

# Modelagem Hidrodinâmica e de Transporte de Sedimentos e Pluma de Dragagem para o Estaleiro do Paraguaçu, Bahia

REVISÃO 00

Novembro/09







**ASA SOUTH AMERICA**

**Rua Fidalga, 711**

**Vila Madalena – São Paulo –SP**

**CEP 05432-070**

**<http://www.asascience.com.br>**



**Superintendência de Desenvolvimento Industrial  
e Comercial - SUDIC**

**Rod. BR - 324 km. 607,6, CIA**

**Simões Filho - BA**

**CEP 43780-000**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS E PLUMA DE DRAGAGEM PARA  
O ESTALEIRO PARAGUAÇU, BAHIA**

Equipe Técnica **ASA South America:**

ANA CAROLINA R. LAMMARDO

(Nº IBAMA: 325047)

EDUARDO A. YASSUDA

(Nº IBAMA: 94066)

ERIKA NAOMI TOMINAGA

(Nº IBAMA: 980855)

GABRIEL CLAUZET

(Nº IBAMA: 1031373)

GABRIELA FREIRE CASSIANO

(Nº IBAMA: 730645)

HEMERSON TONIN

(Nº IBAMA: 1658739)

MARCO ANTONIO CORRÊA

(Nº IBAMA: 434236)

MARIA REGINA F. GUIMARÃES

(Nº IBAMA: 434231)

PEDRO FABIANO M. SARMENTO

(Nº IBAMA: 1800416)

TATIANA JORGETTI

(Nº IBAMA: 2952238)

**Revisão 00**

**Novembro / 2009**

A **ASA South America** é responsável pelo conteúdo do presente relatório incluindo: tecnologias, metodologias, especificações técnicas, desenhos, figuras, cópias, diagramas, fórmulas, modelos, amostras, e fluxogramas.

A utilização deste material deverá ser compatível com o escopo do projeto/trabalho contratado, fazendo-se expressa menção ao nome da **ASA South America** como autora do estudo. Da mesma forma, quando a equipe técnica da **ASA** for incorporada na equipe técnica da empresa contratante, esta deverá ser mencionada, e referenciada, como: “consultores da **ASA South America**”. Qualquer dúvida ou alteração desta conduta deverá ser discutida entre o cliente e a **ASA South America**.

ASA (Applied Science Associates South America), 2009. Modelagem Hidrodinâmica e de Transporte de Sedimentos e Pluma de Dragagem para o Estaleiro do Paraguaçu, Bahia. Relatório Técnico Rev.00. São Paulo, 16 de novembro de 2009. 74pp+Anexos.





## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO.....	I-1
I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS .....	I-3
I.1.2 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS .....	I-4
II MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE TRANSPORTE NATURAL DE SEDIMENTOS .....	II-1
II.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E DADOS DE ENTRADA.....	II-1
II.1.1 GRADE NUMÉRICA E BATIMETRIA .....	II-1
II.1.2 FORÇANTES.....	II-5
II.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA PARA A CONFIGURAÇÃO ATUAL.....	II-8
II.2.1 AVALIAÇÃO PARA A MARÉ .....	II-8
II.2.2 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	II-10
II.2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM HIDRODINÂMICA PARA A CONDIÇÃO ATUAL.....	II-14
II.3 OS IMPACTOS DECORRENTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO EMPREENHIMENTO NA PONTA DO CORUJÃO.....	II-15
II.3.1 ALTERAÇÕES HIDRODINÂMICAS .....	II-16
II.3.2 ALTERAÇÕES NA TAXA DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS .....	II-22
III MODELAGEM DA DISPERSÃO DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE .....	III-1
III.1 ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE DO MATERIAL DRAGADO .....	III-1
III.2 DADOS DE ENTRADA E CENÁRIOS SIMULADOS .....	III-5
III.2.1 CENÁRIOS DA DISPERSÃO DO MATERIAL RESSUSPENDIDO DURANTE A DRAGAGEM .....	III-6
III.2.2 CENÁRIOS DOS DESCARTES DO MATERIAL DRAGADO .....	III-6
III.2.3 CRITÉRIO DE CORTE ADOTADO NA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	III-7

III.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O MODELO SSFATE .....	III-8
III.3.1	RESULTADOS DA DISPERSÃO DO MATERIAL RESSUSPENDIDO DURANTE A DRAGAGEM .....	III-8
III.3.1.1	Resultados para o Período de Verão .....	III-9
III.3.1.2	Resultados para o Período de inverno .....	III-12
III.3.2	RESULTADOS DOS DESCARTES DO MATERIAL DRAGADO ....	III-15
III.3.2.1	Concentração de Sedimentos em Suspensão .....	III-15
III.3.2.2	Sedimentos Depositados.....	III-18
IV	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	IV-1
V	BIBLIOGRAFIA.....	V-1
ANEXO A - ANÁLISE DE DADOS.....		A-1
A.1	VENTOS .....	A-2
A.2	CORRENTES.....	A-7
A.3	MARÉS .....	A-11
A.4	VAZÕES.....	A-13
A.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	A-14
ANEXO B – DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D.....		B-1
B.1	DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-FLOW .....	B-1
B.1.1	PROCESSOS FÍSICOS .....	B-2
B.1.2	EQUAÇÕES BÁSICAS.....	B-3
B.2	DESCRIÇÃO DO MODELO DELFT3D-SED .....	B-9
B.2.1	PROCESSOS FÍSICOS .....	B-10
B.2.1.1	Transporte de Sedimentos em Suspensão.....	B-11
B.2.1.2	Velocidade de Deposição de Sedimentos .....	B-12
B.2.1.3	Transporte Dispersivo .....	B-13
B.2.1.4	Erosão e Deposição.....	B-13
B.3	BIBLIOGRAFIA .....	B-18
ANEXO C - ANIMAÇÕES DOS CAMPOS DE CORRENTE PARA A REGIÃO DO EMPREENHIMENTO.....		C-1
ANEXO D - MODELAGEM HIDRODINÂMICA PARA A REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE.....		D-1
D.1	DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES .....	D-1
D.1.1	EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM.....	D-2

---

D.1.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS .....	D-5
D.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO NA REGIÃO .....	D-6
D.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	D-9
D.1.1 AVALIAÇÃO PARA A ELEVAÇÃO DE SUPEFÍCIE DO MAR .....	D-9
D.1.1 AVALIAÇÃO PARA AS CORRENTES .....	D-10
D.3 BIBLIOGRAFIA .....	D-17
ANEXO E - DESCRIÇÃO DO MODELO SSFATE.....	E-1
E.1 FORMULAÇÃO .....	E-2
E.1.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	E-3
E.1.2 VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS .....	E-5
E.1.3 DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS.....	E-6
E.2 BIBLIOGRAFIA .....	E-9
ANEXO F - ANIMAÇÕES DA MODELAGEM DE RESSUSPENSÃO DE MATERIAL DRAGADO .....	F-1
ANEXO G - ANIMAÇÕES DA MODELAGEM DO DESCARTE DE MATERIAL DRAGADO .....	G-1



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Granulometria (%) do material dragado/descartado (Fonte: Coleta de dados em campo em setembro de 2009. BMA LTDA). .....	III-2
<b>Tabela 2</b> - Características da draga. ....	III-4
<b>Tabela 3</b> - Características do material dragado/descartado.....	III-4
<b>Tabela 4</b> - Características das operações de dragagem e descarte.....	III-5
<b>Tabela 5</b> - Resumo dos resultados obtidos na modelagem. ....	III-8
<b>Tabela 6</b> - Alcance nas direções sudoeste (SW) e nordeste (NE), áreas de abrangência das plumas de sedimento descartado e concentrações máximas na coluna d'água para os cenários simulados. ....	III-15
<b>Tabela 7</b> - Espessuras depositadas para os cenários simulados.....	III-18



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Área de estudo e localização do empreendimento..... I-2
- Figura 2** - Grade computacional (numérica) implementada ao sistema de modelos Delft3D e a respectiva batimetria associada (configuração atual). Batimetria em metros. Em destaque a região de implementação da grade numérica local. .... II-3
- Figura 3** - Detalhe da grade numérica computacional e batimetria (em metros) associada para a região de implementação do empreendimento (configuração atual). Região demarcada na Figura 2. .... II-4
- Figura 4** - Detalhe da grade numérica computacional e batimetria (em metros) associada para a região de implementação do empreendimento (configuração futura). Região demarcada na Figura 2. .... II-5
- Figura 5** - Grade computacional (regional) do modelo hidrodinâmico com a localização das principais bordas abertas (linhas vermelhas)..... II-6
- Figura 6** - Grade computacional (local) do modelo hidrodinâmico com a localização das principais bordas abertas (linhas vermelhas). Configuração atual. .... II-7
- Figura 7** - Séries temporais de elevação de superfície do mar na Estação, para o período típico de verão. Em azul, a série temporal como resultado do modelo; em vermelho, dados coletados (CRA, 2000). .... II-9
- Figura 8** - Séries temporais de elevação de superfície do mar na Estação 18, para o período típico de inverno. Em azul, a série temporal como resultado do modelo; em vermelho, dados coletados CRA (2000). .... II-10
- Figura 9** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, próximo a superfície (prof. ~6 m), durante um período típico de verão. Painel superior: componente u da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente v da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000). .... II-11
- Figura 10** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, junto ao fundo (prof. ~26m), durante um período típico de verão. Painel superior: componente u da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente v da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000). .... II-12
- Figura 11** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, próximo a superfície (prof. ~6 m), durante um período típico de inverno. Painel superior: componente u da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente v da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000). .... II-13

- Figura 12** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, junto ao fundo (prof. ~26 m), durante um período típico de inverno. Painel superior: componente u da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente v da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000). ..... II-14
- Figura 13** - Distribuição espacial de pontos para avaliação de alterações hidrodinâmicas decorrentes da implantação do estaleiro na Ponta do Corujão. As letras (A, B, C e D) indicam os pontos de comparação e, em vermelho, os contornos do empreendimento. As regiões hachuradas indicam as principais alterações impostas no local (em verde escuro: aterro; em amarelo: a região a ser dragada). ..... II-17
- Figura 14** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto A (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho. II-18
- Figura 15** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto B (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho. II-19
- Figura 16** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto C (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho. II-20
- Figura 17** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto D (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho. II-21
- Figura 18** - Variação batimétrica anual (em centímetros), como resultado da simulação numérica, para a região da Ponta do Corujão (BA), para a configuração (situação) atual. .... II-23
- Figura 19** - Variação batimétrica anual (em centímetros), como resultado da simulação numérica, para a região da Ponta do Corujão (BA), para a configuração futura... II-25
- Figura 20** - Setorização da área de dragagem (em linhas de dragagem) e localização do ponto de descarte. .... III-3
- Figura 21** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final de um único ciclo da operação de dragagem, durante o período de verão. .... III-9
- Figura 22** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de dois ciclos da operação de dragagem, durante o período de verão. .... III-10
- Figura 23** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de oito ciclos da operação de dragagem, durante o período de verão. .... III-11
- Figura 24** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final de um único ciclo da operação de dragagem, durante o período de inverno. .... III-12

- Figura 25** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de dois ciclos da operação de dragagem, durante o período de inverno..... III-13
- Figura 26** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de oito ciclos da operação de dragagem, durante o período de inverno. .... III-14
- Figura 27** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final dos descartes realizados durante 30 dias de operações, durante o período de verão. .... III-16
- Figura 28** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final dos descartes realizados durante 30 dias de operações, durante o período de inverno. .... III-17
- Figura 29** - Espessura (mm) de sedimentos depositados ao longo de 30 dias de operação de descarte, durante o período de verão. .... III-19
- Figura 30** - Espessura (mm) de sedimentos depositados estimados para o tempo total de descartes (182,5 dias), durante o período de verão. .... III-20
- Figura 31** - Espessura (mm) de sedimentos depositados ao longo de 30 dias de operação de descarte, durante o período de inverno. .... III-21
- Figura 32** - Espessura (mm) de sedimentos depositados estimados para o tempo total de descartes (182,5 dias), durante o período de inverno. .... III-22



## RESUMO

Este relatório técnico apresenta os resultados dos estudos de modelagem das possíveis alterações ambientais devido à implementação de um estaleiro na Ponta do Corujão, no Rio Paraguaçu (BA). Neste estudo considerou-se uma configuração possível para tal empreendimento e foram conduzidas modelagens para avaliar as possíveis alterações da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos (natural), além de modelagens da dispersão de sedimentos oriundos dos processos de dragagem/descarte.

As simulações realizadas mostraram alterações pouco significativas na hidrodinâmica e nas taxas anuais de deposição e/ou erosão em decorrência da implementação do estaleiro na Ponta do Corujão. Estas alterações são maiores em função das alterações na cota batimétrica devido à dragagem (intensificação do fluxo próximo dos taludes).

Quanto à avaliação da pluma de sedimentos oriundos das operações de dragagem, os resultados das simulações apresentaram áreas totais das plumas em suspensão inferiores a  $1,60 \text{ km}^2$ . Em relação aos descartes na região do bota-fora, calculou-se áreas totais de trajetória das plumas de, aproximadamente,  $430 \text{ km}^2$  e deposição máxima de 194 mm.



## I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de auxiliar na elaboração dos estudos de impacto ambiental para a implantação de um Estaleiro na região da Ponta do Corujão, da Superintendência de Desenvolvimento Industrial e Comercial (SUDIC), localizado no Estado da Bahia, a **ASA South America** apresenta este trabalho de modelagem numérica computacional da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos (natural e das operações de dragagem/descarte) no Rio Paraguaçu, Baía de Todos os Santos (BTS) e região costeira adjacente.

A caracterização, no Rio Paraguaçu e BTS, dos padrões de circulação, do transporte natural de sedimentos e das alterações na morfologia de fundo foi obtida a partir de simulações numéricas. A ferramenta escolhida nestes procedimentos foi o sistema de modelos numéricos Delft3D, desenvolvido por WL|Delft Hydraulics, adaptados e implementados pela **ASA South America**.

Na região costeira adjacente, a caracterização dos padrões de circulação foi obtida a partir de resultados do modelo numérico hidrodinâmico implementado pela **ASA South America**, a partir do código de domínio público do POM<sup>1</sup>.

As simulações da dispersão do material provenientes das operações de dragagem e descarte foram conduzidas através da utilização do modelo SSFATE<sup>2</sup>, da USACE<sup>3</sup>, em versão customizada pela **ASA**.

### I.1 ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a localização do empreendimento, assim como da região de estudo. O Rio Paraguaçu deságua na Baía de Todos os Santos, a qual está localizada no litoral do Estado da Bahia e possui 12 municípios em seu entorno que compõem o chamado Recôncavo Baiano. Ela é a uma das maiores baías da costa brasileira, com uma área aproximada de 1.270 km<sup>2</sup>, considerando o espelho d'água máximo em situação de preamar de sizígia.

<sup>1</sup> Princeton Ocean Model.

<sup>2</sup> Suspended Sediment Fate.

<sup>3</sup> U.S. Army Corps of Engineers.

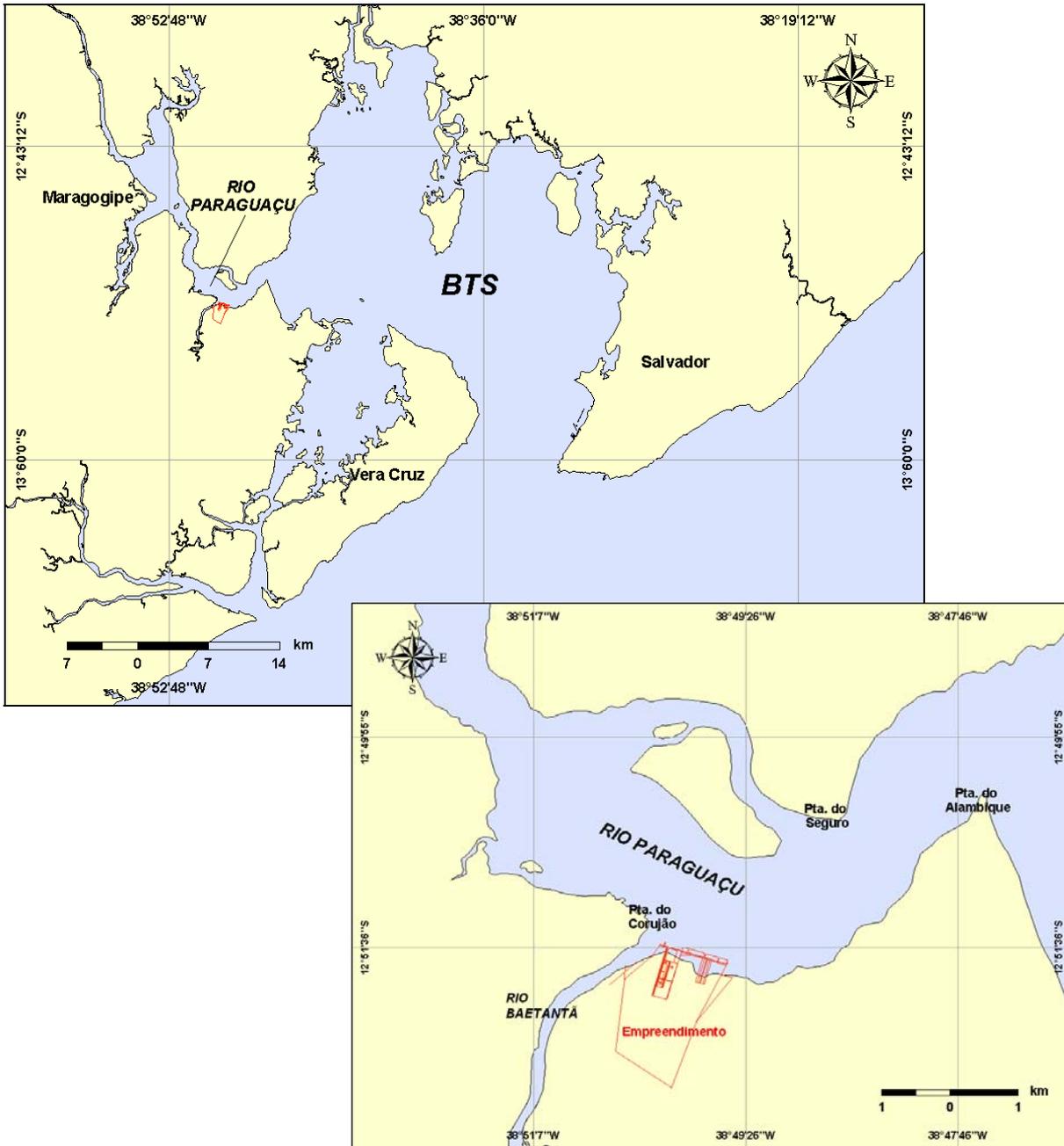


Figura 1 - Área de estudo e localização do empreendimento.

As análises de dados pretéritos meteorológicos, oceanográficos e hidrológicos realizadas para o presente estudo são apresentadas no Anexo A. Este levantamento teve por objetivo obter informações para uma compreensão e descrição da dinâmica da área, bem como para a validação/avaliação das modelagens hidrodinâmicas e aferição direta nas simulações de dragagem/descarte.

A seguir, a partir de levantamento bibliográfico, são apresentadas as principais características meteorológicas e oceanográficas da região.

### ***1.1.1 Características Meteorológicas***

A região Nordeste do Brasil apresenta alta variabilidade climática (Climanálise, 1996). A principal estação chuvosa (incluindo o norte e leste da região), responsável por 60% da chuva anual, ocorre de abril a julho e a estação seca ocorre de setembro a dezembro, para a maior parte da região (Rao *et al.*, 1993). Esta variabilidade pluviométrica interanual está associada às variações nos padrões de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre os oceanos tropicais, os quais afetam a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico, modulando assim os índices pluviométricos da região Nordeste (Hastenrath, 1984; Moura & Shukla, 1981).

O posicionamento da ZCIT também contribui significativamente para a variação sazonal dos padrões de circulação atmosférica nesta região. Os meses de novembro, dezembro e janeiro apresentam dominância de um comportamento de ventos de leste (com intensa componente zonal), indicando o posicionamento da ZCIT mais a sul, típico de verão. Já nos meses de maio, junho e julho, os ventos apresentam uma componente meridional mais intensa, associada ao deslocamento para norte da ZCIT, que implica em alísios de SE sobre a região de interesse. Além disso, os sistemas frontais, mais frequentes no inverno, contribuem periodicamente com mais energia que os alísios, com ventos de sul-sudoeste durante sua passagem.

