

# Modelagem da Dispersão e Deposição de Sedimentos Dragados no Terminal Marítimo Inácio Barbosa - TMIB, SE

Revisão 00  
Jan/2007



**ECOLOGUS**  
Engenharia Consultiva

**ASA SOUTH AMERICA**  
**Rua Purpurina, 155, cj 95**  
**Vila Madalena – São Paulo –SP**  
**CEP 05435-030**

**Ecologus – Engenharia Consultiva**  
**Rua Ouvidor, 60, cj 1001 e 1002**  
**Centro – Rio de Janeiro – RJ**  
**CEP 20004-030**

**MODELAGEM DA DISPERSÃO E DEPOSIÇÃO DE  
SEDIMENTOS DRAGADOS NO TERMINAL MARÍTIMO  
INÁCIO BARBOSA – TMIB, SE**

Equipe **ASA SOUTH AMERICA**:

ANA CAROLINA DA ROCHA	(Nº IBAMA : 325047)
DANIEL CONSTANTINO ZACHARIAS	(Nº IBAMA : 638533)
EDUARDO YASSUDA	(Nº IBAMA : 94066)
GABRIEL CLAUZET	(Nº IBAMA : 1031373)
HEMERSON TONIN	(Nº IBAMA : 1658739)
JOSÉ EDSON PEREIRA	(Nº IBAMA : 326336)
MARCO ANTONIO CORRÊA	(Nº IBAMA : 434236)
MARIA REGINA F. GUIMARÃES	(Nº IBAMA : 434231)
MAURÍCIO PERSON LAMMARDO	(Nº IBAMA : 272165)
RAFAEL BONANATA DA ROCHA	(Nº IBAMA : 434269)

**Revisão 00**  
**Janeiro / 2007**



**CONTROLE DE REVISÕES**

<b>REV.</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>DATA</b>
00	Documento Original	18/01/2007



## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO .....	I-1
I.1.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA .....	I-3
I.1.2 CARACTERIZAÇÃO OCEANOGRÁFICA .....	I-5
II MODELO HIDRODINÂMICO .....	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO OCEÂNICO.....	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM .....	II-2
II.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E FORÇANTES .....	II-5
II.2.1 VENTOS .....	II-7
II.2.2 MARÉS .....	II-8
II.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	II-9
II.3.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR.....	II-10
II.3.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES.....	II-11
III ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE ..	III-1
IV MODELAGEM DA RESSUSPENSÃO, DISPERSÃO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS .....	IV-1
IV.1 DESCRIÇÃO DO MODELO SSFATE .....	IV-1
IV.1.1 BASE TEÓRICA .....	IV-2
IV.2 DADOS DE ENTRADA .....	IV-7
IV.3 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E OCEANOGRÁFICAS .....	IV-8
IV.4 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....	IV-10
IV.5 RESULTADOS.....	IV-10
IV.5.1 RESULTADOS DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM.....	IV-12
IV.5.1.1 Sedimentos na Coluna D'Água .....	IV-13
IV.5.1.1.1 Área A – Trecho 1 .....	IV-13
IV.5.1.1.2 Área B – Trecho 2 .....	IV-20
IV.5.1.1.3 Área B – Trecho 3 .....	IV-26
IV.5.1.2 Área de Influência das Plumas .....	IV-32
IV.5.2 RESULTADOS DAS OPERAÇÕES DE DESCARTE .....	IV-36
IV.5.2.1 Sedimentos na Coluna D'Água .....	IV-37

---

	IV.5.2.1.1	Área A – Trecho 1 .....	IV-37
	IV.5.2.1.2	Área B – Trecho 2 .....	IV-44
	IV.5.2.1.3	Área B – Trecho 3 .....	IV-51
	IV.5.2.2	Área de Influência das Plumas .....	IV-57
	IV.5.2.3	Sedimentos Depositados.....	IV-61
V	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....		V-1
VI	BIBLIOGRAFIA .....		VI-1

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> - Amplitude (cm) e fase local ( $^{\circ}$ ) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica da DHN, no Terminal Portuário Inácio Barbosa ( $10^{\circ}50,0'S$ e $36^{\circ}55,7'W$ ), período de 18 de fevereiro a 19 de março de 1991. Fonte: FEMAR, 2000. ....	I-8
<b>Tabela 2</b> - Coordenadas das áreas de dragagem ( <i>datum</i> Córrego Alegre).....	III-1
<b>Tabela 3</b> - Coordenadas da área de descarte ( <i>datum</i> Córrego Alegre).....	III-2
<b>Tabela 4</b> - Características do processo de dragagem/descarte de sedimentos na Área A do Terminal Marítimo Inácio Barbosa. ....	III-3
<b>Tabela 5</b> - Características do processo de dragagem/descarte de sedimentos na Área B do Terminal Marítimo Inácio Barbosa. ....	III-3
<b>Tabela 6</b> - Porcentagens das classes granulométricas dos Trechos 1, 2 e 3 que serão dragados no TMIB.....	III-4
<b>Tabela 7</b> - Valores típicos dos coeficientes de concentração. ....	IV-5
<b>Tabela 8</b> - Valores típicos para a tensão de atrito (Pa).....	IV-6
<b>Tabela 9</b> - Cenários simulados no SSFATE. ....	IV-10
<b>Tabela 10</b> - Características da deposição de sedimentos descartados na região do TMIB. ....	IV-62





## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização das áreas de dragagem e da área de descarte de material dragado no TMIB, SE. .... I-2
- Figura 2** - Variação da precipitação pluviométrica ao longo dos meses do ano para a região do litoral sergipano..... I-3
- Figura 3** - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários do vento NCEP, para Sergipe, durante o período de janeiro a dezembro de 1990 (convenção vetorial). .... I-4
- Figura 4** - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para os períodos de: (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (julho a agosto). .... I-5
- Figura 5** - Diagrama *stick plot* de dados de correntes coletados próximo ao local da dragagem (PETROBRAS). .... I-7
- Figura 6** - Espectros de amplitudes de dados de correntes coletados em 10,839°S e 36,925°W (PETROBRAS). .... I-7
- Figura 7** - Pontos batimétricos utilizados na região da Bacia de Sergipe-Alagoas. .... II-6
- Figura 8** - Batimetria interpolada para a região de Sergipe-Alagoas. .... II-6
- Figura 9** - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Sergipe-Alagoas, com detalhe na região do TMIB. .... II-7
- Figura 10** - Campo de vento NCEP projetado na grade do modelo hidrodinâmico. .... II-8
- Figura 11** - Mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude da componente de maré  $M_2$ , projetado na grade do modelo hidrodinâmico. .... II-9
- Figura 12** - Série temporal de maré medida (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.....II-10
- Figura 13** - Série temporal da componente  $u$  da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990....II-11
- Figura 14** - Série temporal da componente  $v$  da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990....II-12
- Figura 15** - Principais elementos usados na caracterização meteorológica e oceanográfica da região do Terminal Marítimo Inácio Barbosa, em Sergipe. .... IV-9
- Figura 16** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de enchente em maré de sizígia (09/02 – 18:20h GMT). .... IV-14

- Figura 17** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 16, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro). ..... IV-15
- Figura 18** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de máxima enchente em maré de quadratura (18/02 – 9:50h GMT)..... IV-16
- Figura 19** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 18, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro). ..... IV-17
- Figura 20** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de máxima vazante em maré de sizígia (22/02 – 18:30h GMT). ..... IV-18
- Figura 21** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 20, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro). ..... IV-19
- Figura 22** - Cenário B\_TR2\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia (09/02 – 11:10h GMT)..... IV-21
- Figura 23** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 22, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro). ..... IV-22
- Figura 24** - Cenário B\_TR2\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de estufa de maré em condição de baixa-mar de quadratura (16/02 – 4:10h GMT). ..... IV-23
- Figura 25** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 24, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro). ..... IV-24
- Figura 26** - Cenário B\_TR2\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia (22/02 – 7:10h GMT)..... IV-25
- Figura 27** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 26, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro). ..... IV-26
- Figura 28** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de sizígia (08/02 – 13:20h GMT)..... IV-27

- Figura 29** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 28, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro)..... IV-28
- Figura 30** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de estufa de maré em condição de preamar de quadratura (18/02 – 16:00h GMT)..... IV-29
- Figura 31** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 30, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro)..... IV-30
- Figura 32** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de estufa de maré em condição de baixa-mar de quadratura (23/02 – 00:50h GMT)..... IV-31
- Figura 33** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 32, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro)..... IV-32
- Figura 34** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 1 da Área A..... IV-33
- Figura 35** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 2 da Área B..... IV-34
- Figura 36** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 3 da Área B..... IV-35
- Figura 37** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem nos trechos 1, 2 e 3. .... IV-36
- Figura 38** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de vazante em maré de sizígia (08/02 – 07:50h GMT). .... IV-38
- Figura 39** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 38, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro)..... IV-39
- Figura 40** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de enchente em maré de quadratura (17/02 – 8:20h GMT)..... IV-40
- Figura 41** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 40, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro)..... IV-41

- Figura 42** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de vazante em maré de sizígia. .... IV-42
- Figura 43** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 42, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro). .... IV-43
- Figura 44** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de sizígia. .... IV-45
- Figura 45** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 44, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro). .... IV-46
- Figura 46** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de quadratura. .... IV-47
- Figura 47** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 46, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro). .... IV-48
- Figura 48** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de quadratura. .... IV-49
- Figura 49** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 48, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro). .... IV-50
- Figura 50** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia. .... IV-52
- Figura 51** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 50, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro). .... IV-53
- Figura 52** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de quadratura. .... IV-54
- Figura 53** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 52, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro). .... IV-55
- Figura 54** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia. .... IV-56

- Figura 55** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 54, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro)..... IV-57
- Figura 56** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 1 da Área A. .... IV-58
- Figura 57** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 2 da Área B. .... IV-59
- Figura 58** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 3 da Área B. .... IV-60
- Figura 59** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte nos trechos 1, 2 e 3..... IV-61
- Figura 60** - Cenário A\_TR1\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 1, localizado na Área A..... IV-63
- Figura 61** - Cenário B\_TR2\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 2, localizado na Área B..... IV-64
- Figura 62** - Cenário B\_TR3\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 3, localizado na Área B..... IV-65
- Figura 63** - Área de influência total dos descartes efetuados a partir das operações de dragagem dos trechos 1, 2 e 3..... IV-66



## RESUMO

O modelo computacional SSFATE, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.**, em parceria com o USACE, foi utilizado para estudar a ressuspensão, dispersão e deposição de sedimentos dragados e descartados na região do Terminal Marítimo Inácio Barbosa – TMIB (Município Barra dos Coqueiros – SE).

