modelado em Parati.

Para se obter um resultado que dê um caráter de qualificação à avaliação do modelo, utilizou-se o critério proposto por Walstra *et al.* (2002). Neste, os resultados da modelagem as observações são comparados através do parâmetro denominado Média Relativa do Erro Absoluto (RMAE), dado por:

$$RMAE = \frac{\langle |V_o - V_m| \rangle}{\langle |V_m| \rangle}$$

Para qualificar os resultados é utilizado a seguinte classificação (Tabela 2):

Tabela 2: Qualificação das faixas de erro para o RMAE.

Qualificação	RMAE
Excelente	<0,2
Bom	0,2 a 0,4
Razoável	0,4 a 0,7
Ruim	0,7 a 1,0
Péssimo	>1,0

Os resultados obtidos para cada estação são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3: Resultados do RMAE para as estações maregráficas

Estação	RMAE
Angra	0,32
Castelhanos	0,33
Clubmed	0,31
Parati	0,33

Para todas as estações a calibração mostrou bons resultados, evidenciando que o modelo hidrodinâmico pode ser considerado representativo para as correntes da região. Além da comparação com dados de elevação de maré, foram realizadas comparações com dados de corrente medida, conforme descrito a seguir.

IV.3.2. Campanha de Medição de Dados de Corrente

A campanha de coleta de dados foi realizada durante o período de 8 a 25 de setembro de 2005, no ponto situado em 23° 15' 03,54" S e 44° 12' 10,14" W. (BRASFELS/ECOLOGY, 2005).

Durante o período de medição, uma equipe de técnicos especializados permaneceu a bordo de uma embarcação de apoio monitorando o fundeio e retirando os dados periodicamente.

Nesta campanha foram utilizados dois equipamentos, posicionados a 10 metros abaixo da superfície e 10 metros acima do fundo do mar. As amostragens foram realizadas a cada 30 minutos, durante todo o período de medição.

Da Figura 15 a Figura 19 são apresentadas as séries temporais dos parâmetros: velocidade, direção, componentes zonal e meridional da corrente e temperatura da água do mar, obtidos nas medições de superfície e fundo.

A série temporal de velocidade de correntes (Figura 15) mostra valores similares entre a superfície e o fundo na maior parte do período amostrado. Apenas em curtos espaços de tempo, como ocorrido entre os dias 11/09 e 12/09 e entre 23/09 e 25/09, houve uma variação mais significativa entre as duas profundidades. Entre os dias 17 a 19 e 20 a 21, ocorreu um aumento da velocidade, que atingiu valores próximos a 40 cm/s. A Tabela 4 mostra os parâmetros estatísticos básicos para a velocidade de corrente.

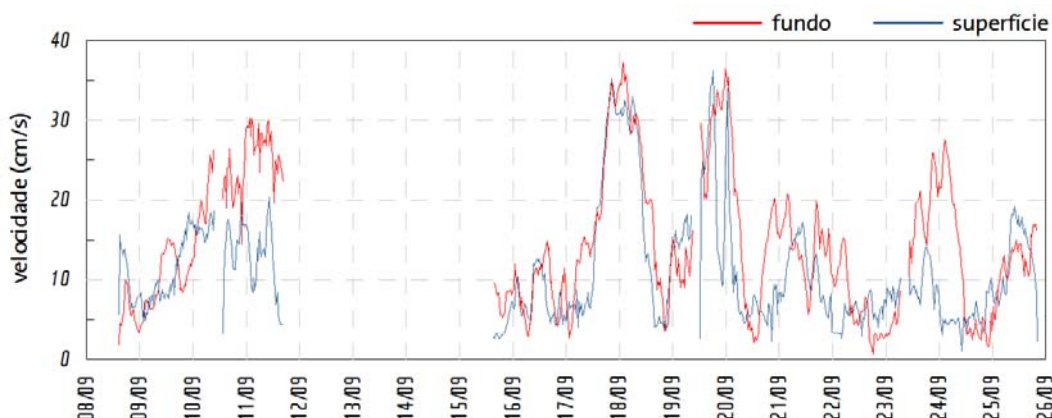


Figura 15: Série temporal de velocidade de corrente medida.

Tabela 4: Parâmetros Estatísticos da Velocidade de Corrente (cm/s)

Velocidade	máximo	mínimo	média	desvio padrão
superfície	36,20	1,00	11,23	7,19
fundo	37,20	0,60	14,53	8,73

Pode-se indicar que a velocidade de corrente no local nesse período foi de 11,23 cm/s \pm 7,19 na superfície e 14,53 \pm 8,73 no fundo e que a velocidade máxima atingida foi de 37,2 cm/s.

Com relação à direção, pode-se também observar boa concordância entre a superfície e o fundo, com poucos períodos de diferenças entre as duas profundidades, como entre os dias 8 e 10/09 e 23 e 24/09 (Figura 16). Na maior parte do tempo a direção variou entre 250 e 300° (SW e W) e entre 30 e 90° (NE e E). Pode-se observar também alguns giros da direção como no período entre 17 e 19/09, quando a direção variou gradativamente de NE para SW, efetuando um giro anticiclônico, característico da passagem de sistema frontal nessa região.

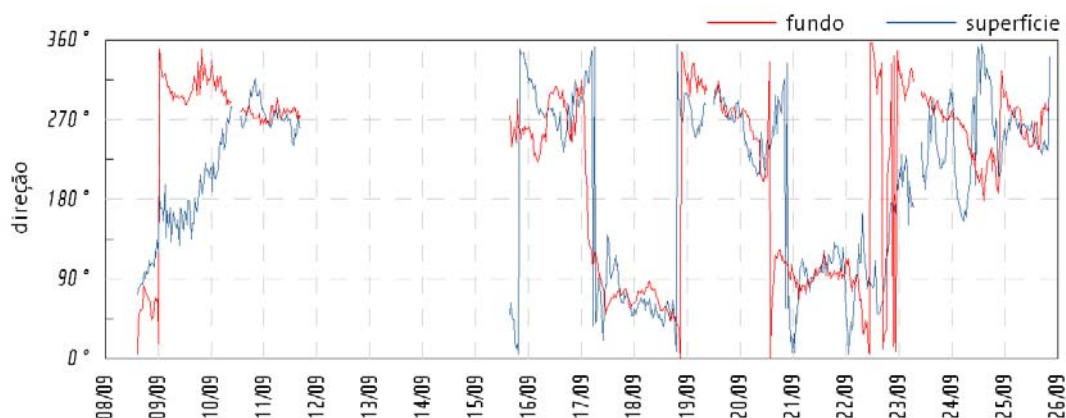


Figura 16: Série temporal de direção de corrente medida

Como a média da direção não é um parâmetro adequado para analisar essa variável, incluiu-se na Tabela 5 a moda (valor mais frequente), que indica que na maioria das vezes a direção da corrente foi W tanto na superfície, quanto no fundo, embora com grande variação, conforme observado nos altos valores de desvio-padrão.

Tabela 5: Parâmetros Estatísticos da Direção da Corrente (Valores em graus)

Direção	máximo	mínimo	média	desvio padrão
superfície	355.00	5.00	280.00	93.26
fundo	357.00	0.00	268.00	100.38

Uma maneira de se avaliar conjuntamente direção e velocidade é analisar as componentes vetoriais da corrente. Decompondo-se em componentes zonal (u) e meridional (v), pode-se observar a variação na direção norte-sul e leste-oeste da corrente, conforme mostram a Figura 17, Figura 18, Tabela 6 e Tabela 7.

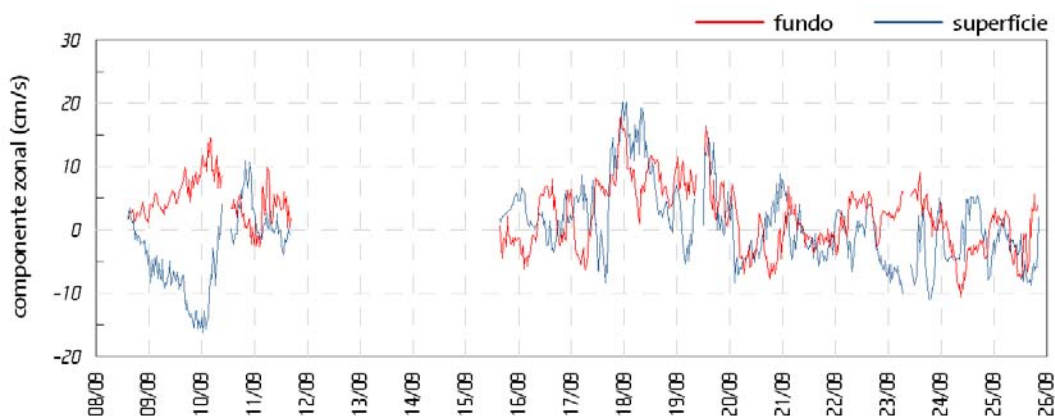


Figura 17: Série temporal da componente u da corrente medida.

Tabela 6: Parâmetros Estatísticos da Componente Zonal da Corrente (cm/s).

Componente u	máximo	mínimo	média	desvio padrão
superfície	33,84	-36,20	-11,15	11,58
fundo	35,93	-36,31	-9,97	15,53

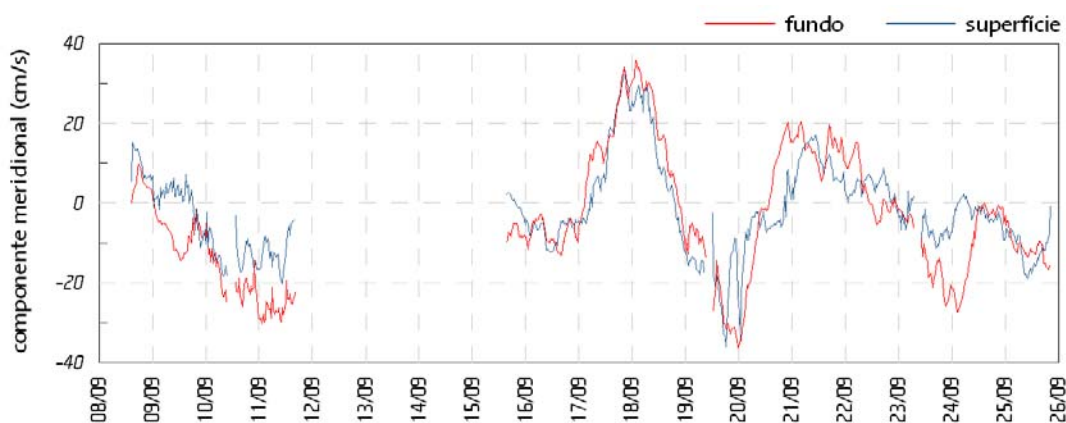


Figura 18: Série temporal da componente v da corrente medida.

Tabela 7: Parâmetros Estatísticos da Componente Meridional da Corrente (cm/s).

Componente v	máximo	mínimo	média	desvio padrão
superfície	20,21	-16,24	-12,83	6,37
fundo	17,78	-10,50	5,53	4,96

A série temporal da temperatura mostra que há pequena variação entre a superfície e o fundo (em torno de 0,5° C) na maior parte do tempo. Pode-se dizer que a temperatura em toda coluna d'água neste período variou entre 22 e 19,5° C.

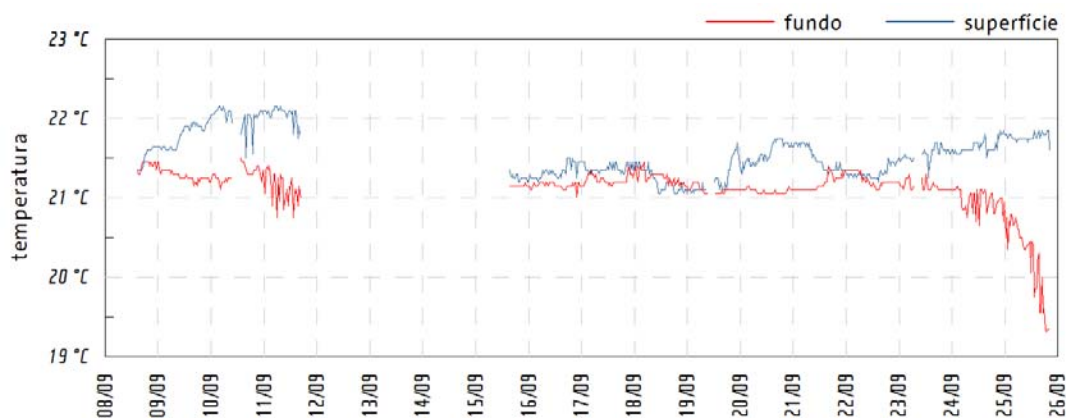


Figura 19: Série temporal da temperatura medida.

Os valores médios e os desvio-padrão da superfície e do fundo bastante similares indicam que a temperatura não apresentou variação significativa ao longo da coluna d'água (Tabela 8).

Tabela 8: Parâmetros Estatísticos da Temperatura da Água do Mar (°C).

Temperatura	máximo	mínimo	média	desvio padrão
superfície	23,80	21,05	21,55	0,30
fundo	21,50	19,30	21,12	0,29

Na Figura 20 e Figura 21 são apresentadas as rosas de corrente elaboradas com os dados coletados na superfície e no fundo, respectivamente.

As direções principais das correntes, tanto para superfície quanto para o fundo, no período de coleta oscilam entre W-SW e E-NE.

Observa-se, no entanto, uma maior frequência de ocorrência de correntes de W e SW. Tal corrente está associada aos ventos de direção leste e nordeste, que podem atingir velocidades consideráveis nessa região. Nota-se também que as velocidades associadas a essa direção são mais intensas, o que indica uma maior eficiência de transporte na direção SW/W, desde a superfície até o fundo.

Já as correntes de direção E/NE devem grande parte de sua energia aos ventos de sul/sudoeste associados aos sistemas frontais.

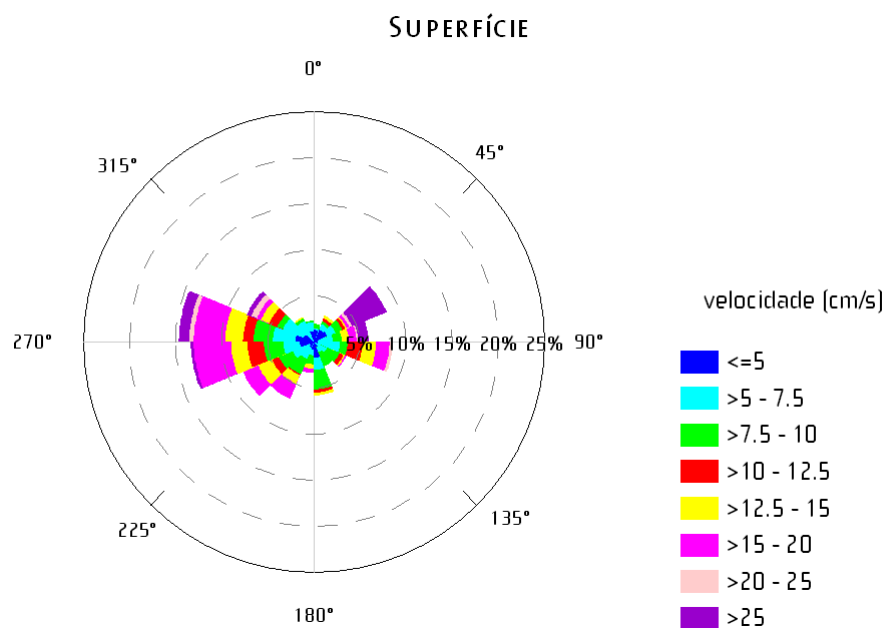


Figura 20: Rosa de correntes elaborada com os dados coletados na superfície.

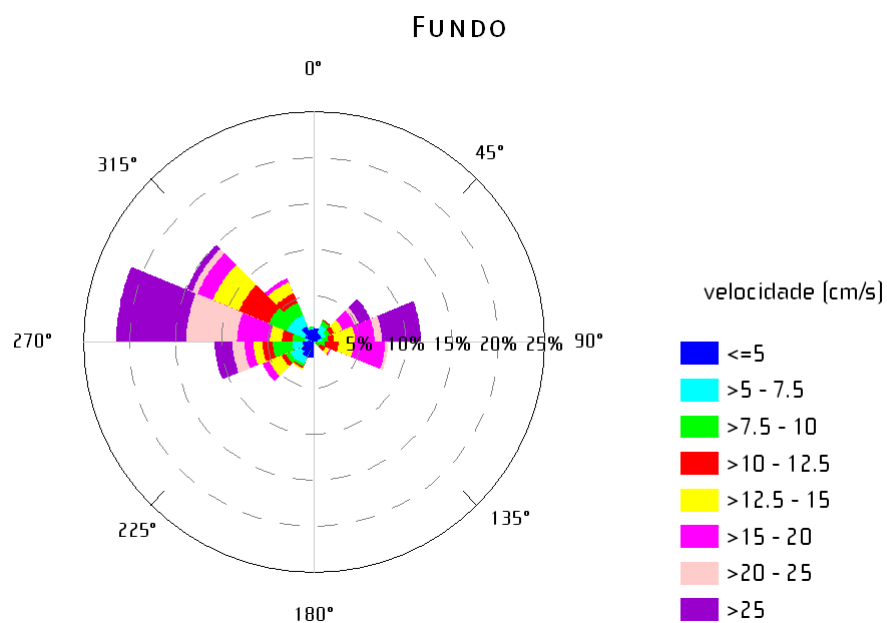


Figura 21: Rosa de correntes elaborada com os dados coletados no fundo.

Uma outra maneira de se avaliar a tendência do transporte das correntes é apresentada na Figura 22, que indica a distância percorrida por uma parcela de água ao longo de todo período. Nesse cálculo utilizou-se a velocidade média entre a superfície e o fundo, a fim de se observar a distância resultante durante todo o período medido.

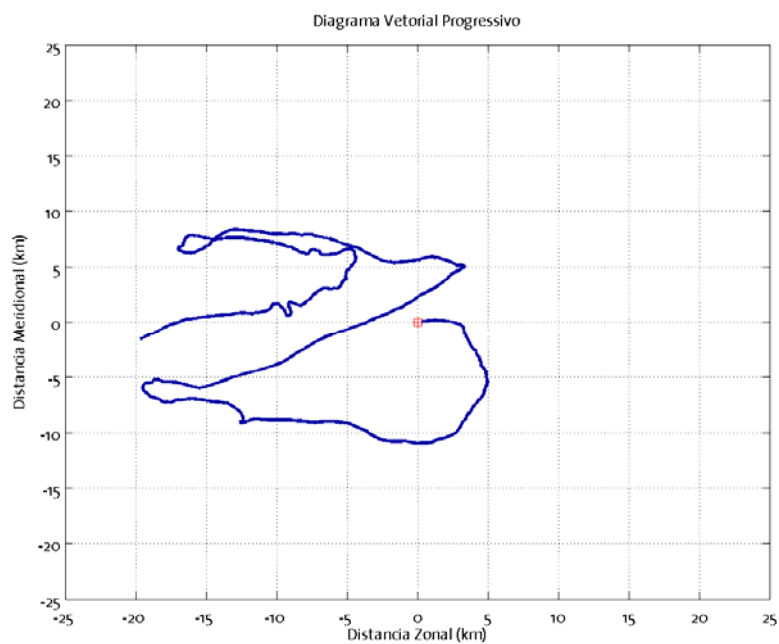


Figura 22: Diagrama Vetorial Progressivo da Corrente Média ao Longo da Coluna D'água.

Pode-se observar que há uma grande variação de direção no percurso ao longo dos 15 dias, porém há uma tendência de deslocamento para oeste. A partícula, ao final do período de medição, encontrar-se-ia a cerca de 20 km a oeste do ponto de partida.

Outra análise realizada foi a do espectro de energia das componentes de corrente. Nesta, pretende-se observar quais são as frequências (ou períodos) responsáveis pela maior parte da energia das correntes. Na Figura 23 observa-se que a maior parcela da energia da componente meridional da corrente (v) está associada à frequência de 0,008 ciclos por hora (ou 125 horas de período). Esse é o período correspondente às passagens de sistemas frontais nessa região, ou seja, o período em que os ventos variam entre E/NE e S/SW.

Já para a componente zonal (u), a maior parte da energia encontra-se na banda de frequência correspondente aos períodos entre 20 e 30 horas. Nessa faixa de períodos estão presentes três fenômenos principais; a oscilação inercial, o efeito de brisa e a componente

diurna da maré. Como a principal componente da maré na região é a semi-diurna e não há energia significativa no período de 12 horas em nenhuma das duas componentes, sugere-se que a maré não exerce papel de significativa importância nas correntes.

Logo, pode-se inferir que a componente v da corrente nessa região foi mais influenciada pelas passagens de frentes frias, enquanto os a componente u sofreu maior influência dos fenômenos com períodos próximos ao diurno e que a influência da maré é menor do que a dos ventos na geração das correntes no local.

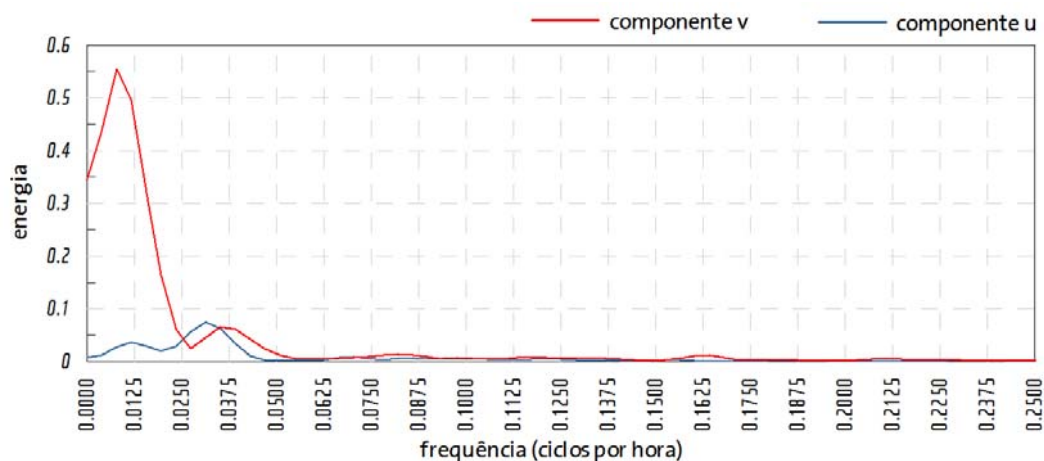


Figura 23: Espectro de Energia das Componentes Zonal e Meridional de Corrente.

A análise dos dados obtidos na campanha de medição de correntes e temperatura na região ao largo da Ilha Grande levou às seguintes conclusões:

Os dados de temperatura da água do mar e de velocidade e direção das correntes mostraram que não existiu variação significativa tanto em relação à estratificação da coluna d'água, quanto em relação à hidrodinâmica no período das medições. Ou seja, pode-se concluir que a dinâmica oceânica local possui caráter barotrópico.

A maior parte da energia das correntes está associada ao fenômenos meteorológicos em detrimento da maré. Portanto, o principal mecanismo de geração de correntes na região é o vento, cabendo à maré apenas a modulação (amplificação ou redução das intensidades, sem inversão do sentido) das correntes.

As direções predominantes da corrente na região foram W/SW e E/NE, (com maior tendência de transporte para a primeira), apresentando característica praticamente bi-

direcional. Tal fato está relacionado à dinâmica dos ventos, que nesse período oscilaram entre situação pré (E/NE) e pós-frontal (S/SW), com intensidades consideráveis em ambos os casos.

Ressalta-se que tais conclusões são apenas válidas para o período das medições, e para que possam ser generalizadas deve-se realizar medições em outros períodos. Porém para o objetivo principal do estudo, que é a comparação das medições com dados modelados, são suficientes e adequadas.

IV.3.3. Comparação com Modelo

Para obter sua avaliação, o modelo hidrodinâmico foi configurado de modo a tentar reproduzir as correntes observadas na campanha de medição. As condições de contorno utilizadas foram a maré reproduzida para o mês de setembro, conforme fornecida pelo modelo global FES95, já descrito. Para simular os ventos atuantes na região, foram utilizados dados das análises resultantes do sistema de análise e previsão global do tempo (GFS, na sigla em inglês), do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*).

Esse sistema gera diariamente dados atmosféricos globais, à partir de modelos de previsão e dados medidos *in situ*, assimilados nos modelos. Os dados são gerados 4 vezes ao dia (00Z, 06Z, 12Z e 18Z) com resolução espacial de 1° e temporal de 3 horas. Na Figura 24 é apresentada a série temporal das componentes *u* e *v* do vento para o período de medição dos dados.

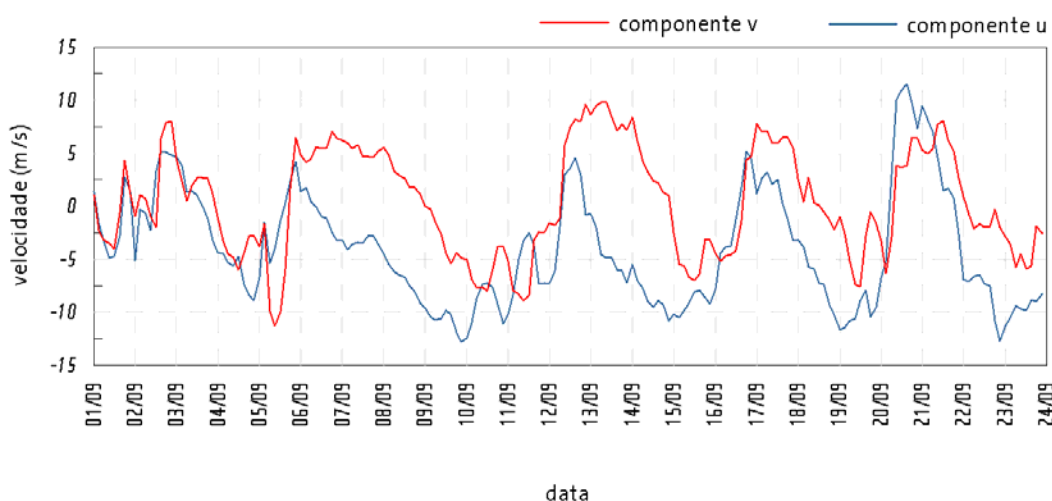


Figura 24: Série temporal de ventos obtida do GFS para o período de medição.

Pode-se observar, pelo módulo das componentes, a predominância das direções NE e SW ao longo de todo o período medido.

Os resultados do ponto de grade do modelo mais próximo ao ponto de medição, tanto em superfície, quanto próximo ao fundo foram comparados com os dados medidos (Figura 25 a Figura 30). Para uma melhor avaliação, as correntes foram decompostas nas componentes meridional (norte-sul) e zonal (leste-oeste).

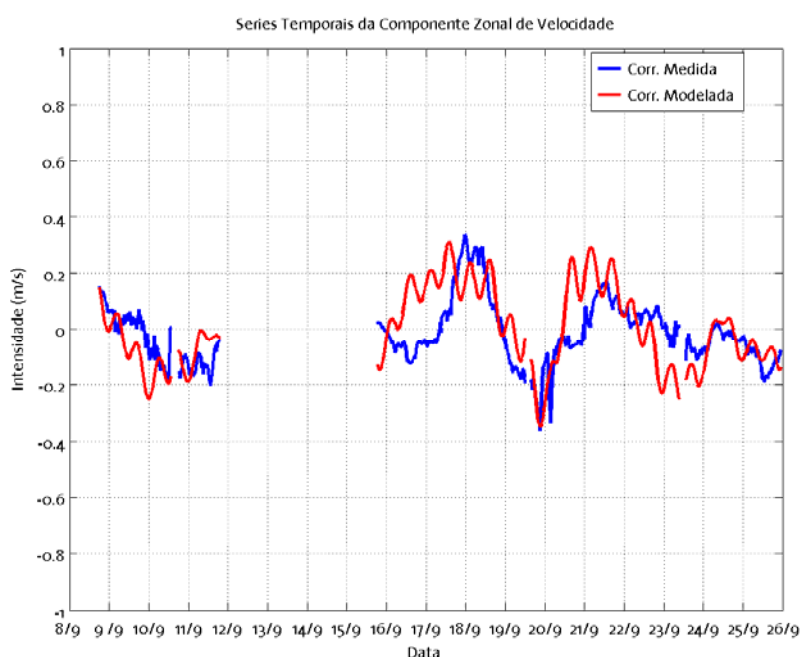


Figura 25: Séries temporais da componente zonal da corrente na superfície.

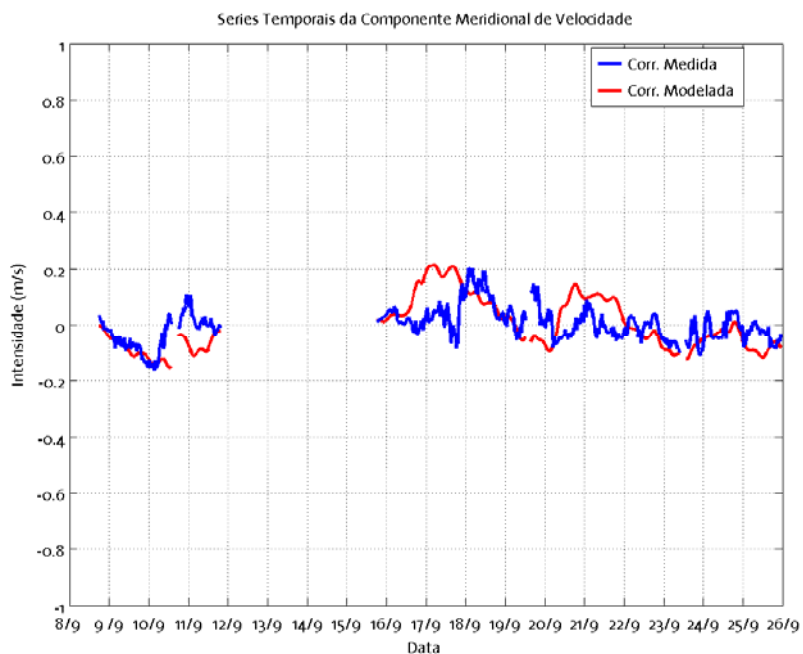


Figura 26: Séries temporais da componente meridional da corrente em superfície.