## ***I.1.2 Características Oceanográficas***

Toda a região localizada acima da Cadeia Vitória-Trindade é uma zona de formação e divisória entre fluxos superficiais e sub-superficiais (*i.e* Corrente do Brasil - CB e Corrente Norte do Brasil - CNB). Este processo, conhecido como Bifurcação da Corrente Sul-Equatorial (BICSE), é relativamente pouco estudado do ponto de vista observacional, embora já bastante discutido em literatura relacionada (*e.g.* Stramma & Schott, 1996; Stramma & England, 1999; Rodrigues *et al.*, 2007).

No litoral da Bahia, a plataforma continental é estreita, apresentando, em algumas áreas, um talude continental abrupto e recortado. Nestas áreas mais estreitas, o efeito da circulação do talude e oceano aberto se faz mais presentes. Especificamente sobre o talude, pouco se conhece sobre a circulação média e suas variabilidades. Supõe-se que o padrão de corrente de contorno oeste em regime permanente, deva contribuir diretamente para a formação do fluxo da Corrente do Brasil (melhor definido ao sul do Parcel de Abrolhos).

A região da BTS apresenta padrões de circulação complexos devido à interação existente entre a circulação oceânica de grande escala (baixa frequência) e os padrões impostos pela dinâmica local. No interior da baía e região costeira adjacente, observa-se predomínio do sinal de maré, decorrente principalmente do afunilamento da energia pelo sistema plataforma continental e BTS. A região da plataforma recebe contribuição indireta da circulação de oceano profundo e dos padrões gerados pela passagem de frentes meteorológicas. Nas áreas costeiras também há forte influência do vento local (alta frequência) e da maré em áreas meandradas e/ou com alargamento da plataforma.

## **II MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE TRANSPORTE NATURAL DE SEDIMENTOS**

O sistema de modelos numéricos Delft3D (WL | DELFT HYDRAULICS, 2006) foi utilizado nas modelagens para avaliação da influência do empreendimento na circulação e transporte natural de sedimentos. Ou seja, neste capítulo são avaliadas situações antes e após a implantação do empreendimento.

As principais características desse modelo são descritas no Anexo B deste relatório, através de seus principais módulos: hidrodinâmico (DELFT3D-FLOW) e geomorfológico (DELFT3D-SED).

### **II.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E DADOS DE ENTRADA**

#### **II.1.1 Grade Numérica e Batimetria**

As grades numéricas (ou malhas numéricas) são implementadas com o compromisso de representação dos processos dinâmicos do sistema com os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário.

Neste estudo foram implementadas duas grades numéricas: (a) uma grade de maior escala, denominada grade regional, que abrange toda a região de interesse, e (b) uma grade local, de alta resolução espacial, para representar, em detalhes, o empreendimento. A grade regional é utilizada para reproduzir a dinâmica da região como um todo e fornecer à grade local as condições de contorno apropriadas.

Para estas grades, os dados de profundidade foram fornecidos pela contratante e complementados com informações provenientes das cartas náuticas da DHN<sup>4</sup> números 1.100, 1.101, 1.102, 1.103, 1.104, 1.105, 1.107, 1.108 e 1.110.

---

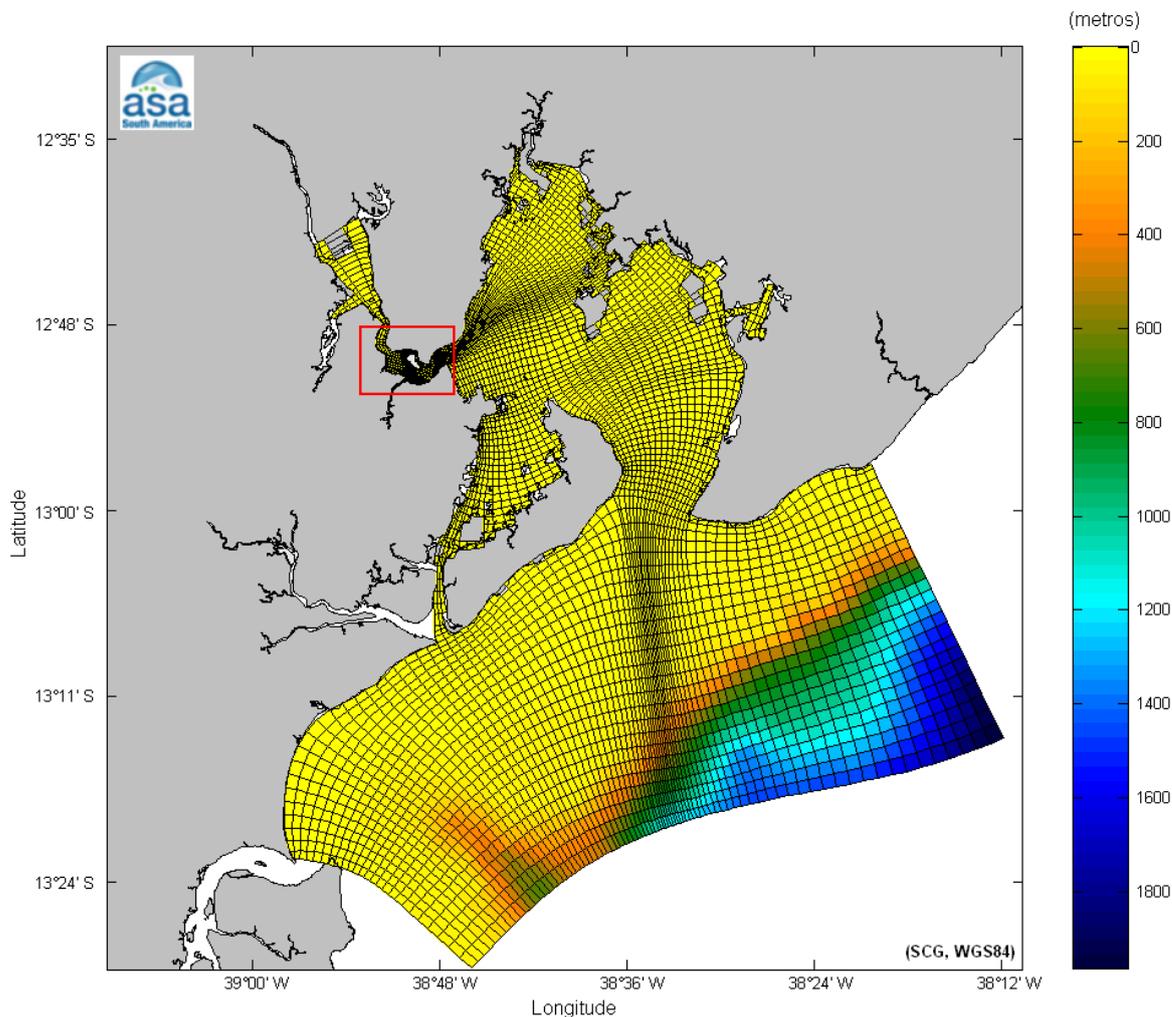
<sup>4</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

A especificação da grade numérica é feita pela fixação dos pontos de grade ao longo da linha de costa (no plano) e pela batimetria (eixo vertical). Uma vez que os pontos de grade ao longo da linha de costa são determinados, as demais características batimétricas são associadas ao domínio.

Os dados batimétricos foram utilizados visando representar:

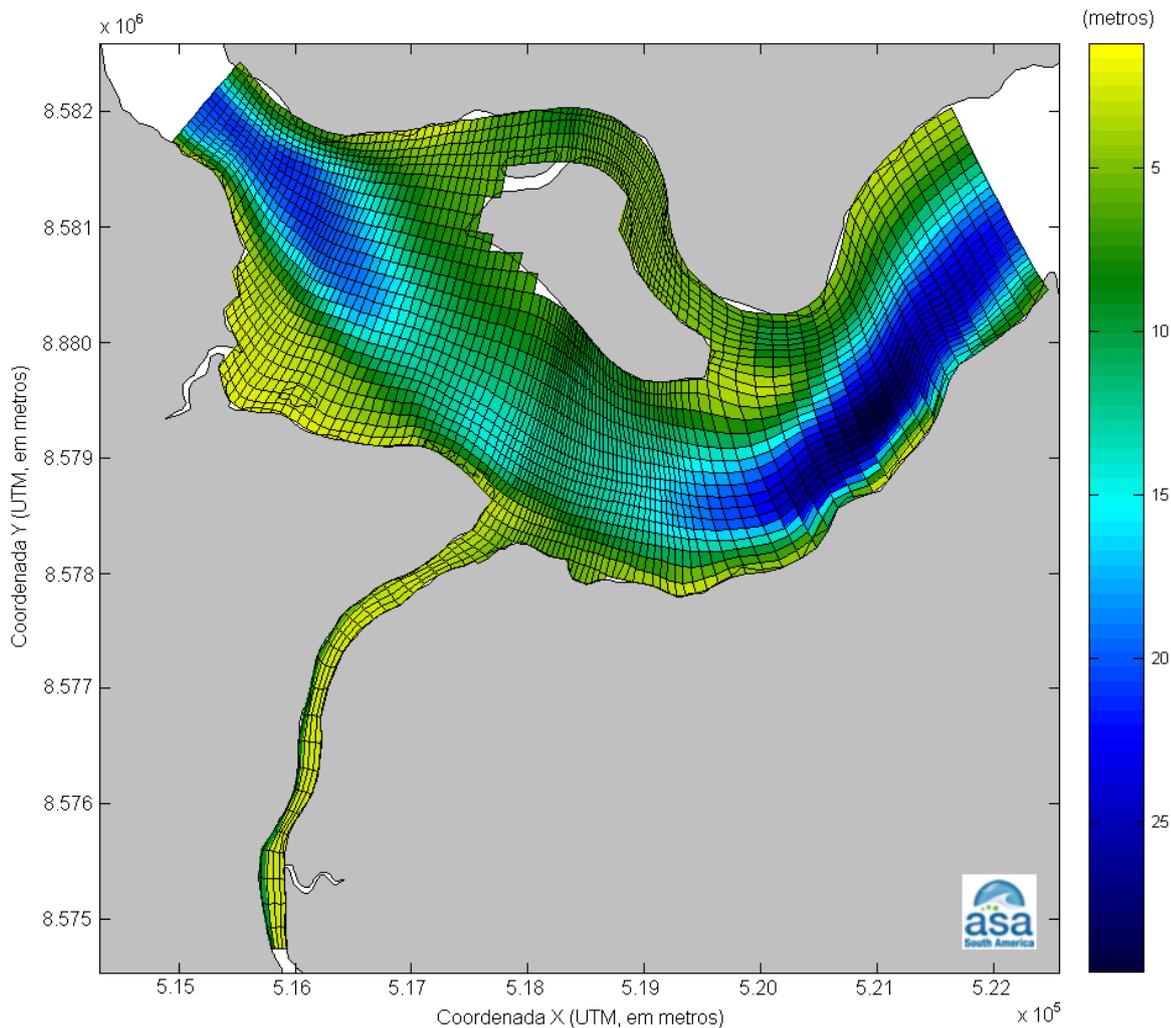
- as cotas batimétricas atuais (configuração atual) e,
- uma configuração futura, correspondendo a opção de *layout* para o empreendimento.

A grade numérica (regional) implementada para o Rio Paraguaçu e Baía de Todos os Santos, a qual independente da batimetria a ela associada, possui dimensão horizontal de 113x128 pontos, enquanto que, a grade local tem dimensão horizontal de 120x55 pontos. Ambas as grades têm cinco níveis (camadas) sigma na vertical. O espaçamento horizontal da grade local varia entre 100 m (na região de menor resolução) e 40 m (na região de maior resolução – centrada na região do empreendimento). Dependendo de qual configuração será simulada (atual ou futura), interpola-se o respectivo conjunto de cotas batimétricas à grade numérica, devidamente adequada a referida configuração. Na Figura 2 é apresentada a grade numérica regional com a respectiva batimetria, destacando a região das principais intervenções previstas em decorrência da implementação do empreendimento (alteração da linha de costa e das cotas batimétricas).



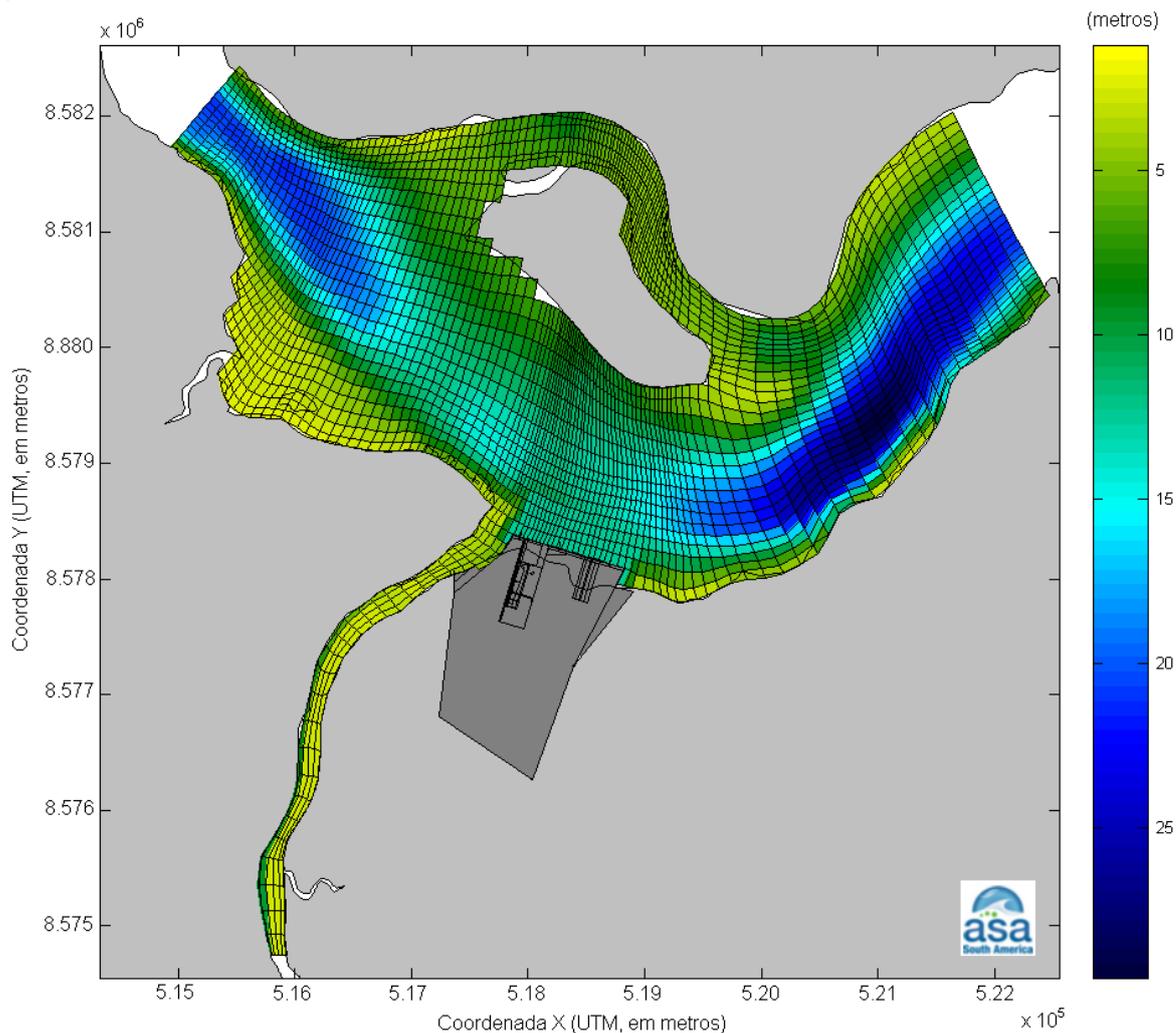
**Figura 2** - Grade computacional (numérica) implementada ao sistema de modelos Delft3D e a respectiva batimetria associada (configuração atual). Batimetria em metros. Em destaque a região de implementação da grade numérica local.

Dentro deste contexto, as figuras a seguir (Figura 3 e Figura 4) evidenciam as diferenças entre as grades numéricas implementadas na região destacada da Figura 2 como efeito da configuração considerada.



**Figura 3** - Detalhe da grade numérica computacional e batimetria (em metros) associada para a região de implementação do empreendimento (configuração atual). Região demarcada na Figura 2.

A Figura 4 apresenta a configuração proposta para o empreendimento. Salienta-se defronte ao empreendimento a existência de uma região com cota batimétrica de 12 m.

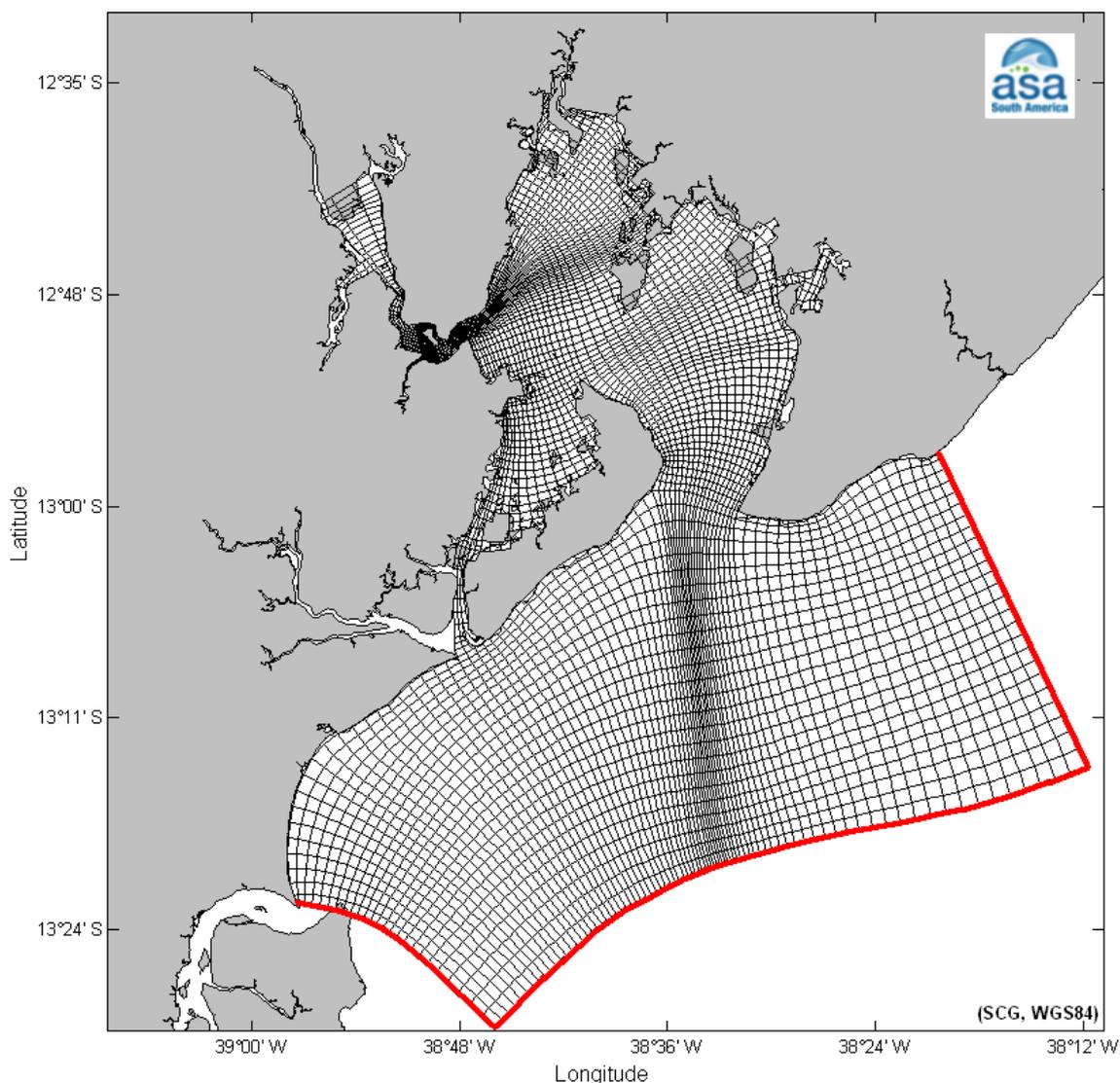


**Figura 4** - Detalhe da grade numérica computacional e batimetria (em metros) associada para a região de implementação do empreendimento (configuração futura). Região demarcada na Figura 2.