O clima no litoral do Sergipe pode ser enquadrado como Megatérmico Subúmido Úmido (C2A'a'), sob influência de um regime de ventos de leste, denominados alísios. O padrão de circulação sobre a plataforma continental apresenta correntes predominantes nas direções SW e NE, com a maior parte da energia em baixas frequências, havendo também forte influência da maré, com sinal predominantemente semi-diurno.

O campo de correntes utilizado pelo SSFATE foi obtido a partir dos resultados de um modelo hidrodinâmico de meso-escala, implementado pela **ASA SOUTH AMERICA** na costa de Sergipe.

A área que será draga no TMIB será dividida em duas, de acordo com o tipo de draga que será utilizada: Área A (draga pequena) e Área B (draga grande). Considerando as diferentes características granulométricas, as áreas a serem dragadas podem ser divididas em três partes: Píer área de acostamento dos navios (Trecho 1 – Área A), Bacia de Evolução (Trecho 2 – Área B) e Canal de Acesso ao terminal (Trecho 3 – Área B).

No total, foram simulados 6 cenários (2 para cada trecho das áreas dragadas), sendo 3 cenários representativos das operações de dragagem e 3 cenários representativos dos descartes do material dragado. As simulações foram realizadas no período de verão, época prevista para as operações de dragagem.

Para a apresentação dos resultados, foram utilizados o corte de 50 mg/L para os sedimentos presentes na coluna d'água e de 1 cm para os sedimentos depositados.

Os resultados das simulações com o SSFATE mostraram que a área de influência da pluma de sedimentos possui orientação preferencial para o



quadrante sul. Durante as operações de dragagem, as maiores concentrações de sedimento presentes na coluna d'água, sempre associadas à maré de sizígia, foram de 997 mg/L para o Trecho 1, 684 mg/L para o Trecho 2 e 731 mg/L para o Trecho 3. Durante as operações de descarte, as maiores concentrações na coluna d'água foram de 6.544 mg/L (Trecho 1), 47.096 mg/L (Trecho 2) e 36.539 mg/L (Trecho 3); também associadas à maré de sizígia. Ainda para as operações de descarte, as maiores espessuras calculadas foram de 128 cm (Trecho 1), 497 cm (Trecho 2) e 380 cm (Trecho 3). Salienta-se que as espessuras calculadas são as máximas possíveis considerando-se o número de descartes diários e o volume total dragado em cada trecho e não foram considerados processos de remobilização deste sedimento.

As áreas de influência total das plumas de sedimento na coluna d'água nos três trechos considerados, considerando concentrações maiores ou iguais a 50 mg/L, foram de 22,5 km<sup>2</sup> para as operações de dragagem e de 56,4 km<sup>2</sup> para as operações de descarte. Já a área de influência total do material depositado durante as operações de descarte foi de 0,67 km<sup>2</sup> (para espessuras maiores ou iguais a 1 cm).

## **I INTRODUÇÃO**

Com o objetivo de dar suporte a ECOLOGUS Engenharia Consultiva / CVRD<sup>1</sup> em estudos ambientais no Terminal Marítimo Inácio Barbosa – TMIB (Município Barra dos Coqueiros – SE), apresenta-se neste trabalho da simulação computacional sobre a ressuspensão, dispersão e deposição de sedimentos dragados. Essa avaliação foi conduzida utilizando o modelo computacional SSFATE (*Suspended Sediment Fate*), desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** em parceria com a USACE<sup>2</sup>.

Para estudos de modelagem como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, (c) campo termohalino, (d) especificações das operações de dragagem e de descarte, e (e) caracterização do material dragado.

O campo de correntes, característico dos padrões de circulação na plataforma continental do litoral do Sergipe, foi obtido a partir de resultados de um modelo de meso-escala desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM).

Neste trabalho, o Capítulo I discute o propósito do estudo e fornece informações sobre a área de interesse. O Capítulo II descreve o modelo hidrodinâmico e a calibração do mesmo. A caracterização das operações de dragagem e descarte são apresentadas no Capítulo III. O Capítulo IV descreve o modelo SSFATE utilizado na modelagem da ressuspensão, dispersão e deposição de material dragado, os dados de entrada e seus resultados. Por fim, no Capítulo V são apresentadas as considerações finais do presente estudo.

### **I.1 ÁREA DE ESTUDO**

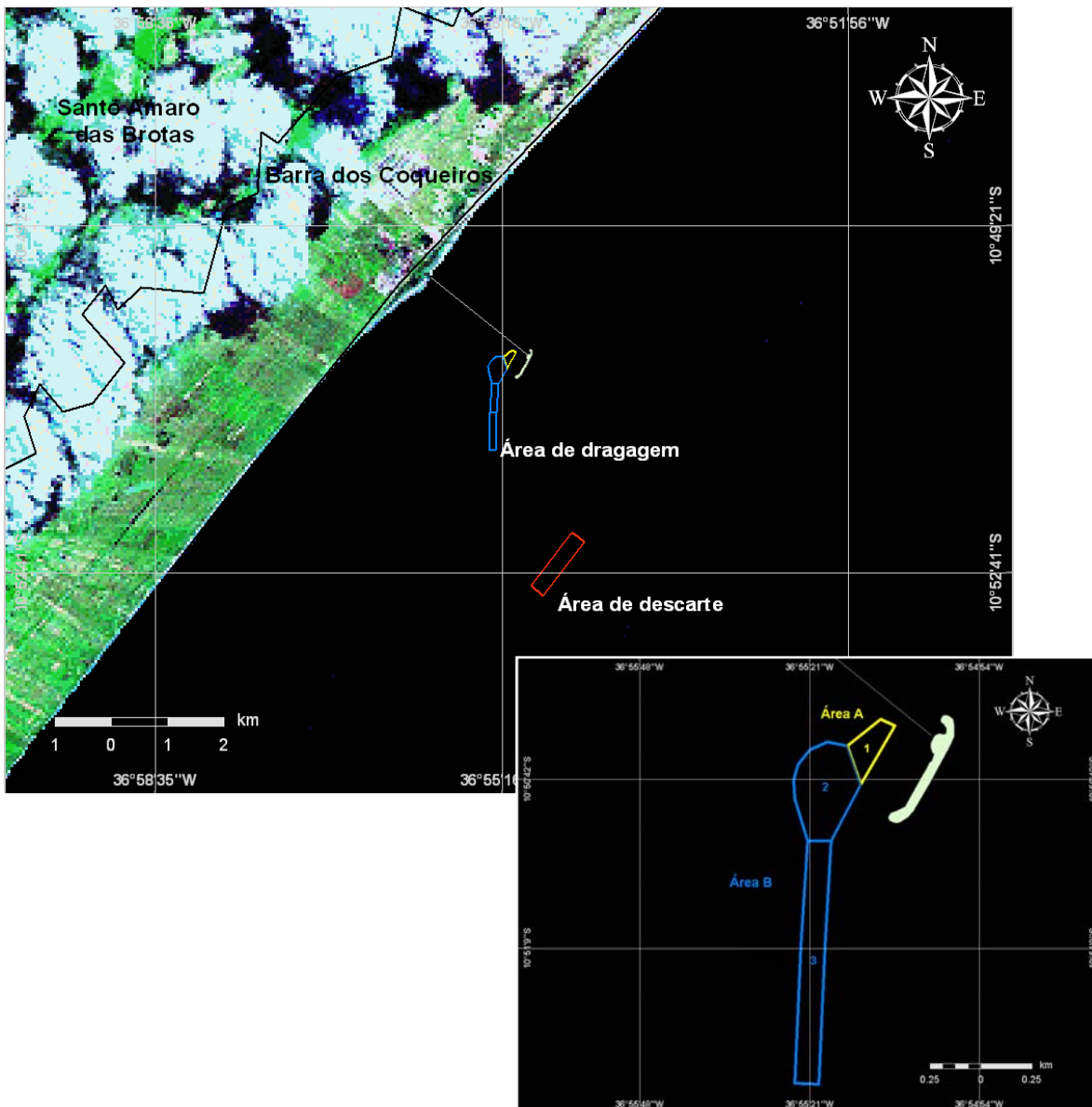
A Figura 1 apresenta a região de interesse para esse estudo, com a localização das áreas e trechos onde foram realizadas as simulações de

---

<sup>1</sup> Companhia Vale do Rio Doce.

<sup>2</sup> *United States Army Corps of Engineers.*

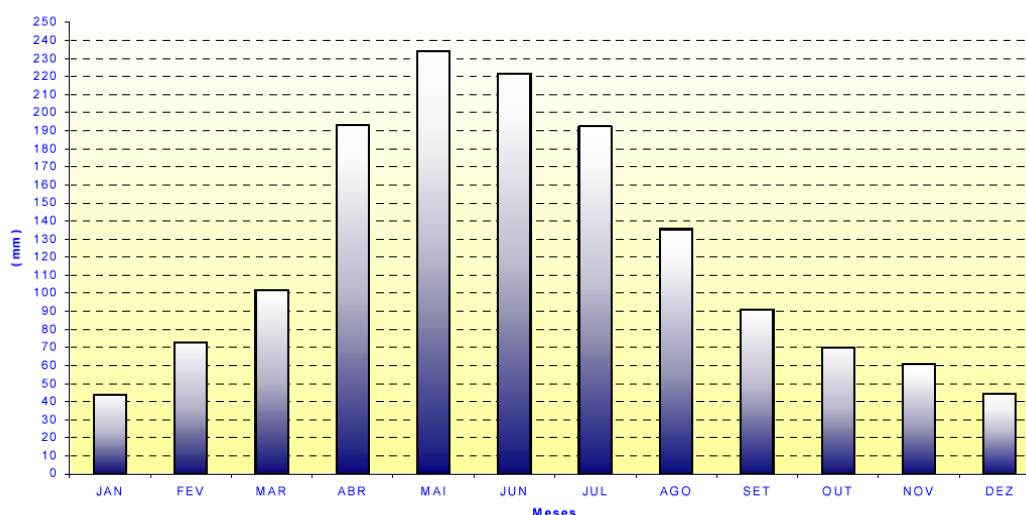
dragagem e descarte de sedimentos. A área que será dragada no TMIB pode ser dividida em três partes: Píer área de acostamento dos navios (Trecho 1), Bacia de Evolução (Trecho 2) e Canal de Acesso ao terminal (Trecho 3). Entretanto, a área de dragagem será dividida em duas: a Área A (Trecho 1) e a Área B (Trechos 2 e 3). Esta divisão foi feita em função do tipo de draga que será utilizada em cada área. Os descartes serão efetuados em uma área localizada à, aproximadamente, 3,5 km do píer de acostamento.