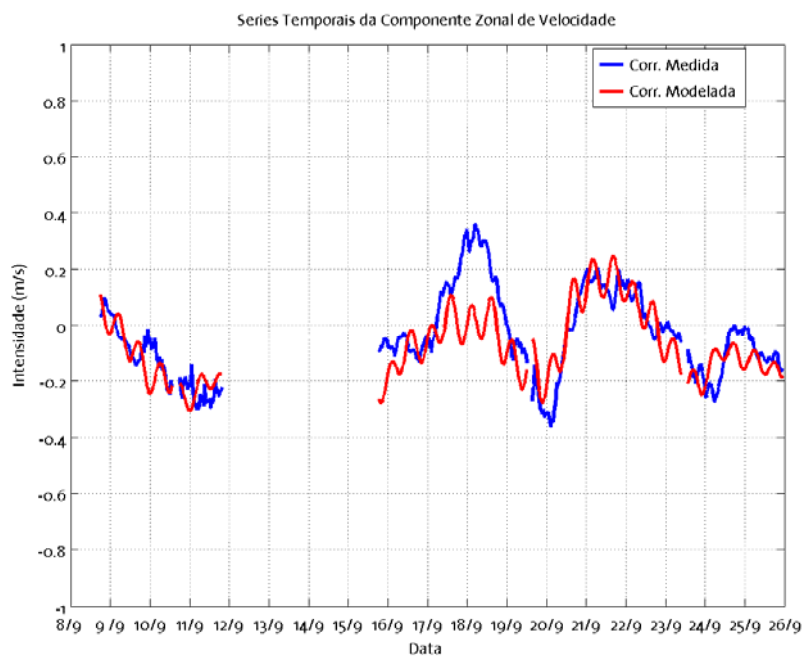


Figura 27: Séries temporais da componente zonal da corrente próxima ao fundo.

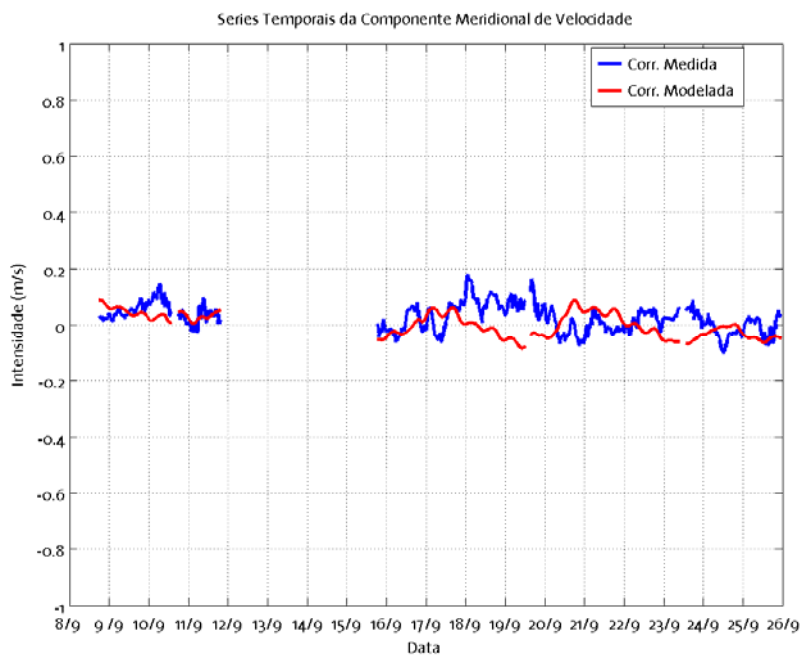


Figura 28: Séries temporais da componente meridional da corrente próxima ao fundo.

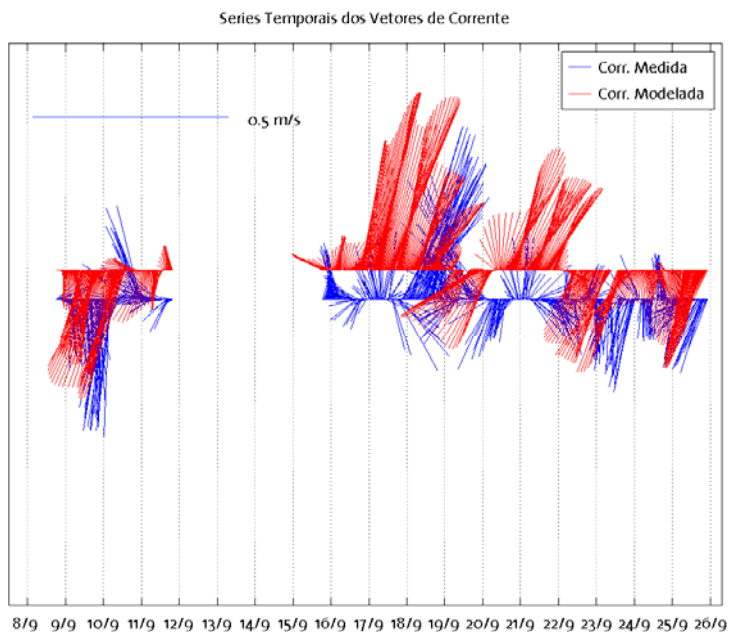


Figura 29: Séries temporais dos vetores de corrente em superfície.

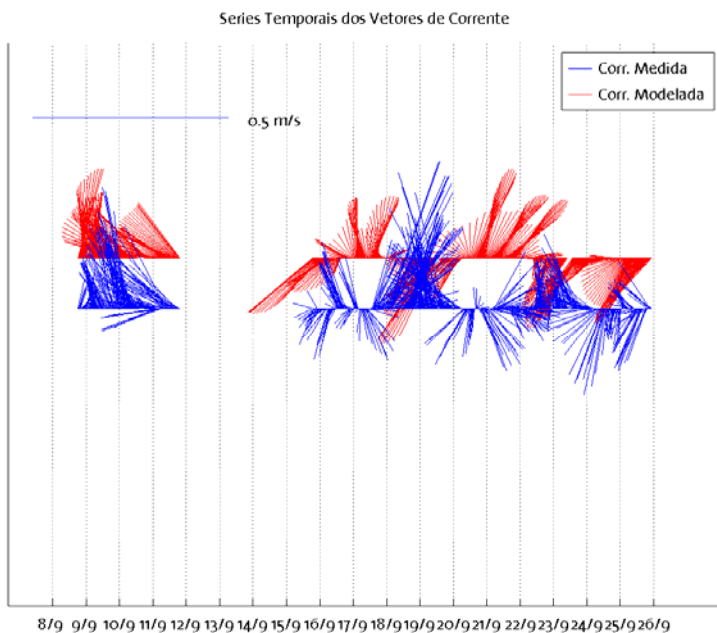


Figura 30: Séries temporais dos vetores de corrente próxima ao fundo.

Para se obter um resultado que dê um caráter de qualificação à avaliação do modelo, utilizou-se o critério proposto por Walstra *et al.* (2002). Neste, os resultados da modelagem as observações são comparados através do parâmetro denominado Média Relativa do Erro Absoluto (RMAE), dado por:

$$RMAE = \frac{\langle |V_o - V_m| \rangle}{\langle |V_m| \rangle}$$

Para qualificar os resultados é utilizado a seguinte classificação (Tabela 9):

Tabela 9: Qualificação das faixas de erro para o RMAE.

Qualificação	RMAE
Excelente	<0,2
Bom	0,2 a 0,4
Razoável	0,4 a 0,7
Ruim	0,7 a 1,0
Péssimo	>1,0

A Média Relativa do Erro Absoluto (RMAE) foi calculada para cada período contínuo de medição tanto na superfície, quanto no fundo para as componentes zonal e meridional. A Tabela 10 e Tabela 11 mostram os resultados obtidos.

Tabela 10: Resultados do RMAE para a componente zonal.

c	Superfície	Fundo
U1	0,33	0,09
U2	0,18	0,42
U3	0,38	0,2
U4	0,24	0,14
U5	0,2	0,21
Média	0,27	0,21

De maneira geral, todos os resultados foram classificados entre excelente e bom. A média geral para a componente zonal, considerando todos os valores da tabela é de 0,24, resultado classificado como bom, segundo o critério da Tabela 9.

Tabela 11: Resultados do RMAE para a componente meridional.

V	Superfície	Fundo
V1	0,13	0,6
V2	0,75	1,2
V3	0,45	0,63
V4	0,36	0,5
V5	0,25	0,51
Média	0,38	0,68

Os resultados para a componente meridional sofreram uma variação maior, sendo alguns excelentes, mas outros considerados ruins (Tabela 11). Como média geral para a componente meridional, o valor obtido foi de 0,53, considerado razoável.

A média geral, levando-se em conta todos os resultados é de 0,38, classificado como bom.

O modelo obteve melhores resultados para a componente zonal, em comparação com a meridional. Tal fato pode estar relacionado ao vento utilizado como condição de contorno, que não foi capaz de capturar em algumas ocasiões as condições locais com maior precisão. No entanto, na maioria do período considerado, o modelo foi capaz de reproduzir com sucesso as principais feições das correntes que ocorrem no local.

Pode-se concluir após a avaliação realizada com dados medidos *in situ* que o modelo hidrodinâmico obteve resultados que representam de maneira significativa as correntes que ocorrem nas proximidades do local de descarte.

Em função da distância entre o ponto de fundeio e o local de descarte foi realizada uma comparação entre resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico próximo ao local do fundeio e os obtidos para o Ponto C, pois se estes forem similares, pode-se considerar que o modelo está também calibrado para o exato local do descarte.

Essas comparações são mostradas da Figura 31 a Figura 34.

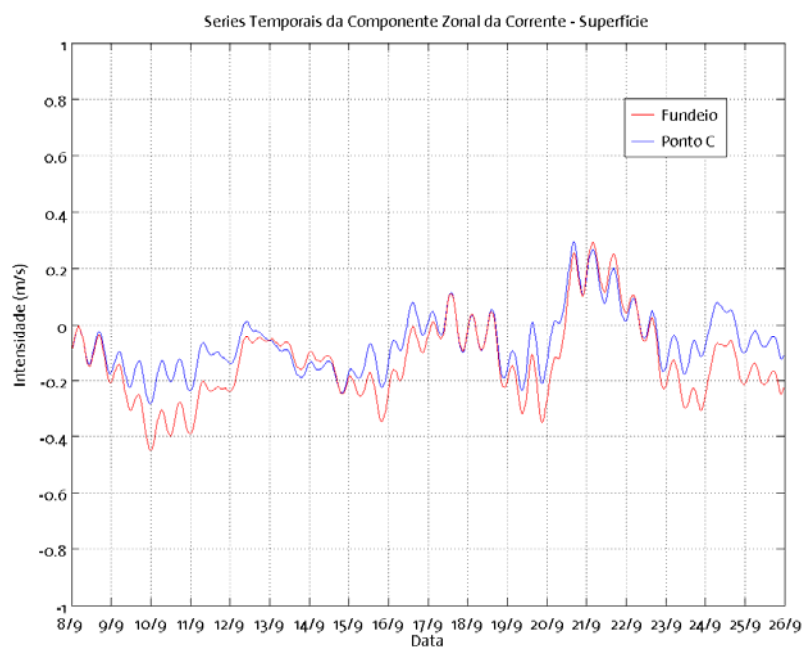


Figura 31: Séries temporais da componente zonal da corrente em superfície.

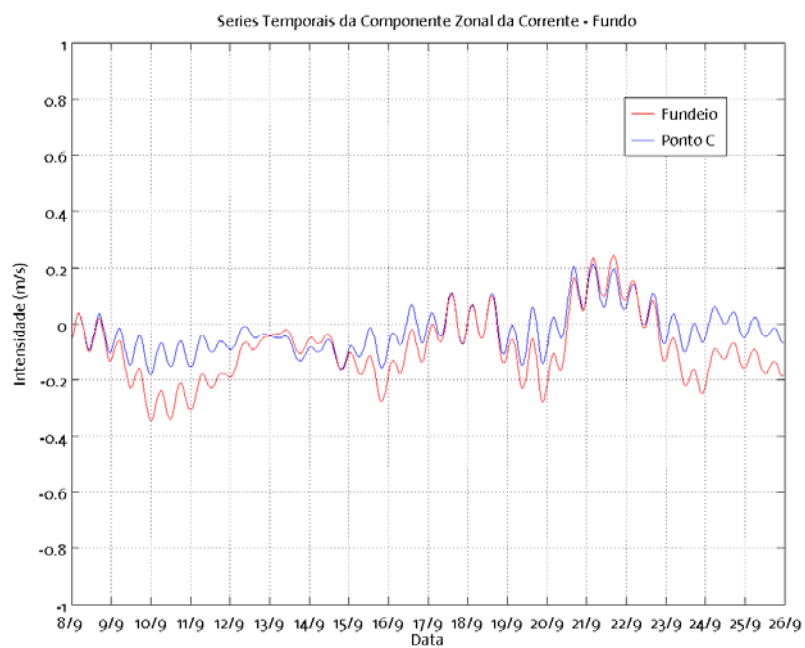


Figura 32: Séries temporais da componente zonal da corrente próxima ao fundo.

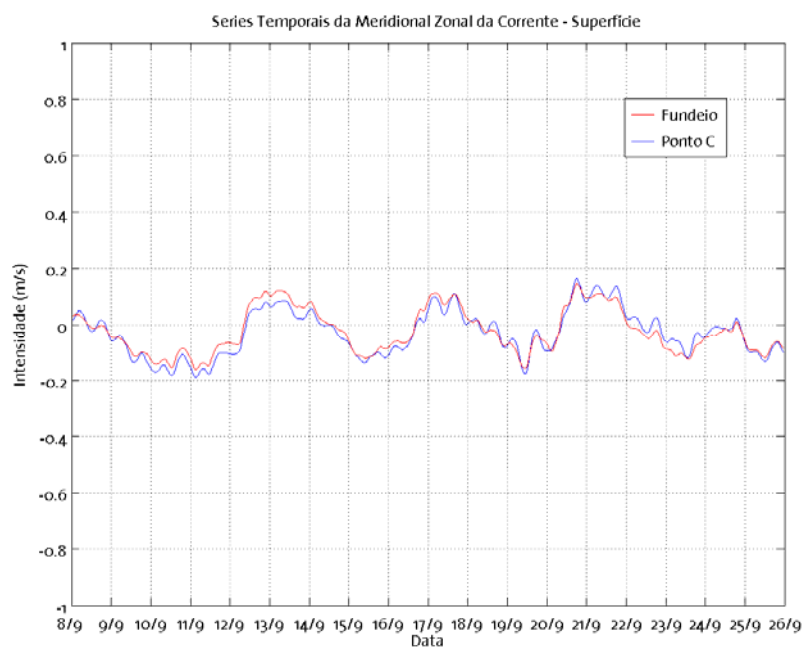


Figura 33: Séries temporais da componente zonal da corrente em superfície.

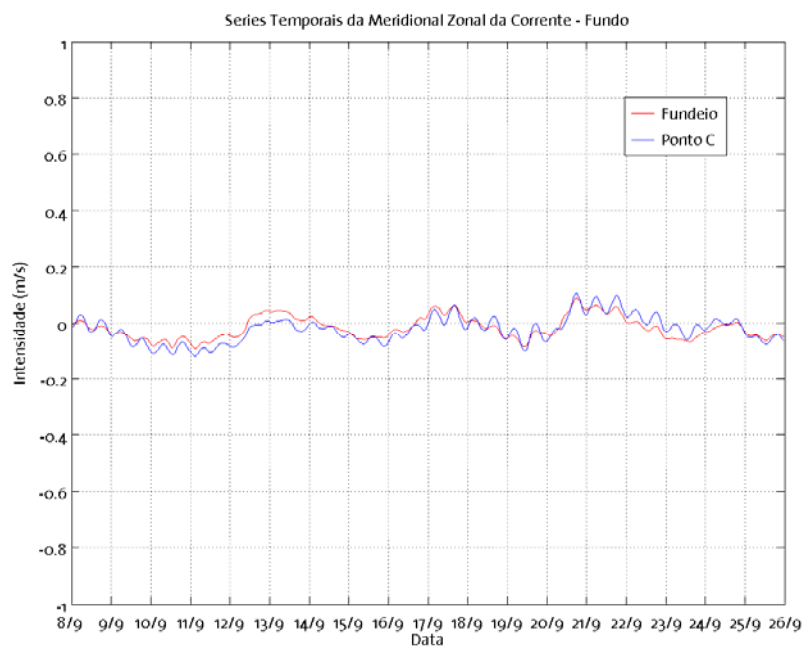


Figura 34: Séries temporais da componente meridional da corrente próxima ao fundo.

Pode-se observar que as correntes no ponto próximo ao fundeio e no ponto próximo ao Ponto C apresentam comportamento muito similar. Desta forma, pode-se concluir que a avaliação realizada apresenta resultados similares para o ponto do modelo mais próximo ao Ponto C.

A avaliação mostrou que os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico representam de maneira satisfatória as correntes da região e desta forma podem ser utilizados para as simulações do transporte do material na coluna d'água.

IV.4. Considerações sobre a modelagem hidrodinâmica

Um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional, capaz de reproduzir as correntes em baías e estuários foi implementado para a região das Baías de Sepetiba e Ilha Grande. A avaliação do modelo mostrou que os resultados são representativos para a região, pois as comparações com dados observados mostraram-se dentro de níveis de aceitação considerados bons.

Foram realizadas simulações com dois cenários ambientais distintos, típicos da dinâmica marinha e atmosférica da região, combinando a maré com ventos de quadrante leste e oeste.

Os resultados obtidos mostram características de circulação marinha distintas para a região da área de dragagem e do bota-fora. A primeira apresenta correntes menos intensas e por isso circulação mais restrita do que a segunda. Os ventos possuem influência relativa maior na área de dragagem, pois ali as profundidades são menores.

As correntes geradas pelo modelo hidrodinâmico são adequadas para serem utilizadas em modelos de transporte de material no oceano, para avaliar o comportamento do material despejado pela dragagem.

V. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM

V.1. Modelo Adotado

Para simular o comportamento dos sólidos lançados ao mar foi escolhido o modelo OOC (Offshore Operators Committee), desenvolvido por Brandsma & Smith (1999) para simular o comportamento de descargas de sólidos ou de alto gradiente de densidade na água do mar.

O comportamento no mar de descargas com estas características é dividido em três fases: ativa, colapso dinâmico e dispersão passiva. Para representar este comportamento, o modelo trabalha em três módulos distintos, encarregados, cada um, de uma diferente fase da pluma.

O primeiro módulo cuida da diluição inicial da pluma, representada em um modelo integral. Este módulo acompanha a evolução do efluente do momento que deixa a fonte até que encontre uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou até que se estabilize no nível de flutuação neutra. Esta fase, também conhecida como fase de jato, ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade com o meio ou pela velocidade de saída da fonte.

Finda a primeira etapa, o efluente se espalhará na profundidade em que se estabilizou devido ainda à diferença de densidade com o meio. Esta diferença tende a diminuir com o tempo e, em dado momento, sua contribuição para o espalhamento do efluente será inferior àquela dada pela turbulência do ambiente. Neste momento tem início a última fase, de dispersão passiva, onde o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte particulado, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. O OOC aplica a dispersão passiva separadamente para cada constituinte do efluente.

Com o OOC, é possível obter resultados para a concentração de sólidos suspensos e a espessura dos acúmulos de fundo formados pela decantação do material. Estes resultados são gerados pelo modelo em grades cuja resolução é determinada pelo usuário no início da simulação.

V.2. Cenários Simulados

De acordo com a descrição apresentada no capítulo IV (Modelagem Hidrodinâmica), 4 diferentes cenários ambientais serão considerados em cada ponto de descarte, a saber:

W_QUA_XXX: Ventos de quadrante oeste, maré de quadratura;

W_SIZ_XXX: Ventos de quadrante oeste, maré de sizígia;

E_QUA_XXX: Ventos de quadrante leste, maré de quadratura;

E_SIZ_XXX: Ventos de quadrante leste, maré de sizígia;

Onde XXX representa a região de descarte: CDF ou BTF (para bota-fora).

V.3. Dados de entrada

No modelo OOC são necessários os seguintes parâmetros:

- vazão;
- raio da fonte;
- profundidade de descarte;
- inclinação vertical;
- duração do descarte;
- densidade dos componentes sólidos;
- densidade do efluente.

A densidade do efluente nos descartes foi calculada por uma média ponderada entre os volumes V e as densidades ρ .

$$\rho_{\text{efluente}} = \rho_{\text{água}} \left(\frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{água}} + V_{\text{sedimento}}} \right) + \rho_{\text{sedimento}} \left(\frac{V_{\text{sedimento}}}{V_{\text{água}} + V_{\text{sedimento}}} \right)$$

Foi estimado que os descartes consistem em 50% de sedimento e 50 % de água do mar. Desta forma, considerando $\rho_{\text{água}} = 1025 \text{ Kg/m}^3$, $\rho_{\text{sedimento}} = 2120 \text{ Kg/m}^3$, chega-se a uma densidade de $\rho_{\text{efluente}} = 1572,5 \text{ Kg/m}^3$ para a descarga.

V.4. Construção da Matriz de Sólidos.

O comportamento da pluma de sólidos no mar está intrinsecamente ligado à velocidade de queda dos grão lançados, que, por sua vez, é função - principalmente - da granulometria do material. Para este estudo estavam disponíveis distribuições granulométricas obtidas a partir de 22 amostras do sedimento da região a ser dragada.

A partir destas amostras, foi calculada uma distribuição média de granulometrias para a qual foi calculada a velocidade de queda dos grão. Esta distribuição, bem como as obtidas das amostras do local, é apresentada na Figura 35.

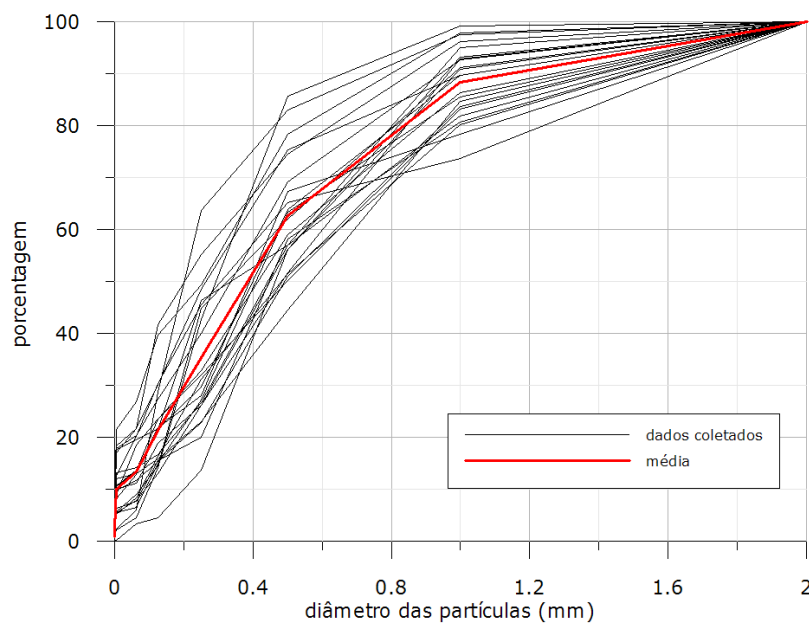


Figura 35: Distribuições de tamanho de partículas obtidas em análises granulométricas (linhas pretas) e distribuição genérica utilizada nas modelagens (linha vermelha).

Os tamanhos médios das partículas foram usados para calcular as velocidades de queda, de acordo com a Lei de Stokes, apresentada na equação a seguir:

$$w_{mat} = \frac{\sqrt{9Z^2\mu^2 + \frac{4}{3}WR^3(\rho_{mat} - \rho_{\acute{a}gua})g} - 3Z\mu}{WR\rho_{\acute{a}gua}}$$

Onde

- Z é o coeficiente de arraste de viscosidade (0,622) ,
- W é o coeficiente de arraste de pressão (0,5305),
- μ é a viscosidade dinâmica ($1,18 \times 10^{-2}$ dina-s/cm²),
- ρ_{mat} densidade do sedimento (2,12 g/cm³)
- $\rho_{água}$ densidade da água do mar (1,025 g/cm³)
- g aceleração da gravidade (980 cm/s²)

A matriz de sólidos obtida pode ser observada na Tabela 12.

Tabela 12: Fração de volume, diâmetro e velocidade de queda, utilizados nos descartes.

Classe	Fração do volume	diâmetro	velocidade de queda (m/s)
grao1	11,60	2,0 mm	0,1562
grao2	25,63	1,0 mm	0,1055
grao3	27,51	0,5 mm	0,0655
grao4	13,93	0,25 mm	0,0329
grao5	8,08	0,125 mm	0,0114
grao6	3,20	0,062 mm	0,0030
grao7	7,53	0,00394 mm	1,23E-05
grao8	1,79	0,0002 mm	3,17E-08
grao9	0,73	0,0001 mm	7,92E-09

A distribuição obtida para a mistura de água do mar e de sedimento foi estimada a partir da análise granulométrica do material. Este tipo de estimativa subestima a velocidade de queda dos menores grãos uma vez que não contempla o agrupamento destes em partículas maiores e, por consequência, com maiores velocidades de queda. Para corrigir este efeito, usa-se, no modelo, um coeficiente de ajuste, cujo valor indicado no manual (Brandsma & Smith, 1999) para estas ocasiões é de 28.

V.5. Duração das simulações

Conhecendo a profundidade na qual o efluente será descartado e a velocidade de queda de cada partícula, é possível avaliar o tempo de chegada das partículas ao assoalho

oceânico, simplesmente pela divisão da camada a ser percorrida e a velocidade de queda de cada classe de grão. De acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1, os tempos obtidos para cada descarte são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Tempos estimados para cada classe de sólido nos descartes previstos.

Classe	tempo (horas)	
	CDF	BOTA-FORA
1	0,0018	0,0889
2	0,0026	0,1317
3	0,0042	0,2119
4	0,0085	0,4227
5	0,0244	1,2202
6	0,0922	4,6120
7	22,5806	1129,0286
8	8763,2671	438163,3552
9	35053,0883	1752654,4161

A representação gráfica dos tempos de queda estimados, para cada classe de grão com seu respectivo volume percentual, pode ser observada na Figura 36.

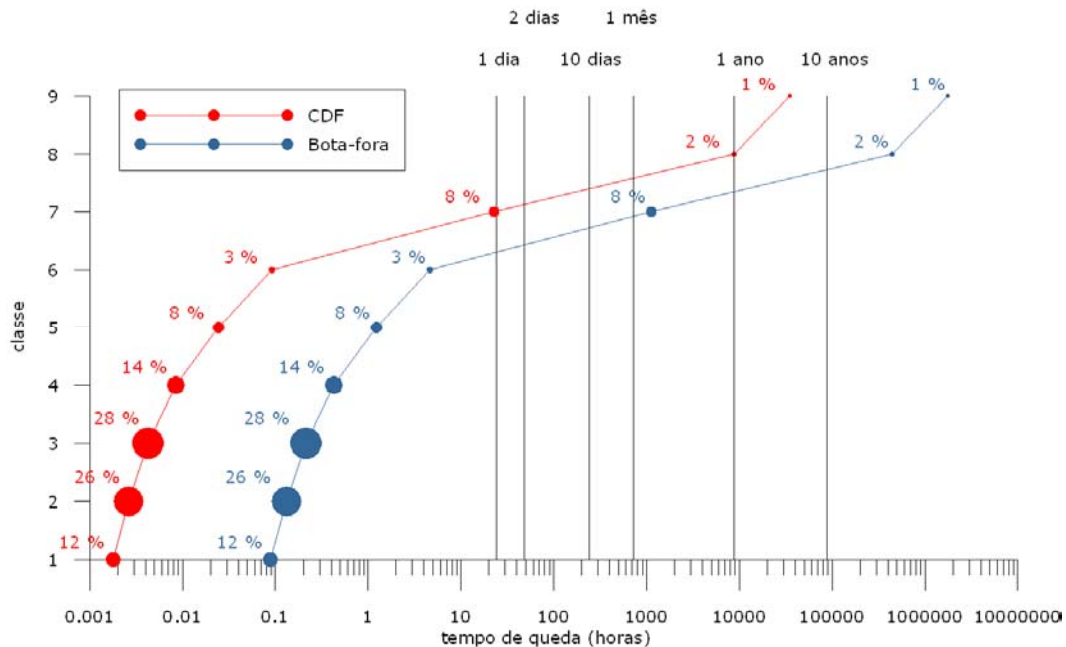


Figura 36: Tempo de queda das partículas de acordo com a classe granulométrica de cada tipo de descarte. Os círculos preenchidos representam a fração de volume que cada classe representa.

Observa-se que no descarte do CDF, 97% do volume sólidos depositam-se em até 24 horas (sendo 89% antes de 1 hora). Já no descarte do bota-fora, 86 % depositam-se antes de 1 hora. As demais partículas, em ambos descartes, depositam-se somente após 1 mês em suspensão.

Assim, visando abranger, tanto a periodicidade das marés na região quanto o tempo necessário para a retirada da maior parte do material na coluna d'água, todas as simulações foram realizadas para um período de 24 horas.

VI. RESULTADOS

A seguir, os resultados serão apresentados separadamente por cenário e região de descarte. Seguindo solicitação da Ecology, foram realizadas estimativas de sólidos em suspensão para a região de CDF e estimativas de sólidos em suspensão e pilhas de deposição para a região de bota-fora. Em cada cenário constarão, além de instantâneos das plumas nos máximos de maré vazante e enchente e nos estofos de preamar e baixa-mar, uma integração dos resultados através da identificação de concentrações máximas e médias no local.

O modelo OOC fornece a massa total de sólidos em suspensão em cada ponto de grade utilizado. A concentração dos sólidos foi calculada considerando uma média na coluna d'água, calculada de acordo com o valor de batimetria em cada ponto.

VI.1. CDF

De forma a facilitar a visualização, na Figura 37 é apresentada a localização do detalhe usado nas figuras dos resultados para o CDF em uma visão ampla, situando-o na Baía de Sepetiba.



Figura 37: Localização da grade usada no estudo da pluma de sólidos no ponto de descarte para o CDF.