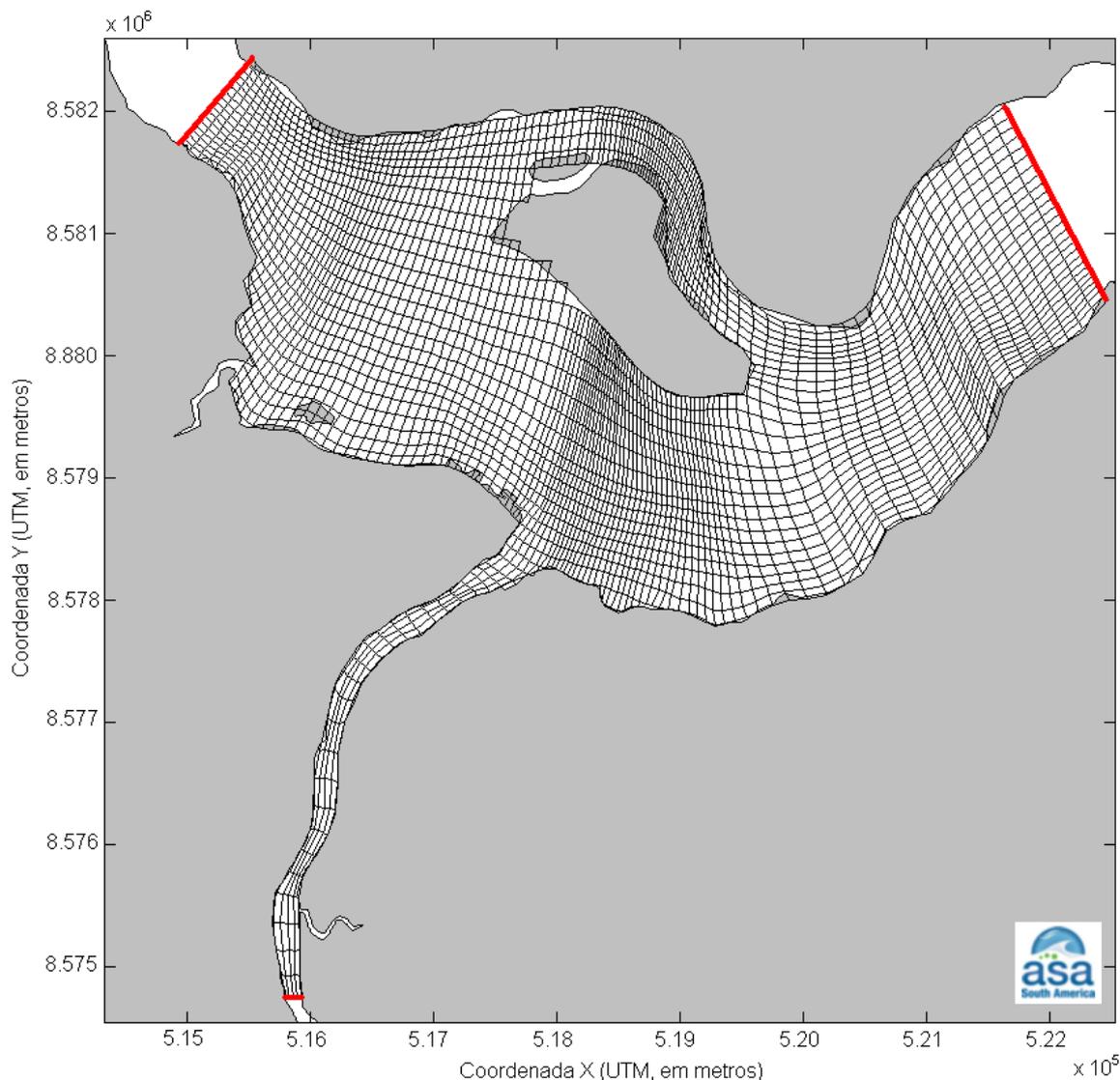
### II.1.2 Forçantes

O sistema de modelos Delft3D possibilita a utilização de contornos abertos. Nesses contornos abertos (ou bordas abertas) podem ser atribuídas condições forçantes (ativa) ou condições radiacionais (passivas). Quando são aplicadas forçantes nas bordas abertas, pode se utilizar séries temporais ou valores constantes para diferentes variáveis pertinentes ao sistema estudado.

Como descrito anteriormente, os resultados da simulação numérica referente a grade regional fornecem as condições de borda para a grade local. Assim, na Figura 5 são apresentadas as bordas abertas nas quais foram aplicadas as forçantes para a simulação numérica relativa a grade regional e, na Figura 6 as bordas abertas onde foram aplicadas as forçantes para a simulação local.



**Figura 5** - Grade computacional (regional) do modelo hidrodinâmico com a localização das principais bordas abertas (linhas vermelhas).



**Figura 6** - Grade computacional (local) do modelo hidrodinâmico com a localização das principais bordas abertas (linhas vermelhas). Configuração atual.

Para a simulação numérica relativa à grade regional, as constantes de maré de Valença (na foz do Rio Una) e do Terminal USIBA (proximidades da Praia de Inema – Aratu) foram linearmente interpoladas e aplicadas ao longo das bordas abertas (linhas vermelhas na Figura 5). A partir dos resultados obtidos pela simulação numérica regional, foram extraídas as séries temporais de elevação de superfície, nas posições coincidentes com as bordas abertas do modelo de escala local, e então utilizadas como forçantes para a simulação deste.

Em ambas as escalas espaciais (regional e local), o vento utilizado como forçante é proveniente da INFRAERO<sup>5</sup> (Aeroporto de Salvador), apresentados no Anexo A.

## **II.2 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA PARA A CONFIGURAÇÃO ATUAL**

A metodologia de validação fundamenta-se na avaliação desse modelo quanto à sua capacidade de reprodução da circulação na região em estudo. A seguir são apresentadas as comparações entre os dados e os resultados do modelo hidrodinâmico. Neste ponto, cabe ressaltar que os resultados que validam o modelo são decorrentes da simulação para o período hidrológico normal (padrão) e configuração atual para a região.

### **II.2.1 Avaliação para a Maré**

A comparação entre os resultados da modelagem e as séries utilizadas (dados) foi quantificada através de um coeficiente utilizado como parâmetro de comparação, Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries temporais com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente de comparação é definido pela normalização do erro quadrático médio e é dado pela fórmula:

$$\frac{RMS}{A} \quad (II.2.1-1)$$

<sup>5</sup> Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária.

onde

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

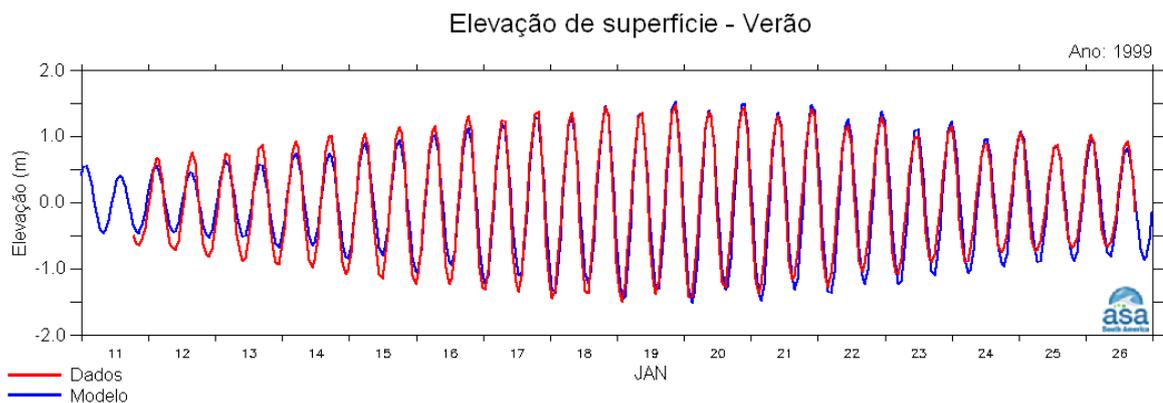
$\bar{A}$  = range médio do dado;

$P$  = previsão;

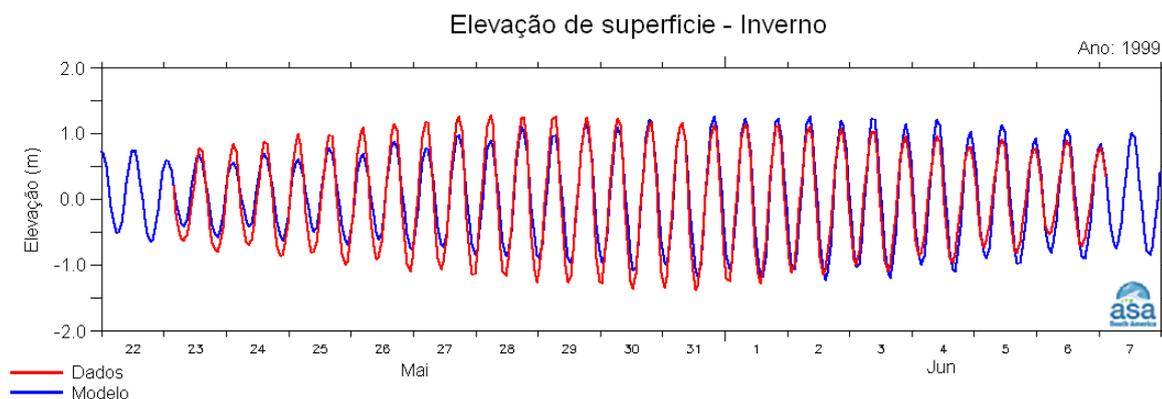
$O$  = observação.

A avaliação com relação à maré foi realizada a partir de dados medidos no Rio Paraguaçu referente à Estação 18 (CRA, 2000), apresentada na análise dos dados do Anexo A.

A Figura 7 apresenta a comparação entre as séries temporais de elevação de superfície para os dados coletados e o resultado obtido pelo modelo numérico, para um período típico de verão. Na Figura 8, é apresentada a comparação análoga para um período típico de inverno. O coeficiente de comparação entre as séries temporais (Figura 7) para o período de verão foi de 12%, sendo 97% a correlação linear entre as séries. Para o período de inverno (Figura 8), o coeficiente de comparação foi de 15% e a correlação linear entre as séries temporais foi de 95%.



**Figura 7** - Séries temporais de elevação de superfície do mar na Estação, para o período típico de verão. Em azul, a série temporal como resultado do modelo; em vermelho, dados coletados (CRA, 2000).



**Figura 8** - Séries temporais de elevação de superfície do mar na Estação 18, para o período típico de inverno. Em azul, a série temporal como resultado do modelo; em vermelho, dados coletados CRA (2000).

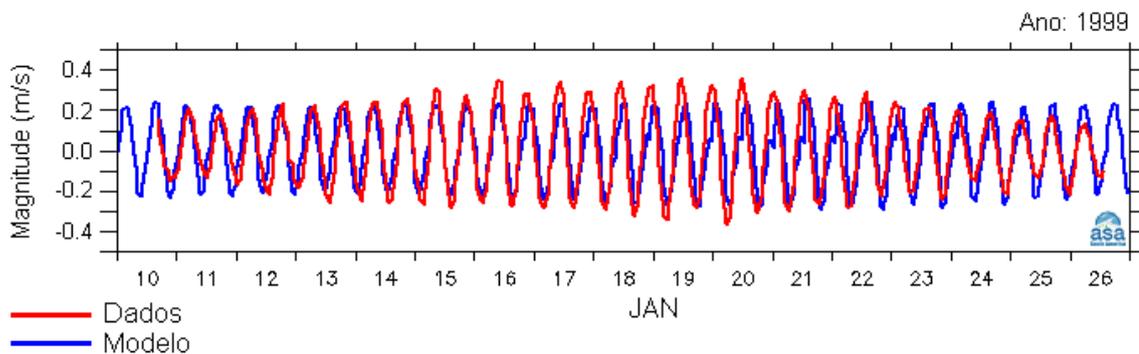
## II.2.2 Avaliação para as Correntes

No processo de validação das correntes calculadas pelo modelo Delft3D, as das correntes modeladas foram comparadas com os dados de correntes coletados na Baía de Todos os Santos, referente à Estação 5 (CRA, op. cit.), apresentada no Anexo A.

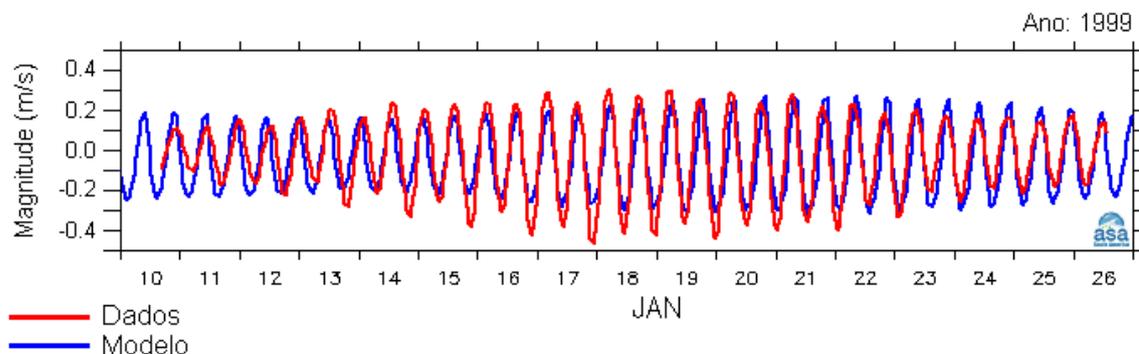
As próximas figuras apresentam as séries temporais das componentes dos vetores de corrente, tanto para o verão como para o inverno, e para duas profundidades (próxima a superfície e próximo ao fundo).

Neste sentido, a Figura 9 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e os dados coletados, para a profundidade de, aproximadamente, 6 m. O coeficiente de comparação para a componente  $u$  da velocidade foi de 29% e de 26% para a componente  $v$ . Com relação a correlação linear entre as séries temporais, para a componente  $u$  (painel superior da Figura 9) o coeficiente de correlação linear foi de 80% e, para a componente  $v$  (painel inferior da mesma figura), 85%.

### Componente U (Leste - Oeste) - Superfície - Verão



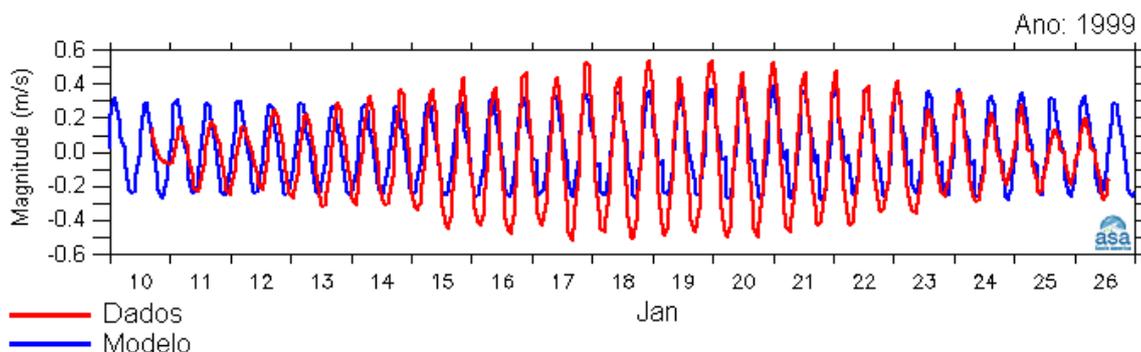
### Componente V (Norte - Sul) - Superfície - Verão



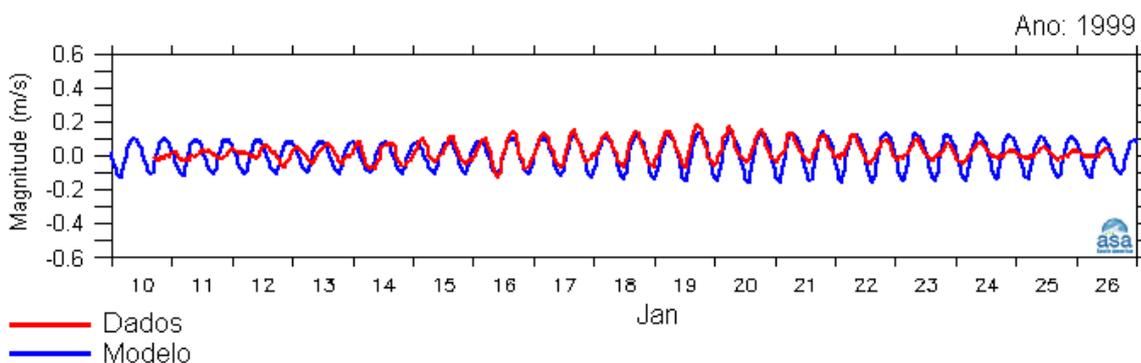
**Figura 9** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, próximo a superfície (prof. ~6 m), durante um período típico de verão. Painel superior: componente  $u$  da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente  $v$  da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000).

A Figura 10 apresenta a comparação entre as séries temporais, para o mesmo ponto, mesmo período (verão), porém para uma profundidade junto ao fundo (profundidade de ~26 m). O coeficiente de comparação entre as séries temporais para essa condição foi de 28% para a componente  $u$  (correlação linear de 83%) e de 57% para a componente  $v$  (correlação linear de 71%).

## Componente U (Leste - Oeste) - Fundo - Verão



## Componente V (Norte - Sul) - Fundo - Verão

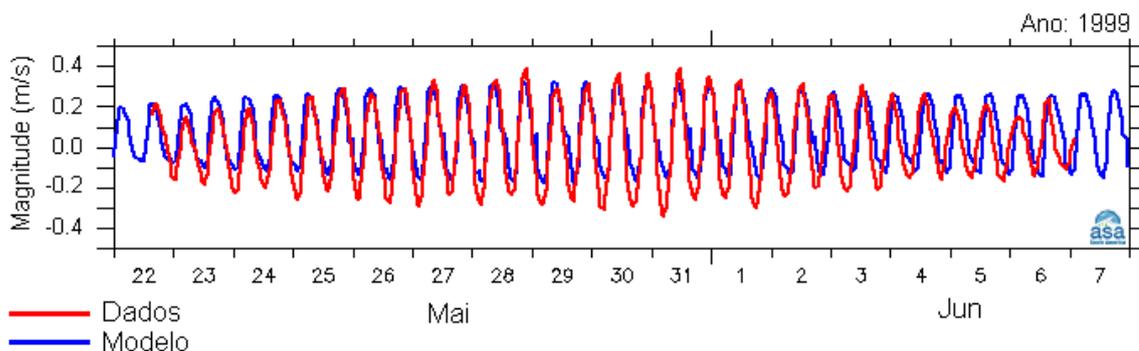


**Figura 10** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, junto ao fundo (prof. ~26m), durante um período típico de verão. Painel superior: componente  $u$  da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente  $v$  da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000).

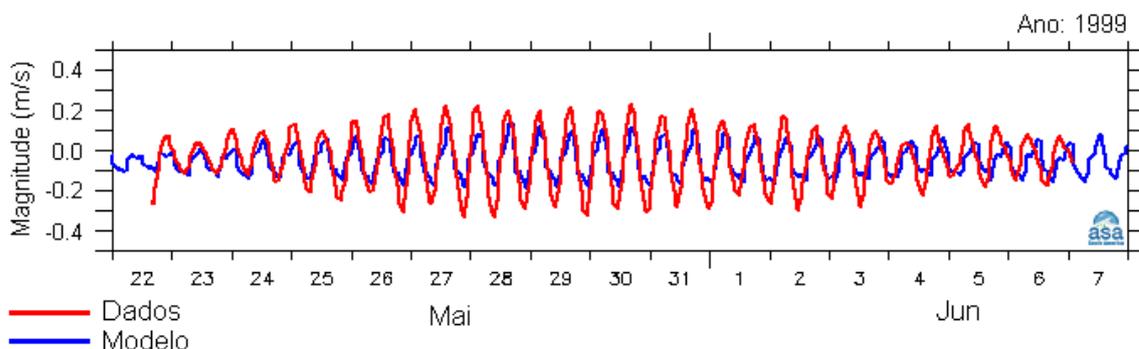
As próximas figuras apresentam as séries temporais das componentes do vetor velocidade para o mesmo ponto, porém, para o período de inverno. A Figura 11 apresenta a comparação em profundidade próxima a superfície e, na seqüência, a respectiva comparação entre as séries temporais junto ao fundo.