**Figura 1** - Localização das áreas de dragagem e da área de descarte de material dragado no TMIB, SE.

### ***1.1.1 Caracterização Meteorológica***

A região Nordeste do Brasil caracteriza-se por irregularidades climáticas que variam tanto espacial quanto temporalmente. Em situações normais, as regiões próximas ao litoral são marcadas por uma estação chuvosa bem definida, com chuvas abundantes. Os principais sistemas meteorológicos que provocam as chuvas que ocorrem ao longo do litoral estão associados às frentes frias, aos distúrbios de leste, às linhas de instabilidade e aos efeitos da brisa concentrando-se no período de abril a agosto. Especificamente para a região do litoral sergipano, o período principal das chuvas concentra-se entre os meses de março a agosto (Figura 2), com cerca de 67% das chuvas ocorrendo durante esses meses.



Fonte: SUDENE - EMDAGRO - INMET

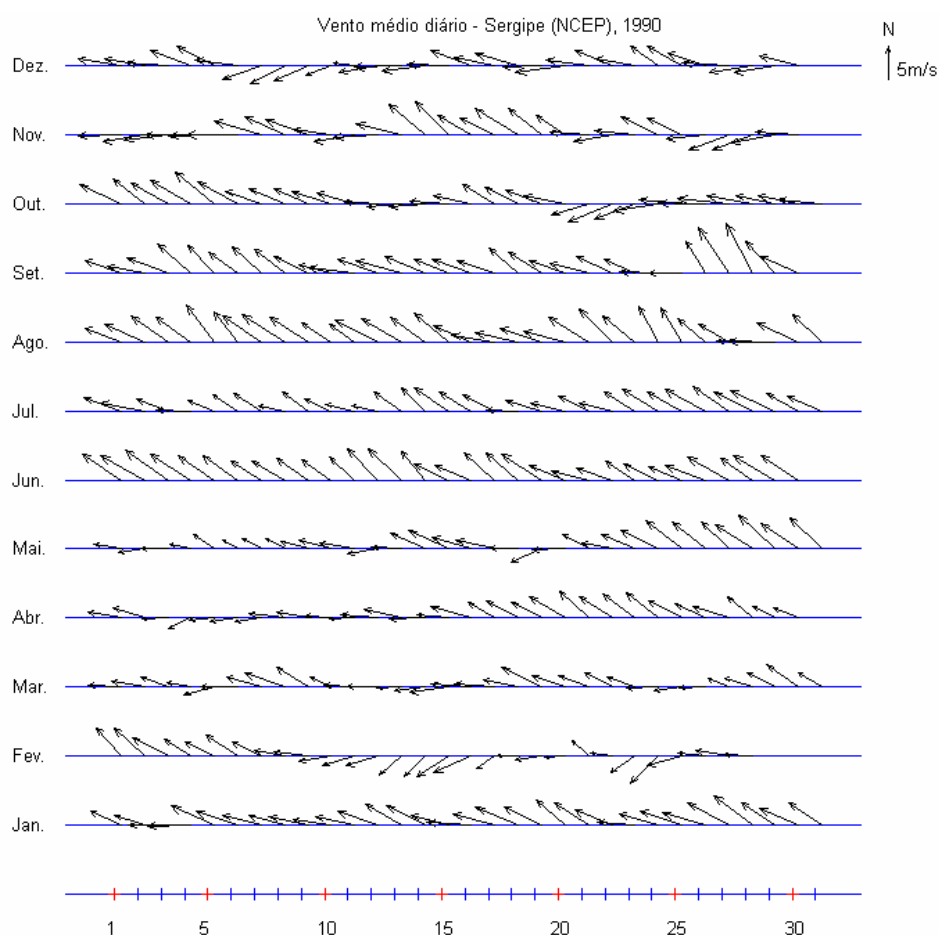
**Figura 2** - *Varição da precipitação pluviométrica ao longo dos meses do ano para a região do litoral sergipano.*

O clima do litoral pode ser enquadrado como clima Megatérmico Subúmido Úmido (C2A'a'), o mais úmido de todo o Estado de Sergipe, com período de chuvas com índices pluviométricos médios anuais entre valores de 1.179 mm, para a localidade de Pacatuba, e ao redor de 1.550 mm, para a cidade de Aracaju (Fontes, 1990).

Quanto aos ventos, a região estudada pode ser caracterizada por um regime de ventos de leste, denominados alísios. A intensidade desses ventos aumenta

do verão para o inverno e a direção média do vento é de  $110^{\circ}$  (Riehl, 1965). Variações sazonais podem ocorrer devido à interação entre o fluxo médio e o sistema de ventos locais, como observado por Kousky (1980).

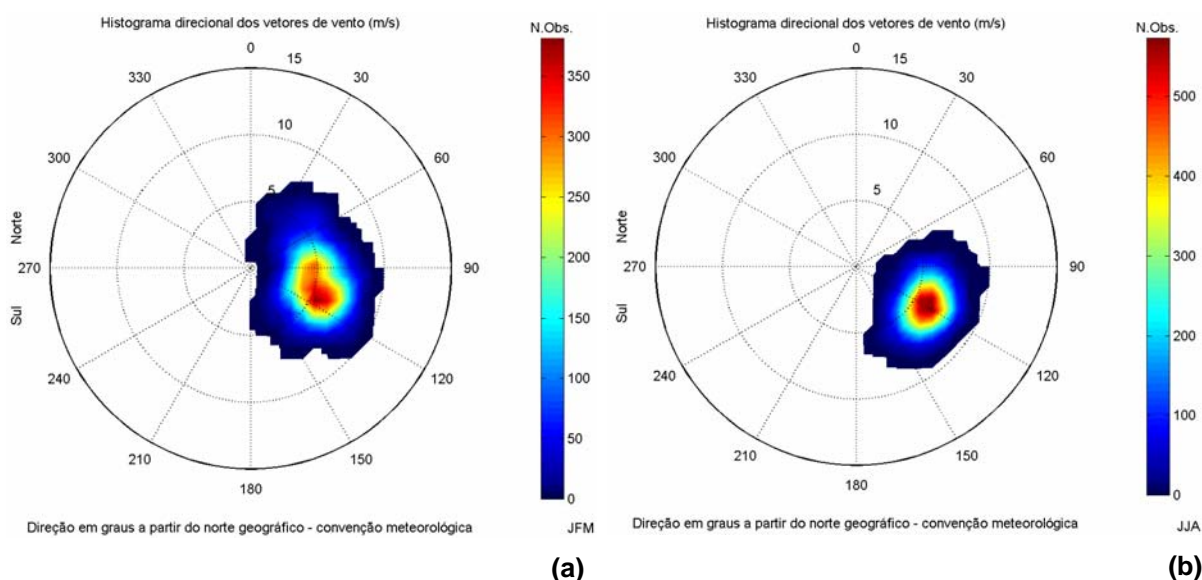
Dados de vento provenientes das reanálises dos modelos meteorológicos NCEP e NCAR<sup>3</sup>, relativos ao quadrilátero de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ , centrado nas coordenadas  $10,5^{\circ}S$  e  $35,6^{\circ}W$ , indicam dois períodos distintos para os padrões de vento. Nos meses de janeiro a março ocorrem ventos menos intensos, com a direção variando de ESE a ENE, e nos meses de junho a agosto os ventos são, em geral, mais intensos, com direção predominantemente de SE, como indicado na Figura 3 (diagrama *stick plot* do vento NCEP referente ao período de 1<sup>o</sup> de janeiro a 31 de dezembro de 1990).



**Figura 3** - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários do vento NCEP, para Sergipe, durante o período de janeiro a dezembro de 1990 (convenção vetorial).

<sup>3</sup> National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR), disponibilizados pelo Climate Diagnostics Center (CDC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

A Figura 4 apresenta os histogramas direcionais dos dados de vento (NCEP) para os períodos de verão (janeiro, fevereiro, março) e inverno (junho, julho e agosto), respectivamente. A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa o número de observações (N.Obs.). Analisando-se as figuras, observa-se que, tanto nos meses de verão quanto nos meses de inverno, os ventos mais frequentes são provenientes do quadrante leste-sudeste, com intensidades de aproximadamente 7,0 m/s. Nos meses de verão há uma incidência maior de ventos do quadrante leste-nordeste em relação aos meses de inverno.



**Figura 4** - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para os períodos de: (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (julho a agosto).

### 1.1.2 Caracterização Oceanográfica

A costa do Estado de Sergipe é uma região pouco estudada e amostrada. Em relação à temperatura da água, os gradientes horizontais são pequenos, com valores típicos de 1 °C por 500 km (Castro & Miranda, 1998). As temperaturas da superfície mostram fraco sinal sazonal, sendo mais altas no verão e começo do outono com valores entre 27 e 29 °C e no inverno, entre 26 e 28 °C. Os

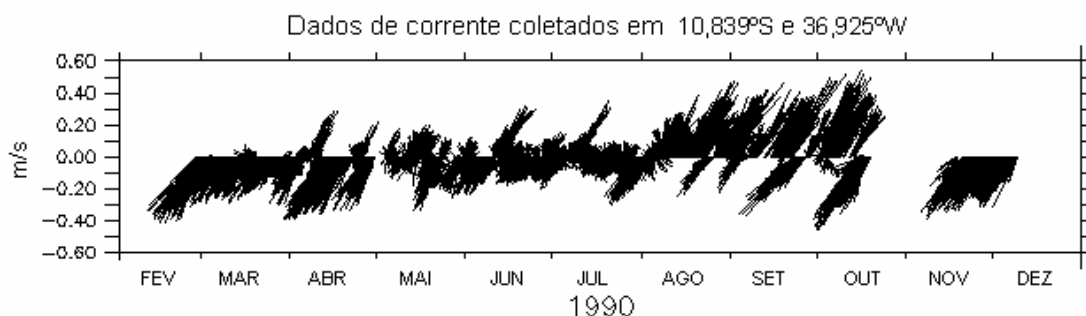
gradientes verticais de temperatura são pequenos, com diferenças de temperatura entre a superfície e o fundo, nas proximidades da quebra da plataforma, inferiores a 1 °C.