VI.1.1. W_QUA_CDF

A seguir são apresentadas figuras (Figura 38 a Figura 43) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante oeste com maré de quadratura (W_QUA_CDF) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

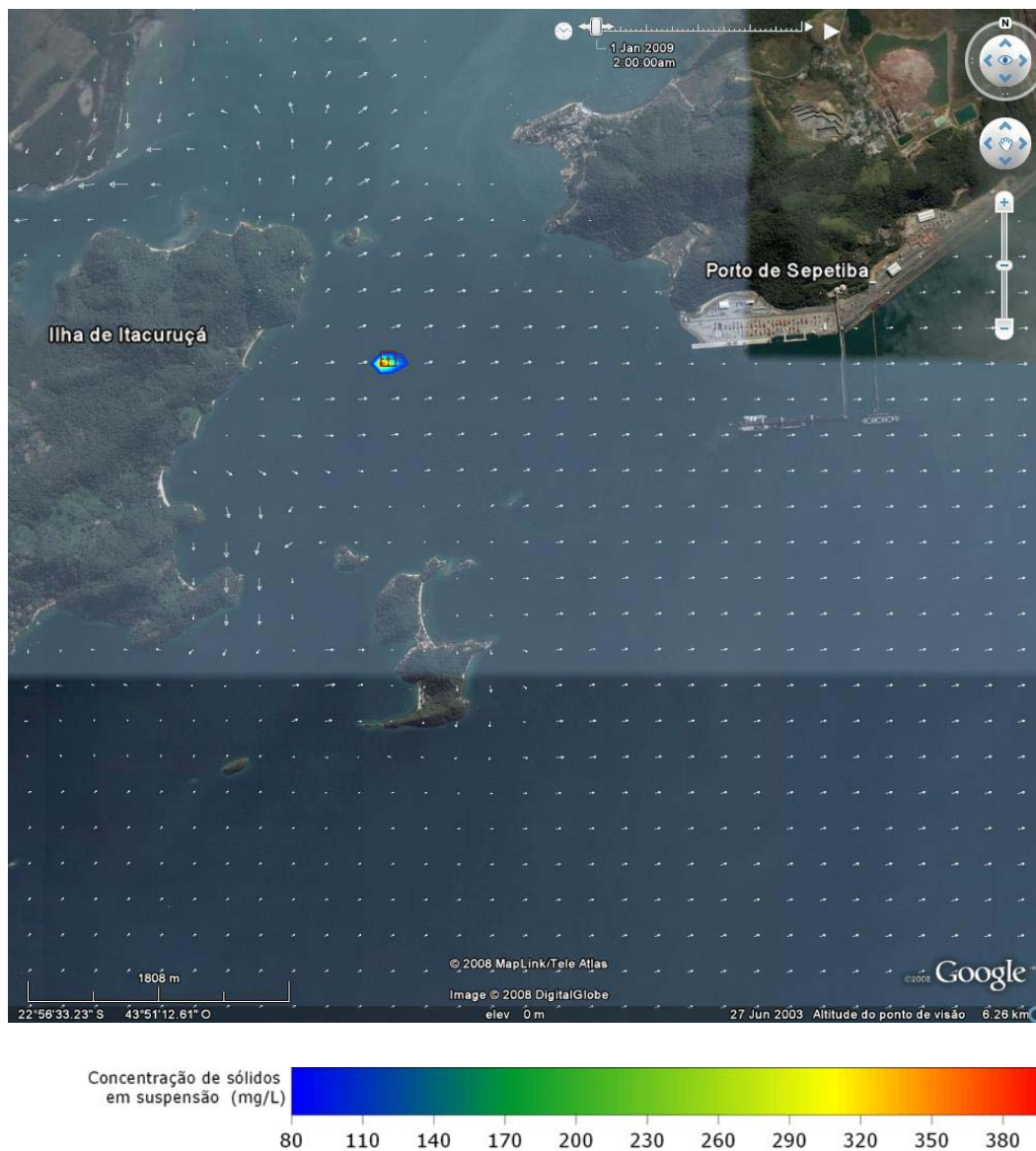


Figura 38: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário W_QUA_CDF.

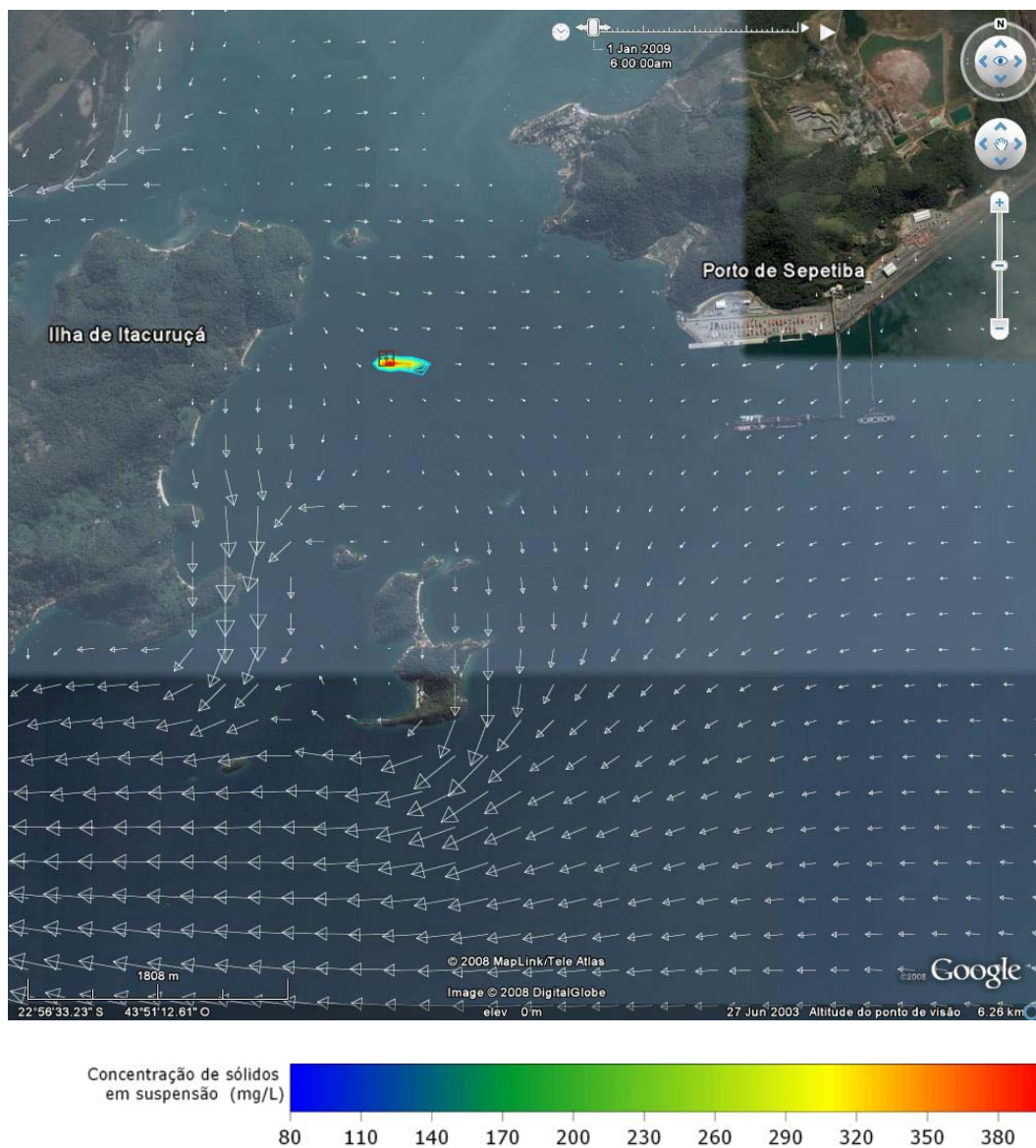


Figura 39: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário W_QUA_CDF.

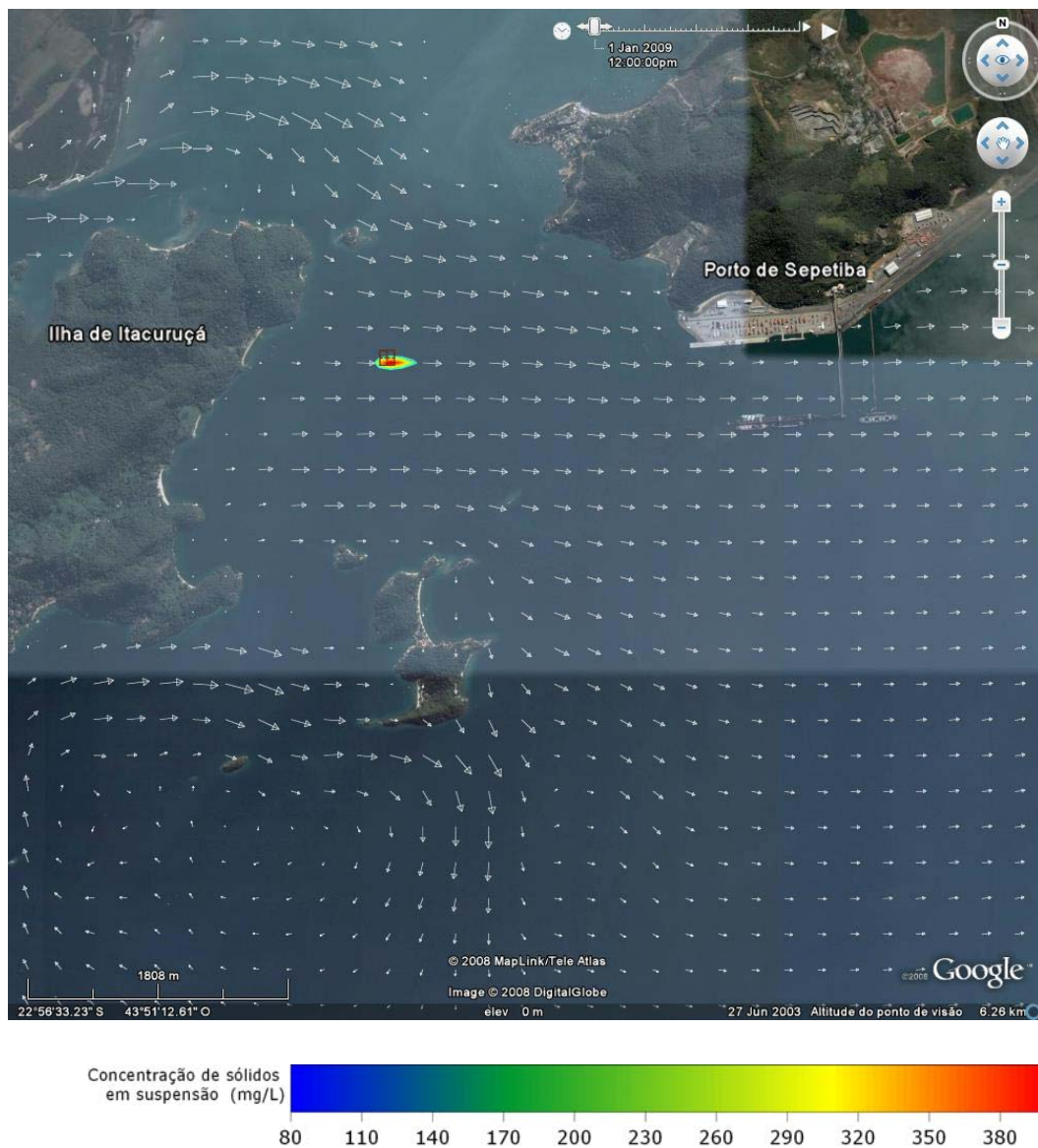


Figura 40: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário W_QUA_CDF.

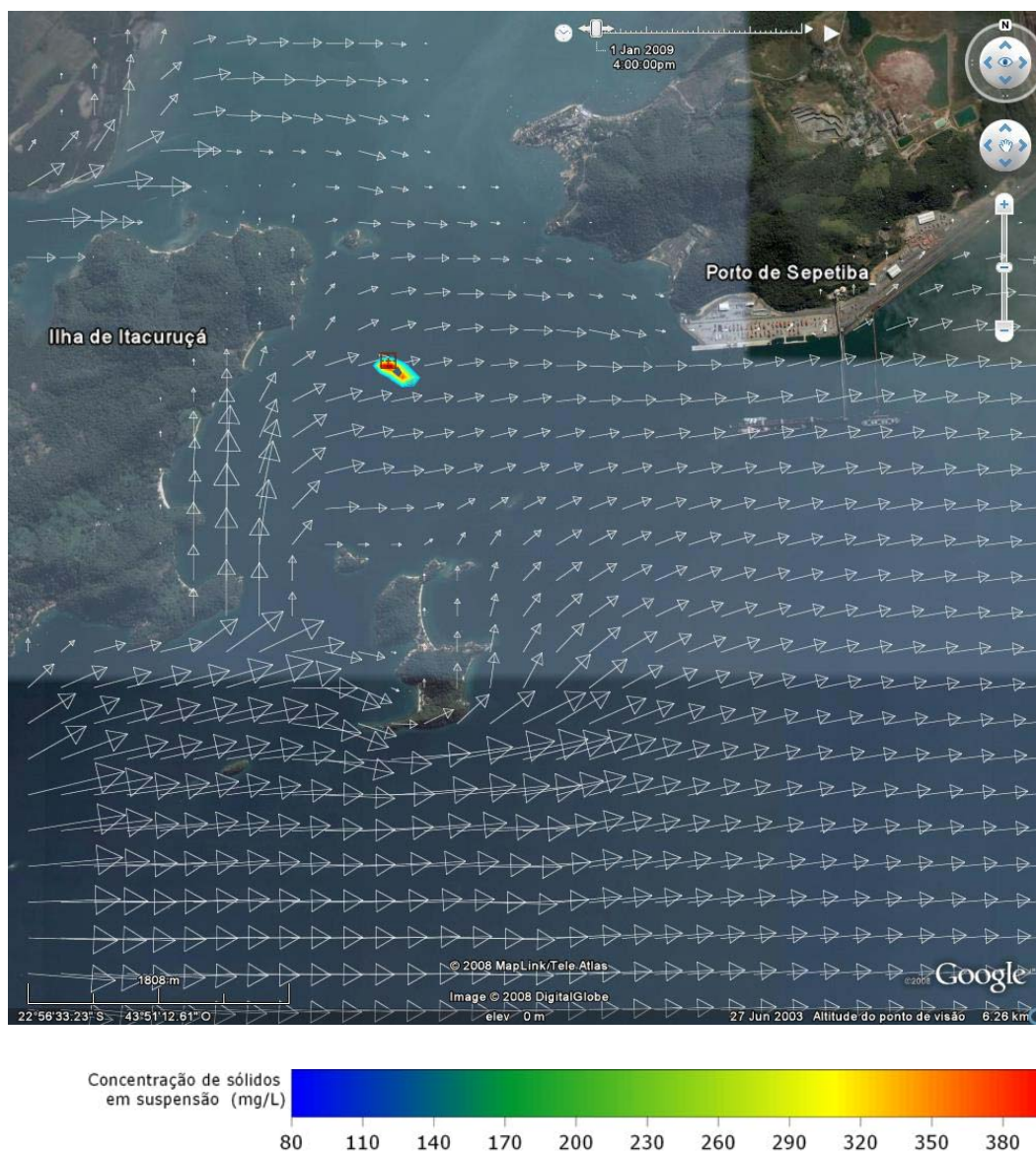


Figura 41: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário W_QUA_CDF.

Pode-se observar que a pluma de sólidos em suspensão, considerando o limite de 80mg/l, fica restrita ao redor do ponto de descarte. Nesse cenário, em virtude dos ventos forçarem as correntes mais para a direção leste, há uma tendência maior de deslocamento da pluma nessa direção. A maior extensão da pluma em relação ao ponto de lançamento foi de 350 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário W_QUA_CDF, independentemente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma possui extensão de 615 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com as máximas concentrações estende-se em direção leste em relação ao ponto de descarte.

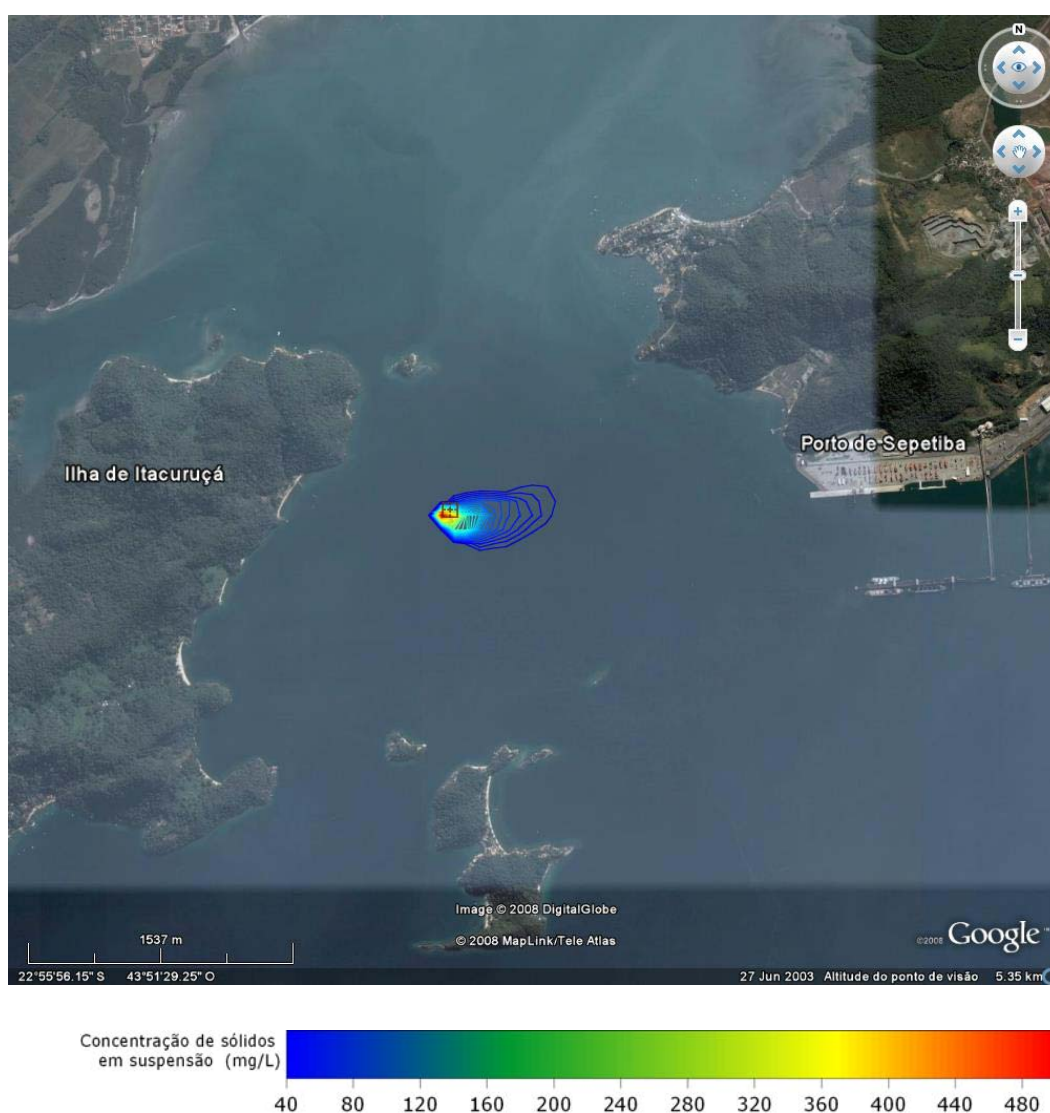


Figura 42: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação W_QUA_CDF.

Da mesma forma, são apresentadas as concentrações médias encontradas durante todo o período para o cenário W_QUA_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que a pluma possui extensão de 250 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com as máximas concentrações estende-se em direção leste em relação ao ponto de descarte.

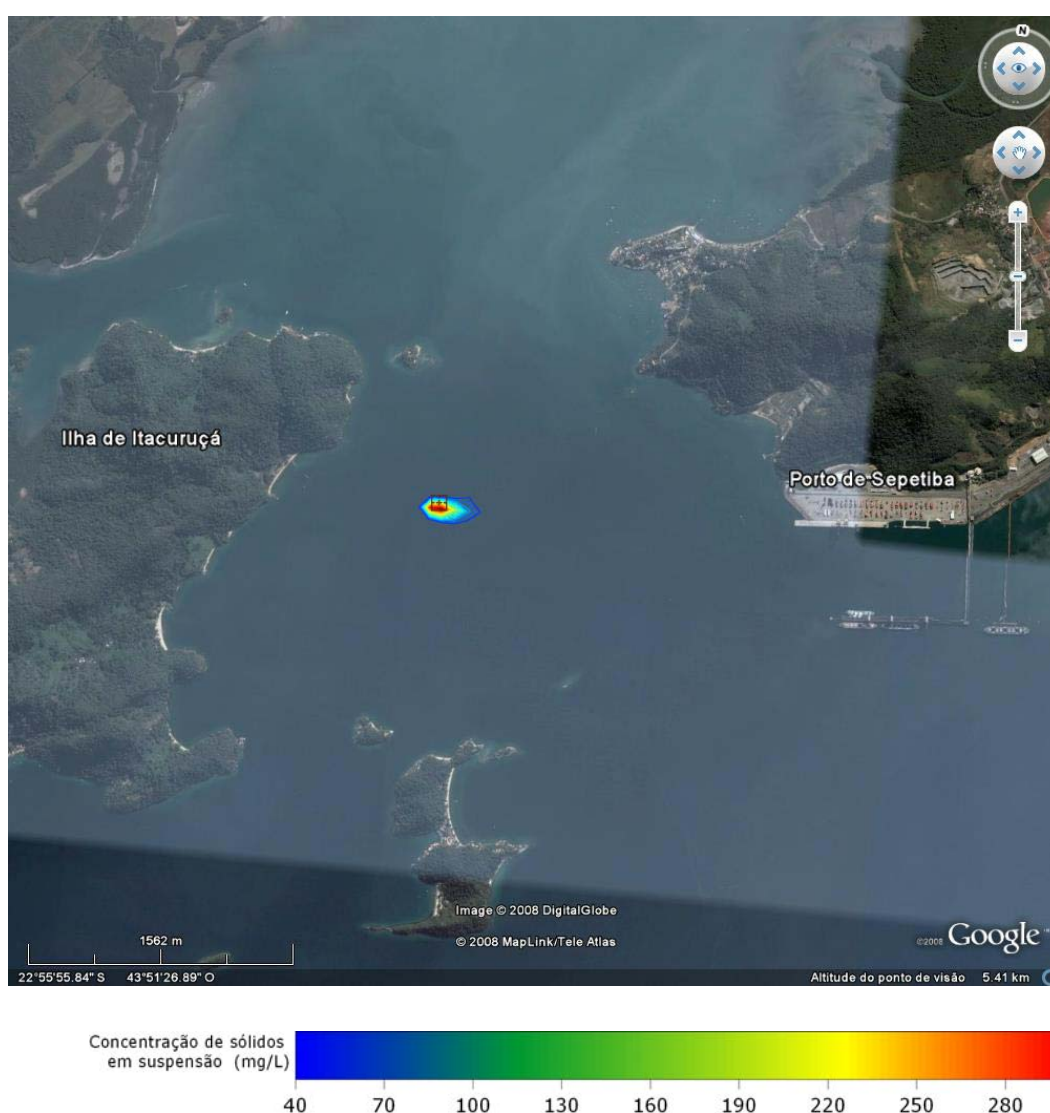


Figura 43: Concentração média de sólidos em suspensão durante a simulação W_QUA_CDF.

VI.1.2. W_SIZ_CDF

A seguir são apresentadas figuras (Figura 44 a Figura 49) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante oeste com maré de sizígia (W_SIZ_CDF) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

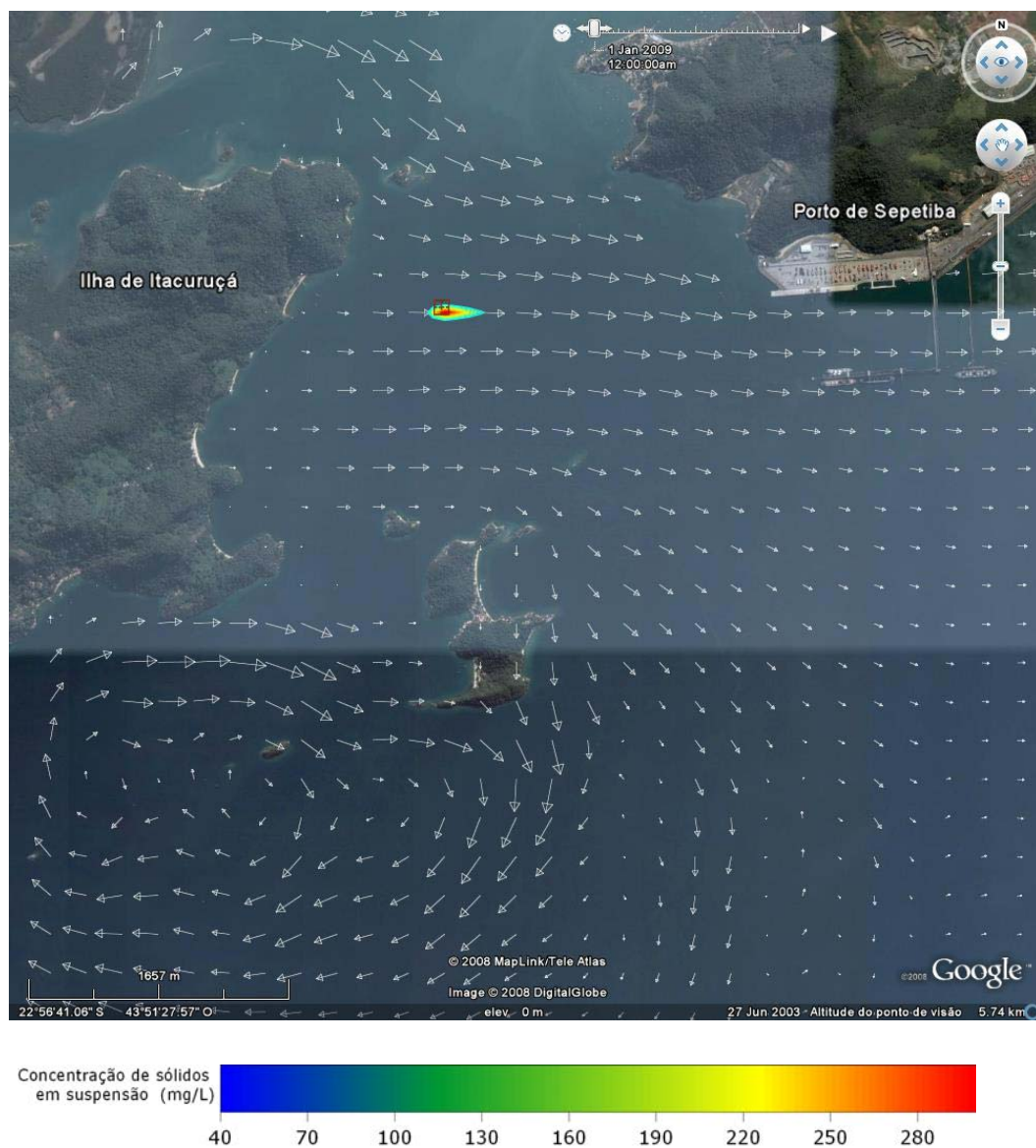


Figura 44: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário W_SIZ_CDF.

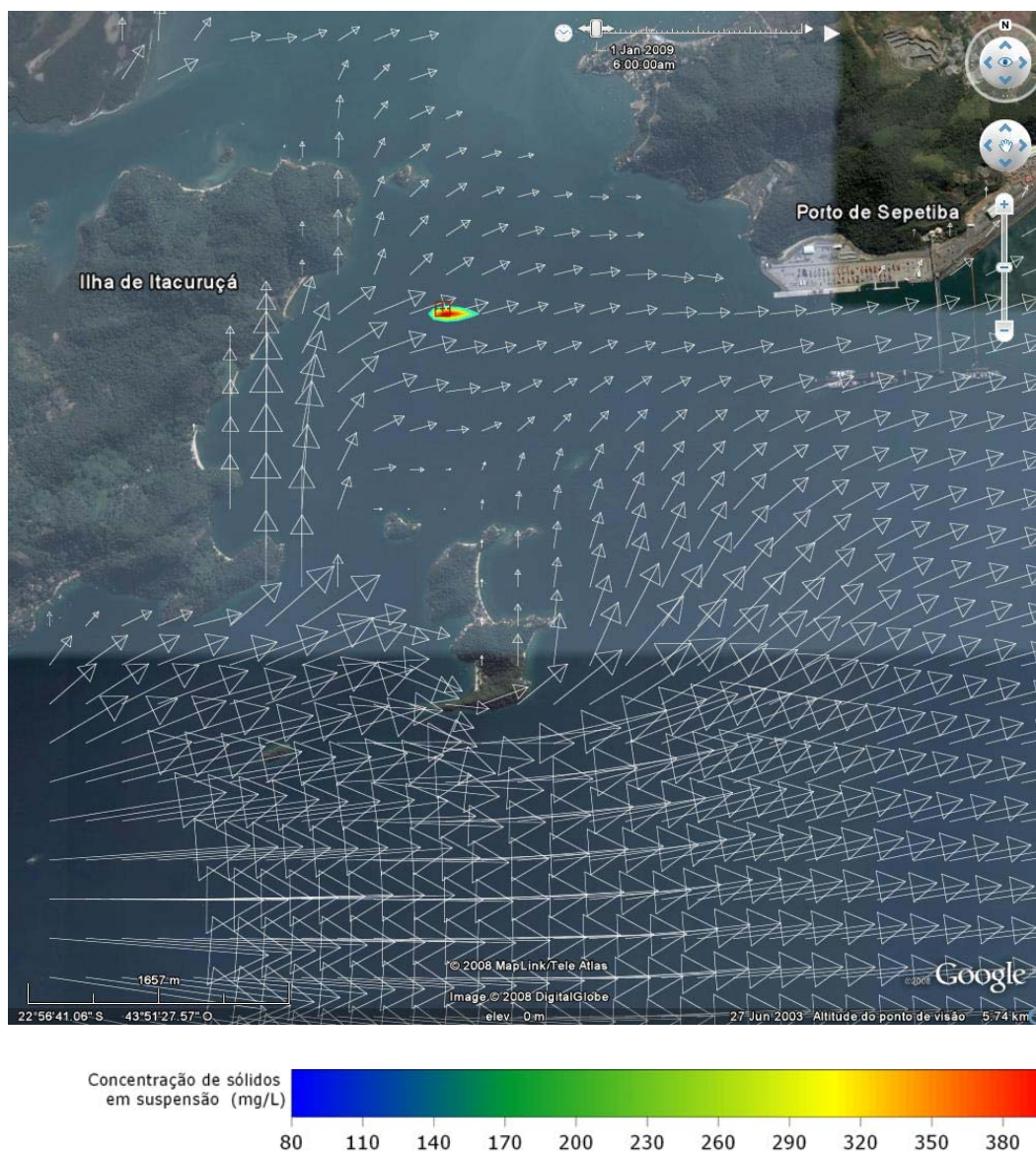


Figura 45: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário W_SIZ_CDF.