Junto à superfície (Figura 11), o coeficiente de comparação para a componente  $u$  (painel superior) foi de 24%, com correlação linear de 85%; para a componente  $v$  (painel inferior), obteve-se o coeficiente de comparação de 30% e correlação linear de 80%.

### Componente U (Leste - Oeste) - Superfície - Inverno



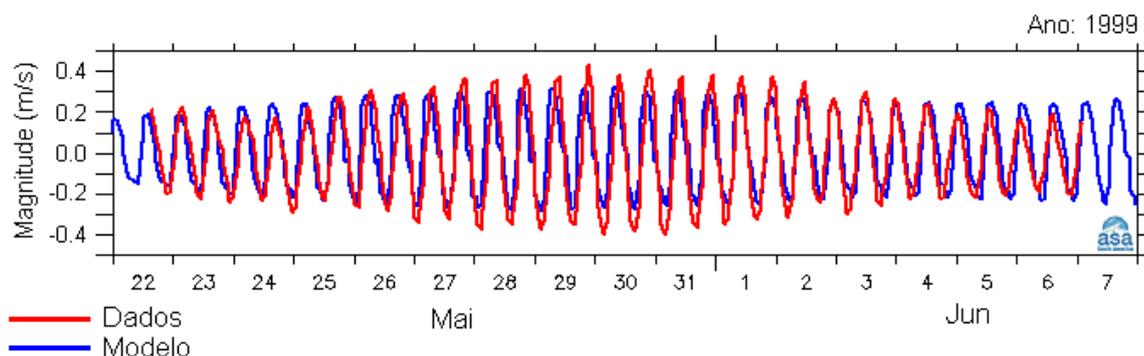
### Componente V (Norte - Sul) - Superfície - Inverno



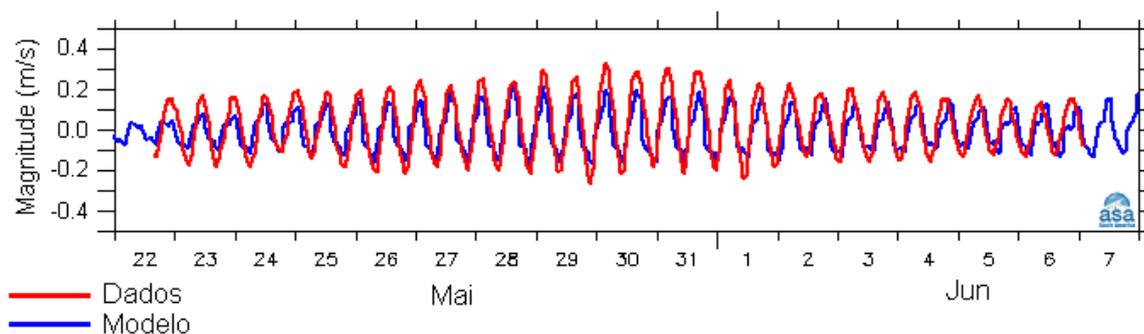
**Figura 11** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, próximo a superfície (prof. ~6 m), durante um período típico de inverno. Painel superior: componente  $u$  da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente  $v$  da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000).

Os coeficientes obtidos na comparação das séries temporais para o período de inverno e junto ao fundo (Figura 12) foram de 26% para a componente  $u$  e de 27% para a componente  $v$ , com correlação linear de 83% e 85%, respectivamente.

## Componente U (Leste - Oeste) - Fundo - Inverno



## Componente V (Norte - Sul) - Fundo - Inverno



**Figura 12** - Séries temporais das componentes vetoriais de corrente, junto ao fundo (prof. ~26 m), durante um período típico de inverno. Painel superior: componente u da corrente (leste-oeste); painel inferior: componente v da corrente (norte-sul). Em azul, as respectivas séries temporais como resultado do modelo e, em vermelho, os dados coletados (CRA, 2000).

### II.2.3 Considerações sobre a modelagem hidrodinâmica para a condição atual

A comparação entre os resultados obtidos pela simulação numérica com relação aos dados coletados na região da Baía de Todos os Santos aponta que o modelo numérico foi adequadamente implementado na região.

Os dados de elevação de superfície disponíveis nas proximidades da região de interesse foram comparados com o resultado do modelo para dois períodos distintos (inverno e verão). Estas comparações estatísticas resultaram em coeficientes de correlação linear superiores a 95% e pelo parâmetro de comparação de Hess & Bosley (1992), entre 10 e 15%.

De maneira análoga aos dados de elevação de superfície, foram comparados dados de corrente com os resultados do modelo numérico. Neste caso, além da comparação para dois períodos distintos, compararam-se também os dados com resultados do modelo para duas profundidades: próxima a superfície e junto ao fundo. Embora os índices estatísticos obtidos não tenham sido tão bons como aqueles obtidos para a elevação de superfície, estes índices ainda mostram uma boa concordância com os dados. Quando o parâmetro estatístico de comparação é aquele proposto por Hess & Bosley (op. cit.), a comparação entre os dados coletados e os resultados do modelo é da ordem de 25%, enquanto que o coeficiente de correlação linear é da ordem de 85% (estes índices independem, de maneira geral, do período ou da profundidade avaliada).

Enfim, as avaliações estatísticas mostram que o modelo numérico foi adequadamente implementado e, portanto, apto para ser utilizado em suas aplicações fim.

### **II.3 OS IMPACTOS DECORRENTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO NA PONTA DO CORUJÃO**

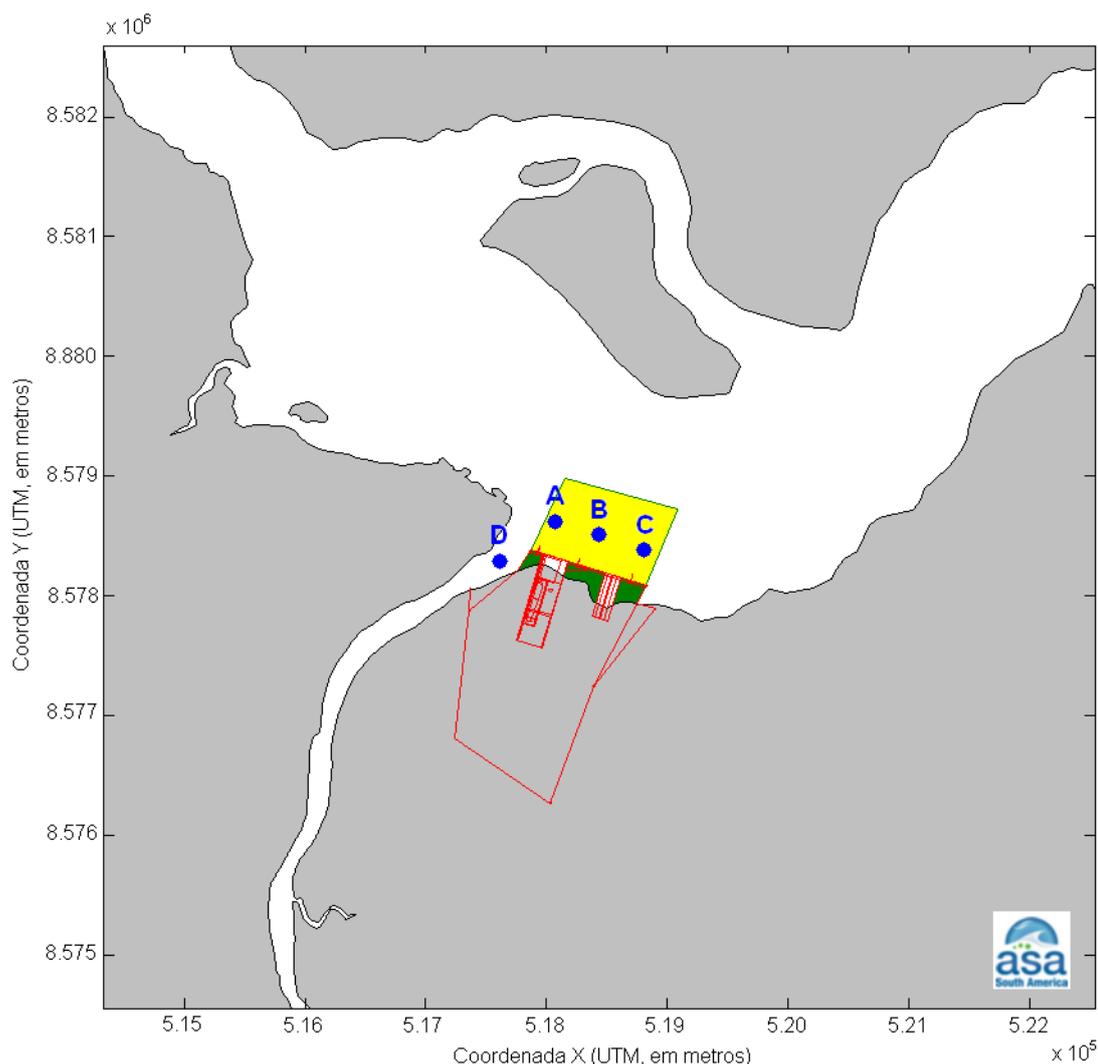
Neste item são apresentados e discutidos os resultados das simulações numéricas contemplando as duas configurações (atual e futura) para a Ponta do Corujão. Devido ao nível de detalhe exigido nesse tipo de avaliação, utilizou-se a grade local nas simulações numéricas. Neste ponto, cabe salientar que a grade numérica para ambas as simulações difere apenas na região do empreendimento. Estas diferenças resumem-se ao aterro para a construção do estaleiro e a dragagem na região defronte (para detalhes, ver Figura 3 e Figura 4).

As forçantes para ambas as simulações foram as mesmas – séries temporais de elevação extraídas dos resultados do modelo numérico de escala regional. Somente assim, mantendo-se as mesmas condições para ambas as configurações, é que se podem avaliar os impactos que decorram da implementação do estaleiro ante a condição atual da região, tanto na hidrodinâmica quanto nas taxas de deposição de sedimentos.

### **II.3.1 Alterações Hidrodinâmicas**

Como anteriormente descrito, as possíveis alterações hidrodinâmicas decorrentes da implementação do estaleiro na Ponta do Corujão foram avaliadas a partir dos resultados de duas simulações numéricas, uma delas contempla a situação (configuração) atual e a outra, a configuração futura (contemplando o estaleiro já implementado). As principais alterações da configuração futura ante a configuração atual referem-se ao aterro para a retro-área do estaleiro e a readequação batimétrica (aprofundamento defronte ao estaleiro para a cota de 12 m).

Para avaliar o impacto (alterações) na hidrodinâmica local foram eleitos quatro pontos (mostrados na Figura 13) para a comparação do fluxo hidrodinâmico entre as duas configurações. O fator principal na escolha desses pontos foi a distribuição espacial em relação as alterações “físicas” (aterro e dragagem) decorrentes da implementação do empreendimento.



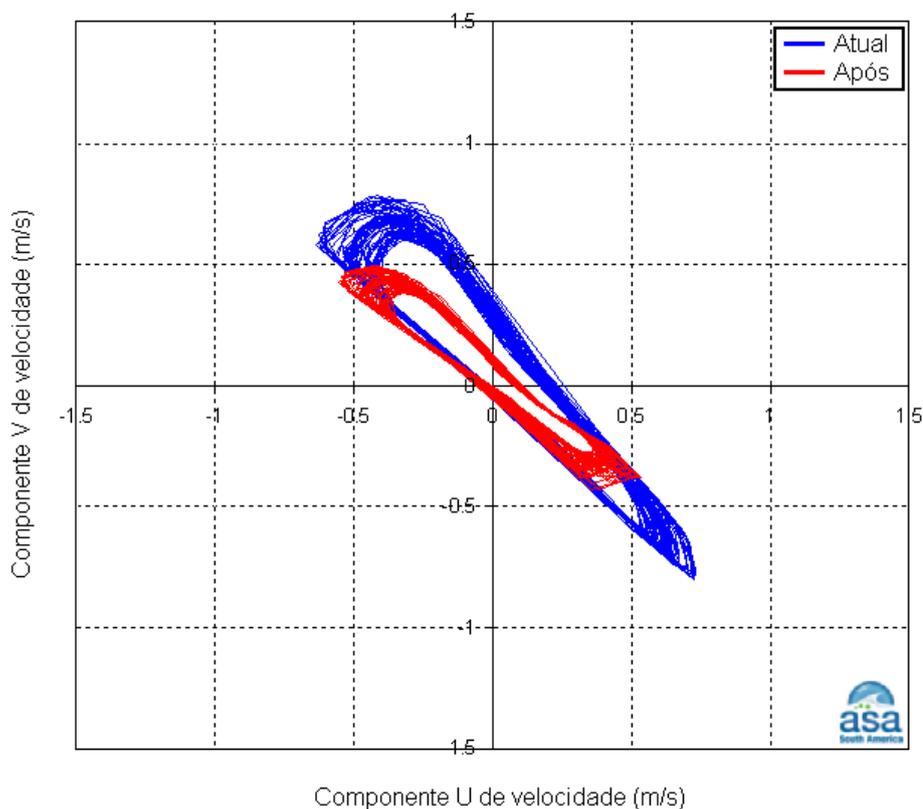
**Figura 13** - Distribuição espacial de pontos para avaliação de alterações hidrodinâmicas decorrentes da implantação do estaleiro na Ponta do Corujão. As letras (A, B, C e D) indicam os pontos de comparação e, em vermelho, os contornos do empreendimento. As regiões hachuradas indicam as principais alterações impostas no local (em verde escuro: aterro; em amarelo: a região a ser dragada).

As avaliações das alterações na hidrodinâmica contemplaram dois períodos (verão e inverno) e utilizaram a média vertical dos vetores de velocidade na coluna d'água. Contudo, devido as características da região (abrigada), os resultados das alterações hidrodinâmicas em decorrência do período (verão ou inverno) não apresentaram diferenças relevantes entre si. Dentro deste contexto,

a seguir são apresentados apenas os resultados para o verão, tendo em mente que estes resultados e análises são estendidos para o período de inverno.

**Ponto A:** por estar junto à borda e no interior da região a ser dragada, o talude da região dragada reduz a intensidade (magnitude) das correntes. Contudo, o caráter bidirecional do fluxo é mantido (influência das marés) após a implantação do empreendimento e, uma pequena rotação do eixo principal de escoamento é verificada.

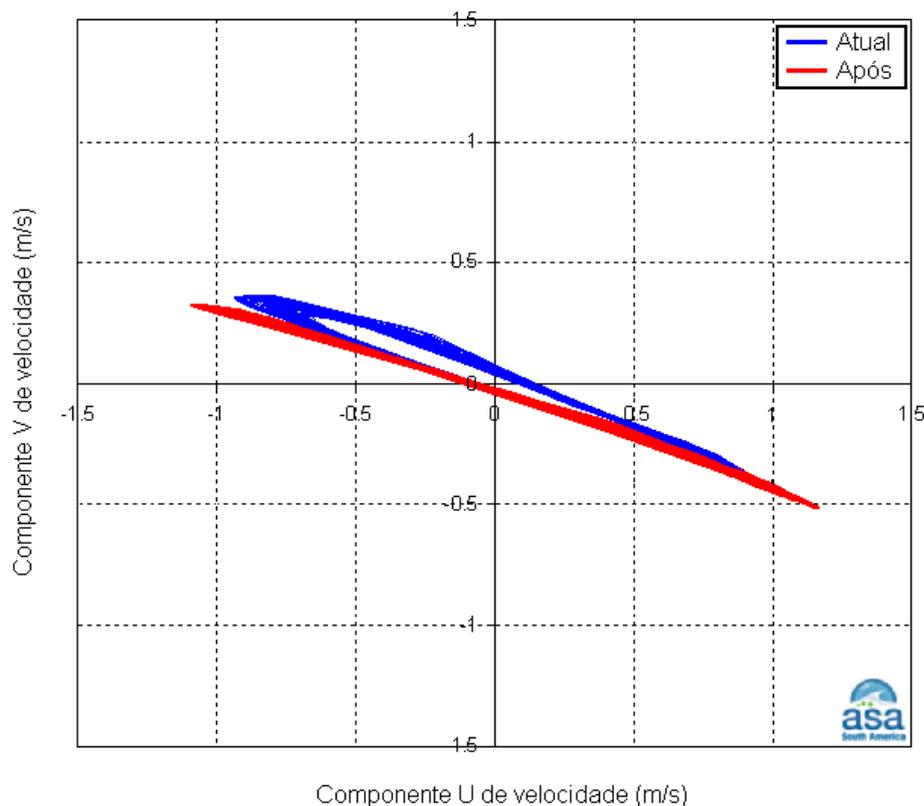
Diagrama de dispersão do vetor velocidade - Ponto A - Verão



**Figura 14** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto A (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho.

**Ponto B:** a readequação (aprofundamento) da região defronte ao empreendimento induz a uma intensificação, da ordem de 10%, na intensidade da corrente na maré enchente. Por outro lado, não há alterações na intensidade das correntes na vazante. De maneira análoga ao verificado no ponto A, uma pequena rotação do eixo principal de escoamento é observada.

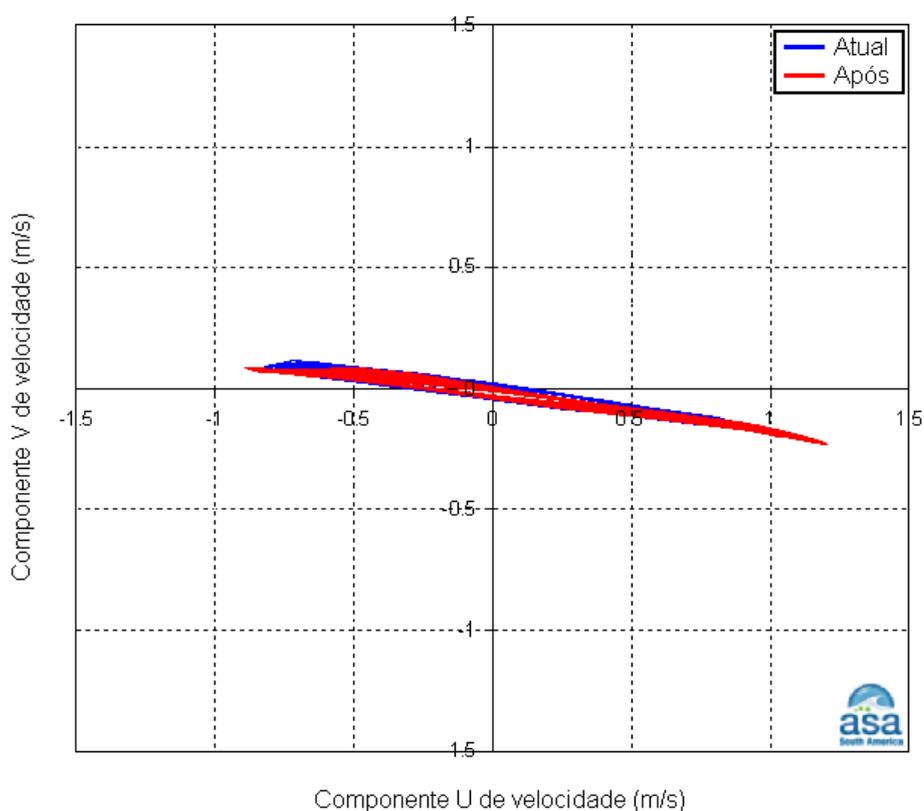
Diagrama de dispersão do vetor velocidade - Ponto B - Verão



**Figura 15** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto B (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho.