As variações de salinidade também são pequenas junto à quebra da plataforma, com valores típicos entre 36 e 37. Em áreas costeiras próximas a desembocadura de rios a salinidade decresce localmente podendo ser encontrados valores em torno de 32 e 33.

A densidade da água do mar é um dos parâmetros mais importantes no estudo da dinâmica (circulação) dos mares e oceanos. Tal parâmetro depende da temperatura, salinidade e pressão. Assim, dadas as condições acima – a ausência de gradientes significativos tanto para a salinidade como para a temperatura – e considerando que a pressão é uma função da profundidade, conclui-se que a variação da densidade na coluna d'água é intrinsecamente dependente da pressão (altura da coluna d'água acima da profundidade de interesse).

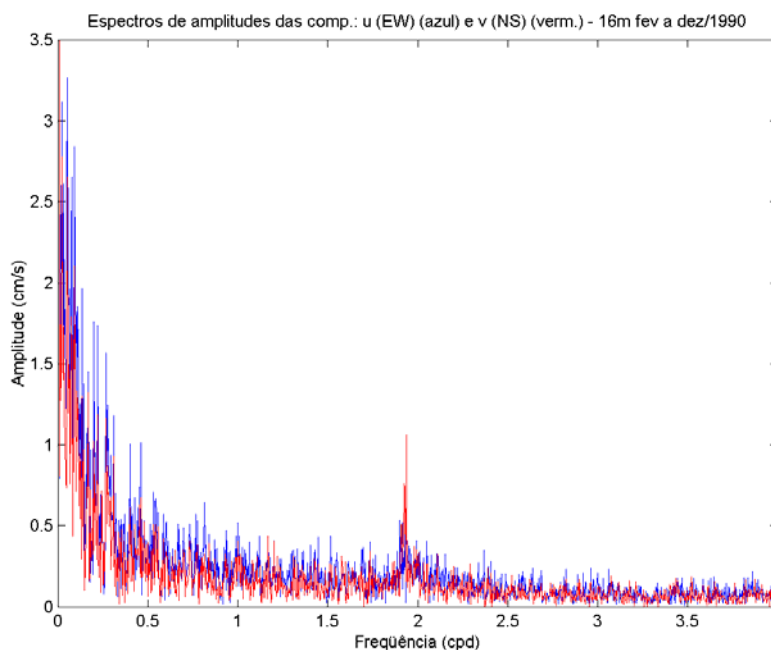
Portanto, se o oceano apresenta superfícies de densidade constante paralela à superfície livre, como conseqüência, o campo de velocidades é independente da profundidade e conserva estreita relação com a elevação da superfície livre. Este tipo de circulação é denominado de circulação barotrópica e, em regiões costeiras e de plataforma continental, tem como característica a uniformidade vertical do campo de correntes.

Dados de correntes coletados próximo ao local da dragagem (coordenadas 10,839°S e 36,925°W, em lâmina d'água de, aproximadamente, 6 m) foram obtidos junto a PETROBRAS. Os dados são referentes ao período de 27 de fevereiro a 13 de dezembro de 1990 e foram obtidos com intervalo de amostragem de 30 min. A Figura 5 ilustra os mesmos na forma de diagrama *stick plot*. Observa-se que as correntes predominantes seguiram as direções SW e NE, havendo maior freqüência de correntes para SW nos meses de fevereiro a abril, e para NE, de agosto a outubro.



**Figura 5** - Diagrama stick plot de dados de correntes coletados próximo ao local da dragagem (PETROBRAS).

O espectro de amplitudes das componentes do vetor velocidade de corrente, apresentado na Figura 6, indica que a maior parte da energia encontra-se nas baixas freqüências, havendo também forte influência da maré (característico de sistemas barotrópicos de circulação), com sinal predominantemente semi-diurno.



**Figura 6** - Espectros de amplitudes de dados de correntes coletados em 10,839°S e 36,925°W (PETROBRAS).

Dados de maré coletados pela estação maregráfica da DHN<sup>4</sup> no Terminal Portuário do Sergipe, instalada nas coordenadas 10°50,0'S e 36°55,7'W,

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



confirmam uma maré astronômica predominantemente semidiurna na região. A Tabela 1 apresenta as constantes harmônicas obtidas para a partir de uma série temporal para o período de 18 de fevereiro a 19 de março de 1991. As principais componentes são  $M_2$  e  $S_2$ , com amplitude de 74,0 e 27,4 cm, respectivamente. A componente  $N_2$  tem amplitude de 14,6 cm e todas as demais componentes apresentam amplitudes inferiores a 7,4 cm. A tabela apresenta ainda os níveis de: média das preamares de sizígia (MPS), média das baixa-mares de sizígia (MBS), média das preamares de quadratura (MPQ) e média das baixa-mares de quadratura (MBQ).

**Tabela 1** - Amplitude (cm) e fase local ( $^\circ$ ) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica da DHN, no Terminal Portuário Inácio Barbosa ( $10^\circ50,0'S$  e  $36^\circ55,7'W$ ), período de 18 de fevereiro a 19 de março de 1991. Fonte: FEMAR<sup>5</sup>, 2000.

COMPONENTE	AMPLITUDE	FASE
Mm	3,3	200
Msf	3,1	344
Q <sub>1</sub>	2,1	088
O <sub>1</sub>	6,4	120
P <sub>1</sub>	1,1	224
K <sub>1</sub>	3,2	233
2N <sub>2</sub>	1,9	086
N <sub>2</sub>	14,6	097
NU <sub>2</sub>	2,8	098
M <sub>2</sub>	74,0	107
L <sub>2</sub>	2,4	144
T <sub>2</sub>	1,6	122
S <sub>2</sub>	27,4	122
K <sub>2</sub>	7,4	123
M <sub>4</sub>	1,1	160
MPS		225
MBS		22
MPQ		170
MBQ		77
Nível Médio		124

<sup>5</sup> Fundação de Estudos do Mar.

## **II MODELO HIDRODINÂMICO**

Nesta seção descreve-se o modelo hidrodinâmico utilizado com o objetivo de reproduzir o campo de corrente base necessário para elaboração dos estudos de ressuspensão, dispersão e deposição de sedimentos dragados na região do TMIB.

Para reproduzir os padrões característicos da circulação para a região da plataforma continental do Estado de Sergipe, foi utilizado um modelo hidrodinâmico baseado no POM (Blumberg & Mellor, 1987), adaptado e implementado pela equipe de modelagem hidrodinâmica da **ASA South America**.

### **II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO OCEÂNICO**

O modelo utilizado tem estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas sob as aproximações de Boussinesq e hidrostática. Este modelo permite também a utilização de grades curvilíneas, de coordenadas  $\sigma$  na vertical e a resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem.

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada  $z$  é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a equação abaixo, onde  $D$  é a profundidade local,  $\eta$  a elevação da superfície e  $H$  a profundidade média local:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \quad (1)$$

sendo  $D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t)$ .

O modelo inclui um submodelo de fechamento turbulento, para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência, no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor & Yamada,

1982). Esses cálculos são efetuados com base em relações empíricas, que utilizam constantes estabelecidas em experimentos de laboratório e em observações de campo. Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística as camadas de Ekman, de superfície e de fundo.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo C de Arakawa e métodos de integração diferentes na horizontal e na vertical – integração horizontal e temporal explícita e vertical implícita. Por meio desses procedimentos, elimina-se a restrição temporal na vertical, permitindo o uso de maior resolução nas camadas de Ekman de superfície e de fundo.

O modelo apresenta uma superfície livre e dois intervalos de tempo distintos, um para o modo de oscilação externo e outro para o interno. O modo externo (barotrópico) usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de Courant-Friedrichs-Levy (CFL). O modo interno (baroclínico) usa um intervalo de tempo mais longo (*splitting mode*).

### **II.1.1 Equações Básicas do POM**

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: as três componentes da velocidade ( $u, v$  e  $w$ ), a temperatura ( $T$ ), a salinidade ( $S$ ), a energia cinética turbulenta ( $q^2/2$ ), a escala turbulenta ( $l$ ), e a elevação da superfície ( $\eta$ ).

O conjunto de equações básicas utilizadas no código é descrito abaixo. Consideremos um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com  $x$  crescendo para Leste,  $y$  para Norte e  $z$  para cima, no qual as coordenadas horizontais (*i.e.*  $x, y$ ) referem-se ao espaço computacional. A superfície livre está localizada em  $z = \eta(x, y, t)$  e o fundo em  $z = -H(x, y)$ . Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + F_{(H)} \quad (6)$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (7)$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (8)$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x} + V \frac{\partial q^2}{\partial y} + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$+ \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \quad (9)$$

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x}(q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y}(q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z}(2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_q \frac{\partial}{\partial z}(q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (10)$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (11)$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (12)$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (13)$$

onde

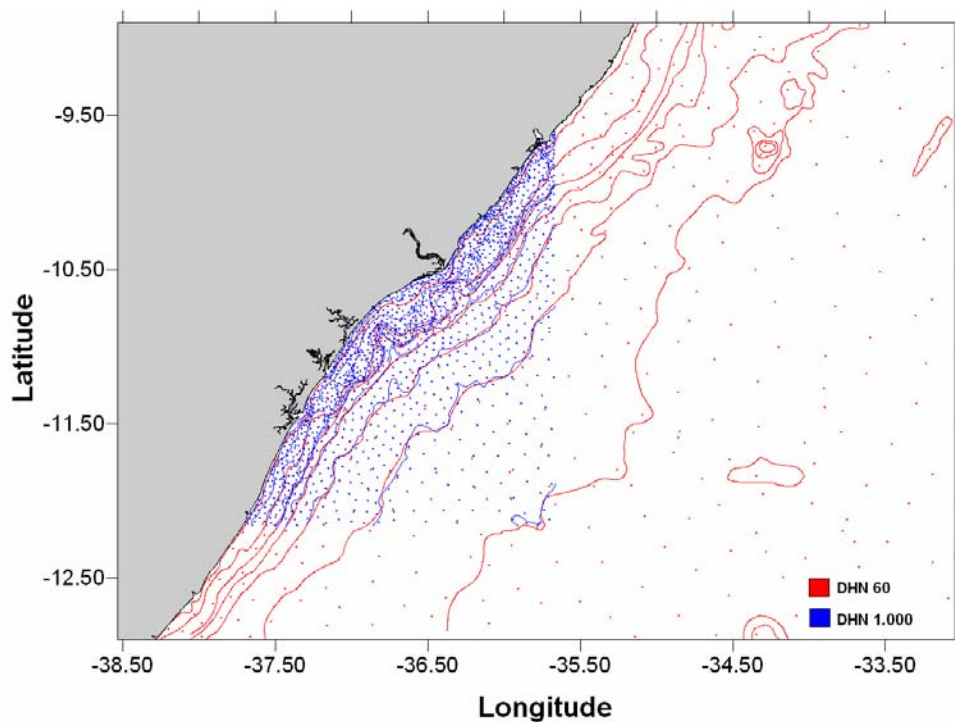
- $U, V, W$  = componentes do vetor velocidade (m/s);  
 $f$  = parâmetro de Coriolis (s<sup>-1</sup>);  
 $\rho_0$  = densidade de referência (kg/m<sup>3</sup>);  
 $\rho$  = densidade *in situ* (kg/m<sup>3</sup>);  
 $P$  = pressão (N/m<sup>2</sup>);  
 $K_M$  = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta (m<sup>2</sup>/s);  
 $K_H$  = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal (m<sup>2</sup>/s);  
 $g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  
 $\Theta$  = temperatura potencial (°C);  
 $S$  = salinidade (PSU);  
 $A_M$  = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta (m<sup>2</sup>/s);