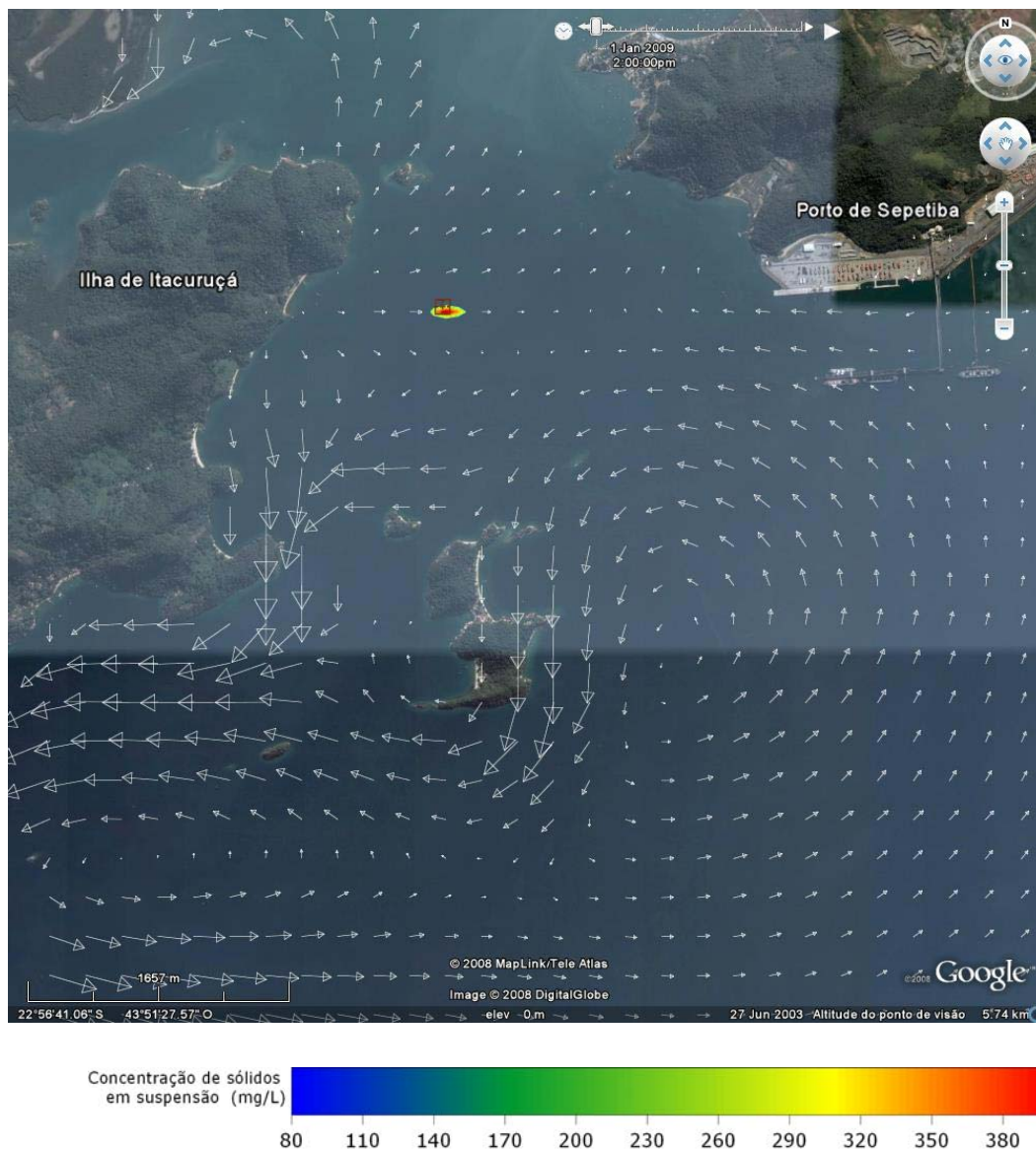


Figura 46: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário W_SIZ_CDF.

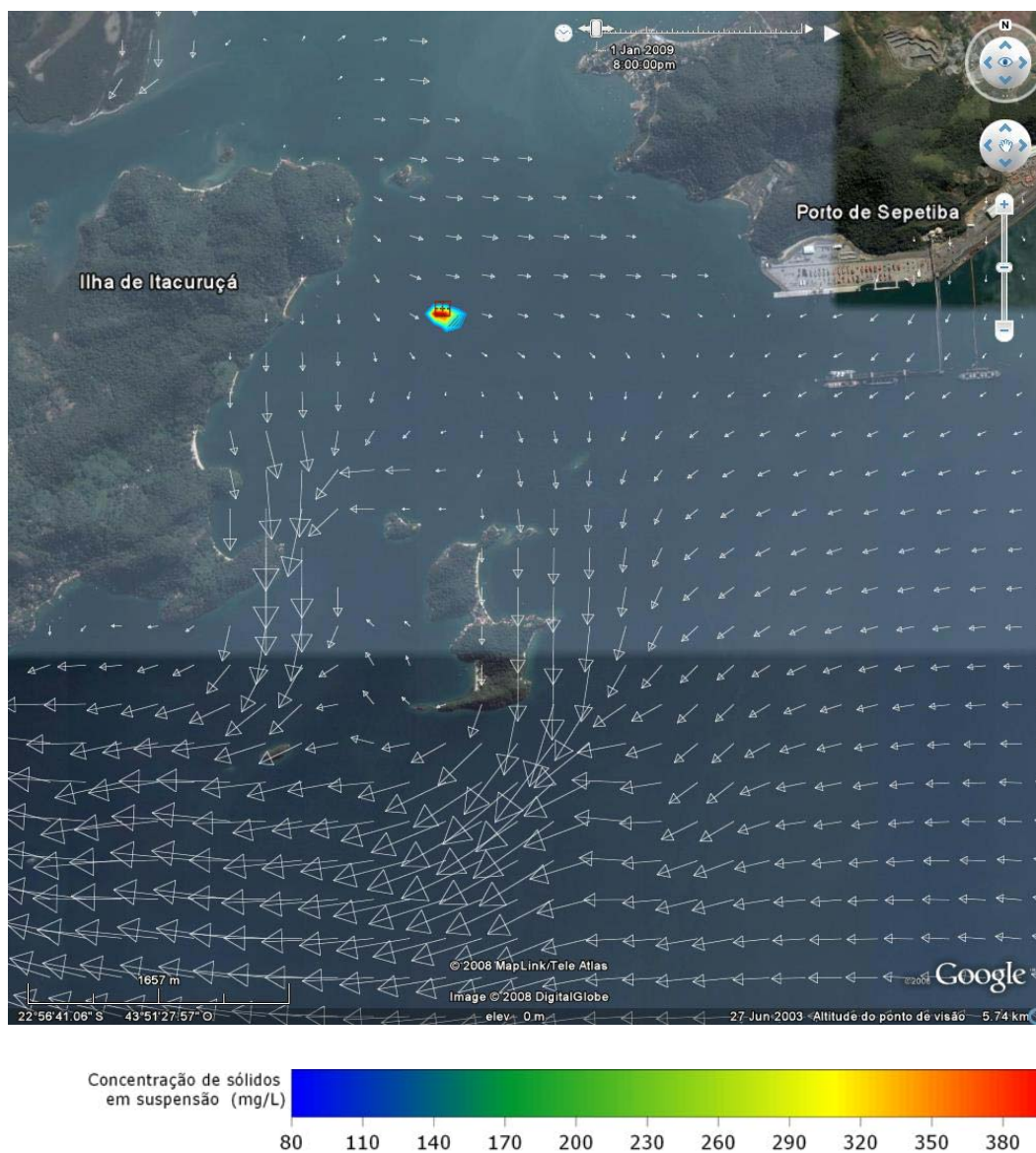


Figura 47: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário W_SIZ_CDF.

Pode-se observar também nesse cenário que a pluma de sólidos em suspensão, considerando o limite de 80mg/l, fica restrita ao redor do ponto de descarte. Nesse cenário, em virtude dos ventos forçarem as correntes mais para a direção leste, há uma tendência maior de deslocamento da pluma nessa direção. A maior extensão da pluma em relação ao ponto de lançamento foi de 340 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário W_SIZ_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma possui extensão de 595 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com as máximas concentrações estende-se em direção leste em relação ao ponto de descarte.

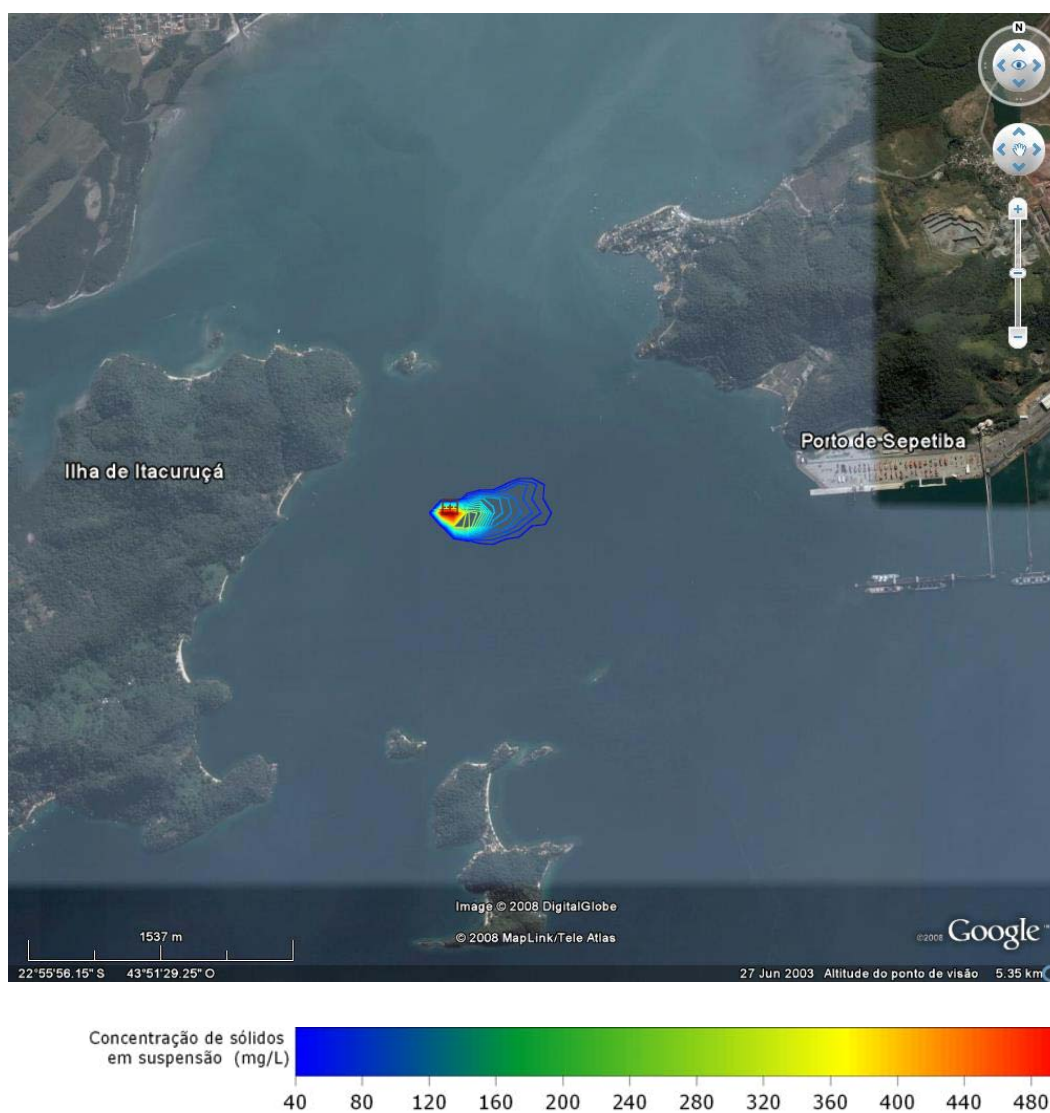


Figura 48: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação W_SIZ_CDF.

Da mesma forma, são apresentadas as concentrações médias encontradas durante todo o período para o cenário W_SIZ_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que a pluma possui extensão de 270 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com concentração média estende-se em direção leste em relação ao ponto de descarte.

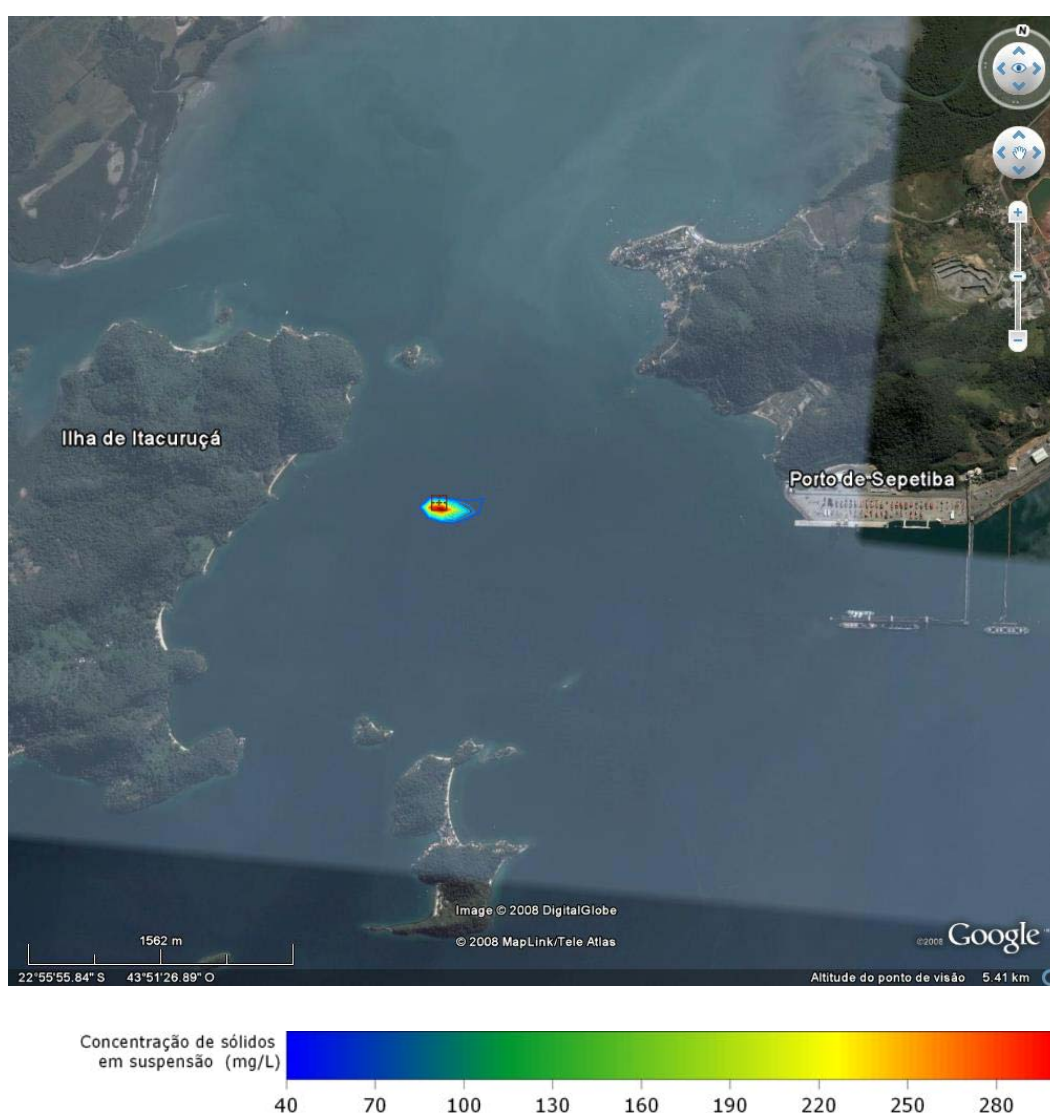


Figura 49: Concentração média de sólidos em suspensão durante a simulação W_SIZ_CDF.

VI.1.1.1. E_QUA_CDF

A seguir são apresentadas figuras (Figura 50 a Figura 55) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante leste com maré de quadratura (E_QUA_CDF) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

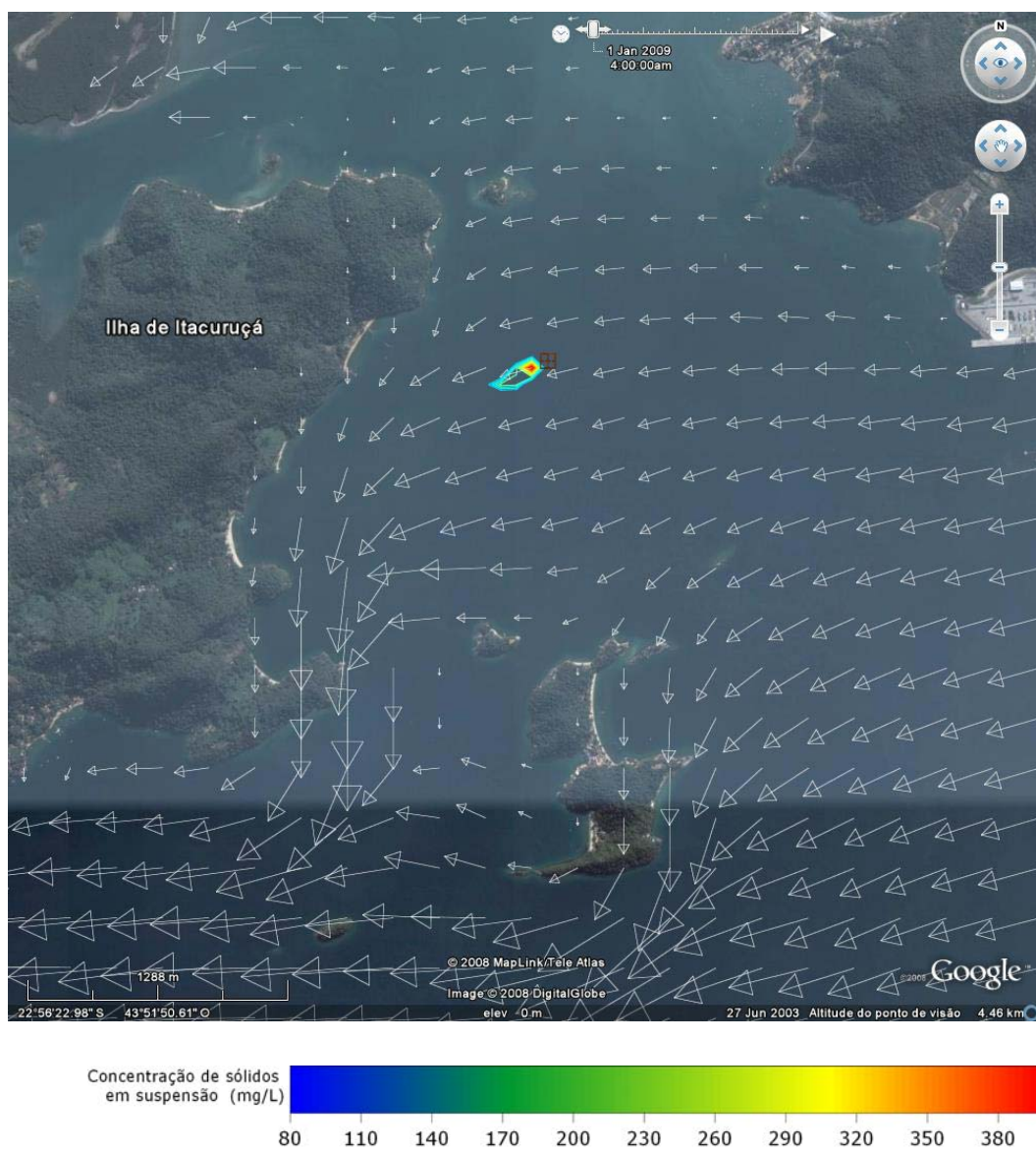


Figura 50: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário E_QUA_CDF.

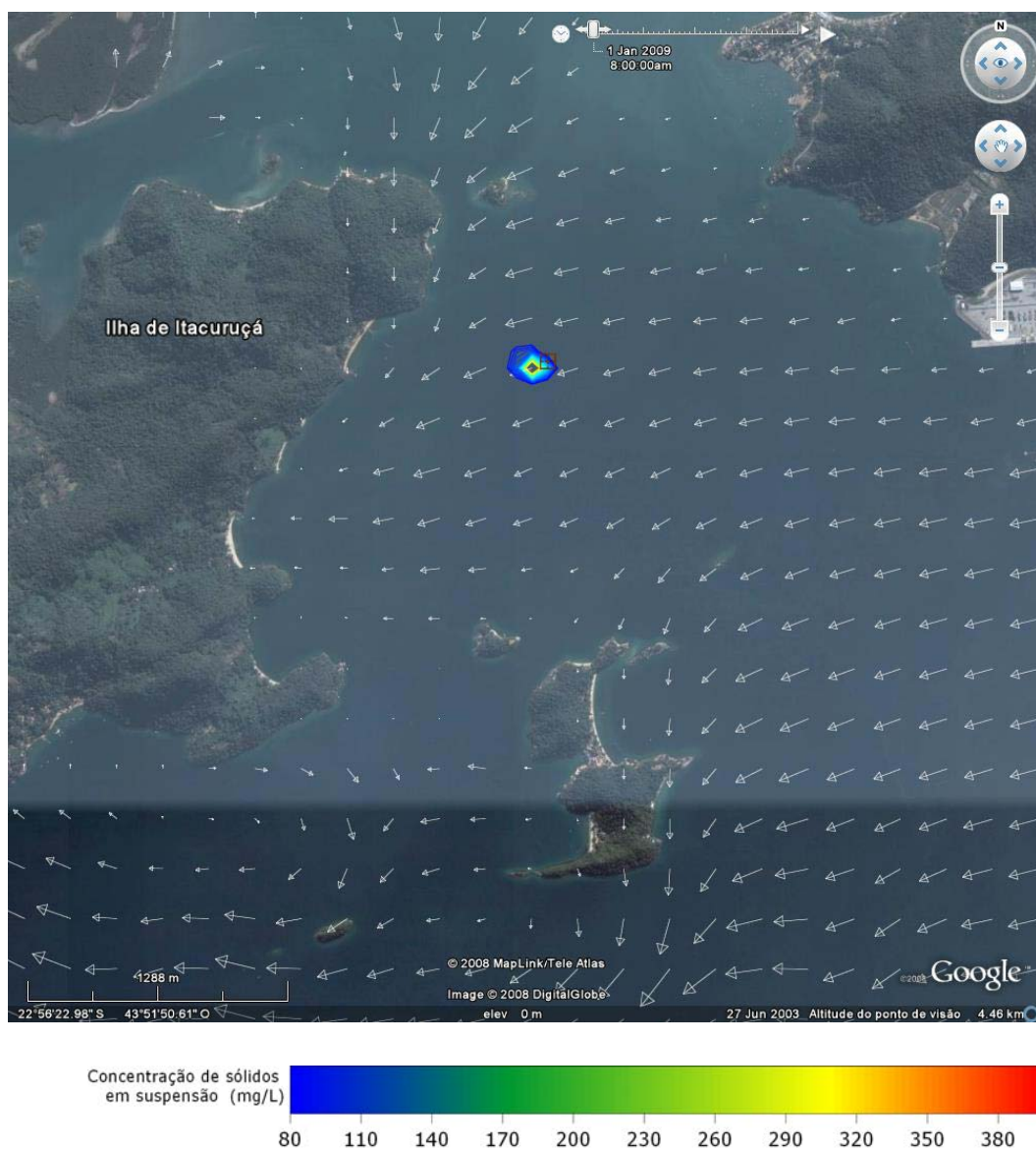


Figura 51: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário E_QUA_CDF.

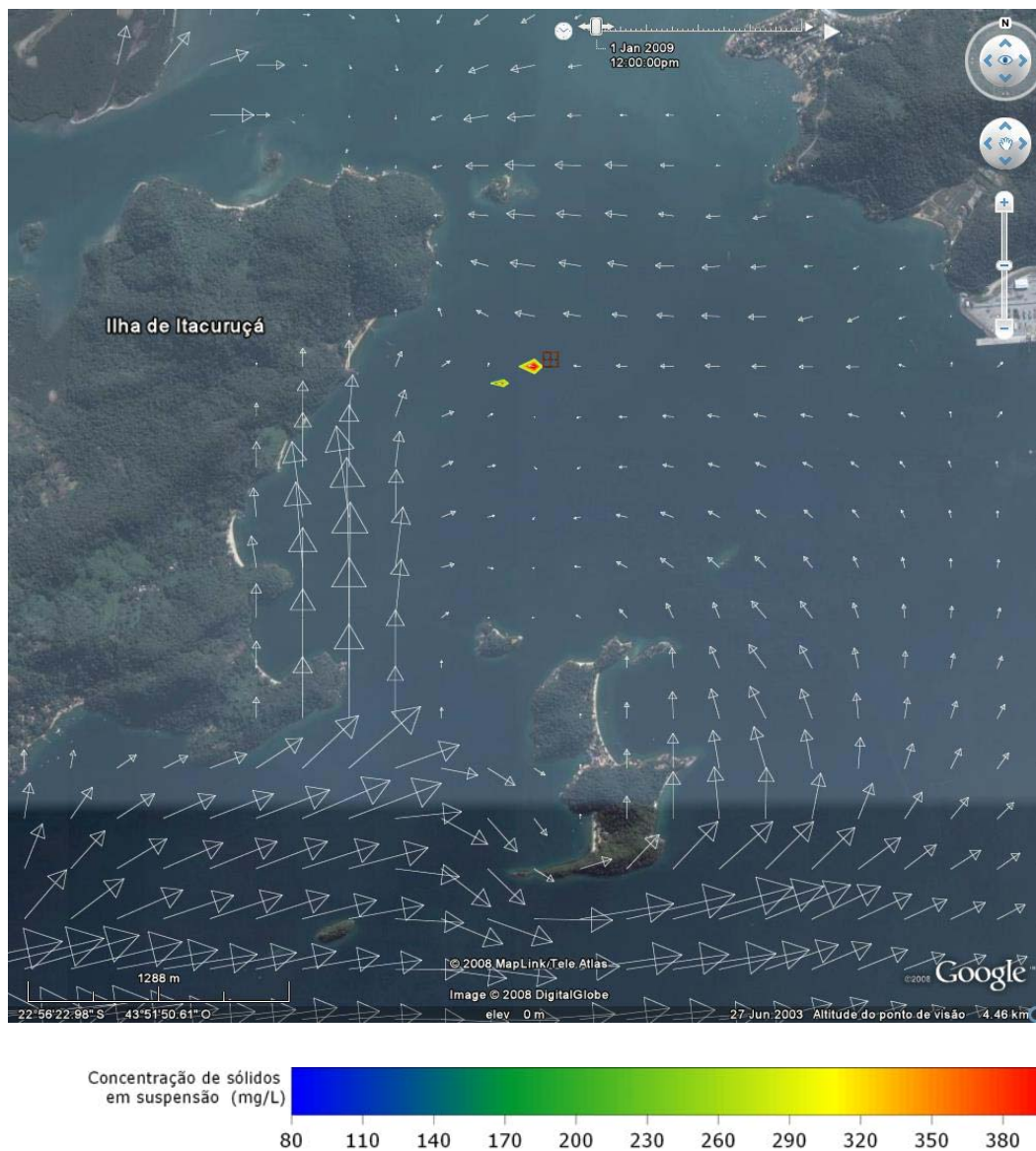


Figura 52: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário E_QUA_CDF.

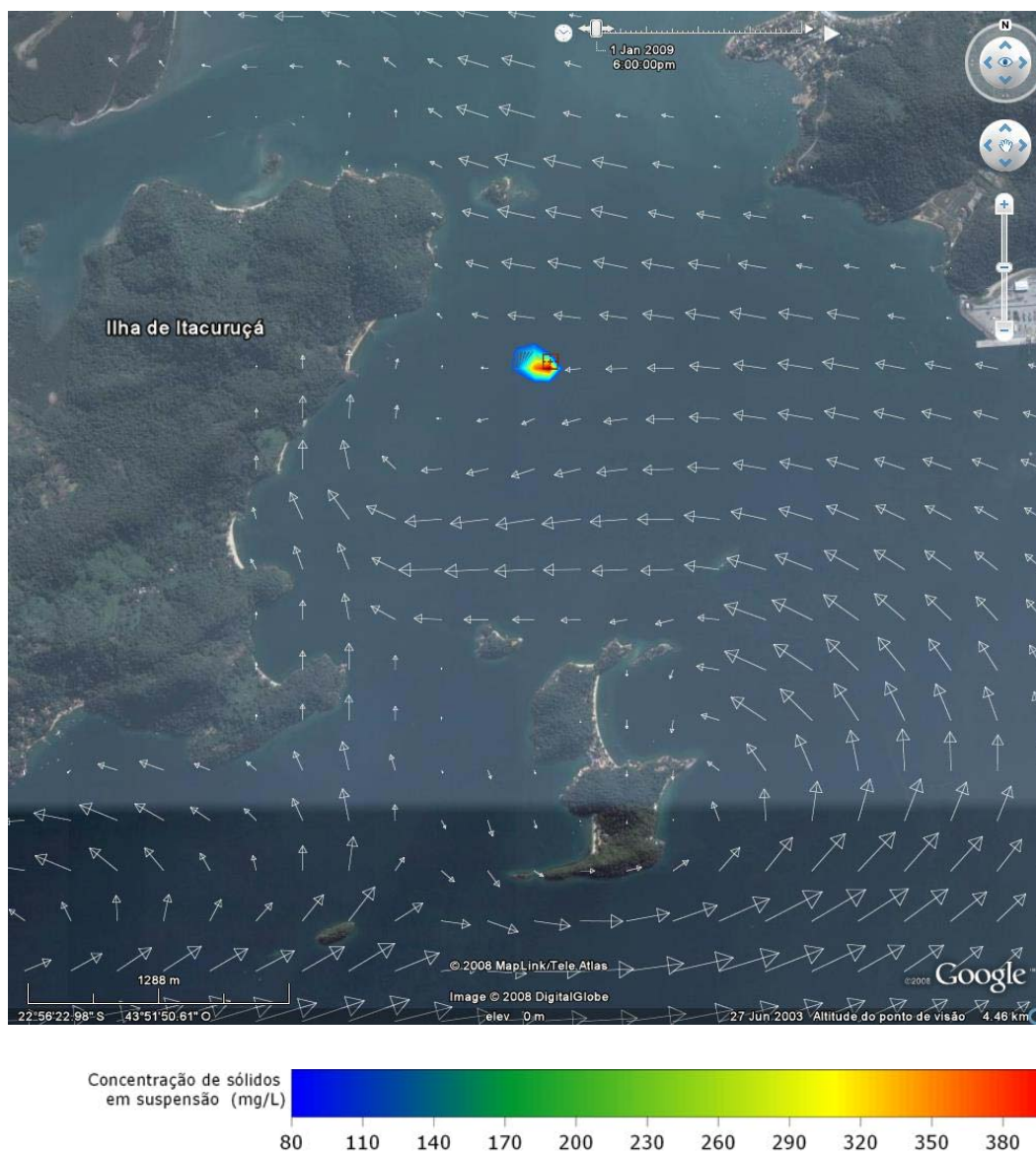


Figura 53: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário E_QUA_CDF.