**Ponto C:** este ponto está localizado em uma região que não sofre alteração batimétrica significativa em decorrência da implementação do estaleiro (cota de 12m ante a cota batimétrica atual). Assim sendo, o fluxo hidrodinâmico (de caráter bidirecional) não sofre alterações após a implementação do estaleiro quando comparado com a configuração atual;

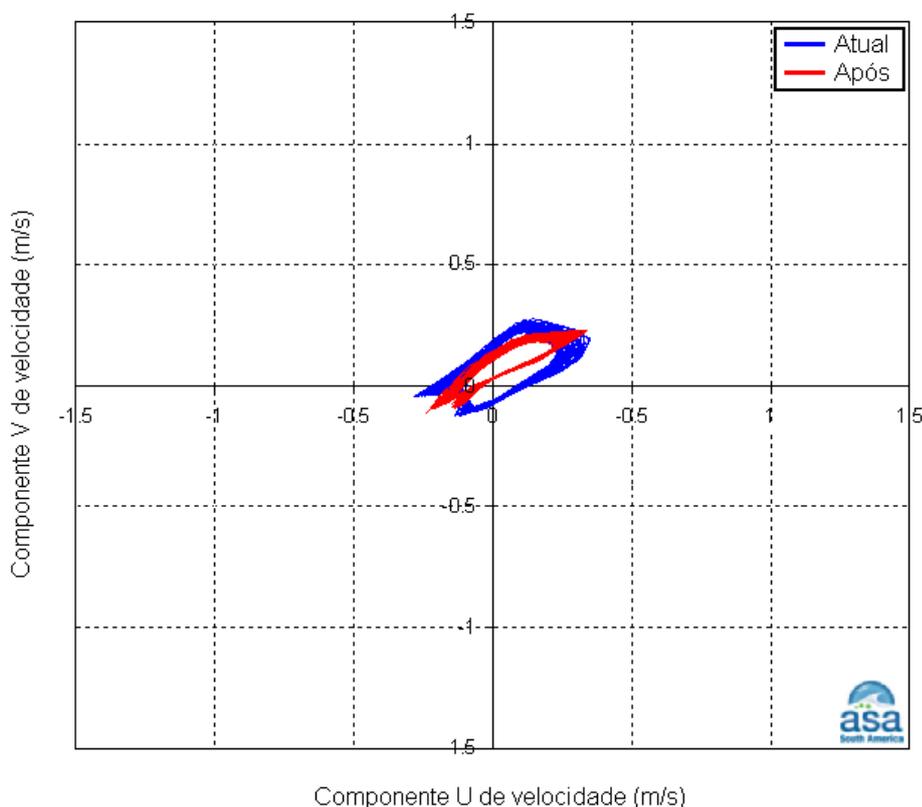
Diagrama de dispersão do vetor velocidade - Ponto C - Verão



**Figura 16** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto C (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho.

**Ponto D:** o aterro a ser implementado induz naquele ponto do Rio Baetantã um caráter de canalização do fluxo, ou seja, remove parte da dispersão das correntes. Embora, o fluxo hidrodinâmico alinhe-se paralelamente ao aterro, não são observadas alterações significativas na intensidade do fluxo.

Diagrama de dispersão do vetor velocidade - Ponto D - Inverno



**Figura 17** - Comparação entre fluxo hidrodinâmico médio (na vertical) após a implementação do estaleiro na Ponta do Corujão ante a condição atual – Ponto D (vide Figura 13). Condição futura (após) em azul e condição atual em vermelho.

Enfim, as alterações hidrodinâmicas observadas em decorrência da implementação do estaleiro na Ponta do Corujão foram pouco significativas. Em decorrência da variação batimétrica (região a ser dragada) pode-se inferir que em pontos onde haverá alteração significativa de cota batimétrica, a tendência é de

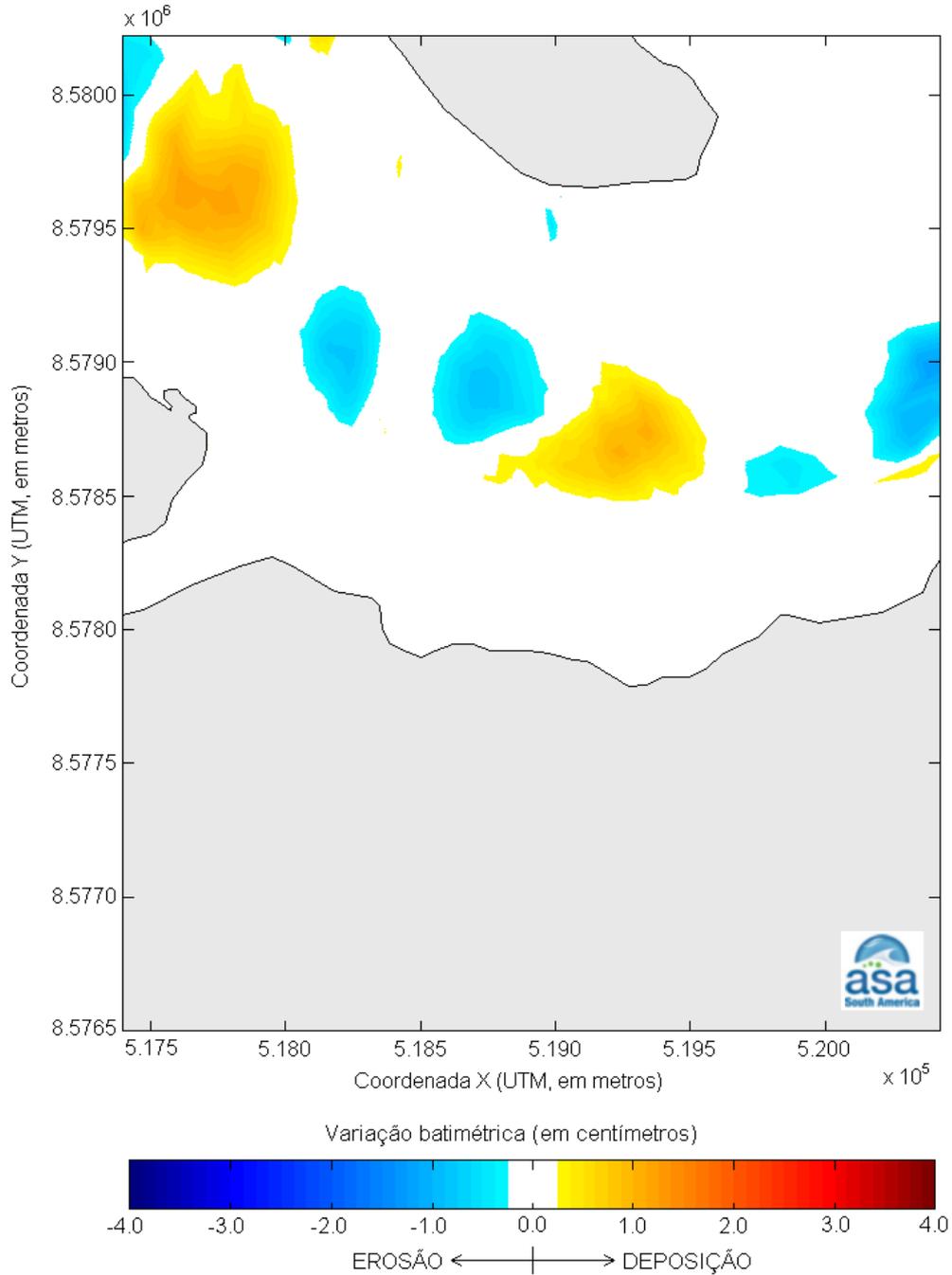
aumento de intensidade do fluxo hidrodinâmico (da ordem de 10% em magnitude). Em locais onde as variações batimétricas não são significativas (configuração futura ante a configuração atual) não se observam alterações significativas na magnitude do fluxo hidrodinâmico. Ressalva deve ser feita para as regiões próximas aos taludes da região a ser dragada. Nestas regiões, quando no interior da região a ser dragada, o gradiente batimétrico induz a redução da intensidade do fluxo hidrodinâmico.

### **II.3.2 Alterações na Taxa de Deposição de Sedimentos**

O sistema de modelos numéricos adotado para a avaliação dos impactos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos, segundo a configuração a ser adotada para o empreendimento, considera as características do fundo, assim como a concentração de sedimentos em suspensão. Além disso, este modelo numérico permite uma completa realimentação das mudanças morfológicas de fundo durante o cálculo hidrodinâmico, ou seja, o modelo numérico tem a capacidade de simular a deposição e a remobilização de sedimentos em decorrência das características do fluxo hidrodinâmico.

Neste sentido, no item anterior foram apresentadas as possíveis alterações hidrodinâmicas decorrentes do empreendimento na Ponta do Corujão, as quais (as alterações hidrodinâmicas) têm influência direta nas possíveis alterações nas taxas de erosão e/ou sedimentação. Assim, na Figura 18 é apresentada a variação batimétrica anual como resultado da simulação numérica para a configuração atual. Logo, qualquer variação nas taxas de erosão e/ou deposição em decorrência do empreendimento na Ponta do Corujão serão relativizadas a esta variação batimétrica.

### Varição batimétrica anual (em cm) - configuração atual



**Figura 18** - Varição batimétrica anual (em centímetros), como resultado da simulação numérica, para a região da Ponta do Corujão (BA), para a configuração (situação) atual.

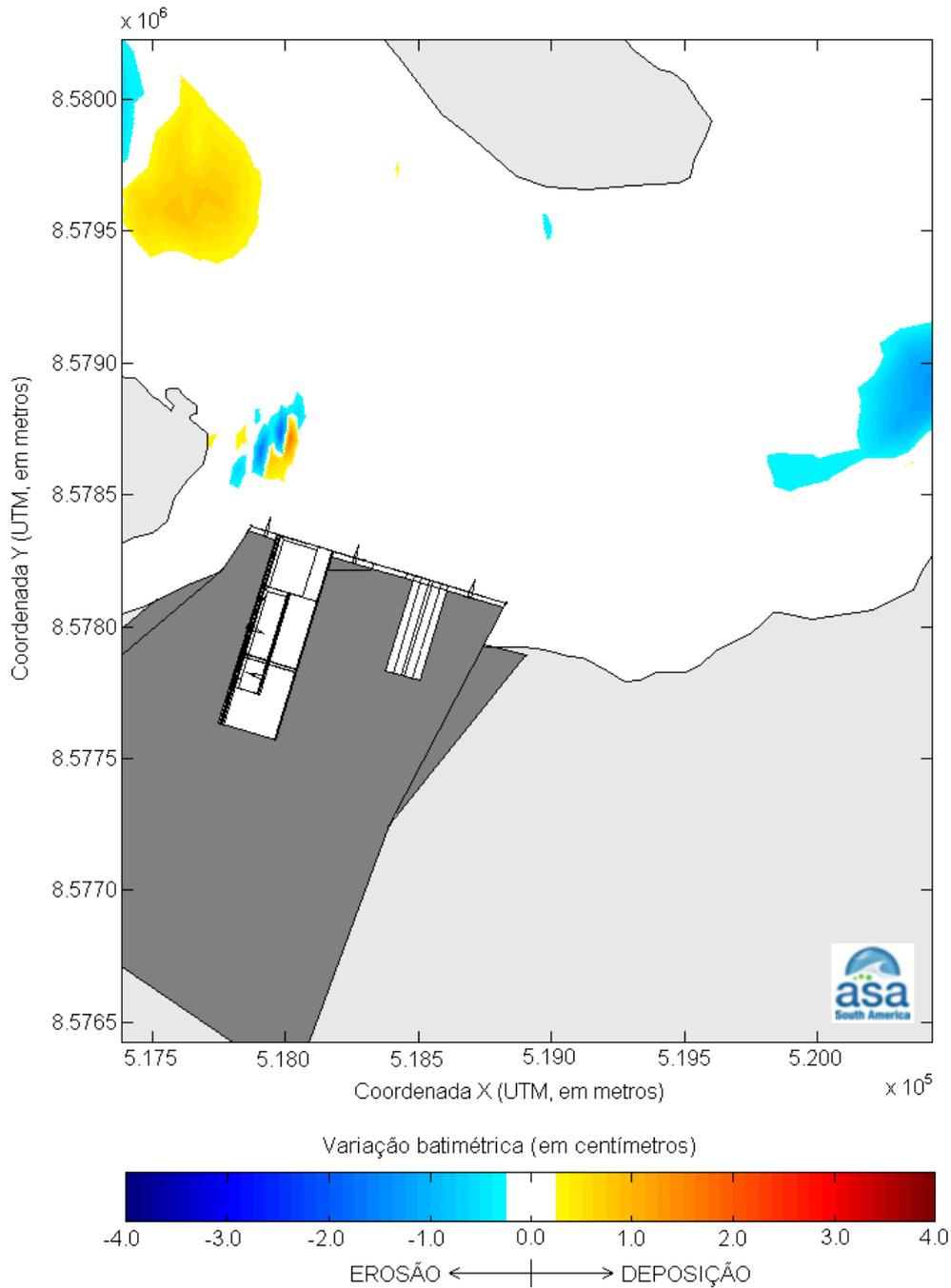
Como descrito anteriormente, a configuração a ser implementada para constituir o estaleiro na Ponta do Corujão, provoca alterações pouco significativas na circulação hidrodinâmica (ver item anterior) em relação a configuração (situação) atual. Essas alterações hidrodinâmicas refletem-se em processos erosivos e em processos deposicionais. De maneira geral, processos erosivos tendem a ocorrer em regiões em que a intensidade do fluxo hidrodinâmico sofre acréscimo e processos deposicionais, em regiões onde há decréscimo do fluxo hidrodinâmico.

Dentro deste contexto, a Figura 19 a seguir apresenta as alterações nas taxas de deposição de sedimentos após a implementação do estaleiro. Salienta-se que a configuração futura considera além do aterro (retro-área do estaleiro), a região defronte do estaleiro com a dragagem já efetuada (rebaixamento da cota batimétrica para 12 m).

Através da análise conjunta dos resultados para ambas as configurações (atual - Figura 18 e futura - Figura 19) infere-se que:

- em regiões em que não há intervenção direta, ou seja, “alteração física” (aterro e dragagem), o padrão de erosão (valores negativos) e de deposição de sedimentos (valores positivos) não é alterado significativamente quando comparada a configuração futura em relação a configuração atual e,
- uma atividade geomorfológica (erosão e deposição) tende a ocorrer na região oeste da região a ser dragada (próximo a foz do Rio Baetantã). Neste sentido, a tendência é de erosão na parte superior do talude da região dragada com conseqüente deposição desses sedimentos na parte baixa (dragada) imediatamente adjacente ao talude.

### Variação batimétrica anual (em cm) - após o empreendimento



**Figura 19** - *Varição batimétrica anual (em centímetros), como resultado da simulação numérica, para a região da Ponta do Corujão (BA), para a configuração futura.*



### **III MODELAGEM DA DISPERSÃO DE SEDIMENTOS ORIUNDOS DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE**

Neste capítulo é apresentada a modelagem da dispersão de sedimentos provenientes das operações de dragagem e descarte. Foram conduzidos estudos de dispersão dos sedimentos ressuspensos durante as operações de dragagem (na região do empreendimento), bem como para o material descartado na área de bota-fora (na região costeira adjacente).

Os campos de correntes utilizados nas simulações de ressuspensão de sedimentos durante a dragagem foram gerados utilizando-se o sistema de modelos DELFT3D, cuja descrição encontra-se no Anexo B e a implementação foi apresentada no Capítulo II. Enquanto os campos de correntes utilizados nas simulações do descarte de material dragado foram gerados utilizando-se o modelo *Princeton Ocean Model* (POM), descrito em detalhe no Anexo D.

As simulações da dispersão do material dragado foram conduzidas através da utilização do modelo *Suspended Sediment Fate* (SSFATE), da USACE, em versão customizada pela [ASA](#).

#### **III.1 ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE DO MATERIAL DRAGADO**

Um dos fatores mais importantes no controle do total de sólidos em suspensão é a velocidade com que o sedimento deposita. Geralmente, materiais mais grosseiros possuem velocidades de deposição maiores que os mais finos, que permanecem por mais tempo na coluna d'água. As características básicas de deposição podem ser determinadas através da análise das classes granulométricas do sedimento a ser modelado.

A granulometria dos sedimentos utilizada nas simulações de dragagem e descarte foi fornecida pela contratante a partir de dados primários coletados no campo em setembro de 2009, e os valores médios utilizados na modelagem, considerando todos os pontos e profundidades amostrais, são apresentados na Tabela 1. Observa-se que, aproximadamente, 52% do material é constituído de lama.

**Tabela 1** - Granulometria (%) do material dragado/descartado (Fonte: Coleta de dados em campo em setembro de 2009. BMA LTDA).

CLASSE	%
Areia Muito Grossa (2 a 1 mm)	1,07
Areia Grossa (1 a 0,5 mm)	7,71
Areia Média (0,5 a 0,25 mm)	16,34
Areia Fina (0,25 a 0,125 mm)	14,05
Areia Muito Fina (0,125 a 0,062 mm)	9,01
Silte (0,062 a 0,00394 mm)	40,65
Argila (0,00394 a 0,0002 mm)	11,17

As operações de dragagem simuladas correspondem à área de dragagem apresentada na Figura 20. Nesta área foram consideradas “linhas de dragagem” para representar as operações de dragagem e possibilitar as simulações de ressuspensão de sedimentos. Nesta mesma figura observa-se também a localização do ponto de descarte, na região do bota-fora, em local com lâmina d’água de cerca de 700 m. Esta área de descarte foi designada especificamente para a disposição de material dragado pela Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil, e está situada nas coordenadas 13°09"S e 38°25"W a mais de 70 km do empreendimento, conforme Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos da Bahia, Item 4 (c) - Diversos.

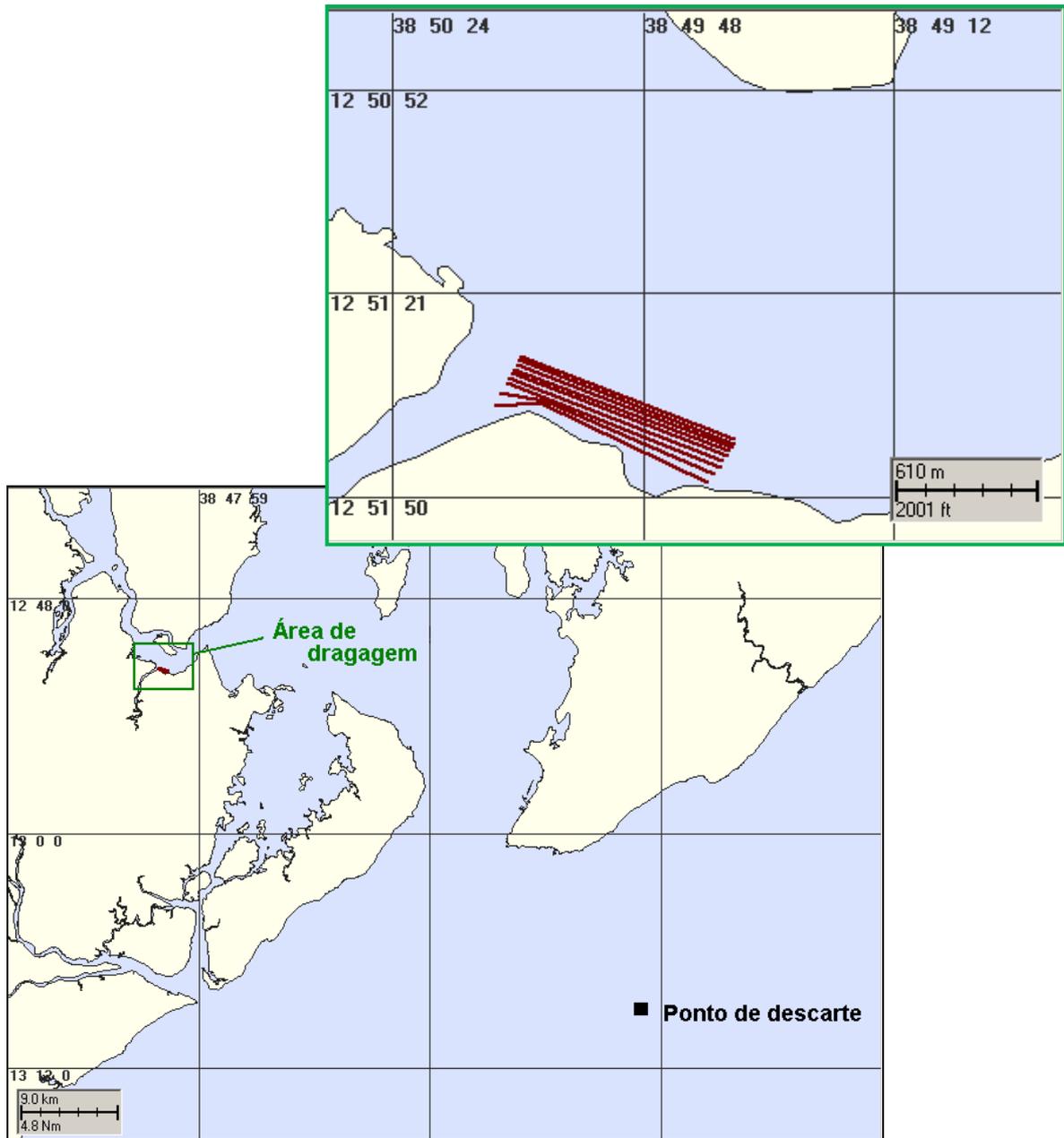


Figura 20 - Setorização da área de dragagem (em linhas de dragagem) e localização do ponto de descarte.