- $A_H$  = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor sal ( $m^2/s$ );
- $F_H$  ,  $F_S$  = parametrização (em termos de processos de mistura horizontal) para processos de pequena escala não resolvidos diretamente pela grade do modelo.
- $q^2 / 2$  = energia cinética turbulenta;
- $l$  = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;
- $\tilde{W}$  = função proximidade-do-contorno;
- $k$  = constante de von Karman ( $k=0,4$ );
- $F_{q^2, q^2l}$  = termos horizontais de mistura para  $q^2$  e  $q^2l$ .

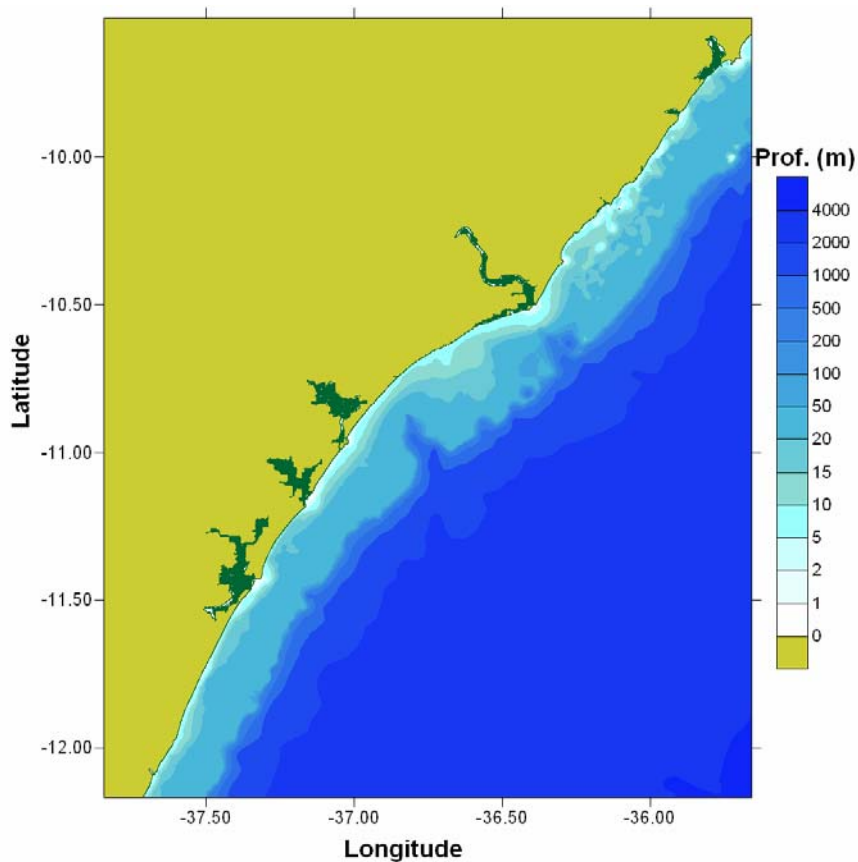
## II.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E FORÇANTES

Os dados de profundidade da base batimétrica da **ASA SOUTH AMERICA** foram obtidos através da digitalização de cartas náuticas da DHN números 60 e 1.000. O conjunto completo destes pontos é apresentado na Figura 7. Nesta figura é ilustrada a linha de costa final, reproduzida por meio da compilação das cartas náuticas acima citadas e de imagens de satélite. O conjunto de dados batimétricos foi interpolado para toda a área com uma resolução horizontal regular de aproximadamente 80 m. O resultado obtido nessa interpolação pode ser observado na Figura 8.

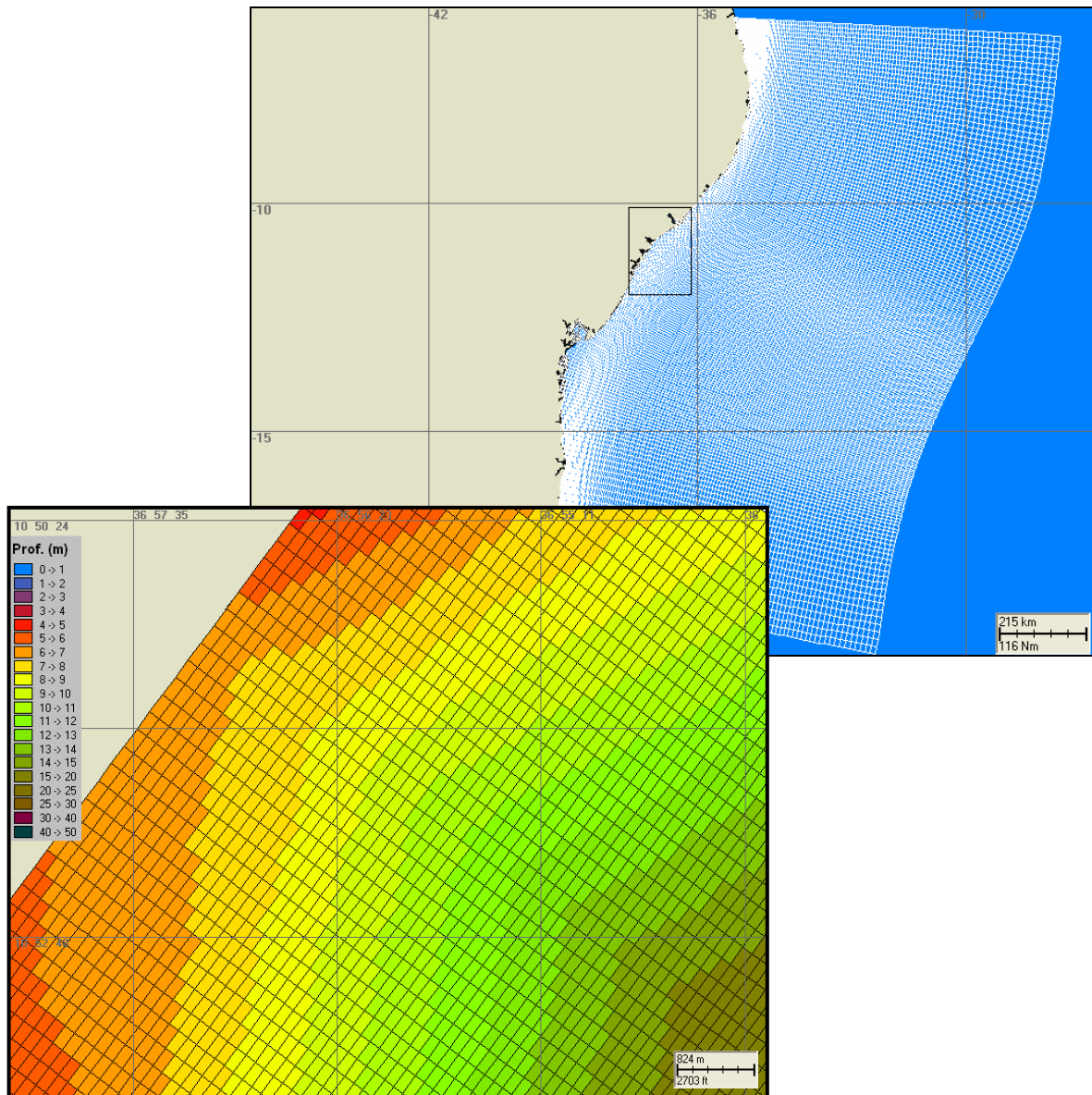
Uma grade curvilínea, ortogonal, e com resolução horizontal variável, foi utilizada para a representação discreta do domínio definido para o modelo hidrodinâmico. A grade geral implementada representa um compromisso entre os objetivos do projeto e a descrição dos processos hidrodinâmicos na região de interesse, bem como entre os recursos computacionais e o tempo de processamento necessário. A grade final gerada para Bacia de Sergipe-Alagoas possui dimensão horizontal máxima de 149x279 e 9 níveis na vertical, com resolução média de 2.000 m, e está representada na Figura 9. Sendo que, para a modelagem do material dragado, esta grade (assim como o campo hidrodinâmico) foi interpolada para a região do TMIB, resultado numa resolução final de, aproximadamente, 200 m.