Pode-se observar também nesse cenário que a pluma de sólidos em suspensão, considerando o limite de 80mg/l, fica restrita ao redor do ponto de descarte. Nesse cenário, em virtude dos ventos forçarem as correntes mais para a direção oeste, há uma tendência maior de deslocamento da pluma nessa direção. A maior extensão da pluma em relação ao ponto de lançamento foi de 395 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário E_QUA_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma possui extensão de 988 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante leste) e seu efeito nas correntes, a pluma com as máximas concentrações estende-se em direção oeste/sudoeste em relação ao ponto de descarte.

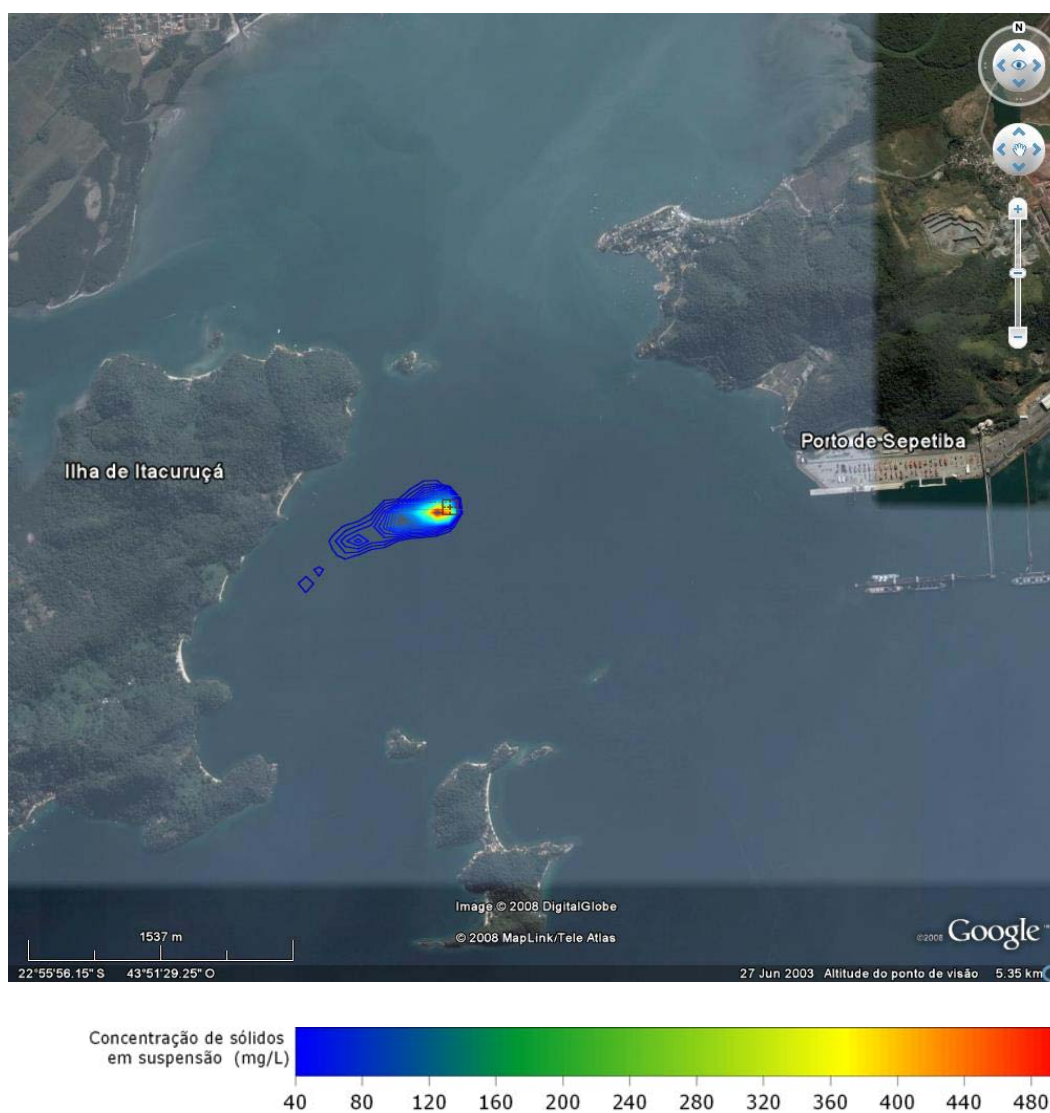


Figura 54: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação E_QUA_CDF.

Da mesma forma, são apresentadas as concentrações médias encontradas durante todo o período para o cenário E_QUA_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se

que a pluma possui extensão de 355 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com concentração média estende-se em direção oeste em relação ao ponto de descarte.

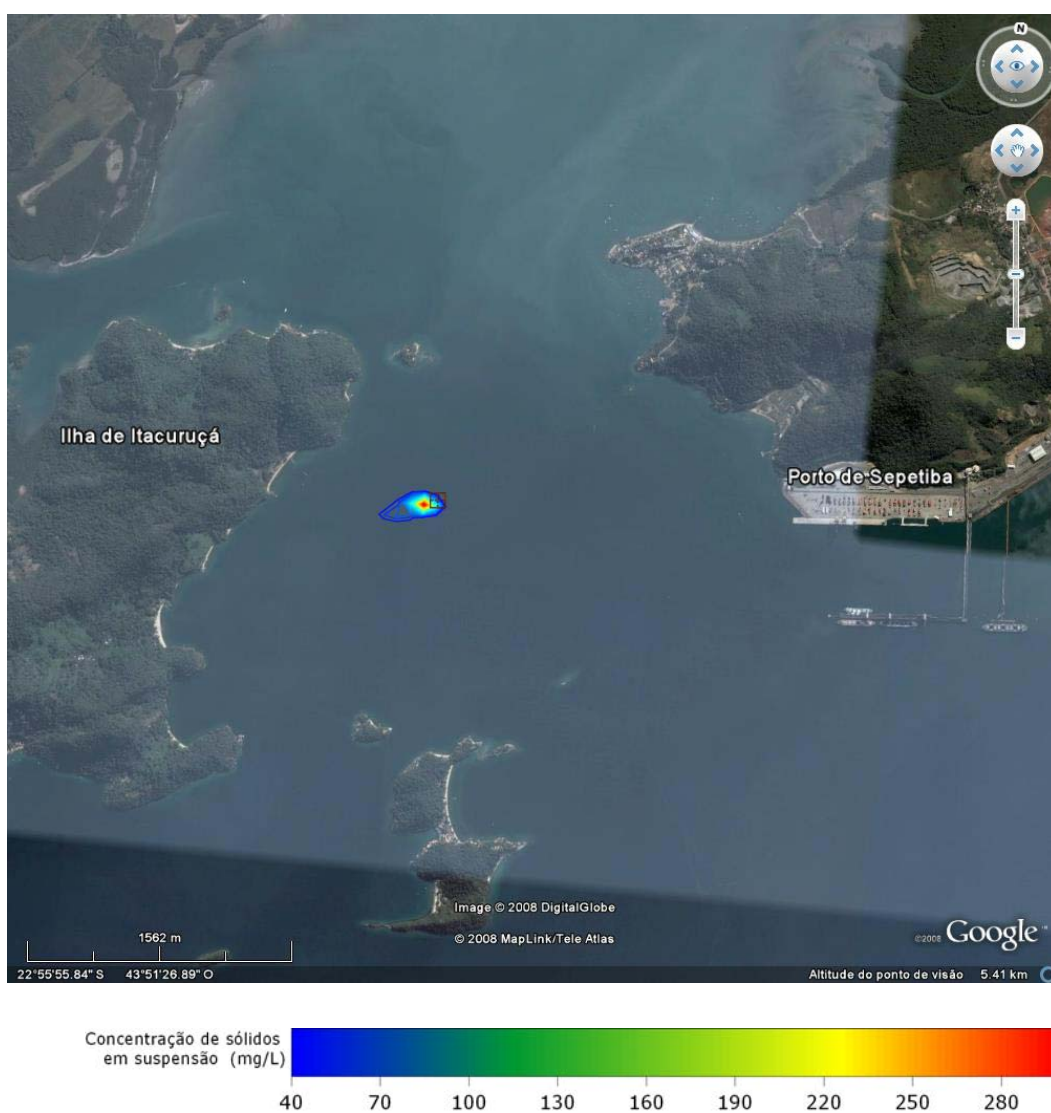


Figura 55: Concentração média de sólidos em suspensão durante a simulação E_QUA_CDF.

VI.1.2. E_SIZ_CDF

A seguir são apresentadas figuras (Figura 56 a Figura 61) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante leste com maré de sizígia (E_SIZ_CDF) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

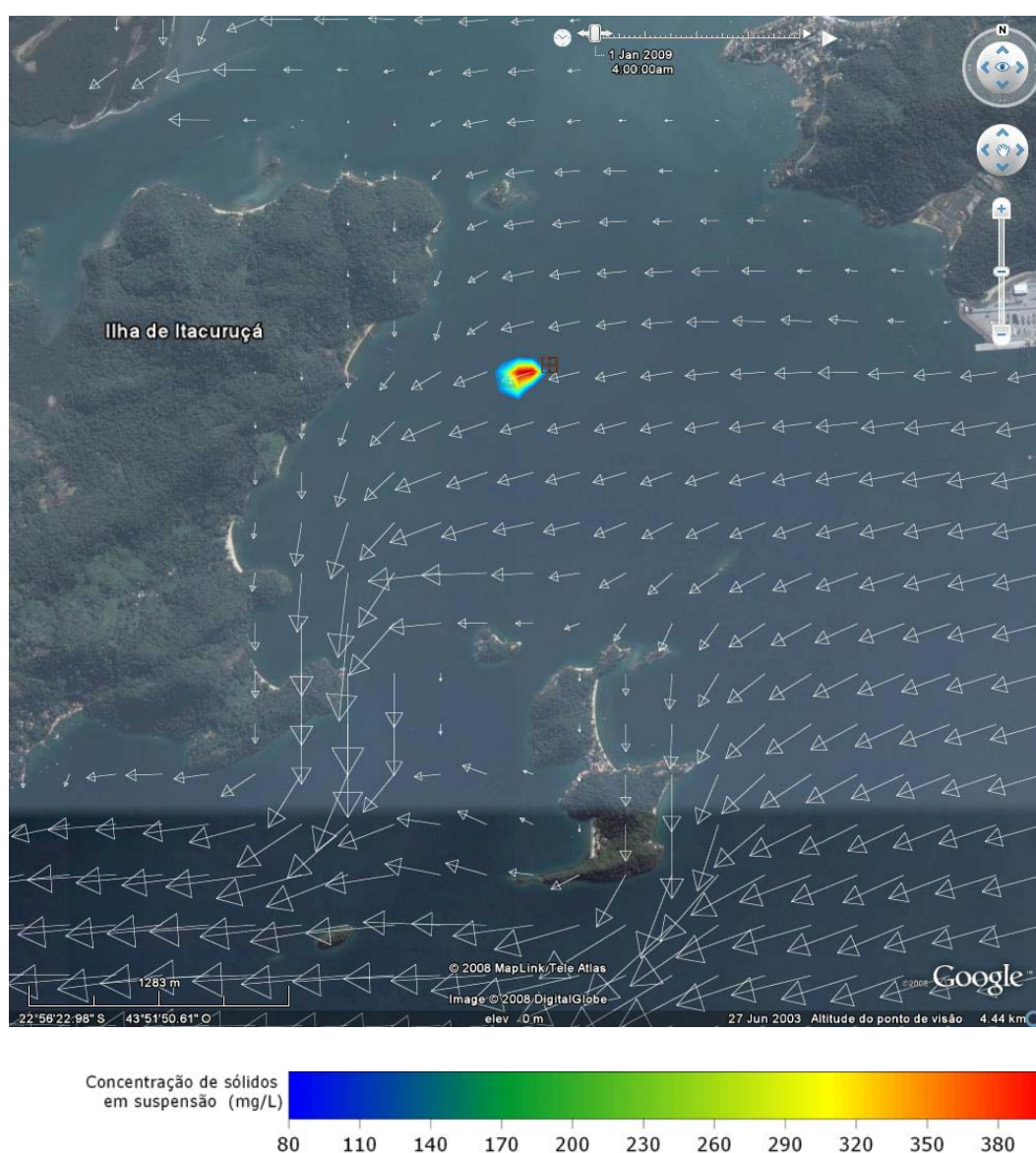


Figura 56: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário E_SIZ_CDF.

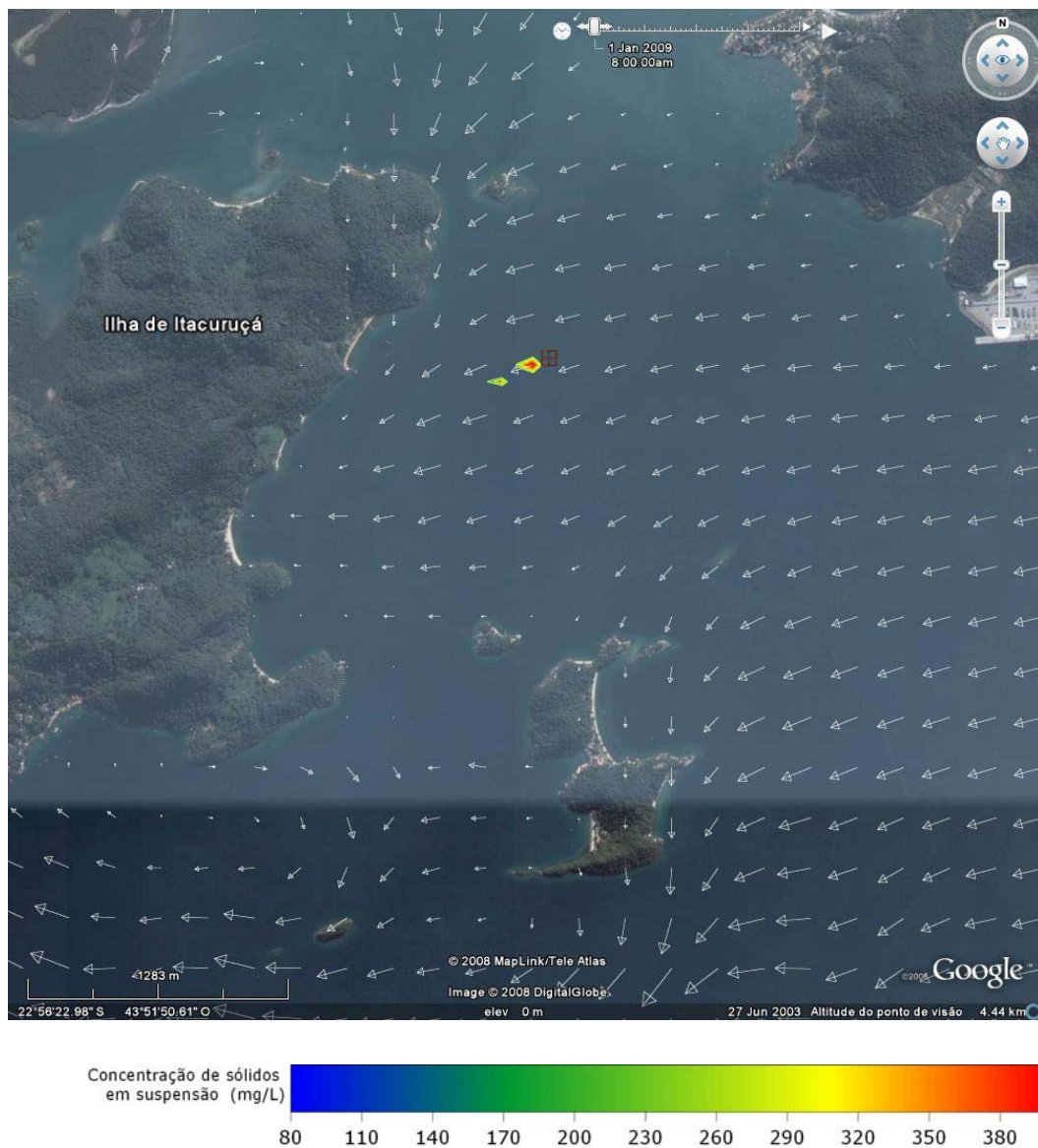


Figura 57: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário E_SIZ_CDF.

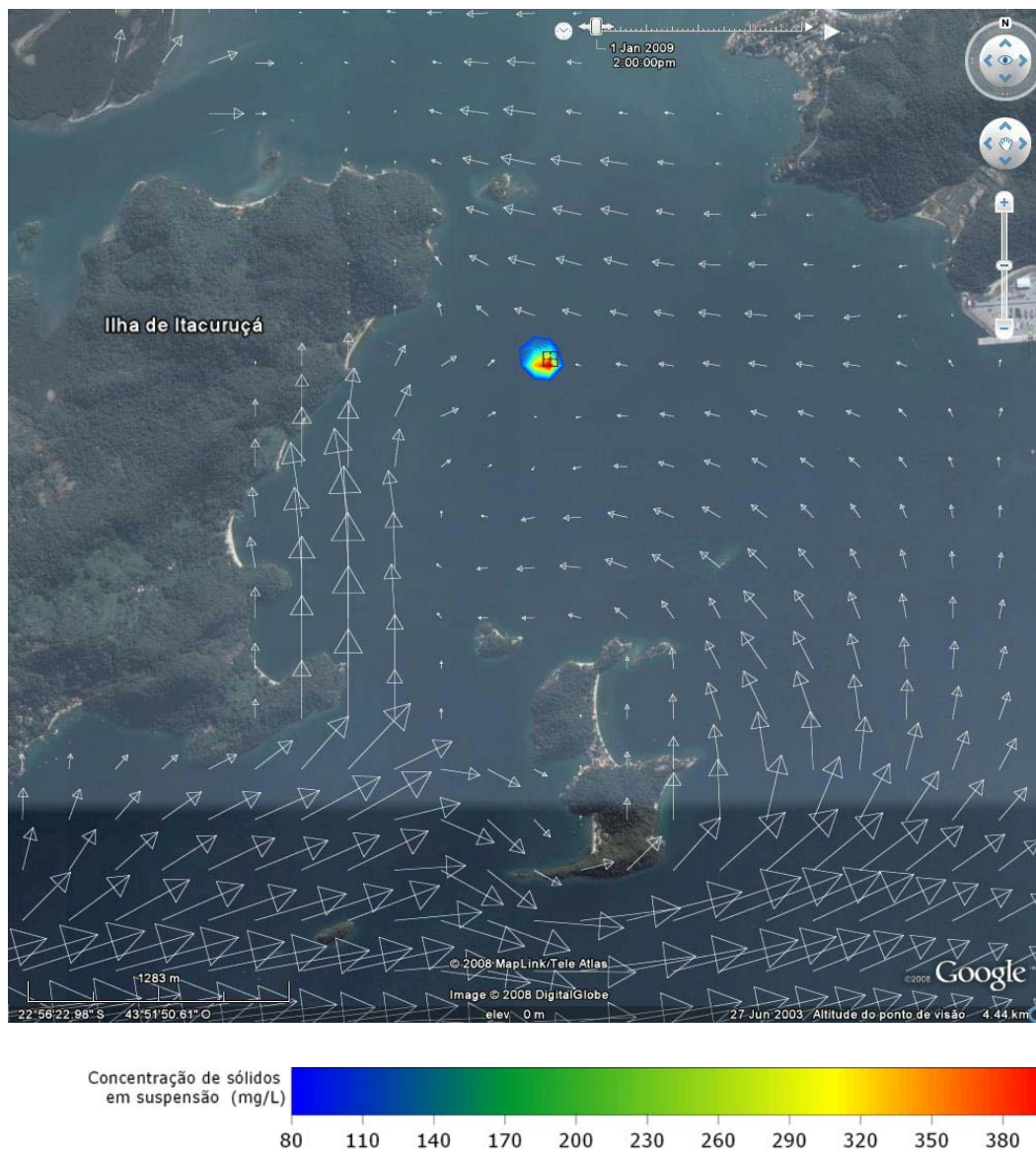


Figura 58: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário E_SIZ_CDF.

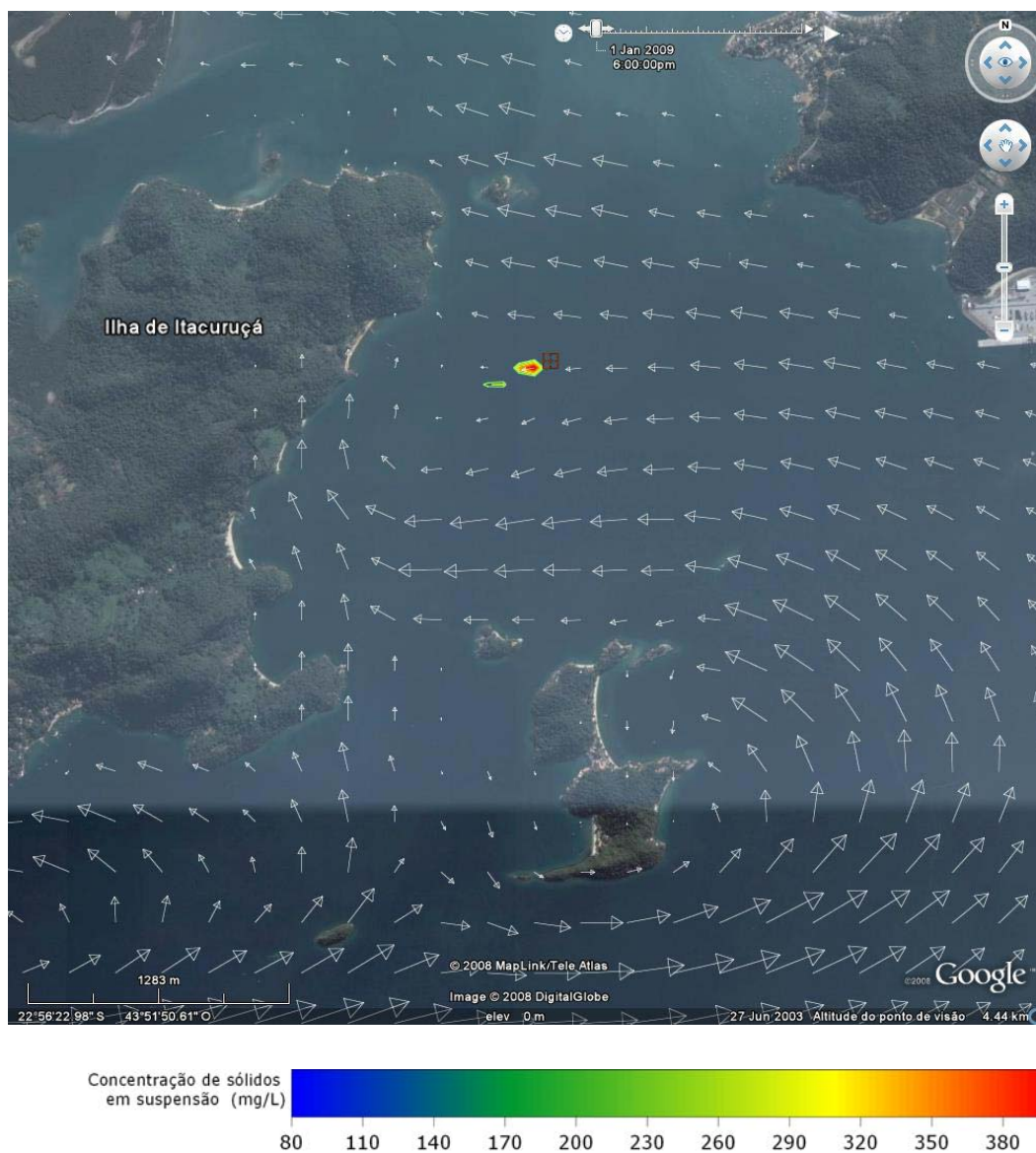


Figura 59: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário E_SIZ_CDF.

Pode-se observar também nesse cenário que a pluma de sólidos em suspensão, considerando o limite de 80mg/l, fica restrita à uma área pequena ao redor do ponto de descarte. Nesse cenário, em virtude dos ventos forçarem as correntes mais para a direção oeste, há uma tendência maior de deslocamento da pluma nessa direção. A maior extensão da pluma em relação ao ponto de lançamento foi de 350 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário E_SIZ_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma possui extensão de 880 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante leste) e seu efeito nas correntes, a pluma com as máximas concentrações estende-se em direção oeste/sudoeste em relação ao ponto de descarte.

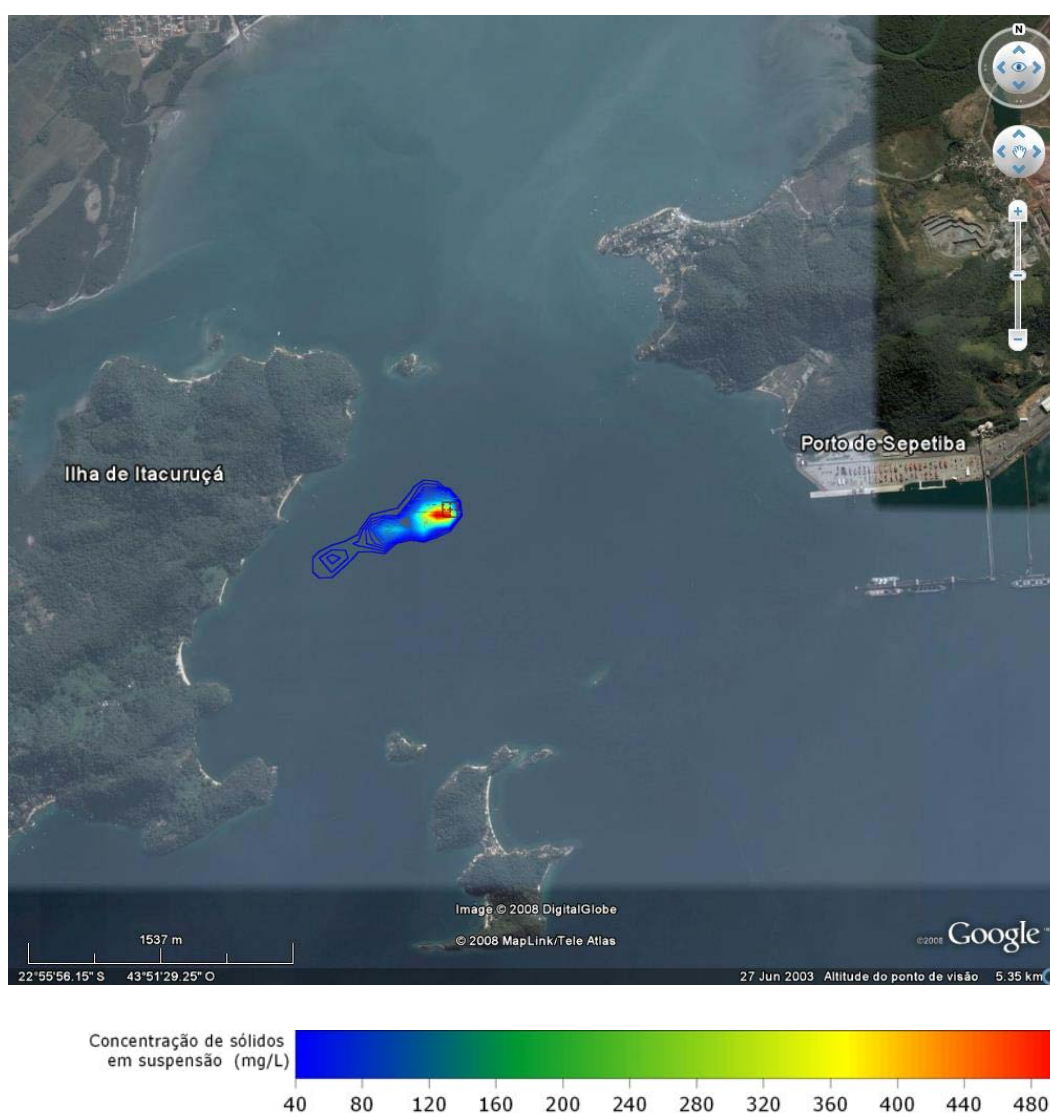


Figura 60: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação E_SIZ_CDF.

Da mesma forma, são apresentadas as concentrações médias encontradas durante todo o período para o cenário E_SIZ_CDF, independente da coexistência temporal. Nota-se que a pluma possui extensão de 380 metros. Em virtude dos ventos incidentes (quadrante oeste) e seu efeito nas correntes, a pluma com concentração média estende-se em direção oeste em relação ao ponto de descarte.