No presente estudo foi considerada a utilização de uma draga tipo *hopper* (auto-transportadora) com calado de 5,7 m, e cuja cisterna tem capacidade de 2.770,0 m<sup>3</sup>. As características de dragas *hopper* e seu sistema de operação resultam em uma mistura de água e sólidos armazenados, que é transportada para o local de descarte. Neste local, as portas situadas na parte inferior da draga se abrem e todo seu conteúdo é despejado em poucos minutos.

Para a determinação do volume de sedimento dragado/descartado, foi considerado que a draga opera com 100% de sua capacidade, sendo 25% de água e 75% de sedimentos presentes na cisterna, resultando em material com densidade de 1.300,00 kg/m<sup>3</sup>. A Tabela 2 apresenta as características da draga, e a Tabela 3, as características do material dragado/descartado.

**Tabela 2 - Características da draga.**

Tipo de draga	<i>Hopper</i>
Capacidade da cisterna	2.770 m <sup>3</sup>
Comprimento da draga	79,3,0 m
Largura da draga	14,0 m
Calado da draga	5,7 m
Porcentagem carregada da cisterna	100%
Velocidade da draga durante o descarte	14 nós

Fonte: BMA/SUDIC.

**Tabela 3 - Características do material dragado/descartado.**

Densidade total ( <i>bulk density</i> ) do material na cisterna	1.300 kg/m <sup>3</sup>
Porcentagem de sedimento da cisterna	75%
Porcentagem de água na cisterna	25%

Fonte: BMA/SUDIC.

A Tabela 4 apresenta as características das operações de dragagem e descartes. Nesta tabela observa-se que o volume total a ser dragado é de 1.300.000 m<sup>3</sup>, com volume médio por dia de 9.695 m<sup>3</sup>, totalizando 183 dias de operações de dragagem/descarte.

**Tabela 4 - Características das operações de dragagem e descarte.**

Volume de sedimento por ciclo de dragagem (% de sedimento)	2.077,0 m <sup>3</sup>
Tempo de carregamento da cisterna	1,5 h
Intervalo entre os ciclos de dragagem	4,5 h
Duração de cada descarte	1 hora
Número de ciclos por dia	3,5
Taxa de dragagem por hora	1.800 m <sup>3</sup> /h
Taxa de perda durante a dragagem	3 %
Taxa de <i>overflow</i>	sem <i>overflow</i>
Volume total a ser dragado	1.300.000,00 m <sup>3</sup>

Fonte: BMA/SUDIC.

Foi considerado que 3% dos sólidos retirados do substrato permanecem em suspensão na coluna d'água junto ao fundo, devido à agitação da "cabeça da draga" durante a operação de dragagem. Também foi considerado que não existirá o processo de *overflow* (excesso de material dentro da cisterna que vaza para o ambiente) durante os processos de dragagem.

### **III.2 DADOS DE ENTRADA E CENÁRIOS SIMULADOS**

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são: local de dragagem/descarte, período de simulação, duração do descarte, informações sobre o sedimento, campo de correntes, opções de saída e parâmetros de simulação. Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros.

### **III.2.1 Cenários da Dispersão do Material Ressuspendido durante a Dragagem**

Para as simulações das operações de dragagem na região do empreendimento foram elaborados três cenários para cada condição sazonal típica (verão e inverno) de modo a acompanhar a evolução da pluma decorrente do processo de dragagem. Para isto, foram elaborados os seguintes cenários com:

- a) um ciclo de dragagem, correspondente a dragagem de 2.077,5 m<sup>3</sup>;
- b) dois ciclos de dragagem, correspondente a dragagem de 4.155,0 m<sup>3</sup>; e
- c) oito ciclos de dragagem, correspondente a dragagem de 16.620,0 m<sup>3</sup>.

O tempo total de oito ciclos (dois dias e oito horas) foi suficiente para que a pluma se estabilizasse, sem sofrer aumento na área de influência. O campo de correntes utilizado foi gerado pelo modelo hidrodinâmico, descrito no Anexo A e as características do processo de dragagem e do material descartado, utilizadas no SSFATE, foram apresentadas no Item III.1.

### **III.2.2 Cenários dos Descartes do Material Dragado**

Segundo USEPA/USACE (1995), a partir do descarte, o material dragado afunda pela coluna d'água na forma de um jato de fluido bem definido e com alta densidade, o qual pode conter blocos e material sólido. A água ambiente é entranhada durante o processo de queda do material. Depois de atingir o fundo, a maior parte do material se acumula no mesmo, mas parte se espalha horizontalmente devido ao impacto da queda. Posteriormente, o material é transportado para longe do ponto de impacto até que a turbulência seja reduzida o suficiente para permitir a deposição do material. À medida que o sedimento afunda, uma porção se dissocia e permanece na coluna d'água.

Foram simulados cenários para as condições típicas de verão e de inverno para 30 dias de operação, representando 102 ciclos de dragagem e um volume de 282.540,0 m<sup>3</sup>.

Não foram realizadas simulações superiores a 30 dias, uma vez que atividades de dragagem tendem a serem intermitentes e interrompidas por pequenos intervalos de tempo em virtude da manutenção dos equipamentos ou mesmo por períodos de mau tempo. Adicionalmente, este tempo é suficiente para que as plumas de sedimento se estabilizem, em função das características do descarte e do material descartado.

O campo de correntes utilizado foi gerado pelo modelo hidrodinâmico, descrito no Anexo D e as características do processo de dragagem e do material descartado, utilizadas no SSFATE, foram apresentadas no Item III.1.

### **III.2.3 Critério de Corte Adotado na Apresentação dos Resultados**

Na apresentação dos resultados de concentrações de sedimentos na coluna d'água, foi estabelecido o corte de 10 mg/L, correspondente ao valor médio de sólidos suspensos encontrado na região, segundo informações fornecidas pela BMA.

Na apresentação dos resultados referentes à deposição de sedimentos no fundo proveniente dos descartes do material dragado foi adotado como critério de corte as espessuras maiores ou iguais a 1 mm. Em áreas dragadas (regiões costeiras), organismos (considerando diferentes espécies e estágios de vida) precisariam de espessuras superiores a 1 mm para sofrer efeitos letais significativos (ASA, 2003).

### III.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O MODELO SSFATE

#### III.3.1 Resultados da Dispersão do Material Ressuspendido durante a Dragagem

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos em cada um dos cenários simulados com o modelo SSFATE, na modelagem de dispersão das plumas de dragagem, na forma de concentração de sedimento na coluna d'água e área total das trajetórias das plumas.

Observa-se que as maiores áreas de abrangência das plumas foram obtidas para o período de inverno, e que as plumas são limitadas à área próxima do empreendimento, alcançando a desembocadura do Rio Baetantã. As concentrações variaram de, aproximadamente, 1.208 mg/L a 1.218 mg/L; estes valores são compatíveis com o encontrado por Nichols *et al.* (1990) em monitoramentos realizados da Baía de Chesapeake, Virgínia, EUA, quando encontraram valores de até 7.500 mg/L ou concentrações de 50 a 400 vezes maiores que a encontrada naturalmente no local.

**Tabela 5** - Resumo dos resultados obtidos na modelagem.

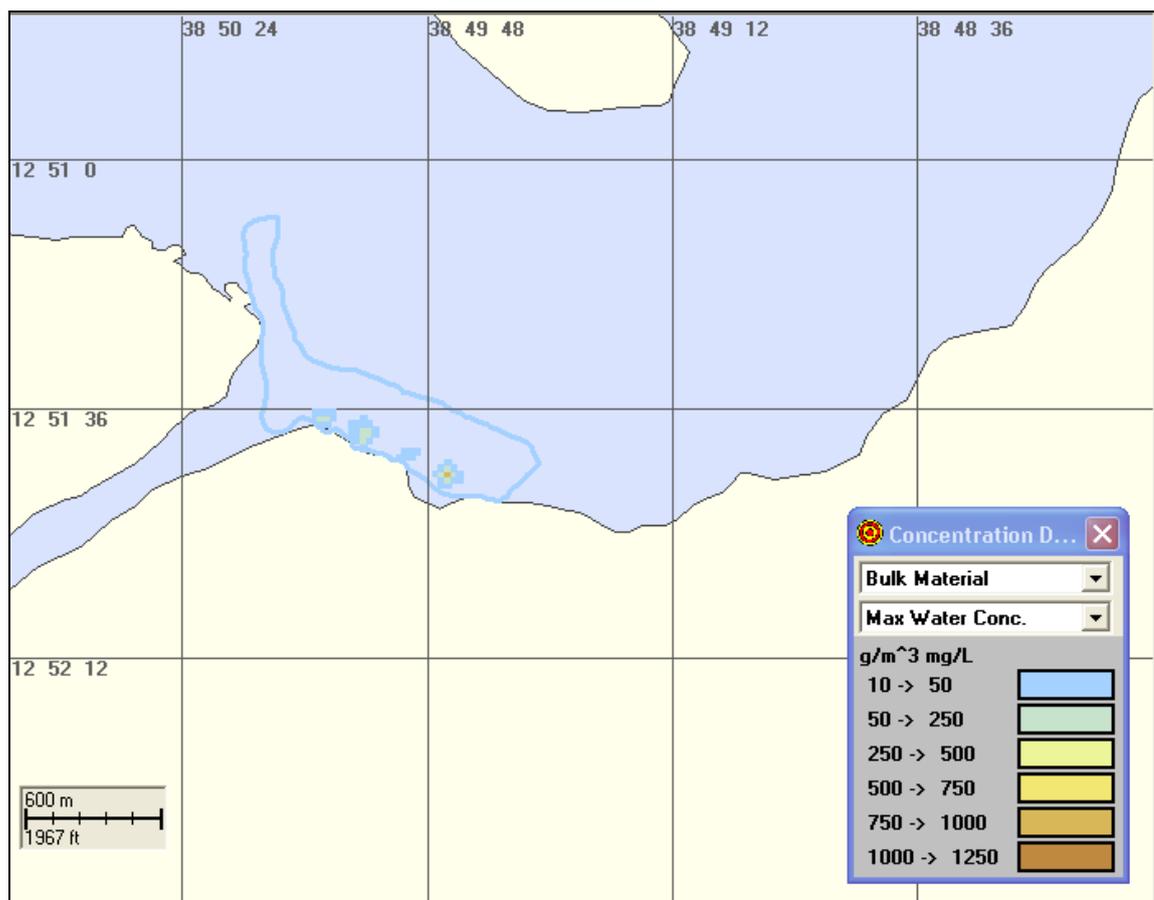
CENÁRIO	ÁREA (km <sup>2</sup> )		CONCENTRAÇÃO (mg/L)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
1 ciclo	0,46	0,46	1.207,9	1.207,9
2 ciclos	0,82	0,66	1.208,4	1.207,9
8 ciclos	1,30	1,56	1.218,1	1.213,2

A seguir, são apresentados os resultados das plumas de sedimentos ressuspendidos no instante final de um único ciclo de dragagem, de dois ciclos de dragagem e de oito ciclos de dragagem. Nas figuras são apresentadas as concentrações de sedimento na coluna d'água ao final do ciclo, além da área total de das trajetórias das plumas ao longo das simulações (representada por um polígono azul claro).

As animações, mostrando o transporte e dispersão da pluma para os cenários simulados dos sedimentos ressuspensos durante as atividades de dragagem, são apresentadas no Anexo F.

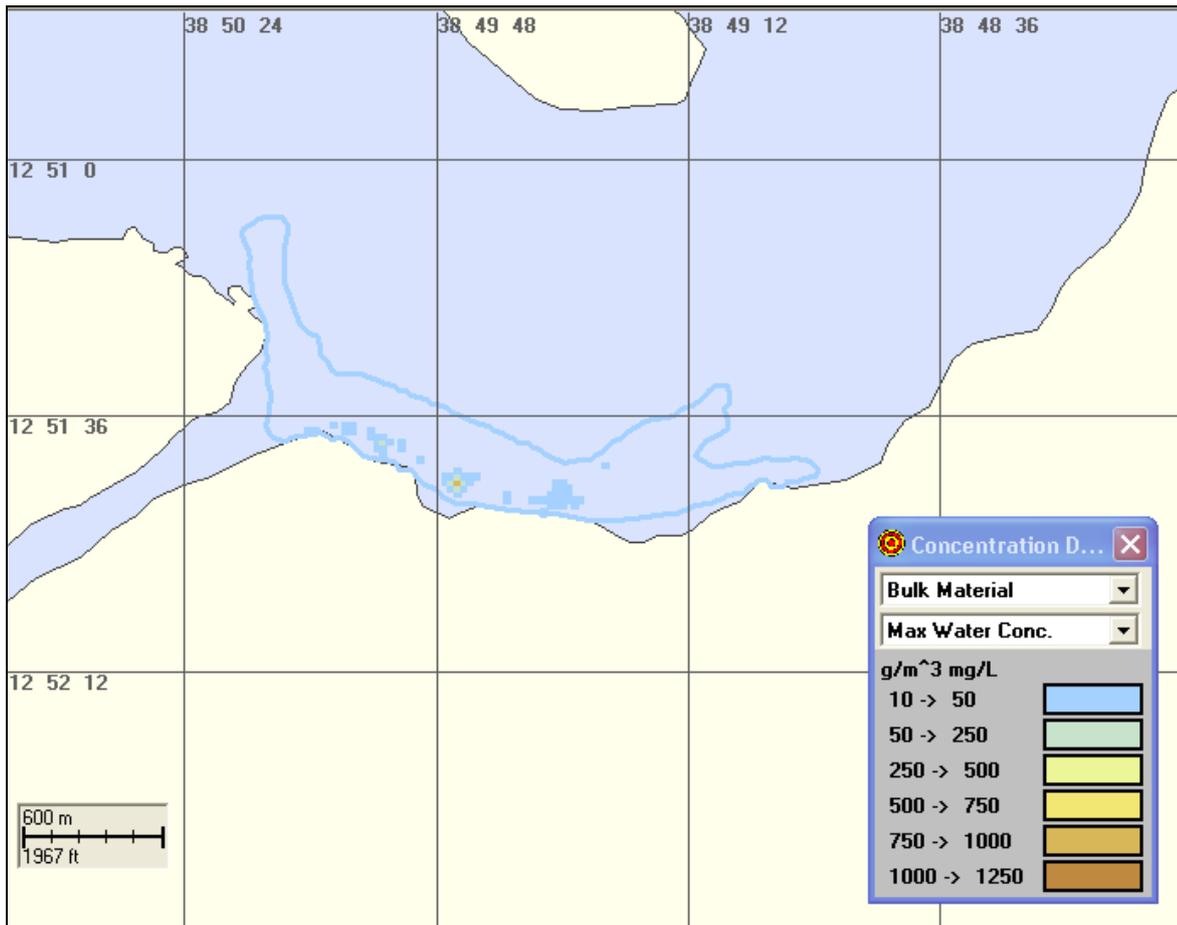
### III.3.1.1 Resultados para o Período de Verão

A Figura 21 mostra as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final após um ciclo de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de verão e representam a extração de 2.077,5 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 0,46 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.207,9 mg/L.



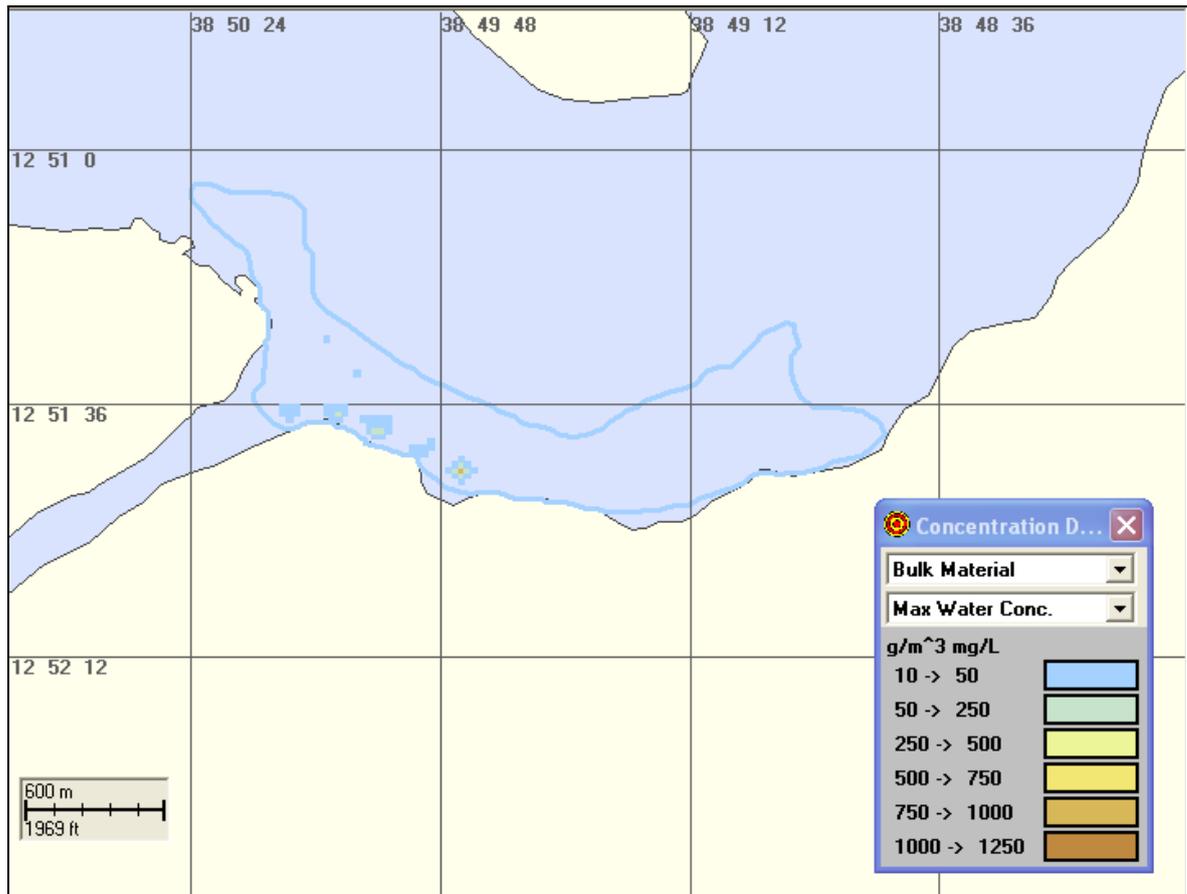
**Figura 21** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final de um único ciclo da operação de dragagem, durante o período de verão.

A Figura 22 apresenta as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final após dois ciclos de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de verão e representam a extração de 4.155,0 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 0,82 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.208,4 mg/L.



**Figura 22** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de dois ciclos da operação de dragagem, durante o período de verão.