**Figura 7 -** Pontos batimétricos utilizados na região da Baía de Sergipe-Alagoas.



**Figura 8 -** Batimetria interpolada para a região de Sergipe-Alagoas.

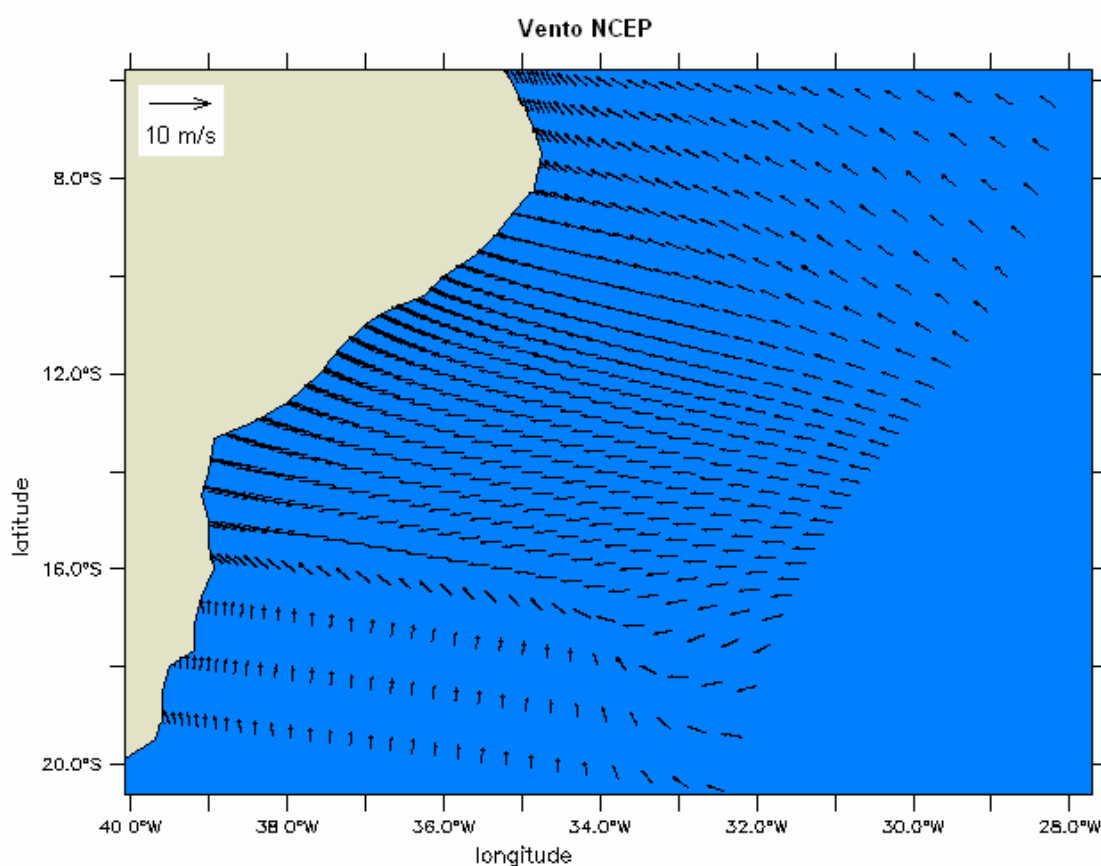


**Figura 9** - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Baía de Sergipe-Alagoas, com detalhe na região do TMIB.

## II.2.1 Ventos

O campo de vento utilizado como forçante foi extraído das reanálises do modelo de circulação geral do NCEP para as simulações de calibração e de longo período. A Figura 10 ilustra um instante deste campo de vento, já projetado na grade do modelo.

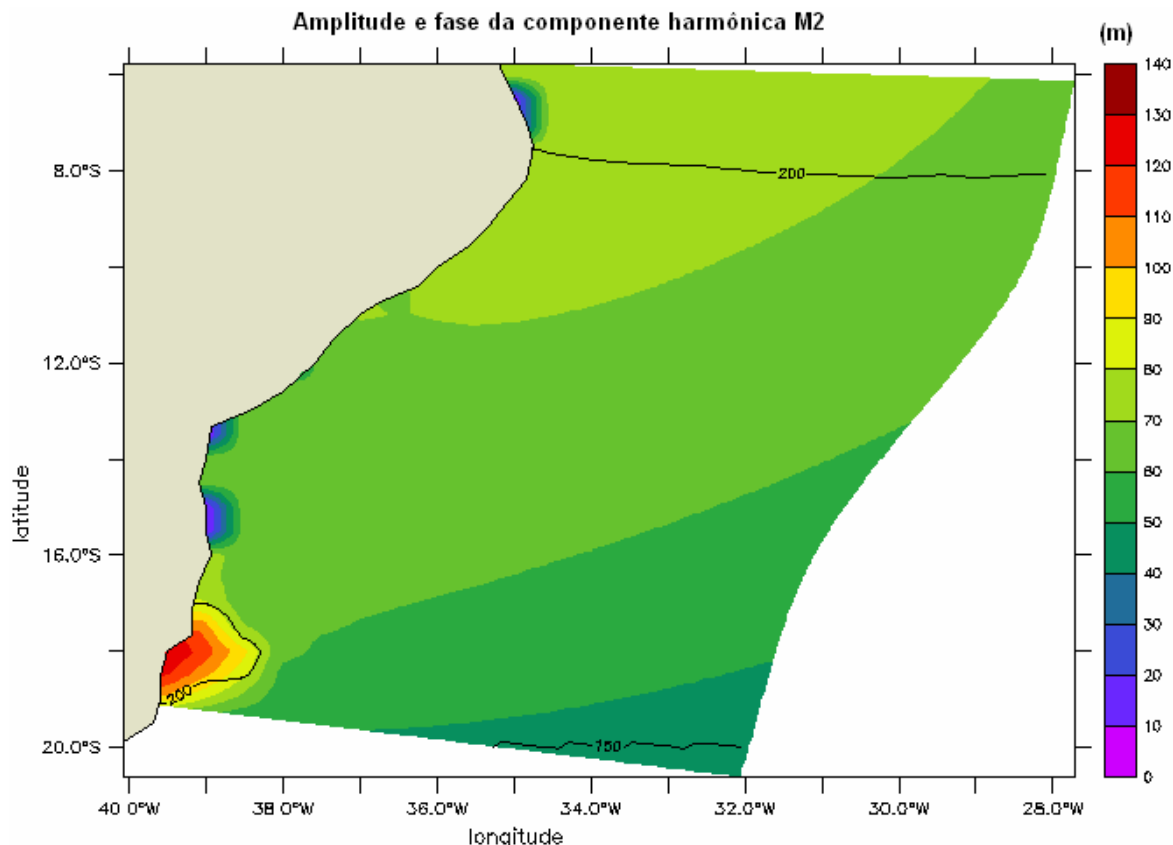




**Figura 10** - Campo de vento NCEP projetado na grade do modelo hidrodinâmico.

## II.2.2 Marés

Embora usadas somente nos contornos abertos (não se ativou o potencial de maré neste domínio, devido à pequena escala do mesmo em relação ao fenômeno), o campo de harmônicos utilizado como forçante para o POM é proveniente do CSR3 (Modelo global de maré do *Center for Space Research* da Universidade do Texas). Este campo foi projetado em toda a grade, de tal forma a permitir focalizações automáticas em áreas de interesse (redução eventual do domínio). Foram utilizados campos com variação espacial de amplitude e fase das componentes de maré mais significativas na região, com energia superior a 10% da energia da  $M_2$ , no caso, as diurnas e semi-diurnas. A Figura 11 ilustra as amplitudes e fases da componente  $M_2$ , projetadas na grade.



**Figura 11** - Mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude da componente de maré  $M_2$ , projetado na grade do modelo hidrodinâmico.

### II.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Para comparação com os resultados do modelo, foram utilizados os dados apresentados no Capítulo I: dados de corrente coletados nas coordenadas 10,839°S e 36,925°W, obtidos junto a PETROBRAS, e uma série de elevação obtida através de previsão harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR para a estação maregráfica da DHN no Terminal Portuário do Sergipe, instalada nas coordenadas 10°50,0'S e 36°55,7'W.

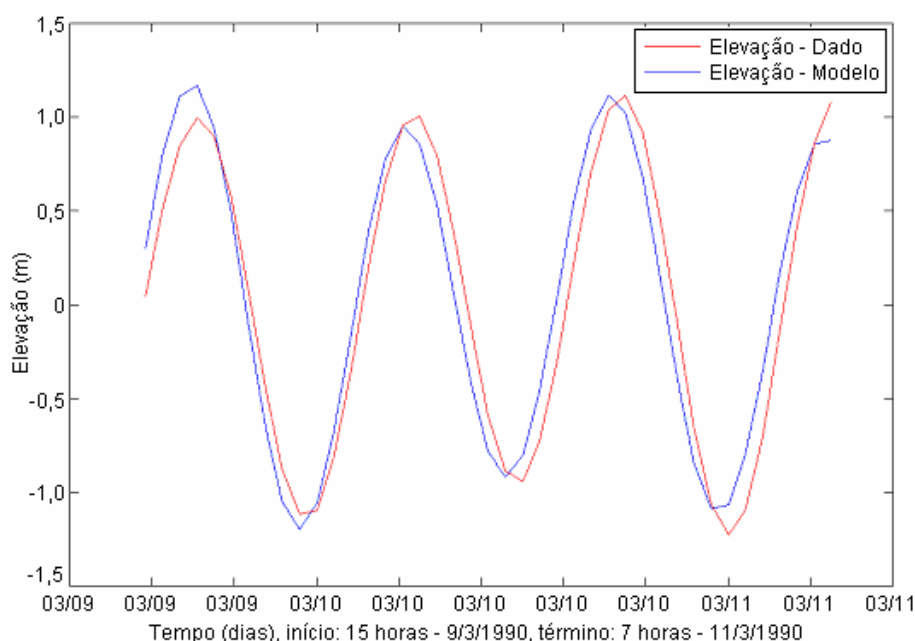
O coeficiente de ajuste (ou erro percentual) utilizado (tanto para elevação quanto para corrente) é dado pela razão entre o desvio médio ( $DM$ ) do erro e o dobro do desvio médio do dado (no caso, a série de maré medida):

$$\text{erro percentual} = \frac{DM(\text{erro})}{2 \times DM(\text{dado})} \quad (14)$$

### II.3.1 Calibração para o Nível do Mar

Aos dados de nível foi aplicado um filtro passa baixa, de forma a reduzir as variações de alta frequência (*i.e.* menores que 8 ciclos por dia), de difícil reprodução no modelo. Estas componentes de alta frequência têm características apenas perturbatórias, já que a maior parte da energia se concentra na componente semidiurna da maré.

A Figura 12 mostra uma comparação entre o resultado do processamento para a variável elevação calculada pelo modelo (vermelho) e a série de maré prevista azul. Para ambas as séries foi selecionado um período de 40 horas, compreendido entre os dias 9 e 11 de março de 1990. Observa-se nesta figura boa concordância, tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e os valores da previsão de maré. O coeficiente de ajuste (ou erro percentual) obtido nesta comparação foi de 13,8%.