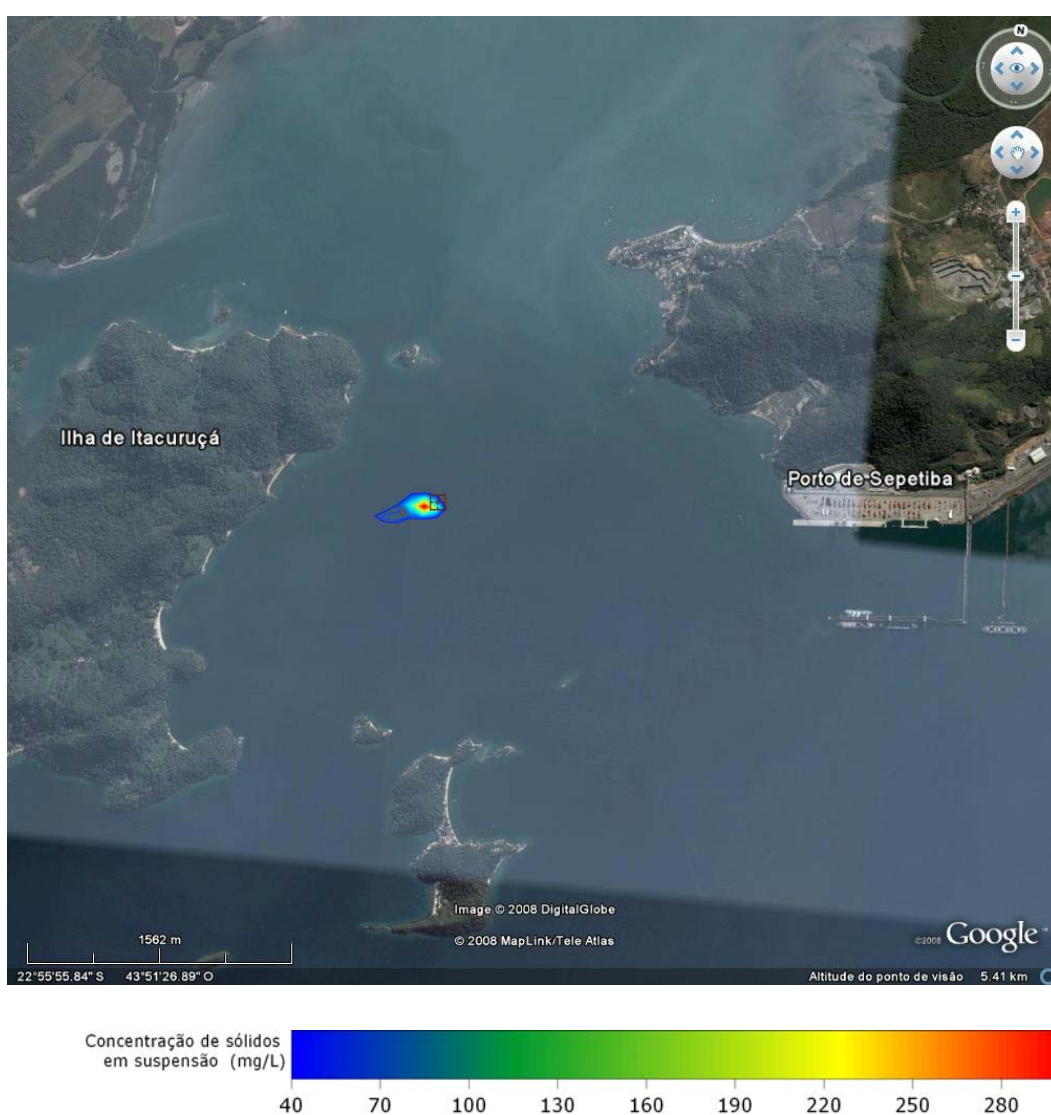


Figura 61: Concentração média de sólidos em suspensão durante a simulação E_SIZ_CDF.

VI.2. BOTA-FORA

Assim como apresentado para a região do CDF, na Figura 62 consta a localização do detalhe usado nas figuras da região do bota-fora em uma visão mais ampla. A natureza do descarte desse cenário é diferente em relação ao descarte do CDF, que é contínua. No caso do bota-fora, os descartes não são contínuos, mas acontecem a cada quatro horas, em virtude das características operacionais da draga (velocidade, capacidade e vazão).

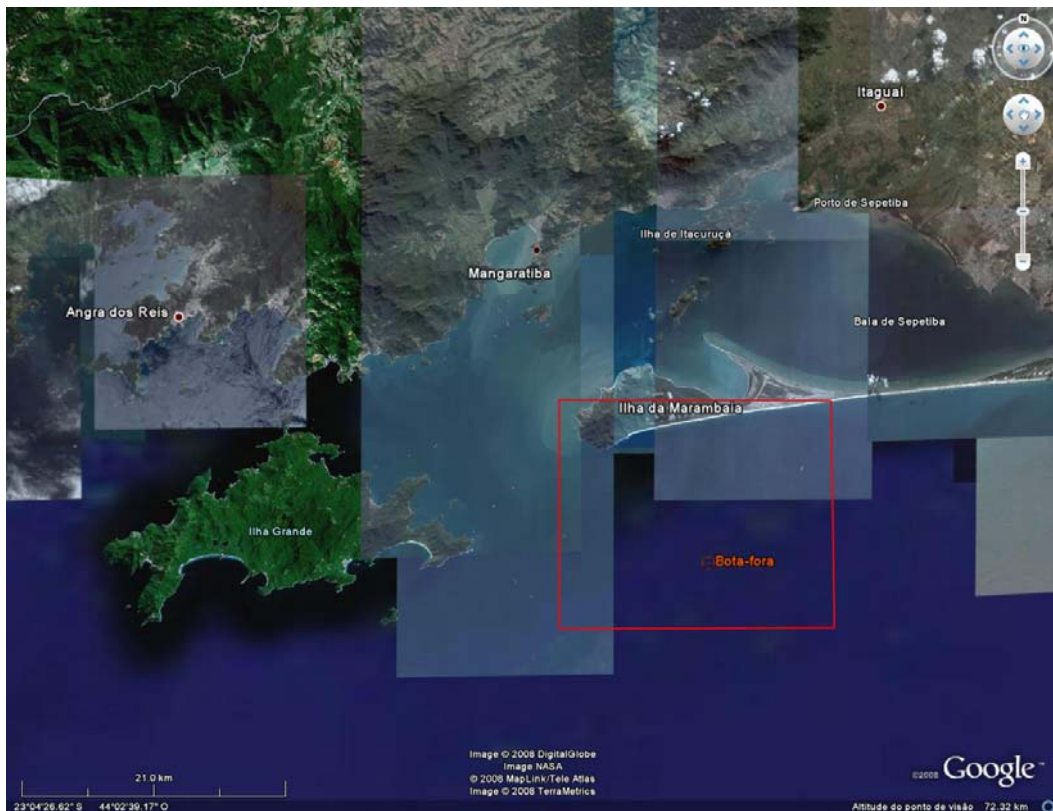


Figura 62: Localização da grade usada no estudo da pluma de sólidos no ponto de descarte para o bota-fora.

VI.2.1. W_QUA_BTf

A seguir são apresentadas figuras (Figura 63 a Figura 67) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante oeste com maré de quadratura (W_QUA_BTf) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os

períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

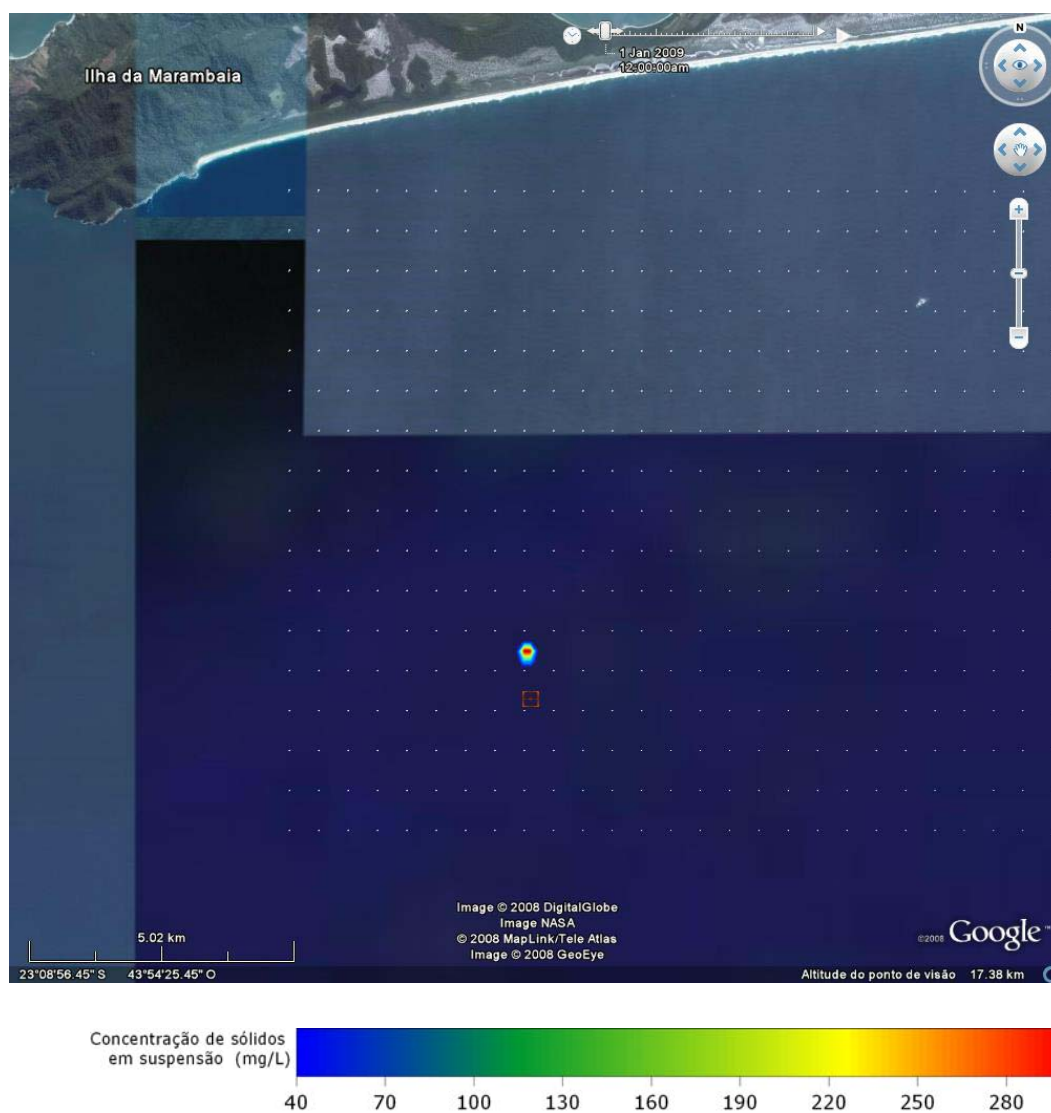


Figura 63: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário W_QUA_BTf.

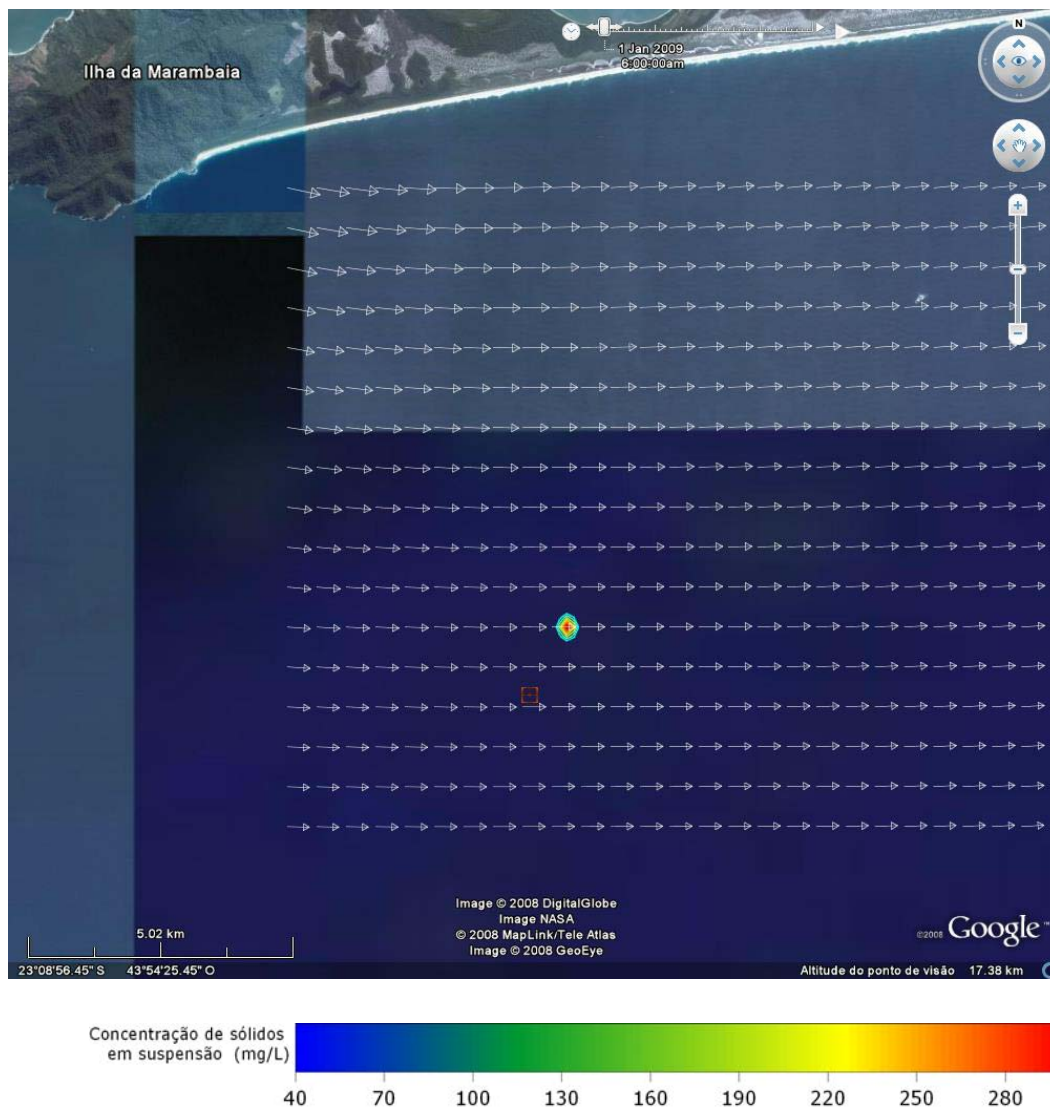


Figura 64: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da vazante para o cenário W_QUA_BTf.

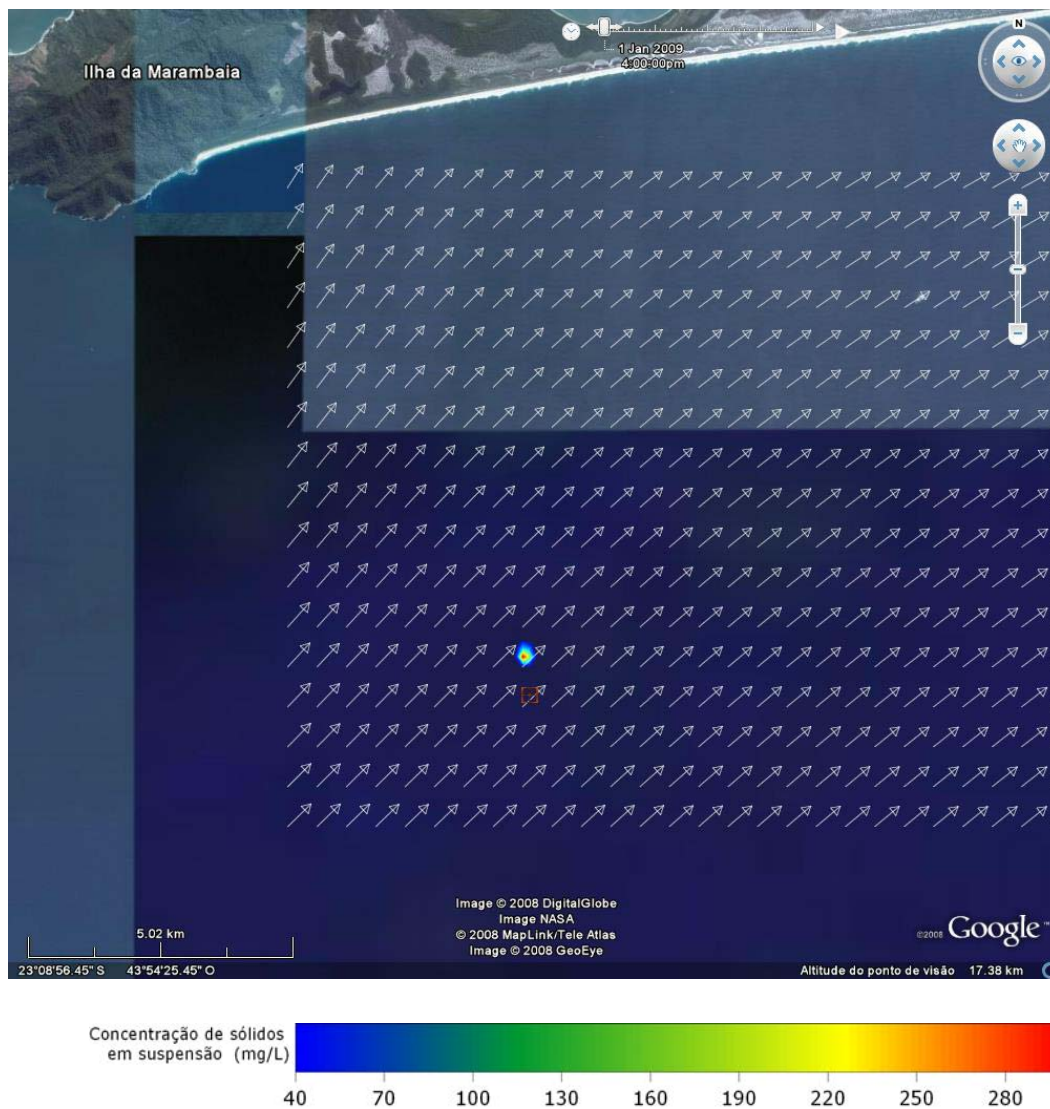


Figura 65: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário W_QUA_BTf.

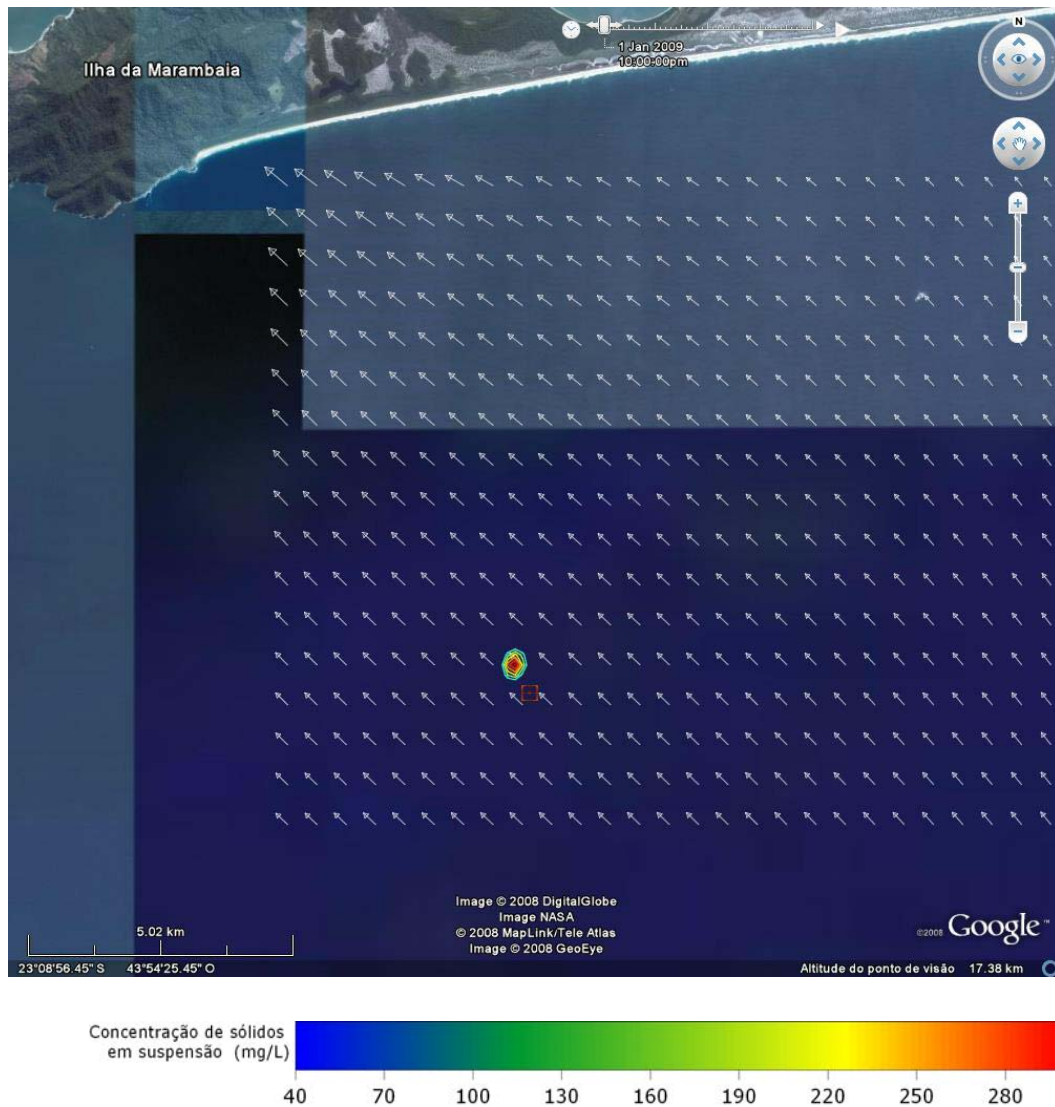


Figura 66: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário W_QUA_BTf.

Nota-se que nesse cenário não há interação entre as plumas de sólidos em suspensão, considerando o limite de 40 mg/l. Ou seja, a pluma já se encontra abaixo do limite de 40 mg/l menos de quatro horas após o lançamento. Em média, as plumas possuem diâmetros de cerca de 300m, com máximo de 580m. A maior distância alcançada pelas plumas em relação ao ponto de lançamento foi de 1770 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário W_QUA_BTf, independente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma

alcança distância máxima de 2370 metros, em relação ao ponto de descarte, apresentando uma área de aproximadamente, 1.597.500 m². O resultado para a concentração média apresentou valores sempre abaixo do limite de 40 mg/l.

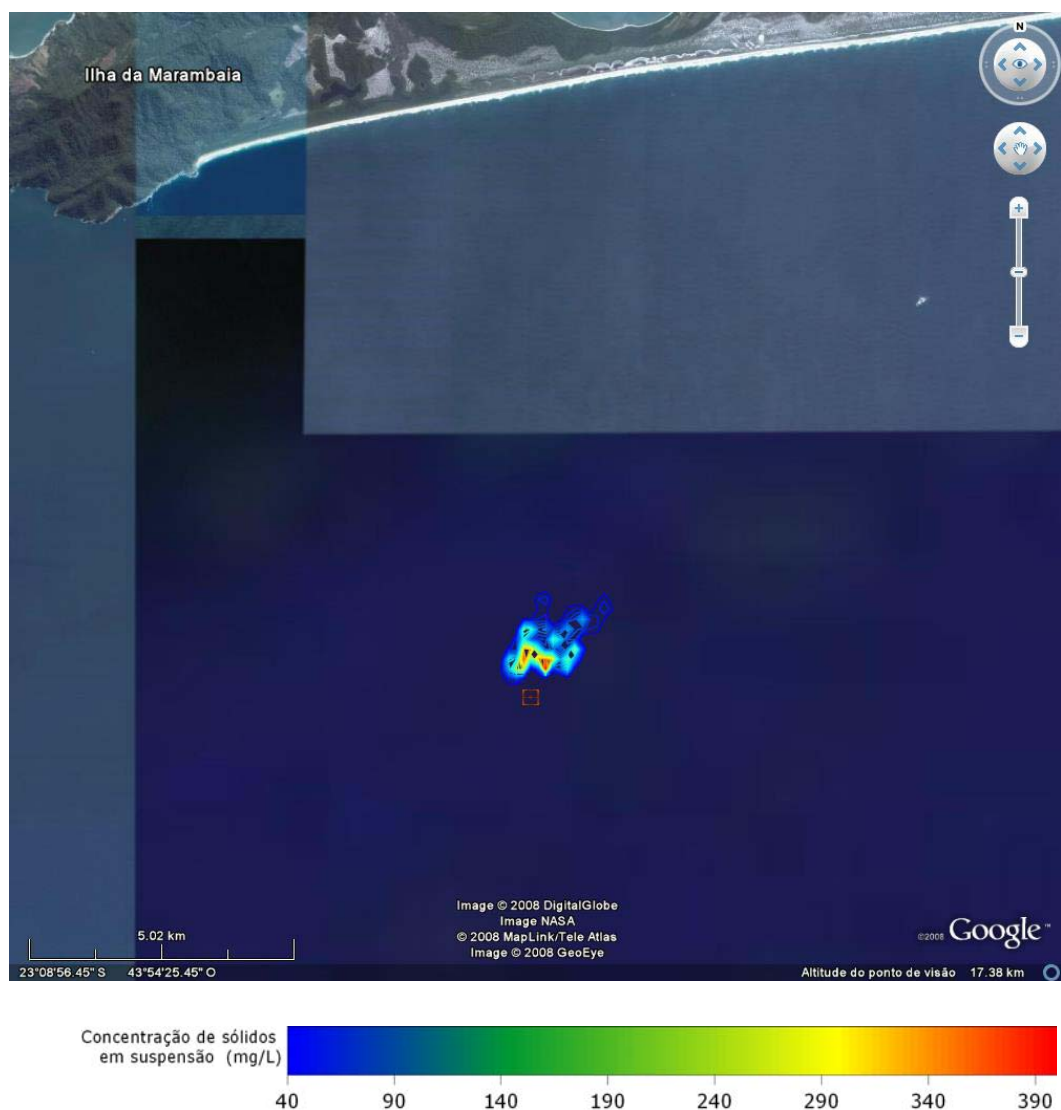


Figura 67: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação W_QUA_BTf.

VI.2.2. W_SIZ_BTf

A seguir são apresentadas figuras (Figura 68 a Figura 72) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante oeste com maré de sizígia (W_SIZ_BTf) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

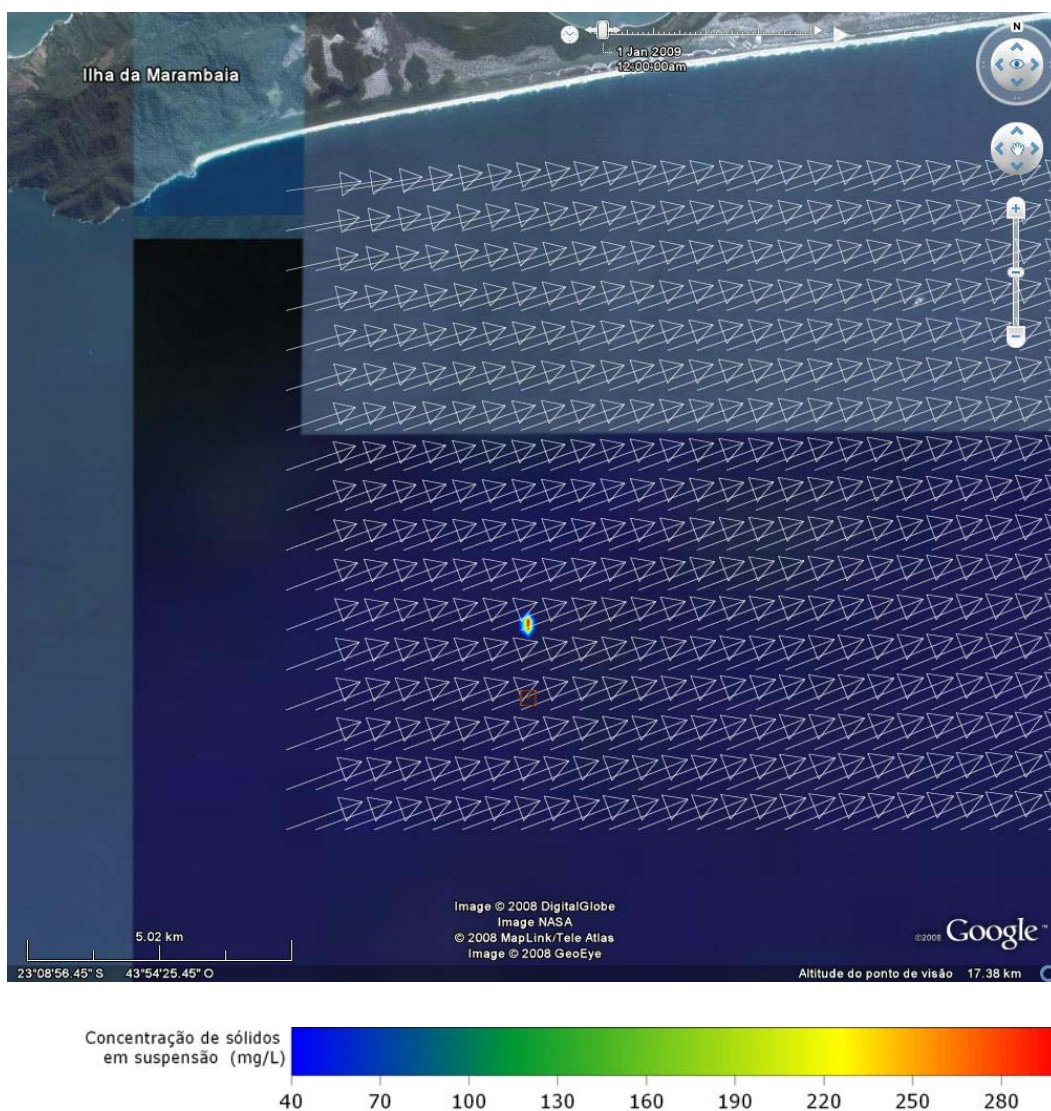


Figura 68: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário W_SIZ_BTf.

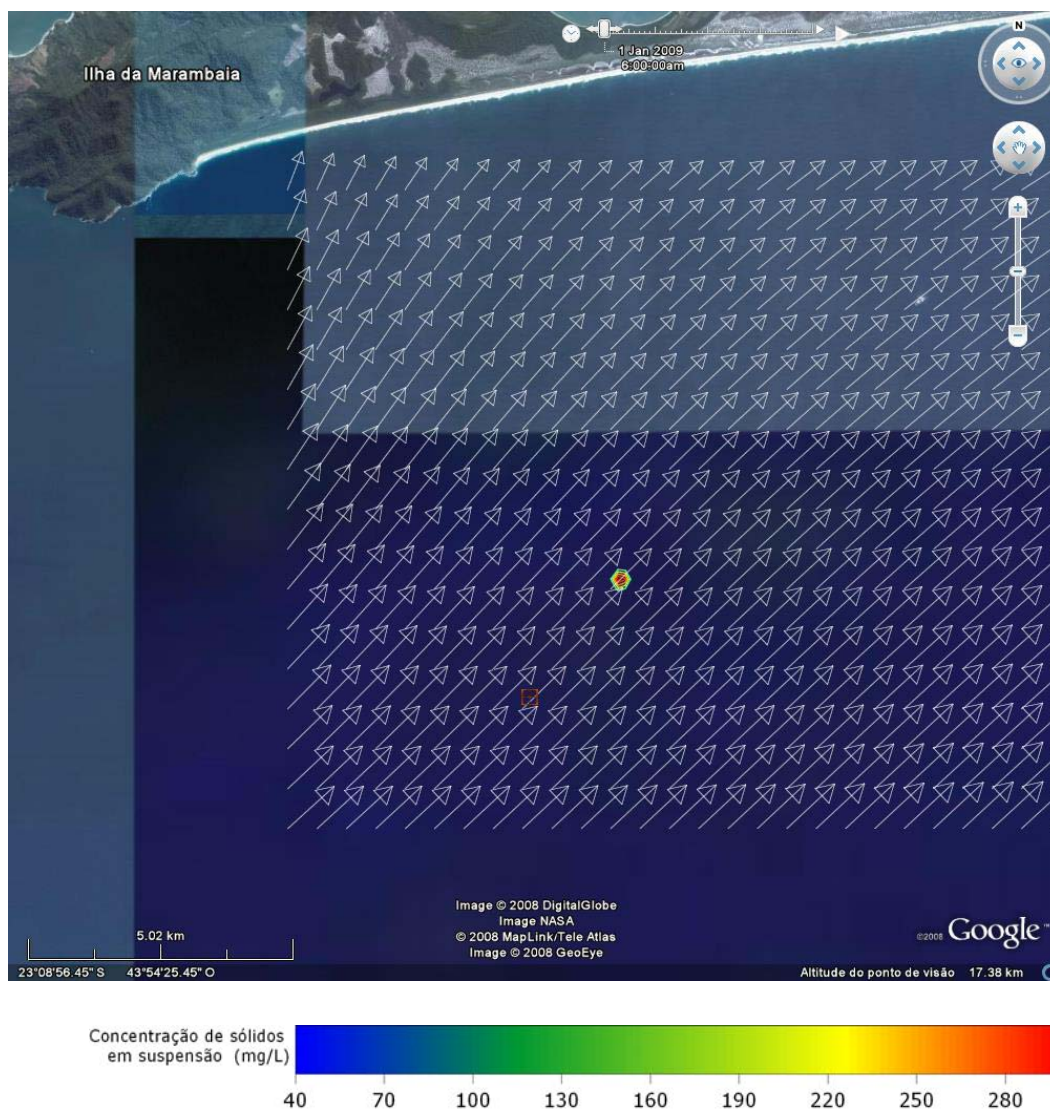


Figura 69: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estófo de baixa-mar para o cenário W_SIZ_BTf.