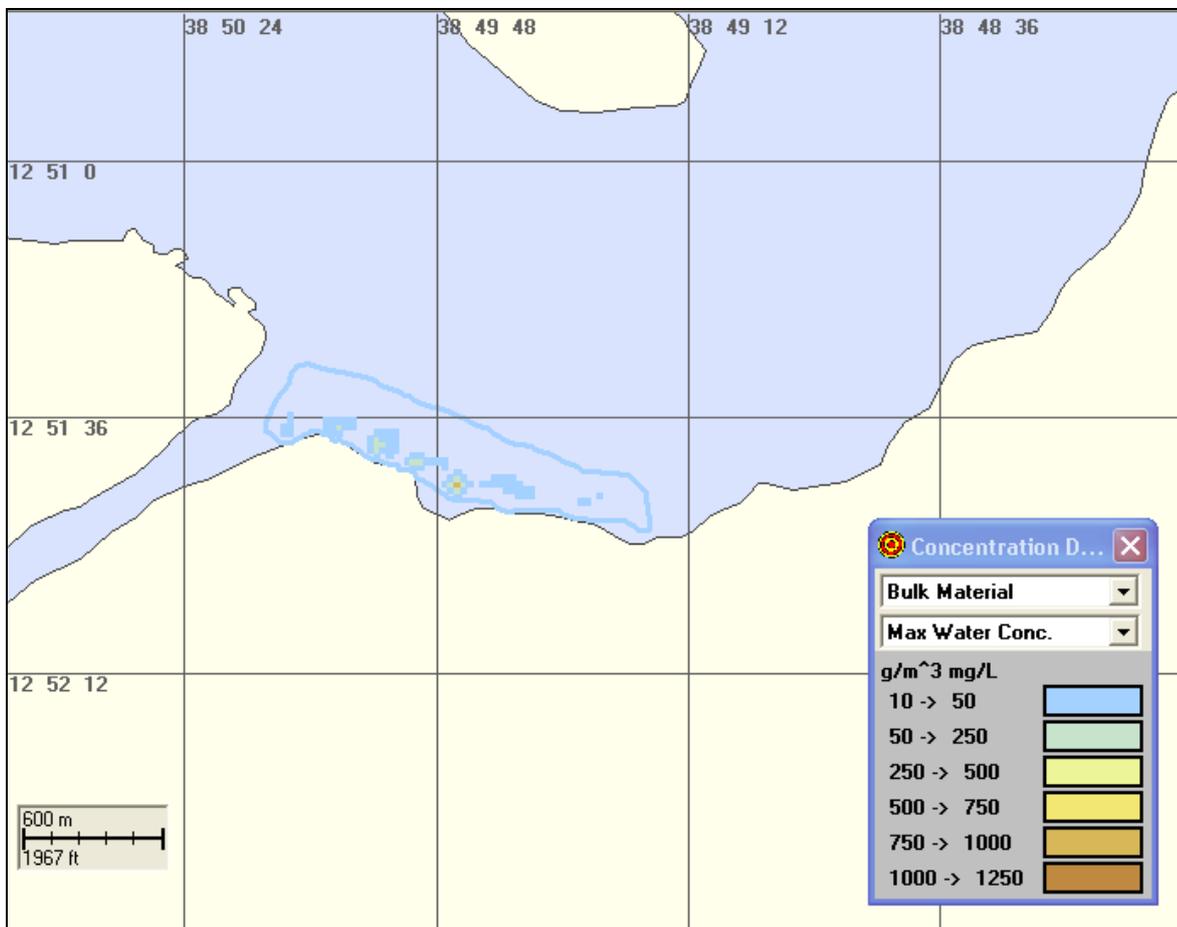
A Figura 23, a seguir, apresenta as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final após oito ciclos de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de verão e representam a extração de 16.620,0 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 1,30 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.218,1 mg/L.



**Figura 23** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de oito ciclos da operação de dragagem, durante o período de verão.

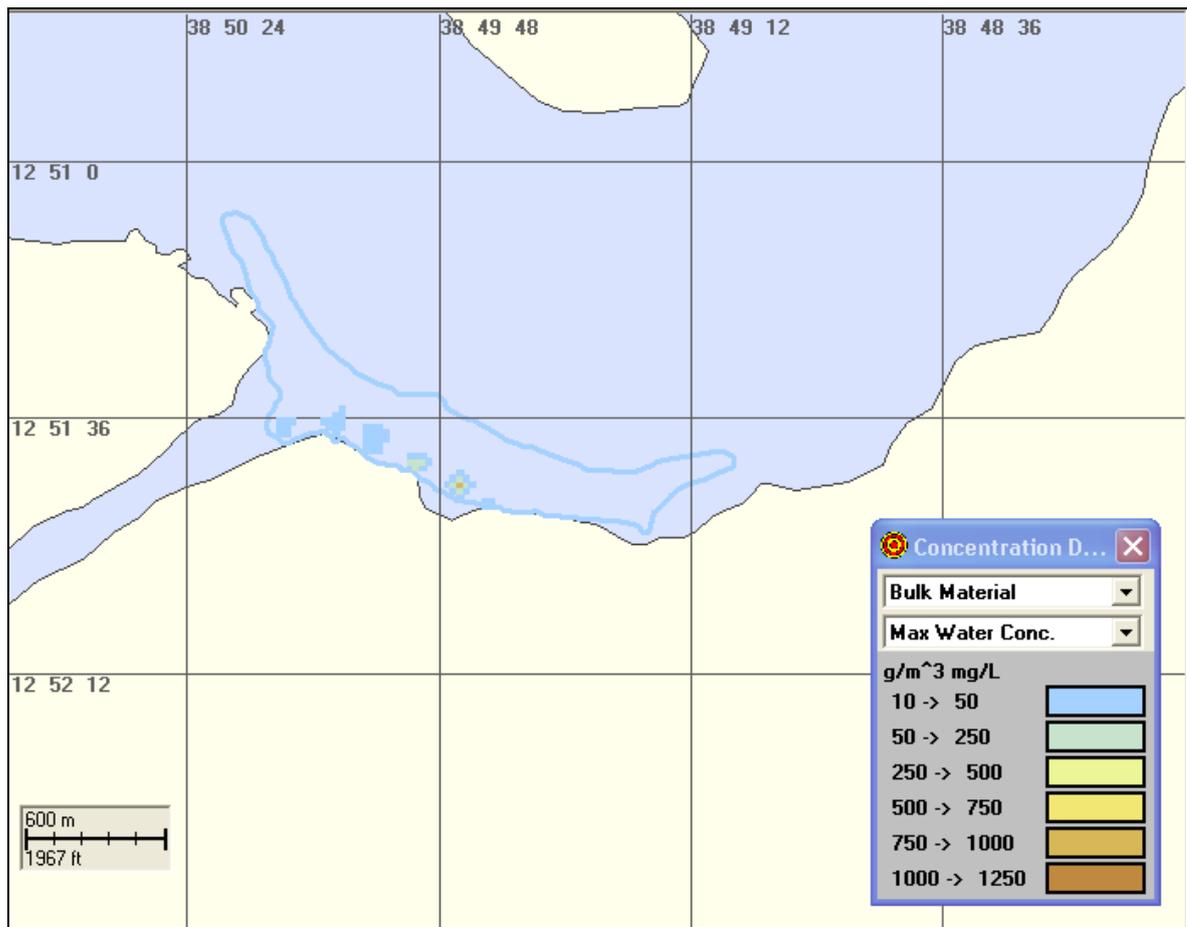
### III.3.1.2 Resultados para o Período de inverno

A Figura 24 apresenta as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final após um ciclo de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de inverno e representam a extração de 2.077,5 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 0,46 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.207,9 mg/L.



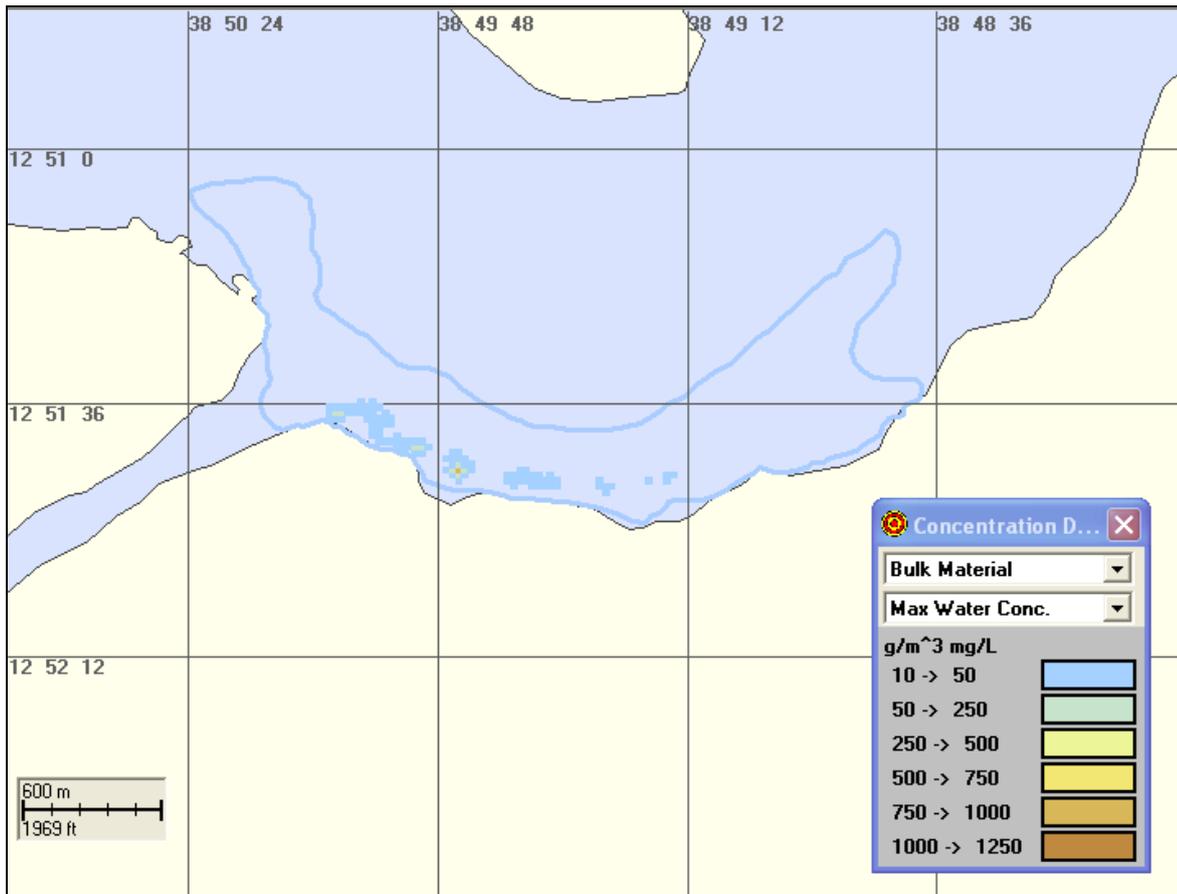
**Figura 24** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final de um único ciclo da operação de dragagem, durante o período de inverno.

A Figura 25 apresenta as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final após dois ciclos de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de inverno e representam a extração de 4.155,0 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 0,65 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.207,9 mg/L.



**Figura 25** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de dois ciclos da operação de dragagem, durante o período de inverno.

A Figura 26 apresenta as plumas de sedimentos ressuspensos no instante final de oito ciclos de operação. Os resultados são referentes à dragagem no período de inverno e representam a extração de 16.620,0 m<sup>3</sup> de sedimentos dragados. A área total das trajetórias das plumas foi de 1,56 km<sup>2</sup>, com concentração máxima de 1.213,2 mg/L.



**Figura 26** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água ao final de oito ciclos da operação de dragagem, durante o período de inverno.

### III.3.2 Resultados dos Descartes do Material Dragado

Neste item são apresentados os resultados das simulações de descarte de material dragado na região do bota-fora designado pela Diretoria de Portos e Costas do Estado da Bahia na zona oceânica a cerca de 70 km da zona de dragagem. Para melhor compreensão e visualização, os resultados foram divididos em: Concentração de Sedimentos em Suspensão e Sedimentos Depositados.

As animações, mostrando o transporte e dispersão da pluma para os cenários simulados dos sedimentos descartados na região do bota-fora, são apresentadas no Anexo G.

#### III.3.2.1 Concentração de Sedimentos em Suspensão

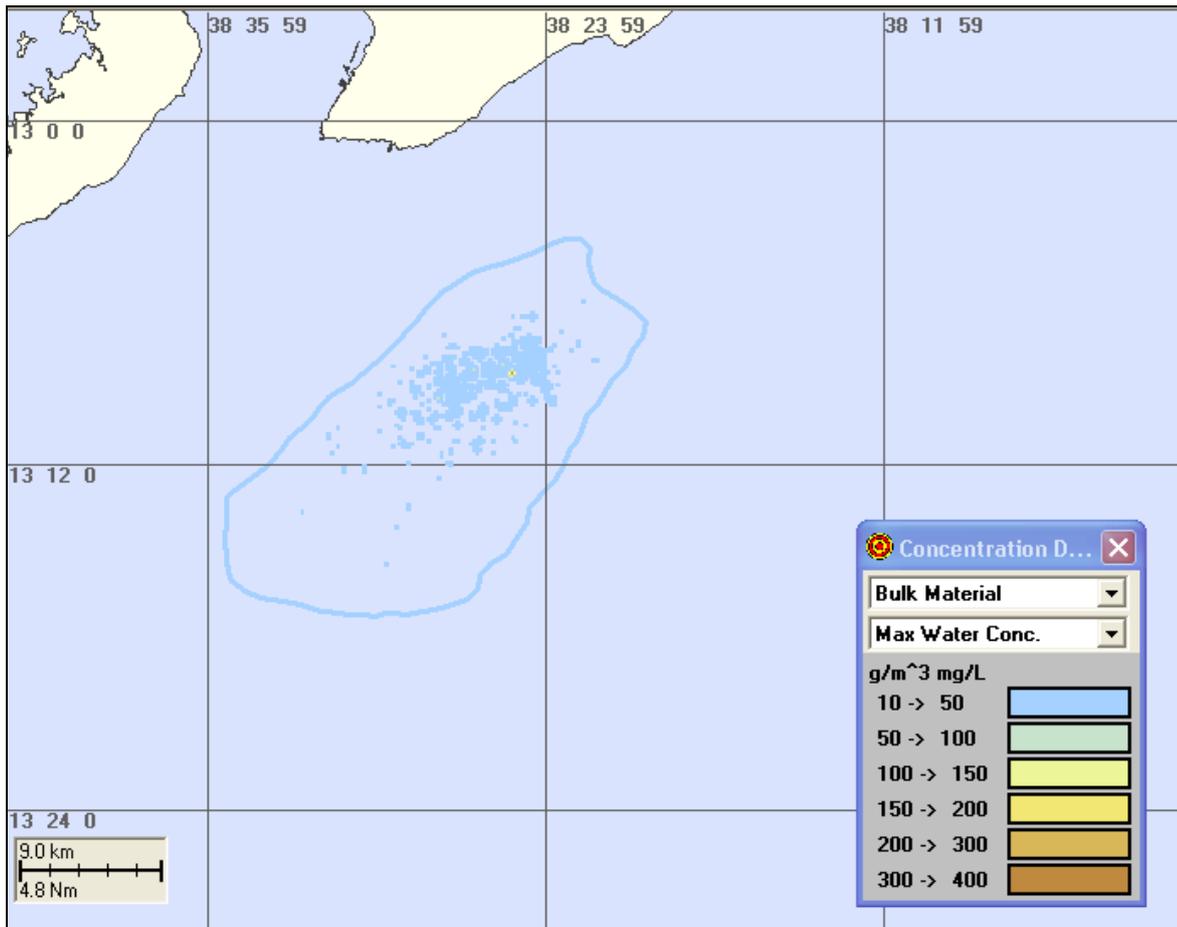
A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os resultados das simulações com o SSFATE para a concentração de sedimentos na coluna d'água, referente às operações de descarte na região do bota-fora. Observa-se no inverno uma tendência maior de deslocamento para nordeste quando comparado com o verão.

A Tabela 6 apresenta o alcance da pluma nas direções sudoeste e nordeste e as áreas de abrangência (área total) das plumas de sedimento descartado para cada cenário simulado. Esta tabela apresenta, ainda, as máximas concentrações calculadas para a coluna d'água.

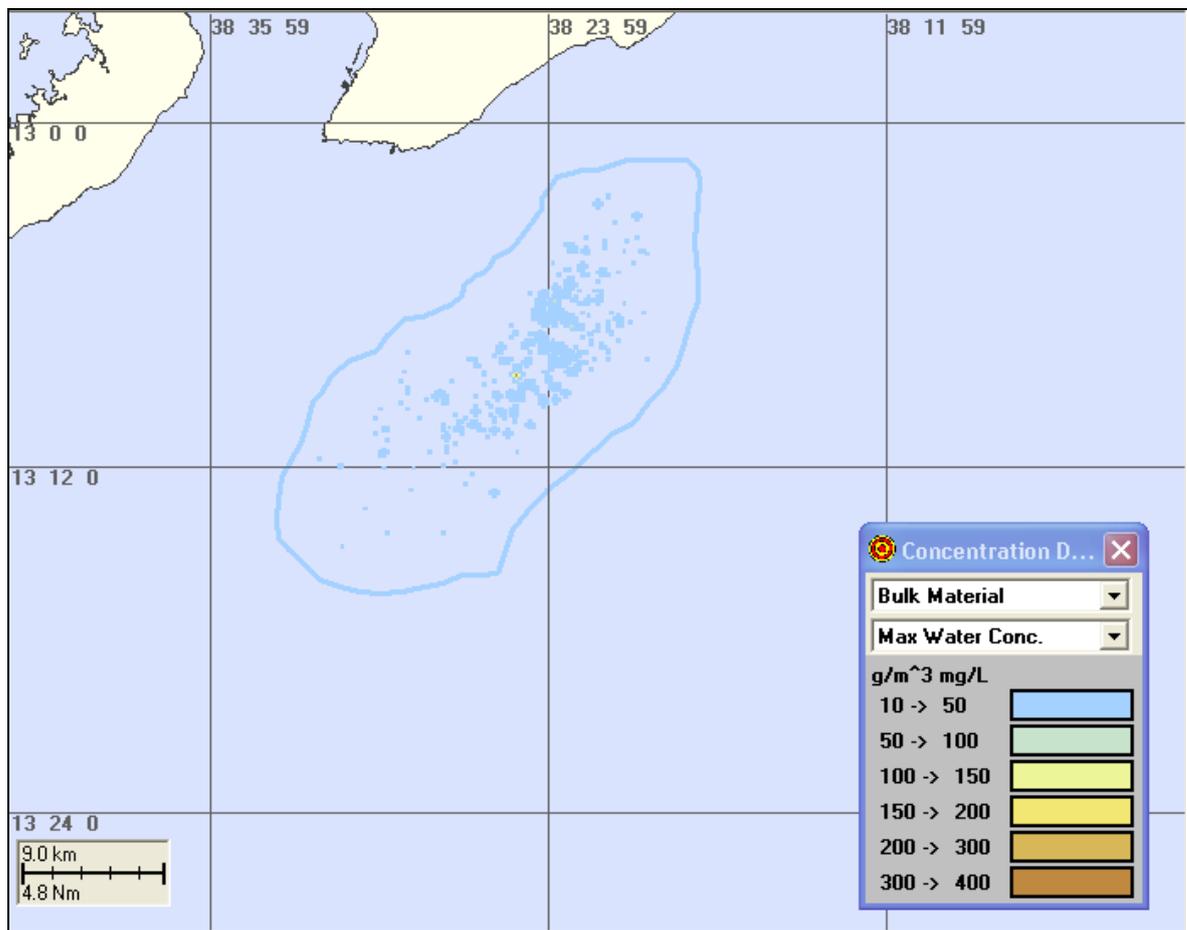
**Tabela 6** - Alcance nas direções sudoeste (SW) e nordeste (NE), áreas de abrangência das plumas de sedimento descartado e concentrações máximas na coluna d'água para os cenários simulados.

PERÍODO	ALCANCE NE (km)	ALCANCE SW (km)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	CONCENTRAÇÃO (mg/L)
VERÃO	9,7	22,4	367,8	386,9
INVERNO	17,7	17,9	429,9	386,9

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os resultados das simulações considerando os cenários de 30 dias (213.685,7 m<sup>3</sup> de sedimentos) de descartes para os períodos de verão e inverno. Nessas figuras apresenta-se a concentração final e a área total de cobertura de todas as trajetórias das plumas de sedimento descartado ao longo do período total simulado.



**Figura 27** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final dos descartes realizados durante 30 dias de operações, durante o período de verão.