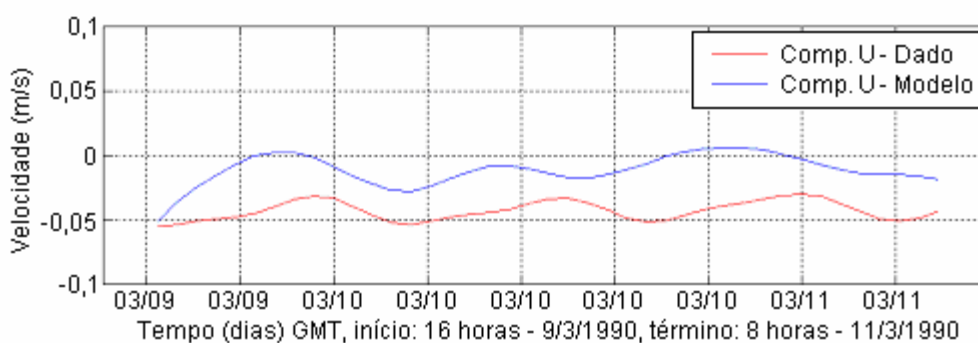
**Figura 12** - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

### II.3.2 Calibração para as correntes

Para a calibração das correntes, foi selecionado um período com duração de 40 horas, compreendido entre os dias 9 e 11 de março de 1990, onde foram comparadas separadamente as componentes  $u$  (EW) e  $v$  (NS) dos dados coletados com a saída do modelo.

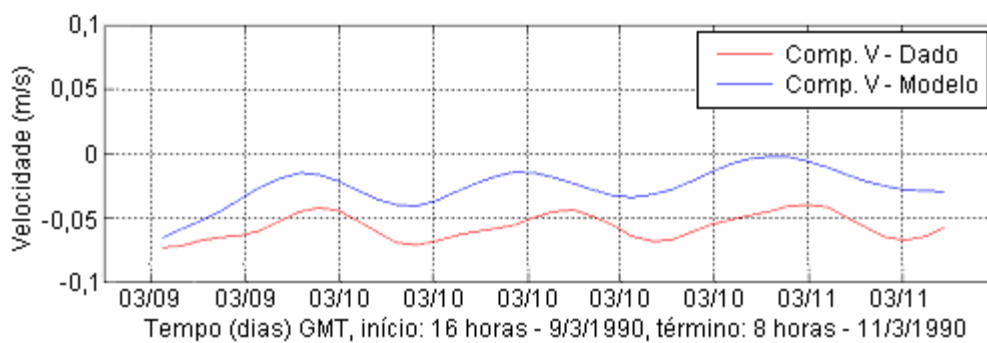
No caso da componente  $u$ , os dados medidos foram recompostos através de análise espectral. Nesta recomposição foram utilizadas 30 componentes harmônicas. Com as estimativas das amplitudes e fases destas componentes, foram feitas previsões harmônicas para as séries temporais das componentes da velocidade, para o período correspondente à coleta de dados.

A Figura 13 apresenta a comparação entre o resultado do processamento para a série medida da componente  $u$  (EW) (azul) e o resultado do modelo (vermelho). O erro percentual, obtido nesta comparação, foi de 21,6%.



**Figura 13** - Série temporal da componente  $u$  da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

A Figura 14 apresenta para a componente  $v$  (NS), o mesmo tipo de comparação apresentado na Figura 13. Observa-se nesta, boa concordância tanto na amplitude quanto na fase, entre os resultados obtidos com o modelo e os valores coletados originais. O erro percentual obtido nesta comparação foi de 24,8%.



**Figura 14** - Série temporal da componente v da velocidade coletada (azul) e a calculada pelo modelo (vermelho) para os dias 09/03/1990-11/03/1990.

### **III ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DRAGAGEM E DESCARTE**

A área que será dragada no TMIB pode ser dividida em três partes (Figura 1): Píer área de acostamento dos navios (Trecho 1), Bacia de Evolução (Trecho 2) e Canal de Acesso ao terminal (Trecho 3). Essa área de dragagem será dividida em duas: a Área A (Trecho 1 – draga pequena) e a Área B (Trechos 2 e 3 – draga grande), totalizando 235.730 m<sup>2</sup>, aproximadamente. Esta divisão foi feita em função do tipo de draga que será utilizada em cada área, pois a utilização de uma draga grande, com mais de 5.600 m<sup>3</sup> de capacidade de transporte e mais de 100 m de comprimento, na área próxima ao píer, seria muito arriscado, tanto para a operação de dragagem quanto para a estrutura do terminal. A Tabela 2 apresenta as coordenadas das áreas e trechos de dragagem.

**Tabela 2 - Coordenadas das áreas de dragagem (datum Córrego Alegre).**

ÁREAS	TRECHOS	COORDENADAS (UTM)	
		N	E
A	1	8.800.590,0	727.335,0
		8.800.720,0	727.500,0
		8.800.685,0	727.565,0
		8.800.400,0	727.400,0
B	2	8.800.400,0	727.400,0
		8.800.125,0	727.255,0
		8.800.125,0	727.140,0
		8.800.330,0	727.080,0
		8.800.425,0	727.075,0
		8.800.501,0	727.098,0
		8.800.570,0	727.155,0
		8.800.609,0	727.238,0
		8.800.590,0	727.335,0
	3	8.800.125,0	727.140,0
		8.800.125,0	727.255,0
		8.798.940,5	727.070,1
		8.798.934,5	727.186,1

Na modelagem das operações de dragagem foram consideradas linhas de dragagem no interior dos trechos, perpendicular à direção predominante das correntes (SW), partindo de nordeste para sudoeste.

Os descartes serão efetuados em uma região localizada à, aproximadamente, 3,5 km do píer de acostamento, com uma área de 0,32 km<sup>2</sup> (Figura 1), cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 3. Ressalta-se que para efeitos de modelagem, no total, foram considerados 3 pontos de descarte dentro desta área, sendo um ponto para cada trecho dragado (considerando a proximidade dos trechos aos pontos), apesar do descarte ser efetuado ao longo da área de despejo.

**Tabela 3** - Coordenadas da área de descarte (datum Córrego Alegre).

VÉRTICES	COORDENADAS (UTM)	
	N	E
1	8.796.542	727.806
2	8.797.485	728.524
3	8.797.316	728.739
4	8.796.365	728.002

Portanto, no estudo da ressuspensão e descarte de material dragado na região costeira adjacente ao terminal, serão utilizados dois tipos de procedimentos, dependendo da área considerada.

Na Área A, será utilizado um batelão autopropelido com capacidade de 700 m<sup>3</sup> em associação com um *clamshell*. Este batelão tem capacidade de transporte de 700 m<sup>3</sup> e, por operar com velocidade de 10 nós, demorará, aproximadamente, 40 minutos para realizar o percurso de ida e volta a para a área de descarte, contando com um período de até 15 minutos para a realização do descarte. O *clamshell* tem capacidade de carregamento de 100 m<sup>3</sup> por hora, necessitando de 7 horas para carregamento total do batelão, sendo duas viagens por dia. Nesta área será dragado um total de 62.542 m<sup>3</sup>. A Tabela 4 resume as características da draga e do processo de dragagem da Área A.

Para a dragagem da Área B, será utilizada uma draga de maior porte, cuja capacidade de sucção e movimentação é maior. A draga modelo utilizada para

esta dragagem é uma draga hidráulica autotransportada do tipo *Hopper* com uma capacidade nominal de 5.600 m<sup>3</sup> e carga de, aproximadamente, 5.400 m<sup>3</sup> por viagem. Nesta, serão feitas 11 viagens por dia, com a duração de 40 minutos cada, além do tempo de uma hora e meia para a dragagem em si. No total, serão dragados 386.298 m<sup>3</sup>, sendo 286.724 m<sup>3</sup> no Trecho 2 e 99.871 m<sup>3</sup> no Trecho 3. A Tabela 5 resume as características da draga e do processo de dragagem da Área B.

**Tabela 4** - Características do processo de dragagem/descarte de sedimentos na Área A do Terminal Marítimo Inácio Barbosa.

Tipo de draga	<i>Clam Shell + Batelão</i>
Taxa de dragagem	100 m <sup>3</sup> /hora
Capacidade da cisterna	700 m <sup>3</sup>
Conteúdo de água na cisterna	65%
Comprimento da draga	50 m
Largura da draga	12 m
Calado da draga cheia	2,1 m
Número de viagens por dia	2
Volume total de material dragado descartado	62.542 m <sup>3</sup>

**Tabela 5** - Características do processo de dragagem/descarte de sedimentos na Área B do Terminal Marítimo Inácio Barbosa.

Tipo de draga	<i>Hopper</i>
Taxa de dragagem	5.000 m <sup>3</sup> /hora
Capacidade da cisterna	5.600 m <sup>3</sup>
Conteúdo de água na cisterna	65% (Trecho 2)
	35% (Trecho 3)
Comprimento da draga	106,6 m
Largura da draga	18,3 m
Calado da draga cheia	8,5 m
Número de viagens por dia	11
Volume total de material dragado descartado	386.298 m <sup>3</sup> (Total)
	286.724 m <sup>3</sup> (Trecho 2)
	99.871 m <sup>3</sup> (Trecho3)



Um dos fatores mais importantes no controle do total de sólidos em suspensão é a velocidade com que o sedimento se 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. As informações de granulometria média do material dragado por trecho foram fornecidas pela ECOLOGUS/CVRD e são apresentadas na Tabela 6. Observa-se que o material dragado nos Trechos 1 e 2 possui alto teor de silte, já o material do Trecho 3 possui alto teor de areia.

**Tabela 6** - Porcentagens das classes granulométricas dos Trechos 1, 2 e 3 que serão dragados no TMIB.

CLASSES	PORCENTAGEM		
	TRECHO 1	TRECHO 2	TRECHO 3
Areia muito grossa	0,98	1,47	0,09
Areia grossa	1,47	0,11	0,07
Areia média	0,15	0,19	0,13
Areia fina	0,17	0,79	9,96
Areia muito fina	0,77	2,80	47,35
Silte	96,44	94,63	42,40
Argila	0,01	0,00	0,00

---

## **IV MODELAGEM DA RESSUSPENSÃO, DISPERSÃO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS**

O modelo SSFATE, utilizado na modelagem da ressuspensão, dispersão e deposição de sedimentos dragados, é uma ferramenta computacional desenvolvida pela **ASA** em parceria com o USACE. O SSFATE consiste em um sistema integrado que combina um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com um modelo computacional para a previsão do transporte, dispersão e deposição de material em suspensão, como consequência de operações de dragagem (ASA, 2001).

### **IV.1 DESCRIÇÃO DO MODELO SSFATE**

O SSFATE é utilizado nos Estados Unidos para definir janelas ambientais (*environmental windows*) de tempo para dragagem em áreas sensíveis. As janelas ambientais são necessárias para proteger recursos biológicos e seus *habitats* e suas determinações são requeridas em projetos de dragagem (Reine *et al.*, 1998). Sedimentos em suspensão estão no foco de preocupações das agências ambientais, uma vez que a exposição de animais aquáticos a elevadas concentrações destes consiste em das principais fontes de impactos sobre tais organismos. De forma semelhante, o processo de sedimentação será importante quando consideramos organismos bentônicos, como ostras e macroalgas presentes nas proximidades do local de deposição dos sedimentos.