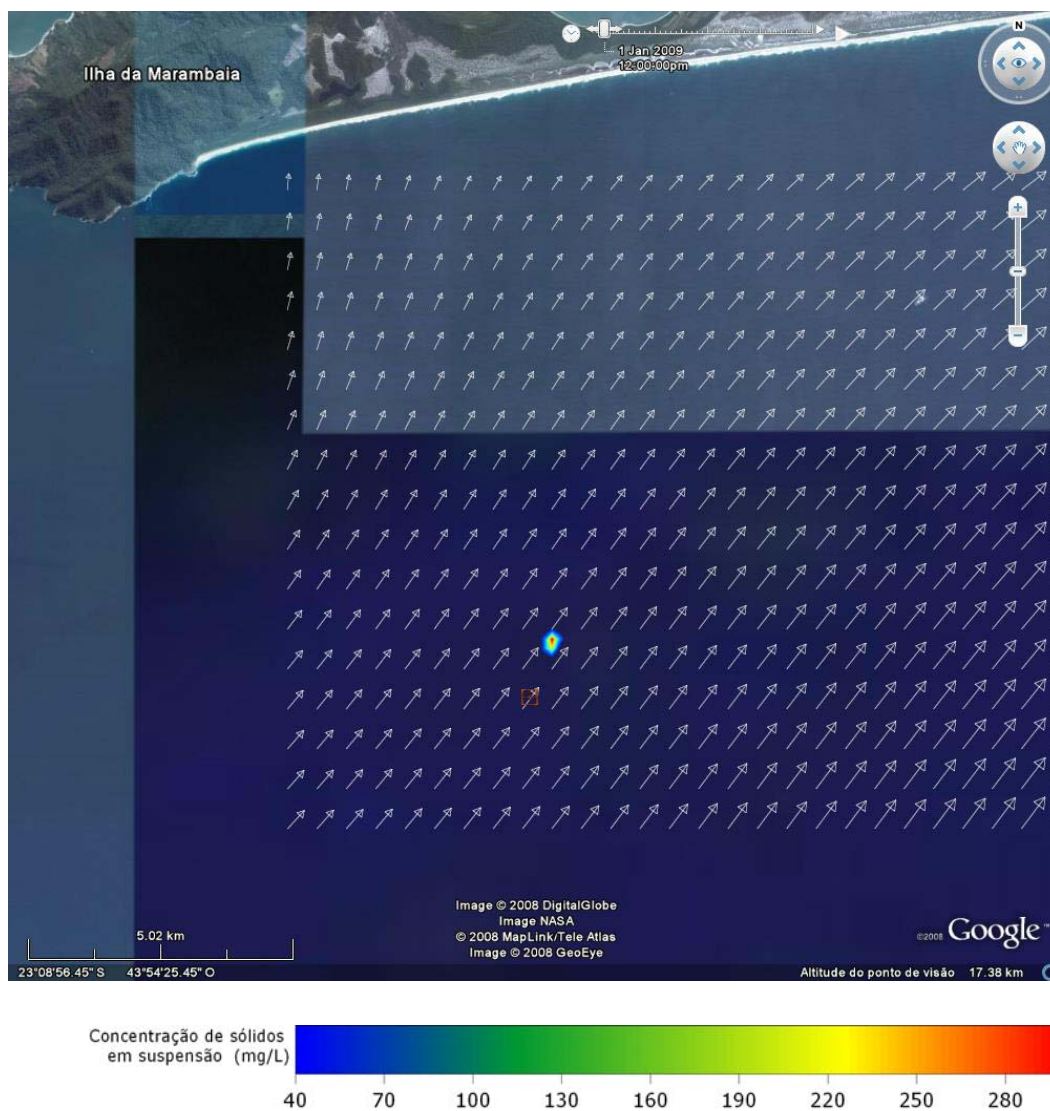


Figura 70: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário W_SIZ_BTf.

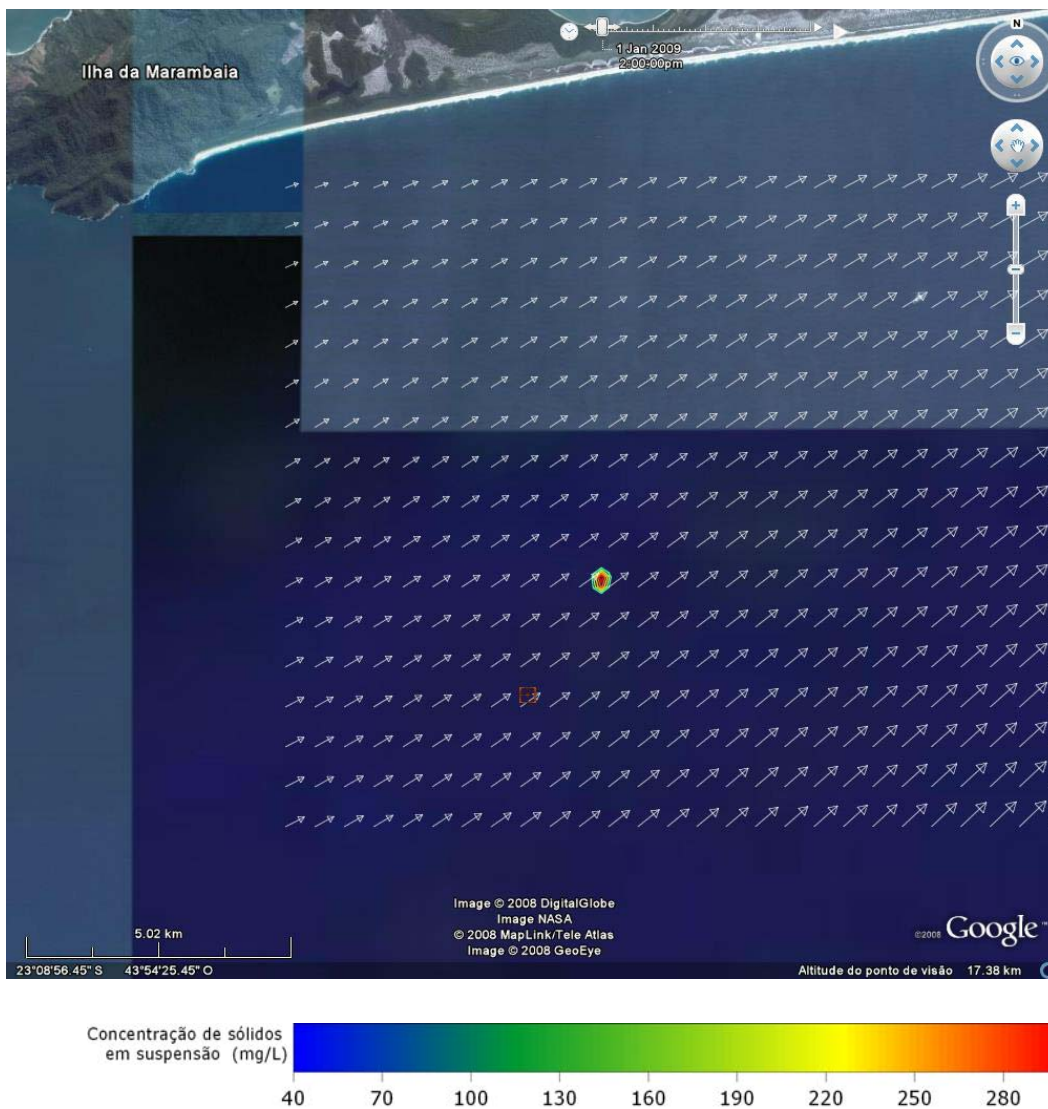


Figura 71: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário W_SIZ_BTf.

Nota-se que nesse cenário também não há interação entre as plumas de sólidos em suspensão, considerando o limite de 40 mg/l. Ou seja, a pluma já se encontra abaixo do limite de 40 mg/l menos de quatro horas após o lançamento. Em média, as plumas possuem diâmetros de cerca de 300m, com máximo de 560m. A maior distância alcançada pelas plumas em relação ao ponto de lançamento foi de 3000 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário W_SIZ_BTf, independente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma

alcança distância máxima de 4010 metros, em relação ao ponto de descarte, apresentando uma área de aproximadamente, 1.777.500 m². O resultado para a concentração média apresentou valores sempre abaixo do limite de 40 mg/l.

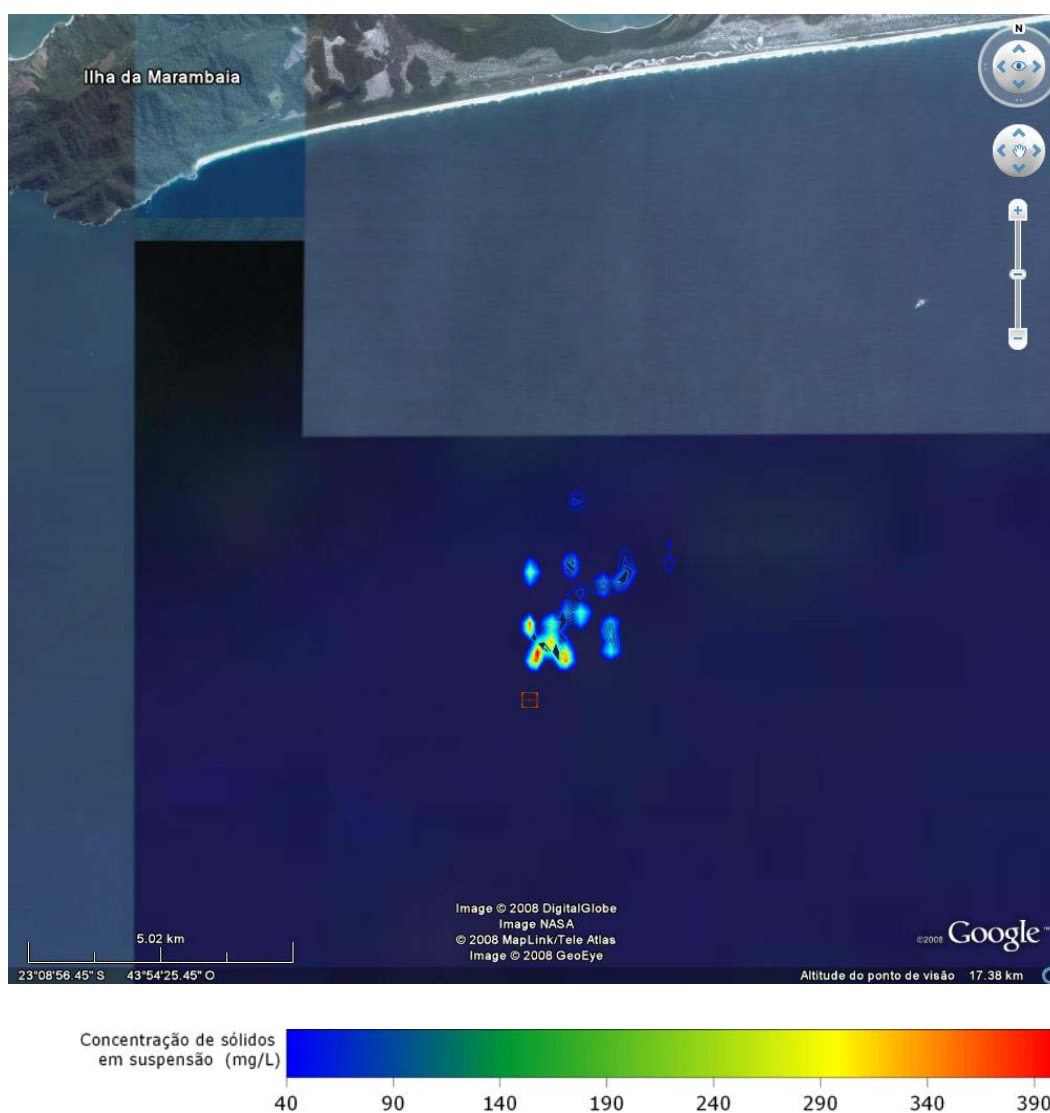


Figura 72: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação W_SIZ_BTF.

VI.2.3. E_QUA_BTf

A seguir são apresentadas figuras (Figura 73 a Figura 77) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante leste com maré de quadratura (E_QUA_BTf) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

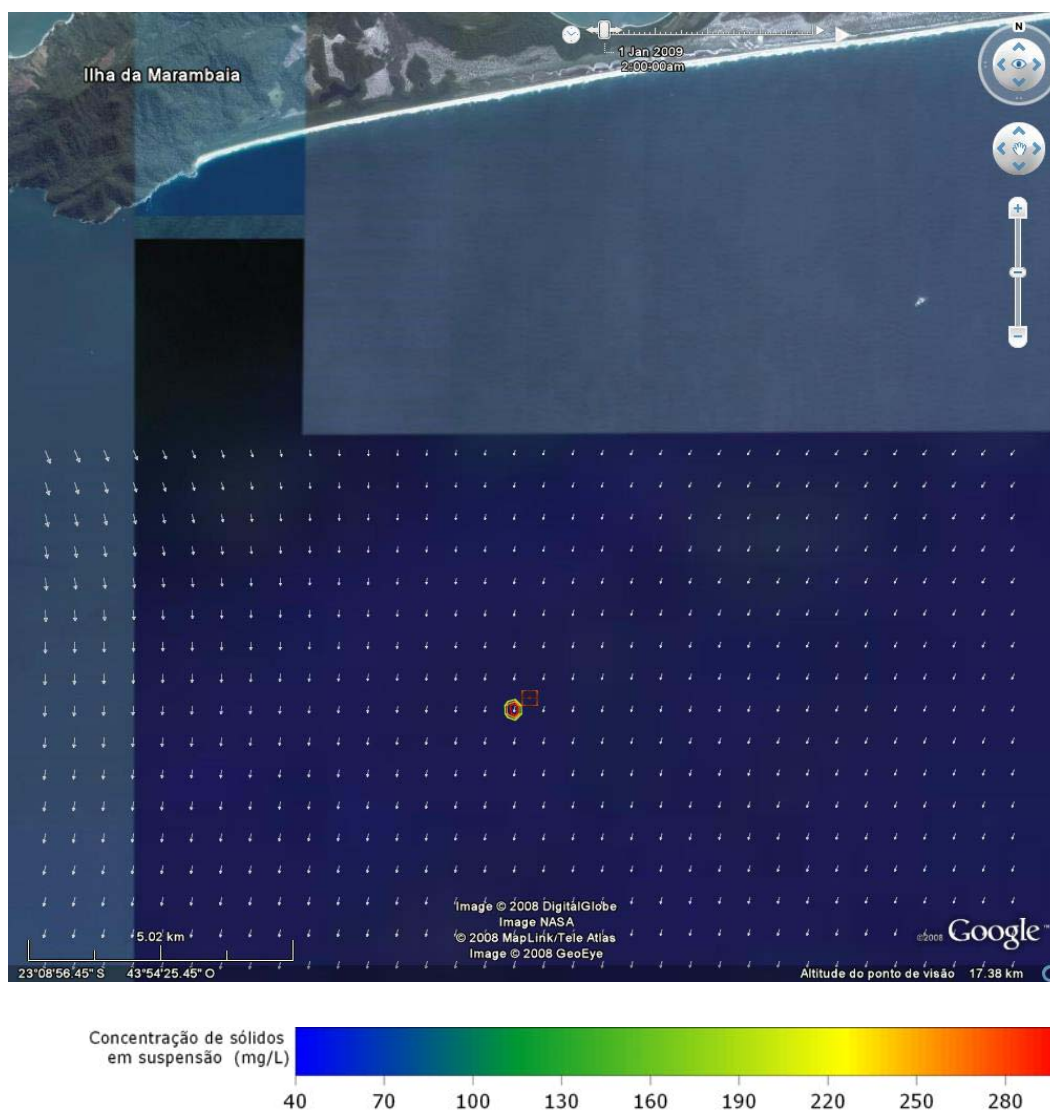


Figura 73: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário E_QUA_BTf.

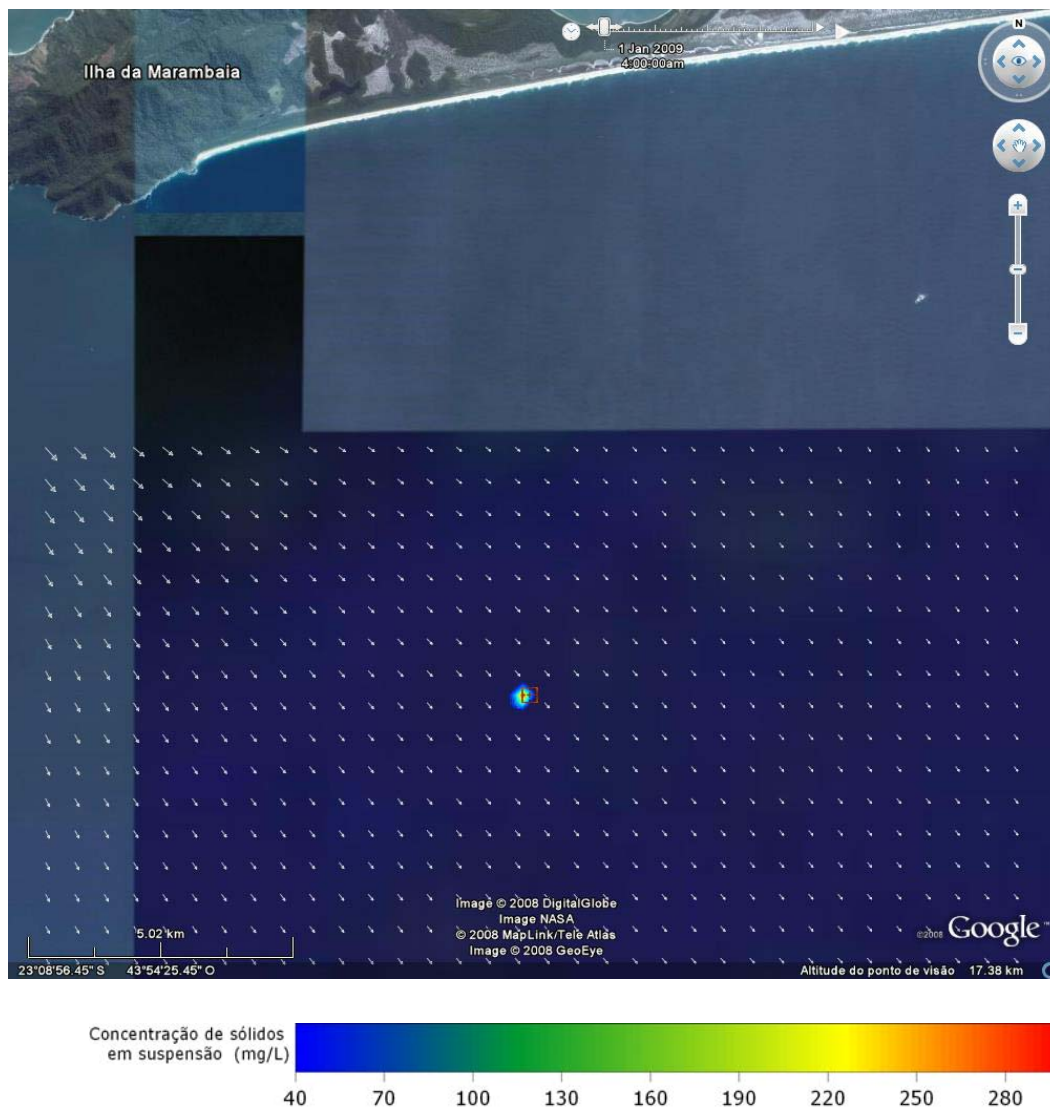


Figura 74: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré vazante para o cenário E_QUA_BTF.

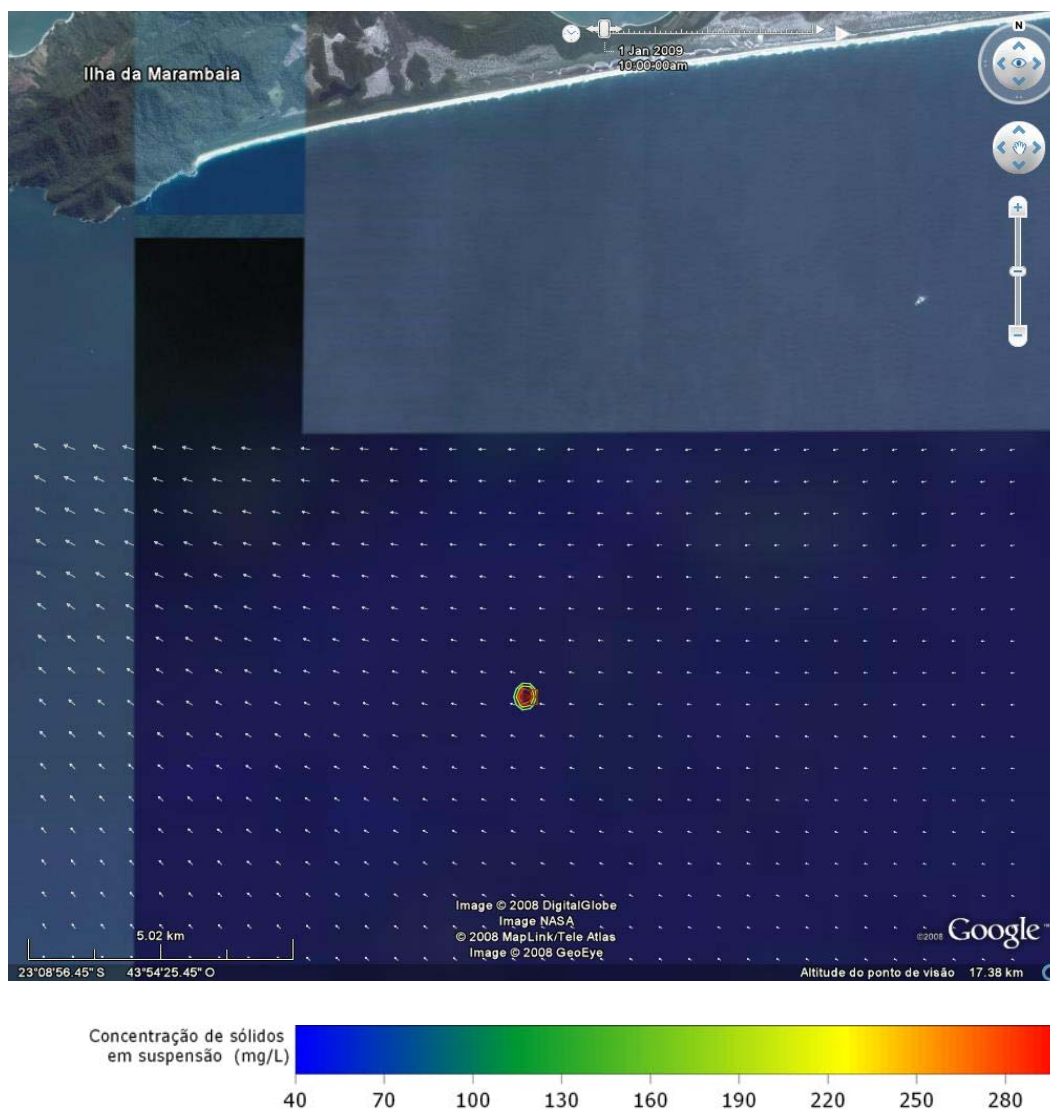


Figura 75: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de baixa-mar para o cenário E_QUA_BTf.

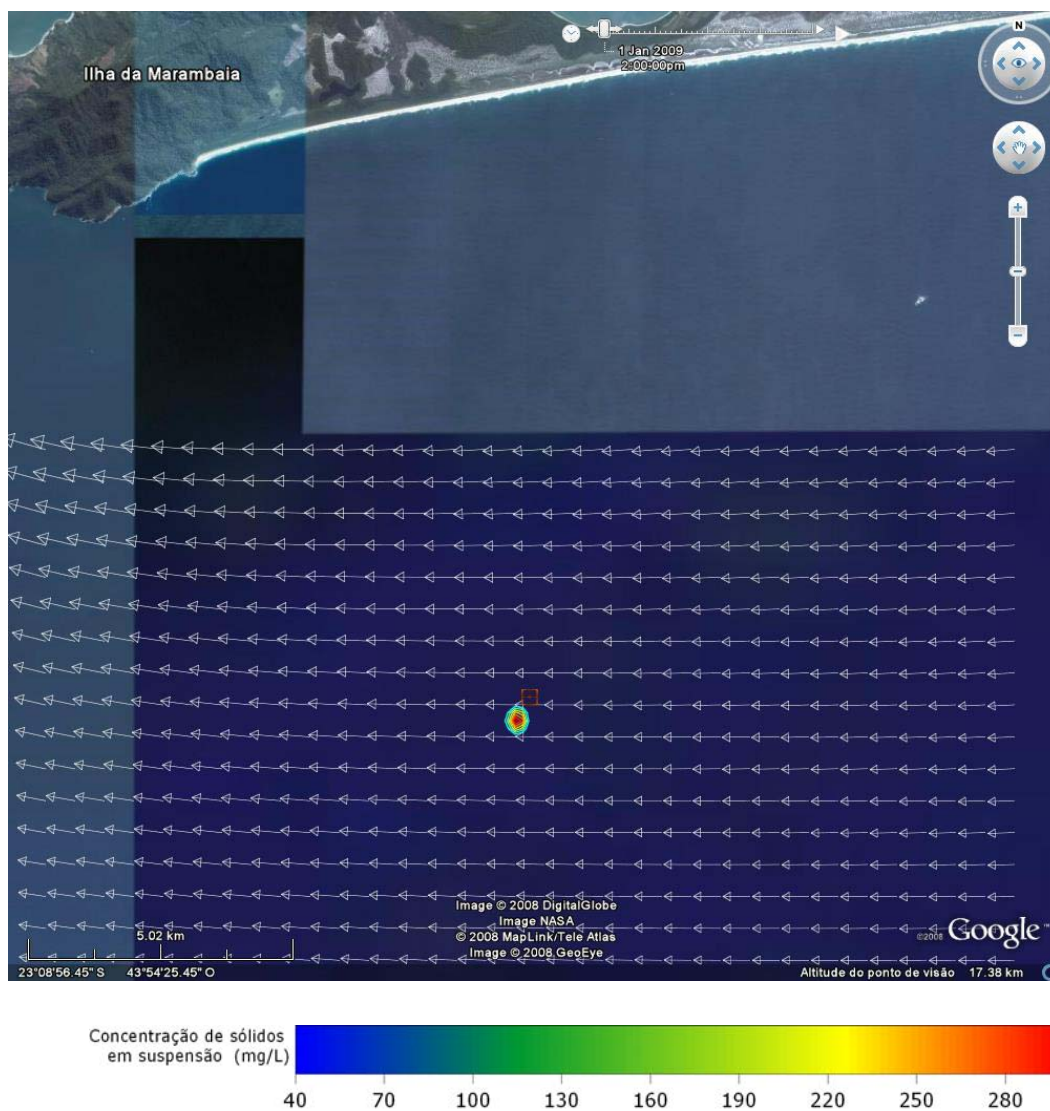


Figura 76: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário E_QUA_BTf.

Nota-se que nesse cenário também não há interação entre as plumas de sólidos em suspensão, considerando o limite de 40 mg/l. Ou seja, a pluma já se encontra abaixo do limite de 40 mg/l menos de quatro horas após o lançamento. Em média, as plumas possuem diâmetros de cerca de 300m, com máximo de 540m. A maior distância alcançada pelas plumas em relação ao ponto de lançamento foi de 1380 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário E_QUA_BTf, independentemente da coexistência temporal. Nota-se que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma

alcança distância máxima de 2180 metros, em relação ao ponto de descarte, apresentando uma área de aproximadamente, 1.305.000 m². O resultado para a concentração média apresentou valores sempre abaixo do limite de 40 mg/l.