**Figura 28** - Área total das trajetórias das plumas e concentração na coluna d'água no instante final dos descartes realizados durante 30 dias de operações, durante o período de inverno.

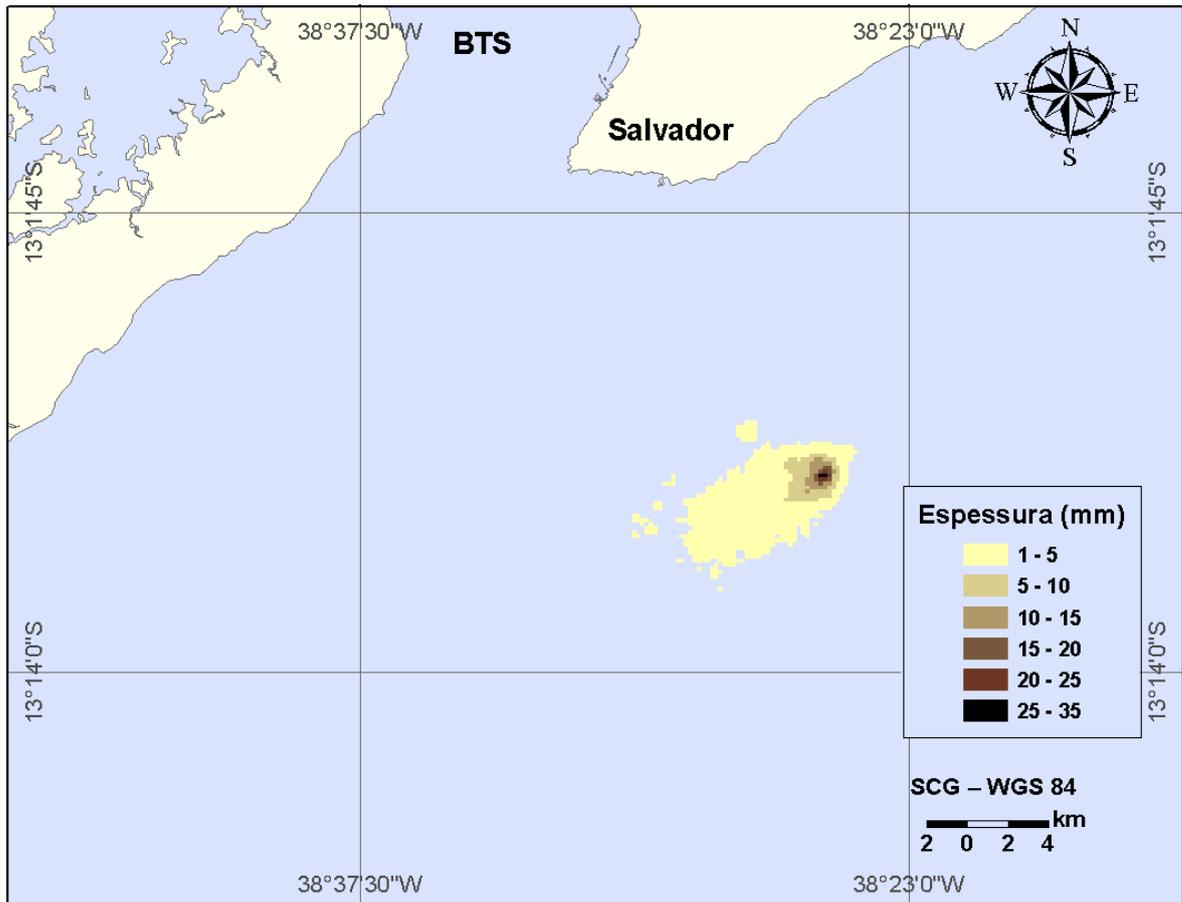
### III.3.2.2 Sedimentos Depositados

A Tabela 7 apresenta as espessuras totais depositadas ao final das simulações de 30 dias, sem considerar os processos de remobilização do material. Nesta tabela apresentam-se, ainda, as espessuras estimadas (a partir dos resultados de 30 dias) para o período completo das operações de dragagem/descarte (182,5 dias). A partir dos resultados dos depósitos de material no fundo oceânico para 30 dias, pode-se estimar a espessura que será alcançada com o descarte do volume total a ser dragado de 1.300.000 m<sup>3</sup>, por meio de uma regressão linear simples relacionando a espessura ao volume a ser descartado.

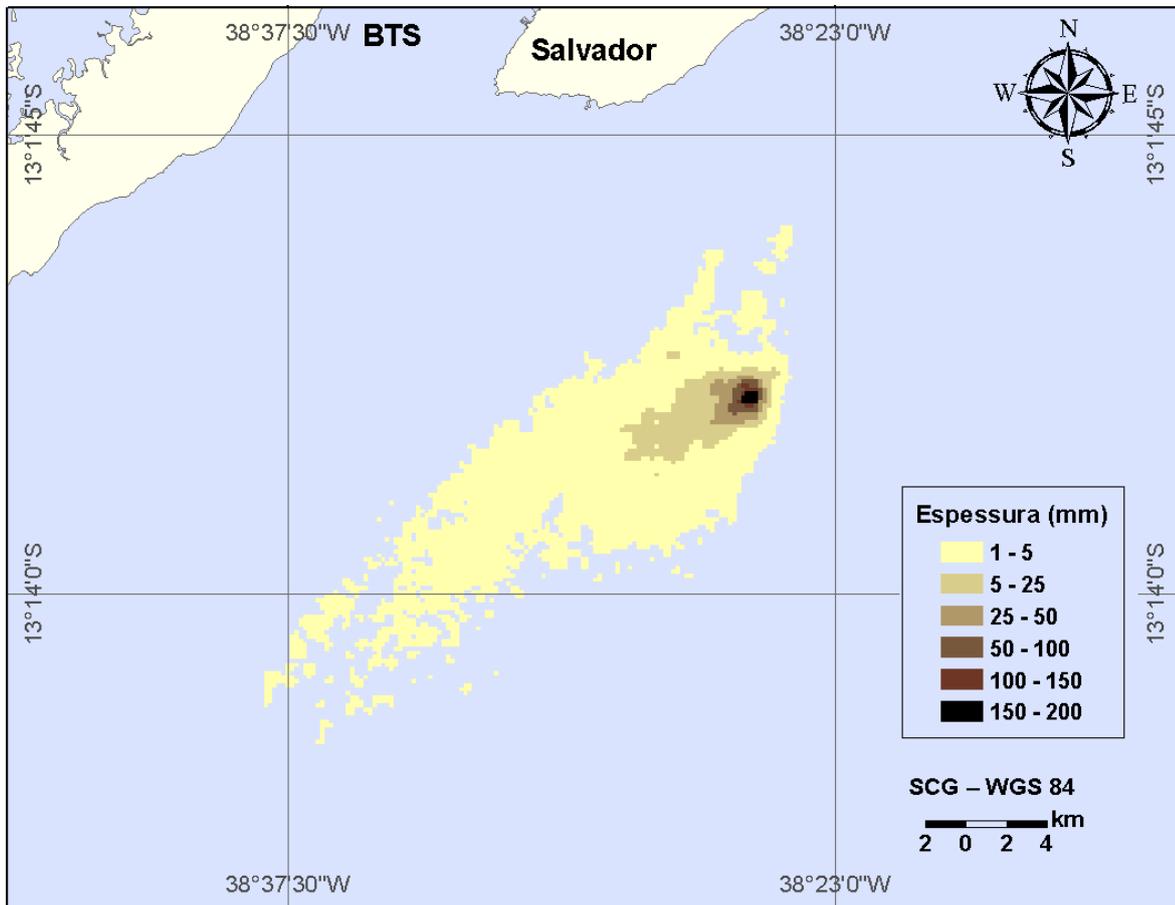
**Tabela 7 - Espessuras depositadas para os cenários simulados.**

PERÍODO	CENÁRIO	ESPESSURA (mm)
VERÃO	(30 dias - 213.685,7 m <sup>3</sup> )	31,7
	(182,5 dias - 1.300.000,0 m <sup>3</sup> )	193,7
INVERNO	(30 dias - 213.685,7 m <sup>3</sup> )	25,4
	(182,5 dias - 1.300.000,0 m <sup>3</sup> )	154,7

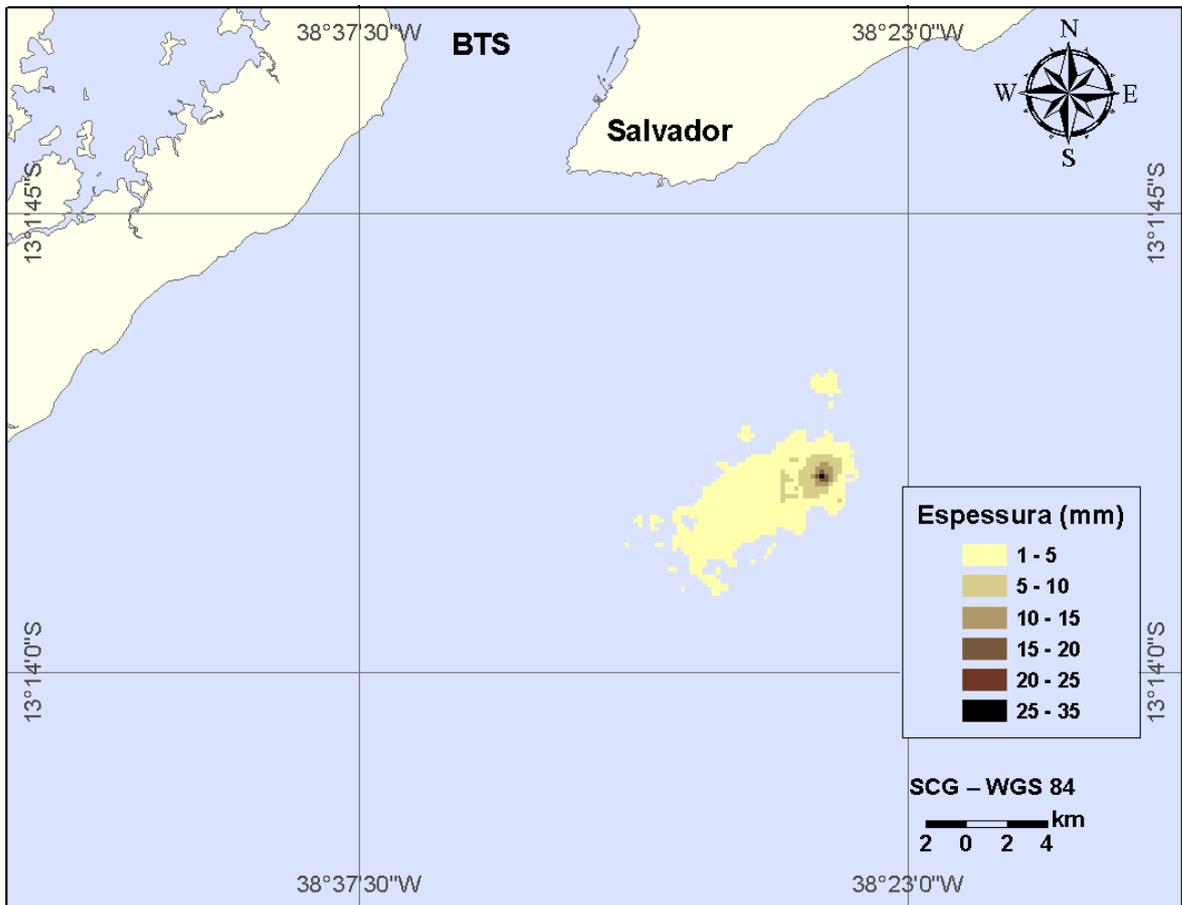
Da Figura 29 até a Figura 32 são apresentados os resultados de espessuras depositadas ao final das simulações considerando os cenários de 30 dias e as estimativas para o tempo total (182,5 dias), para verão e inverno.



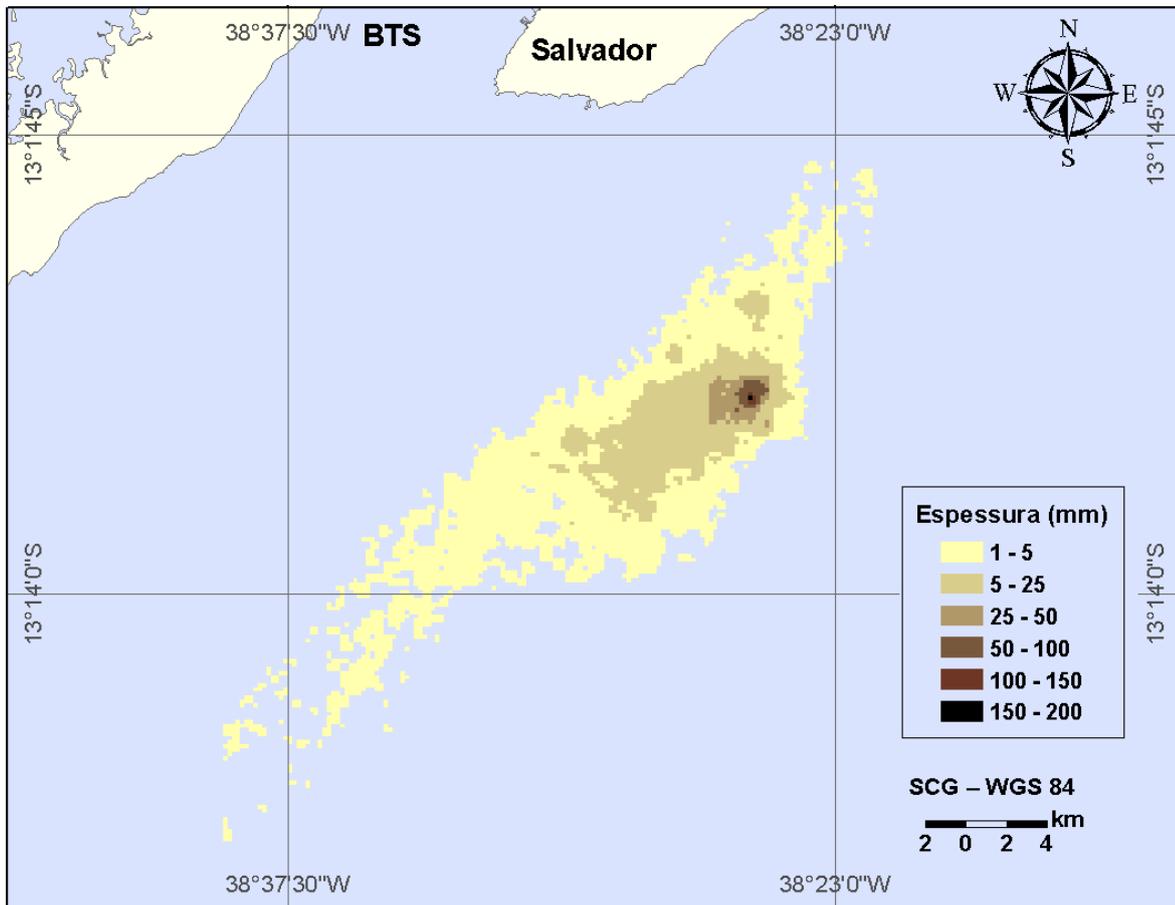
**Figura 29** - Espessura (mm) de sedimentos depositados ao longo de 30 dias de operação de descarte, durante o período de verão.



**Figura 30** - Espessura (mm) de sedimentos depositados estimados para o tempo total de descartes (182,5 dias), durante o período de verão.



**Figura 31** - Espessura (mm) de sedimentos depositados ao longo de 30 dias de operação de descarte, durante o período de inverno.



**Figura 32** - Espessura (mm) de sedimentos depositados estimados para o tempo total de descartes (182,5 dias), durante o período de inverno.

## IV CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de fornecer subsídios a SUDIC, este relatório técnico apresenta estimativas das possíveis alterações da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos (natural) devido à implementação de um estaleiro na região da Ponta do Corujão, além do estudo de dispersão de sedimentos provenientes das operações de dragagem e descarte, para implementação de tal empreendimento.

A modelagem numérica relativa aos processos naturais foi realizada pelo sistema de modelos numéricos Delft3D e as simulações das plumas de sedimentos ressuspensas durante a dragagem foram conduzidas através do modelo SSFATE.

Dentro do contexto de avaliação desses possíveis impactos nos processos naturais (circulação hidrodinâmica e transporte natural de sedimentos), foram avaliadas a partir dos resultados de duas simulações numéricas, uma delas contempla a situação (configuração) atual e a outra, a configuração futura (contemplando o estaleiro já implementado). As principais alterações da configuração futura ante a configuração atual referem-se ao aterro para a retro-área do estaleiro e a readequação batimétrica (aprofundamento defronte ao estaleiro para a cota de 12 m).

A caracterização dos padrões de circulação na região estuarina foi obtida a partir do módulo Delft3D-FLOW enquanto que, o transporte natural de sedimentos foi conduzido através do módulo Delft3D-SED. Os resultados alcançados pela implementação do Delft3D apresentaram boa concordância com os padrões de circulação quando comparados com os dados disponíveis na região. Esta implementação do modelo numérico também forneceu os subsídios hidrodinâmicos necessários e suficientes para a utilização do SSFATE na região do empreendimento. Para as simulações de descartes utilizou-se um modelo hidrodinâmico baseado no *Princeton Ocean Model*.

As alterações hidrodinâmicas observadas foram pouco significativas e não apresentaram diferenças relevantes entre si para os períodos de verão e inverno. Em decorrência da variação batimétrica (região a ser dragada) pode-se inferir que

em pontos onde haverá alteração significativa de cota batimétrica, a tendência é de aumento de intensidade do fluxo hidrodinâmico (da ordem de 10% em magnitude). Em locais onde as variações batimétricas não são significativas (configuração futura ante a configuração atual) não se observam alterações significativas na magnitude do fluxo hidrodinâmico. Ressalva deve ser feita para as regiões próximas aos taludes da região a ser dragada. Nestas regiões, quando no interior da região a ser dragada, o gradiente batimétrico induz a redução da intensidade do fluxo hidrodinâmico.

Quanto à avaliação da pluma de sedimentos oriundos das operações de dragagem, os resultados das simulações apresentaram áreas totais das plumas em suspensão inferiores a 1,60 km<sup>2</sup>. Em relação aos descartes na região do bota-fora, calculou-se áreas totais de trajetória das plumas de, aproximadamente, 430 km<sup>2</sup> e deposição máxima de 194 mm.

## V BIBLIOGRAFIA

**ASA (Applied Science Associates South America), 2005.** Estudo da Dispersão e Deposição de Sedimentos Dragados no Porto de Salvador. Relatório Técnico (março de 2005). 68pp.

**CLIMANÁLISE, 1996.** Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Edição comemorativa de 10 anos. Outubro.

**CRA (Centro de Recursos Ambientais), 2000.** Relatório de Diagnóstico da Qualidade da Água da BTS, Nº RT- 257-05-MA-002. Volumes I, II, III e IV.

**HESS, K.W. & K.T BOSLEY, K.T. 1992.** Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

**HASTENRATH, S. 1984.** Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1097-1107p.

**MOURA, A. D., & J. SHUKLA, 1981.** On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2653-2675p.

**NICHOLS, M.; DIAZ, R.J & SCHAFFNER, L.C., 1990.** Effects of Hopper Dredging and Sediment Dispersion, Chesapeake Bay. *Environmental Geology*, Vol. 15, Number 1, 31-43.

**RAO, V.B.; LIMA, M. & FRANCHITO, S.H. 1993.** Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. *Journal Of Climate*, 6, 1754-1763p.

**RODRIGUES, R. R., L. M. ROTHESTEIN, & M. WIMBUSH., 2007.** Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. *Journal of Physical Oceanography*, 37, 16-30.

**STRAMMA L. AND F SCHOTT, 1996.** Western equatorial circulation and interhemispheric exchange. In: Krauss, W. (Ed.), *The Warmwatersphere of the North Atlantic Ocean. Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart*, pp. 195-227.

**STRAMMA, L. & M. ENGLAND, 1999.** On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104(C9): p. 20863-20883.

**U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) and U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 1995.** Evaluation of dredged material proposed for discharge in waters of the U.S. – Testing Manual (Final, Working Group Draft). Appendix C. 80pp.

**WL | DELFT HYDRAULICS, 2006.** Delft3D-FLOW User Manual, version 3.13. ([www.wldelft.nl/](http://www.wldelft.nl/)).