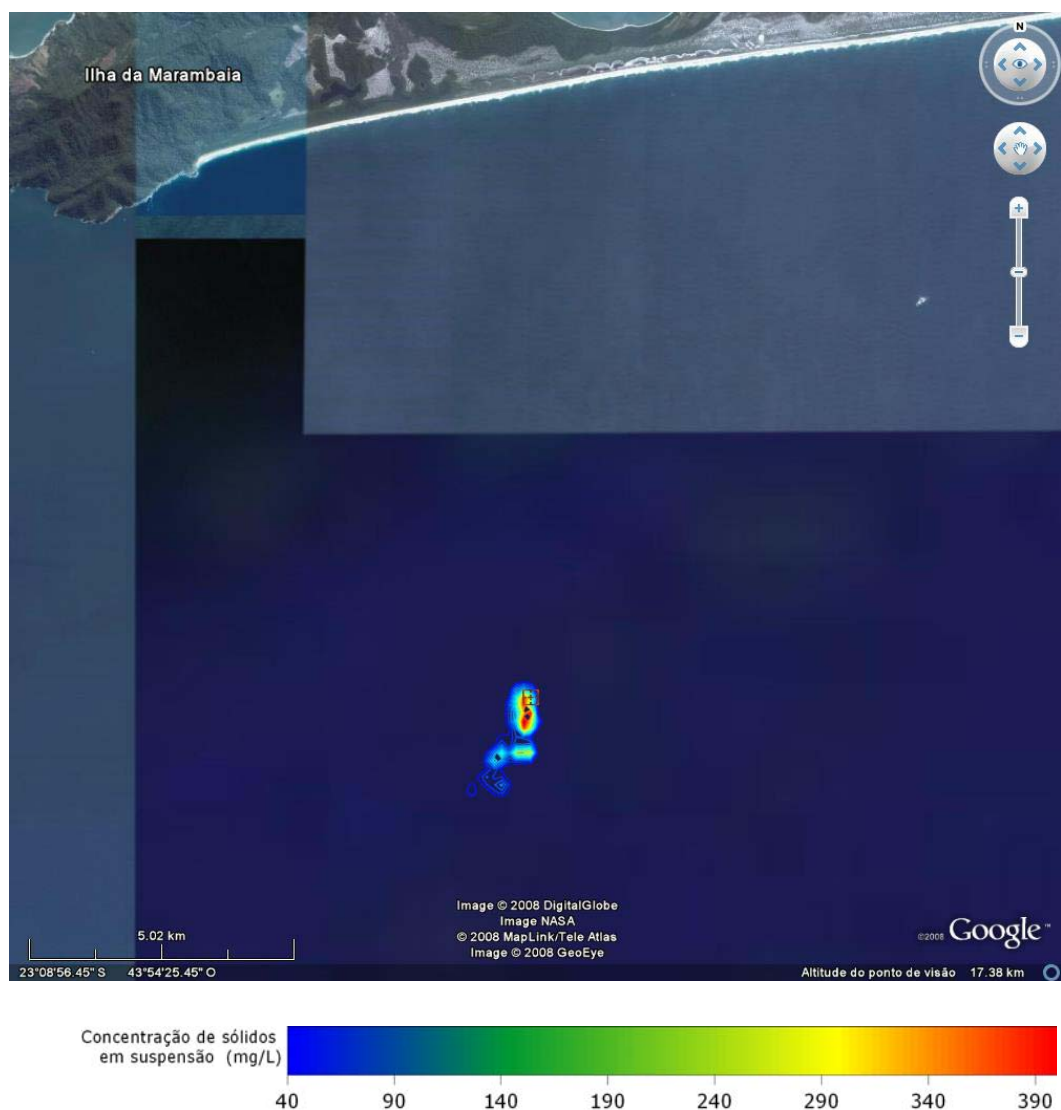


Figura 77: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação E_QUA_BTf.

VI.2.4. E_SIZ_BTf

A seguir são apresentadas figuras (Figura 78 a Figura 81) com os resultados obtidos para o cenário de ventos de quadrante leste com maré de sizígia (E_SIZ_BTf) para diferentes instantes de tempo, considerando o ciclo de maré. Assim, são destacados os períodos de máximo de enchente, máximo de vazante, estofo de enchente e estofo de vazante.

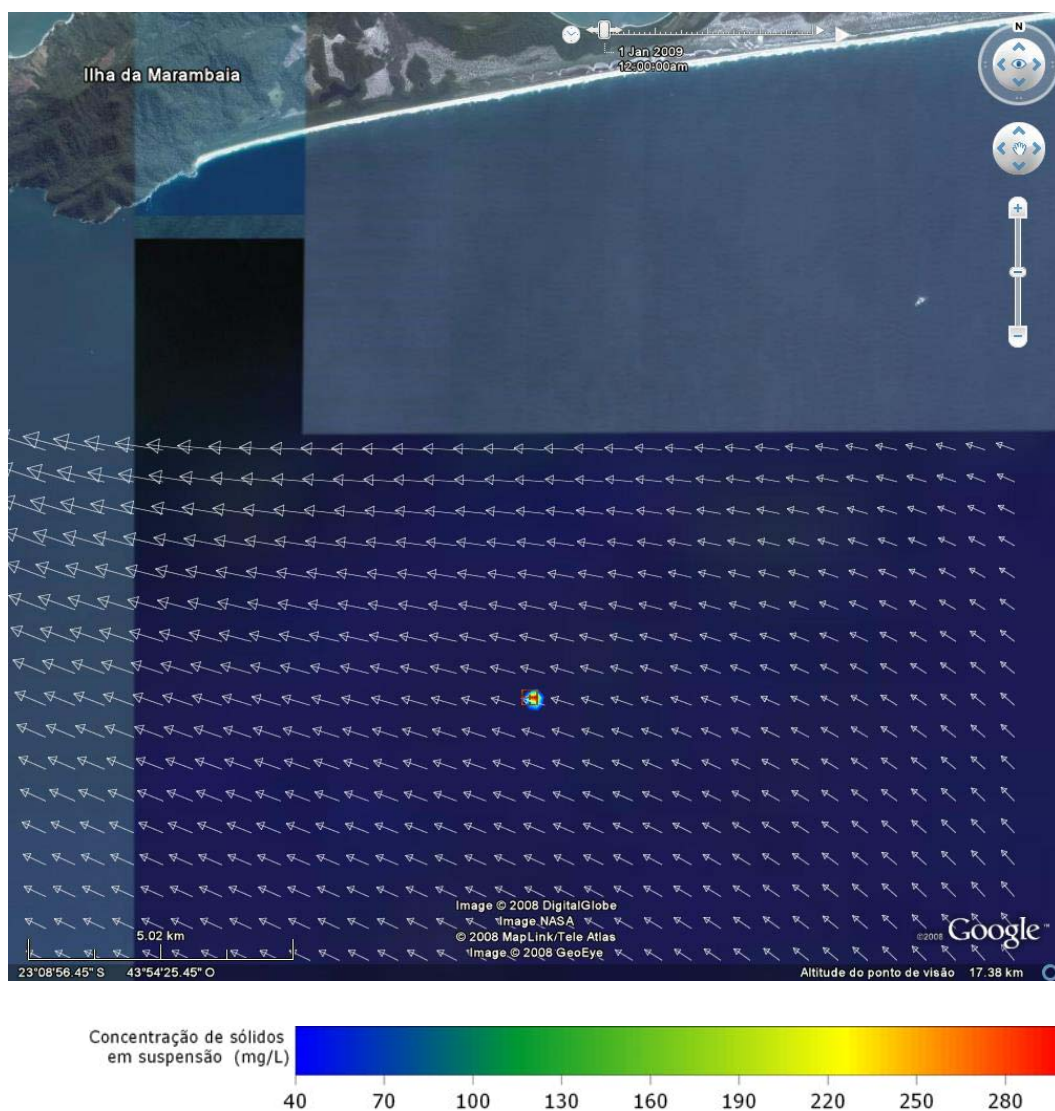


Figura 78: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da maré enchente para o cenário E_SIZ_BTf.

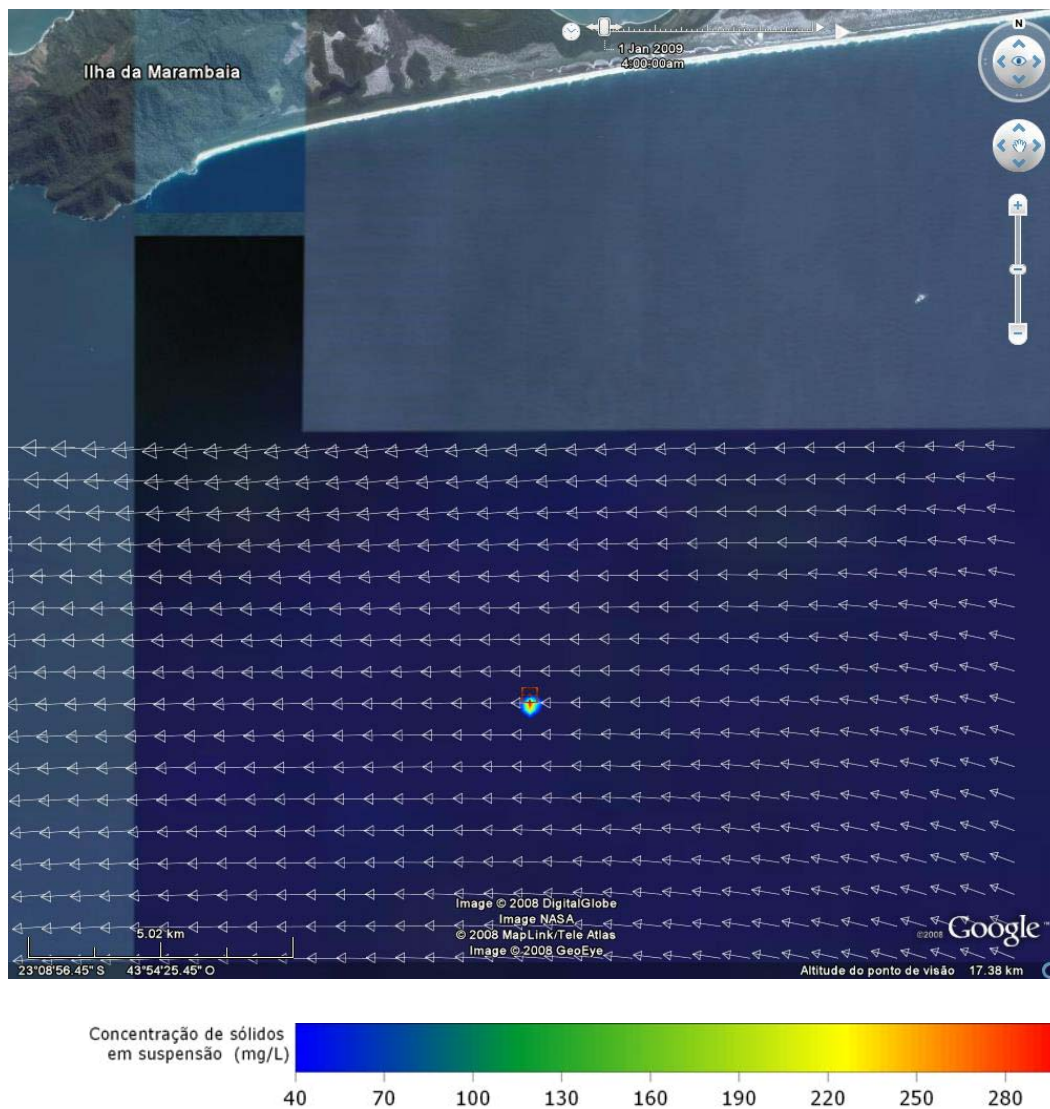


Figura 79: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no estofo de preamar para o cenário E_SIZ_BTf.

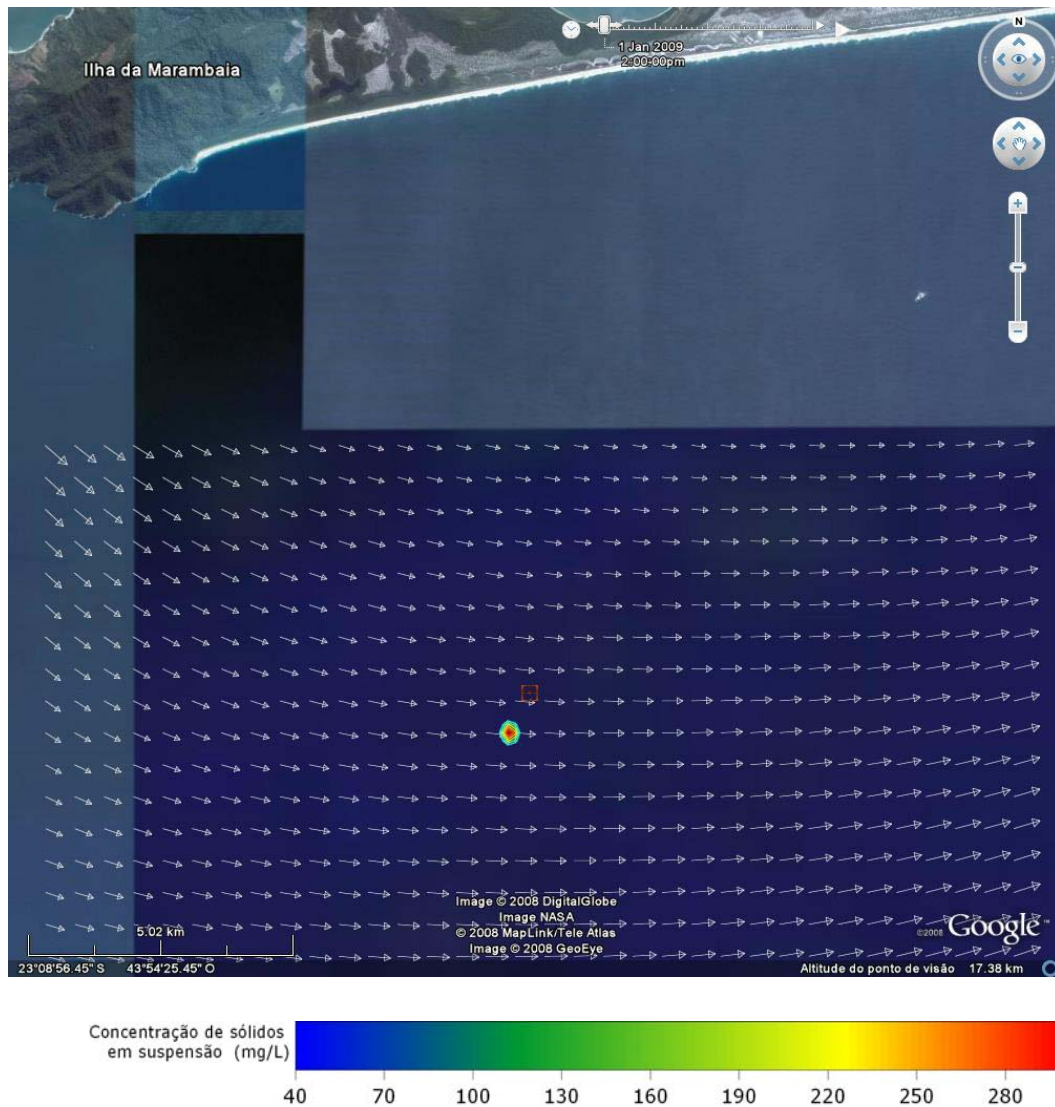


Figura 80: Concentração de sólidos em suspensão na coluna d'água no máximo da vazante para o cenário E_SIZ_BTF.

Nota-se que nesse cenário também não há interação entre as plumas de sólidos em suspensão, considerando o limite de 40 mg/l. Ou seja, a pluma já se encontra abaixo do limite de 40 mg/l menos de quatro horas após o lançamento. Em média, as plumas possuem diâmetros de cerca de 300m, com máximo de 530m. A maior distância alcançada pelas plumas em relação ao ponto de lançamento foi de 1300 metros.

A seguir são apresentadas as concentrações máximas encontradas durante todo o período para o cenário E_SIZ_BTF, independentemente da coexistência temporal. Nota-se

que, mesmo considerado a máxima concentração encontrada em qualquer período, a pluma alcança distância máxima de 1450 metros, em relação ao ponto de descarte, apresentando uma área de aproximadamente, 1.507.500 m². O resultado para a concentração média apresentou valores sempre abaixo do limite de 40 mg/l.

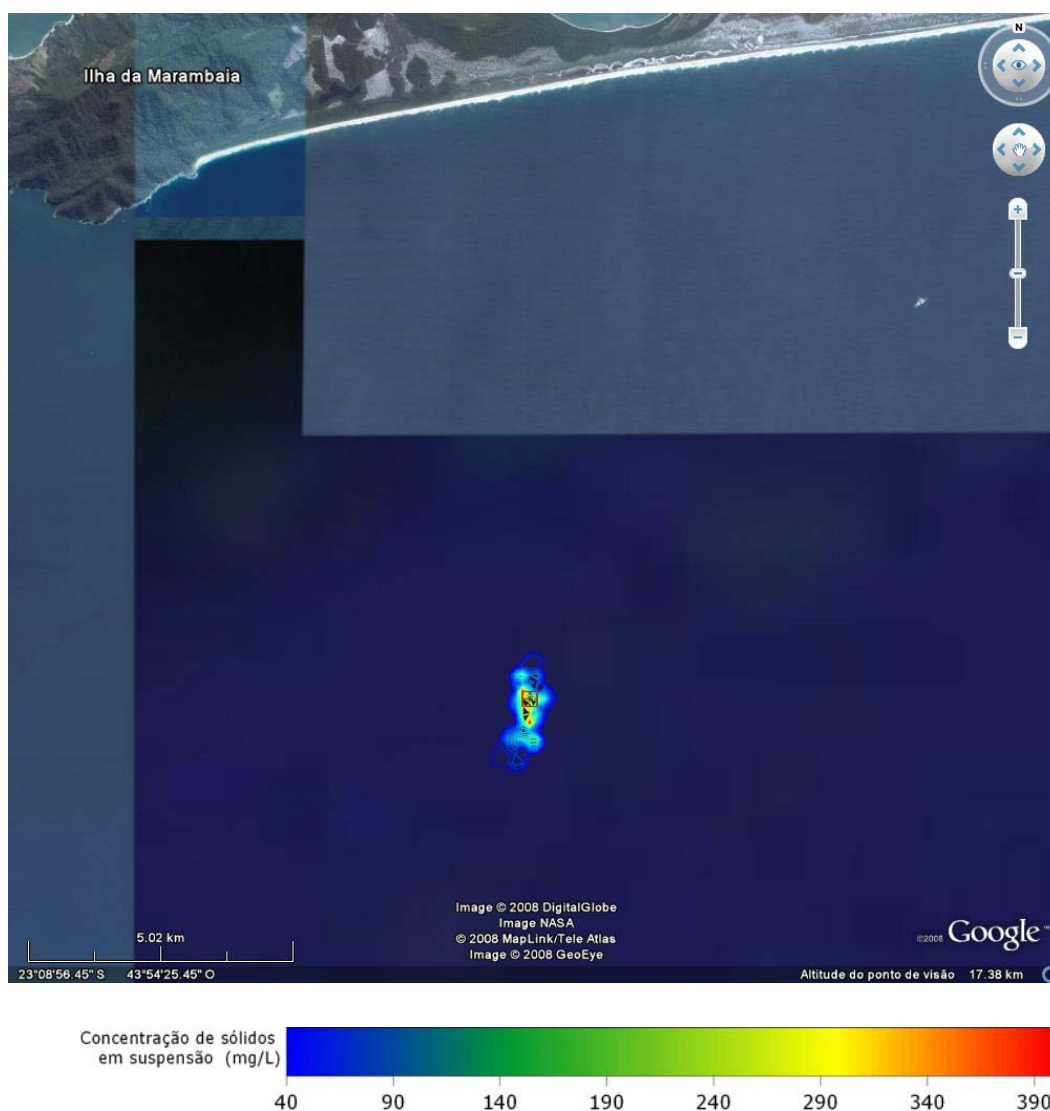


Figura 81: Concentração máxima de sólidos em suspensão durante a simulação E_SIZ_BTf.

VI.2.5. Pilha de Deposição

Para identificar o impacto no assoalho marinho do descarte na região de bota-fora, foram estimadas as pilhas formadas em todos os cenários previamente apresentados. Entretanto, conforme descrito na Figura 36, as maiores partículas (responsáveis pelas maiores espessuras), depositam-se com menos de 1 hora de duração, tornando a pilha pouco susceptível aos cenários ambientais.

Na Tabela 14 são apresentados os valores de espessura máxima encontrada para cada cenário simulado.

Tabela 14: Espessura máxima encontrada para a pilha de deposição em cada cenário simulado.

cenário	espessura máxima (m)
W_QUA	0.2374
W_SIZ	0.2346
E_QUA	0.2250
E_SIZ	0.2344

Nota-se pouca variação nos valores, sendo o máximo encontrado para o cenário de maré de quadratura com ventos de oeste. Os contornos de espessura desta pilha são apresentados na Figura 82.

Ressalta-se que este é o valor encontrado para o lançamento de apenas 1 balsa. O volume total previsto para lançamento na região de bota-fora é de 11.000.000 m³. Entretanto, este material não será lançado do mesmo ponto, e sim em uma área. Em uma estimativa de primeira ordem, para manter uma espessura máxima próxima ao valor de 1 draga é necessária uma área circular com um raio de aproximadamente 4 Km.

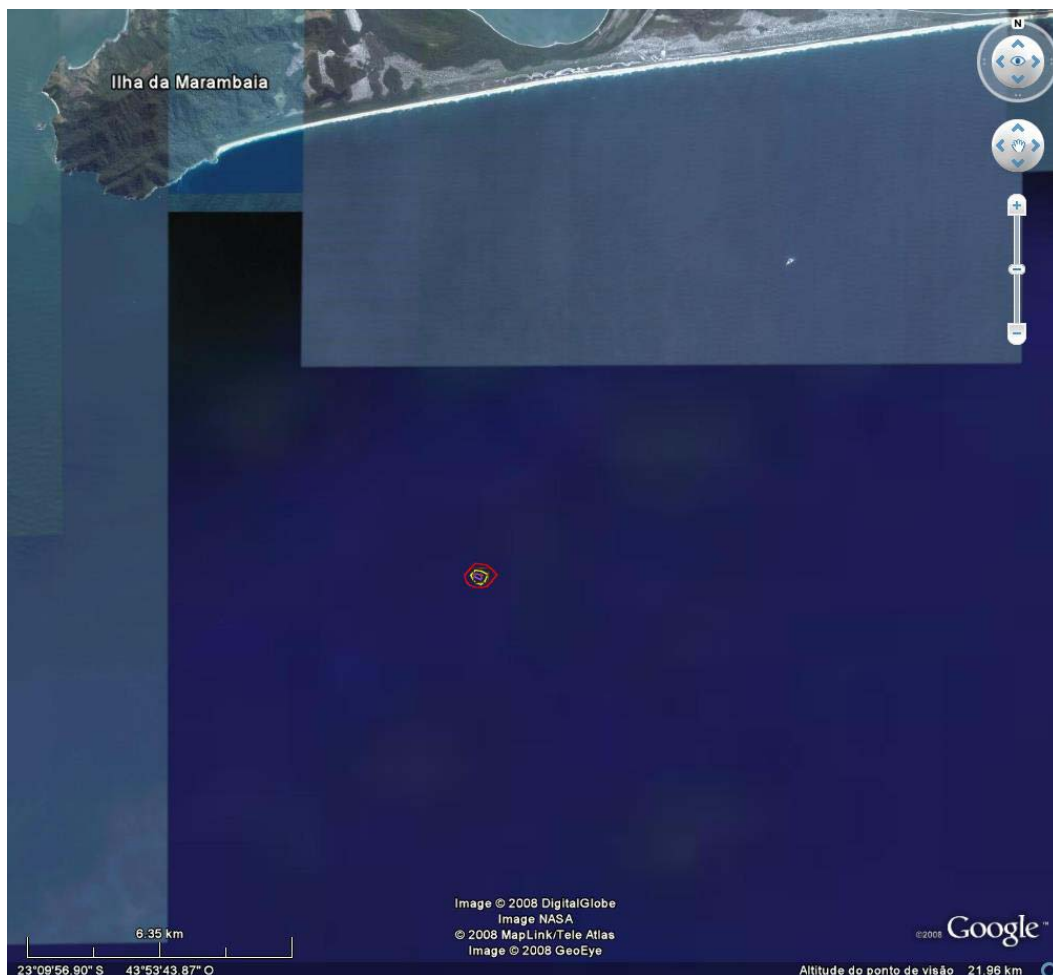


Figura 82: Pilha de deposição formada na deposição de uma draga lançada no cenário W_QUA_BTf.

VII. CONCLUSÕES

Com o intuito de estimar o comportamento do material de dragagem a ser lançado ao mar na região da Baía de Sepetiba foram realizados estudos de modelagem numérica hidrodinâmica e de transporte de sedimentos. Para tanto, foram utilizados, respectivamente, os modelos POM (Princeton Ocean Model) e OOC (Offshore Operators Committee).

Foram considerados diferentes cenários ambientais combinando os principais mecanismos de geração de correntes na região, a saber; vento e maré. Conforme análise de dados meteorológicos na região, observou-se a predominância de ventos de quadrante leste e oeste. Estes foram combinados com os períodos de maré de sizígia e quadratura, totalizando quatro cenários distintos.

Dois pontos de descarte são previstos na operação sendo 1 no interior da Baía (CDF - Confined Disposal Facility) para destinação dos sedimentos com algum grau de contaminação, e outro, bota-fora, para o lançamento do sedimento livre de contaminantes.

Observou-se um tempo de queda inferior a 1 h para mais de 89% do volume lançado no ponto de CDF e para 86% no bota-fora.

No interior da Baía de Sepetiba foi considerado um limiar de 80 mg/L e os resultados indicaram uma restrição da pluma às proximidades do ponto de descarte. Atingindo uma concentração máxima de cerca de 400 mg/L, e uma extensão máxima de aproximadamente 400 m do ponto de descarte.

Para a região do bota-fora foi considerado um limiar de 40 mg/L e os resultados indicam pouca ou nenhuma interação entre os descartes de balsas sucessivas com intervalos de 4 horas. A máxima distância percorrida pelas plumas foi em torno de 3 Km, com manchas de diâmetros médios de 300 m e máximos de 580 m, representando uma área de 1,7 Km².

Para este ponto de descarte também foi avaliada a pilha formada no assoalho marinho pela deposição do material. Notou-se pouca influência do cenário ambiental na deposição do material em virtude do reduzido tempo de queda do material.

A pilha formada por uma balsa possui espessura máxima de 0,28 m (28 cm), sendo necessária uma circunferência com raio de cerca de 4 Km para garantir que todo o volume descartado produza esta espessura máxima.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Beck, B., 2002 - "Model evaluation and performance." In: Encyclopedia of Environmetrics Volume 3, pp 1275–1279 - Edited by Abdel H. El-Shaarawi and Walter W. Piegorsch John Wiley & Sons, Ltd, Chichester

BRASFELS/ECOLOGY, 2005. EIA para realização dos Serviços de Dragagem para Aprofundamento e Manutenção do Calado do Cais de Acesso ao Estaleiro BRASFELS S.A 625 pp.

Brandsma, M., & Smith, J., 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. *ExxonMobil Upstream Research Co.*

Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In Three-Dimensional Coastal Ocean Models, N. S. Heaps (Ed.), 1-16, American Geophysical Union, Washington, DC, 1987.

Blumberg, A.F., 1977. Numerical tidal model of Chesapeake Bay. Journal of the Hydraulics Division, 103: 1-10.

Calado, L. 2000, Dinâmica da Formação dos Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro, Dissertação de Mestrado – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Camargo, R., 1998. Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da baía de Paranaguá. Tese de Doutorado, Instituto Astronômico e Geofísico - Universidade de São Paulo, São Paulo, 179 p.

Ezer, T. and G. L. Mellor, 1994: "Diagnostic and prognostic calculations of the North Atlantic circulation and sea level using a sigma coordinate ocean model" J. Geophys. Res., 99(C7), pp. 14,159-14,171.

Ezer, T., H. Arango and A. F. Shchepetkin: 2002. "Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects", Ocean Modelling, 4, pp. 249-267.

Ezer, T., and G. L. Mellor, 2004: A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids. Ocean Modelling, 6(3-4), 379-403.

Ezer, T., 2001. On the response of the Atlantic Ocean to climatic changes in high latitudes: Sensitivity studies with a sigma coordinate ocean model, In: The Oceans and Rapid Climate Change: Past, Present and Future, D. Seidov, B. J. Haupt and M. Maslin (Eds.). American Geophysical Union, 199-215.

Fragoso, M.R., 1999. Estudo Numérico da Circulação Marinha da Região das Baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo. 112p.

Fragoso, M.R., 1995. Estimativa do Padrão de Circulação da Baía de Sepetiba (RJ) Através de Modelagem Numérica. Monografia de Graduação, Depto. Oceanografia - UERJ, Rio de Janeiro, 84 pp.

Gan, J., L. A. Mysak and D. N. Strub, 1998. Simulation of the South Atlantic Ocean circulation and its seasonal variability. J. Geophys. Res., 103(C5), 10,241-10,251

Galperin, B., A.F. Blumberg & R.H. Weisberg, 1992. "The importance of density driven circulation in well mixed estuaries: The Tampa Bay experience." In: ASCE (Editor), Estuarine and Coastal Modeling, pp. 332-341.

Galperin, B. & G.L. Mellor, 1990a. A time-dependent, three-dimensional model of the Delaware Bay and River. Part 1: Description of the model and tidal analysis. Estuarine, Coastal and Shelf Sci, 31: 231-253.

Galperin, B. & G.L. Mellor., 1990b. A time-dependent, three-dimensional model of the Delaware Bay and River. Part 2: Three-dimensional flow fields and residual circulation. Estuarine, Coastal and Shelf Sci, 31: 255-281.

Hong, C.H., 1998. Simulation of sea water response in Deukryang Bay to Typhoon using the Princeton Ocean Model. J. Korean Soc. Oceanogr, 33: 53-63.

Le Provost, C., M.L. Genco, F. Lyard, P. Vincent & P. Canceil, 1994. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model. Journal of Geophysical Research, 99(C12): 24.777-24.797.

Marsaleix, P., C, 1998: Estournel, V. Kondrachoff & R. Vehil. "A numerical study of the formation of the Rhone River plume." J. Mar. Sys., 14: pp. 99-115.

Mascarenhas Jr, A S 1985 - "Revisão sobre o cálculo da tensão de cisalhamento do vento sobre o oceano." In: Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, n.14, pp.1-10

Mellor, G. L., and T. Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, 20, 851-875, 1982.

Mellor, G. L., 2004. "User's Guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model". Atmos. And Oceanic Sci. Program, Princeton University, Princeton, N. J., USA.

O'Connor, W.P., 1991. A Numerical Model of Tides and Storm Surges in the Rio de la Plata Estuary. Continental Shelf Res, 11: 1491- 1508.

Signorini, S.R., 1980a. A Study of The Circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba Part I, A Survey of the Circulation Based on Experimental Field Data. Bolm Inst. oceanogr., 29(1): 41-55.

Signorini, S.R., 1980b. A Study of the Circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba Part II, An Assessment to the Tidally and Wind-Driven Circulation Using a Finite Element Numerical Model. Bolm Inst oceanogr., 29(1): 57-68.

Tommasi, L.R., M.T.M. Valente & R. Acedo, 1972. Cephalocordata da região da Ilha Grande (RJ). Bolm Inst. oceanogr., 21: 149-162.

Walstra, D.J.R., van Rijn, L.C., Blogg, H., van Ormondt, M., 2001. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the Coast3D data at Teignmouth 1999. COAST3D Final Volume of Summary Papers. Report TR121, HR Wallingford, UK