Assim, uma previsão acurada da dinâmica espacial dos sedimentos provenientes de tais atividades é considerada crítica no estabelecimento da necessidade de “janelas de proteção”.

O SSFATE possui características exclusivamente utilizadas para os estudos que envolvem peculiaridades das atividades de dragagem, com uma versatilidade e capacidade de simulação de cenários reais. O modelo permite a previsão do transporte e destino de diferentes classes granulométricas e da trajetória de

partículas, no qual o padrão de circulação da área estudada pode ser importado de um modelo hidrodinâmico numérico ou definido graficamente através da interpolação de dados de campo. O modelo supre a necessidade de uma ferramenta de modelagem, que possa ser facilmente adaptada, para simular um largo espectro de cenários de dragagem, acomodando essencialmente qualquer configuração hidrodinâmica e a maioria dos tipos de dragas mais utilizadas (*cutterhead*, *hopper* e *clamshell*).

Em resumo, o SSFATE pode ser utilizado tanto para estudar a dispersão e deposição de sedimentos originários da ressuspensão durante as operações de dragagem quanto para simular o descarte de sedimentos dragados.

### IV.1.1 Base Teórica

Dependendo da resolução da grade numérica utilizada, o modelo SSFATE pode simular cenários muito próximos da realidade das operações de dragagem. Entretanto, os processos modelados são basicamente de campo afastado, nos quais são dominantes o transporte médio e a turbulência associada às correntes. A seguir é descrita a base teórica do modelo, segundo nota técnica do DOER (2000).

As seguintes equações básicas determinam a localização de cada partícula em cada passo de tempo da simulação:

$$X^{n+1} = X^n + \Delta X \quad (15)$$

$$Y^{n+1} = Y^n + \Delta Y \quad (16)$$

$$Z^{n+1} = Z^n + \Delta Z \quad (17)$$

onde

$$\Delta X = U\Delta T + L_x \quad (18)$$

$$\Delta Y = V\Delta T + L_y \quad (19)$$

$$\Delta Z = Ws_i\Delta T + L_z \quad (20)$$

e

$X, Y, Z$  = posição da partícula nas direções  $x$  (E-W),  $y$  (N-S) e vertical, respectivamente;

$U, V$  = velocidade ambiente média nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;

$\Delta T$  = passo de tempo;

$W_s$  = velocidade de deposição da classe  $i$  de partículas;

$L_x, L_y, L_z$  = distância de difusão da partícula nas direções  $x, y$  e  $z$ , respectivamente.

Assume-se que a difusão da partícula segue um processo simples de *random walk* (passeio aleatório). A distância de difusão, definida como a raiz quadrada do produto do coeficiente de difusão e do passo de tempo, é decomposta em deslocamentos  $X$  e  $Y$  através de uma função que considera uma variável aleatória. A distância de difusão  $Z$  é escalonada numa direção aleatória positiva ou negativa. As equações para a difusão dos deslocamentos horizontal e vertical são descritas como:

$$L_x = \sqrt{D_h \Delta T} \cos(2\pi R) \quad (21)$$

$$L_y = \sqrt{D_h \Delta T} \sin(2\pi R) \quad (22)$$

$$L_z = \sqrt{D_z \Delta T} (0,5 - R) \quad (23)$$

onde

$D_h, D_z$  = coeficientes horizontal e vertical de difusão, respectivamente;

$R$  = número real aleatório entre 0 e 1.

O modelo de partículas permite ao usuário simular o transporte e o destino de classes de partículas em decantação, e.g. areias, siltes e argilas. O destino de misturas formadas por mais de um componente em suspensão é simulado por superposição linear. A aproximação para partículas é extremamente robusta e

independente do sistema de grades. Assim, o método não apresenta difusão artificial próximo aos gradientes de concentração e pode ser facilmente utilizado para vários tipos de sedimento. Por exemplo, o principal objetivo do SSFATE é fornecer assistência em questões relacionadas com a necessidade de associar “janelas ambientais” com as operações de dragagem. Contudo, modelos como o STFATE, o qual modela a dinâmica de campo próximo de uma operação de descarte, poderia ser utilizado para fornecer a fonte de sedimento associada com as operações de descarte.

Em adição ao transporte e dispersão, também existe uma taxa de deposição das partículas de sedimento. A sedimentação de misturas de partículas, algumas das quais podem ser coesivas por natureza, é um processo complicado com a interação de diferentes tamanhos de classes, i.e. a deposição de um tipo de partícula não é independente dos outros tipos. O procedimento adotado no SSFATE é descrito nos parágrafos seguintes (a partir de Teeter, 1998 *apud* DOER, 2000).

Ao final de cada passo de tempo, a concentração de cada classe de sedimento  $C_i$ , assim como a concentração total  $C$ , é calculada numa grade numérica de concentração. O tamanho de todas as células da grade não varia espacial e temporalmente, com o número total de células aumentando de acordo com movimento da pluma de sedimento em suspensão a partir da fonte de dragagem. A velocidade de deposição de cada classe de tamanho de partícula é dada por:

$$Ws_i = a \left( \frac{C}{C_{ul}} \right)^{n_i} \quad (24)$$

$$a = \frac{1}{C} \sum_i a_i C_i \quad (25)$$

$$\bar{C}_{ul} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ul_i} C_i \quad (26)$$

$$\bar{C}_{ll} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ll_i} C_i \quad (27)$$

e  $C_{ul_i}$  e  $C_{ll_i}$  são os limites de concentração superior e inferior, respectivamente, para uma acentuada deposição da classe  $i$  de grão.

Se  $C \geq \bar{C}_{ul}$  então

$$Ws_i = a \quad (28)$$

Ao passo que, se  $C \leq \bar{C}_{ll}$ , então

$$Ws_i = a \left( \frac{\bar{C}_{ll}}{\bar{C}_{ul}} \right)^{n_i} \quad (29)$$

A Tabela 7 apresenta alguns valores típicos de  $C_{ll_i}$ ,  $C_{ul_i}$ ,  $a_i$  e  $n_i$  para tamanhos de grão considerados no SSFATE.

**Tabela 7 - Valores típicos dos coeficientes de concentração.**

CLASSE	TAMANHO (MICRAS)	$C_{ll_i}$ (g/cc)	$C_{ul_i}$ (g/cc)	$a_i$ (m/s)	$n_i$
0	0-7 (argila)	50	1.000	0,0001	1,33
1	8-35 (silte fino)	150	3.000	0,0002	1,10
2	36-74 (silte grosso)	250	5.000	0,0005	0,90
3	75-130 (areia fina)	400	8.000	0,010	0,80

O modelo também considera uma classe granulométrica superior a 3, equivalente à areia grossa, com valor de  $a_i$  igual a 0,1 m/s.

O próximo passo nos cálculos é estimar uma tensão de atrito de fundo ( $\tau$ ) utilizando o campo de correntes. Uma probabilidade de deposição  $P_i$  é, então, calculada para cada tamanho de classe, como segue:

a. Para tamanhos de classe 0 (argila):

$$P_0 = \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right), \text{ se } \tau < \tau_{cd} \quad (30)$$

$$P_0 = 0, \text{ se } \tau > \tau_{cd} \quad (31)$$

onde  $\tau_{cd}$  é a tensão de atrito crítica para a deposição da fração argila.

b. Para os outros tamanhos de classe:

$$P_i = 0, \text{ se } \tau \geq \tau_{ul_i} \quad (32)$$

$$P_i = 0, \text{ se } \tau \leq \tau_{ll_i} \quad (33)$$

onde,

$\tau_{ul_i}$  = tensão de atrito acima da qual nenhuma deposição ocorre para a classe de grão  $i$ ;

$\tau_{ll_i}$  = tensão de atrito abaixo da qual a probabilidade de deposição para a classe de grão  $i$  é 1,0;

Para valores de  $\tau$  entre  $\tau_{ll_i}$  e  $\tau_{ul_i}$ , é utilizada uma interpolação linear.

Valores típicos para  $\tau_{ll_i}$  e  $\tau_{ul_i}$  são mostrados na Tabela 8. Um valor típico para  $\tau_{CD}$  é 0,016 Pa.

**Tabela 8** - Valores típicos para a tensão de atrito (Pa).

CLASSE	$\tau_{ll_i}$	$\tau_{ul_i}$
0	0,016	0,03
1	0,03	0,06
2	0,06	0,20
3	0,20	0,90

Em seguida, é calculada a deposição para cada classe de tamanho, a partir de cada célula do fundo durante o passo de tempo do arquivo de correntes. Os cálculos iniciam-se com a maior classe de tamanho:

$$Flux_i = b_i C_i W s_i P_i \quad (34)$$

onde  $b_i$  é o parâmetro de probabilidade que inclui todos os outros fatores que também influenciam na deposição, assim como o atrito.

A massa é, então, removida a partir das partículas que ocupam a célula. A deposição para as classes restantes é, então, computada, começando com a segunda classe de tamanho e avançando em direção às menores. Tal deposição é calculada da seguinte maneira:

se  $0 \leq P_i \leq 0,05$ , então

$$Flux_i = \frac{C_i Flux_{i+1}}{C_{i+1} + 1} \quad (35)$$

Por outro lado,

$$Flux_i = b_i C_i W S_i P_i \quad (36)$$

Abaixo são apresentados alguns valores típicos para o coeficiente  $b_i$ , para as classes de tamanho apresentadas:

- $b_0 = 0,2$
- $b_1 = 0,4$
- $b_2 = 0,6$
- $b_3 = 1,0$

## IV.2 DADOS DE ENTRADA

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são: área de dragagem e/ou pontos de descarte, período de simulação, taxa de dragagem por hora, número de descartes diários, informações sobre o material dragado, 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.



As áreas de dragagem e o local de descarte estão apresentadas na Figura 1. Salienta-se que, para efeitos de uma modelagem mais conservativa (*i.e.* maiores espessuras depositadas), foram considerados 3 pontos de descarte ao longo da área do mesmo, sendo um ponto para cada trecho a ser dragado. O campo de correntes utilizado foi gerado pelo modelo hidrodinâmico descrito no Capítulo II e as características das operações de dragagem/descarte e do material dragado utilizado estão descritos no Capítulo III.

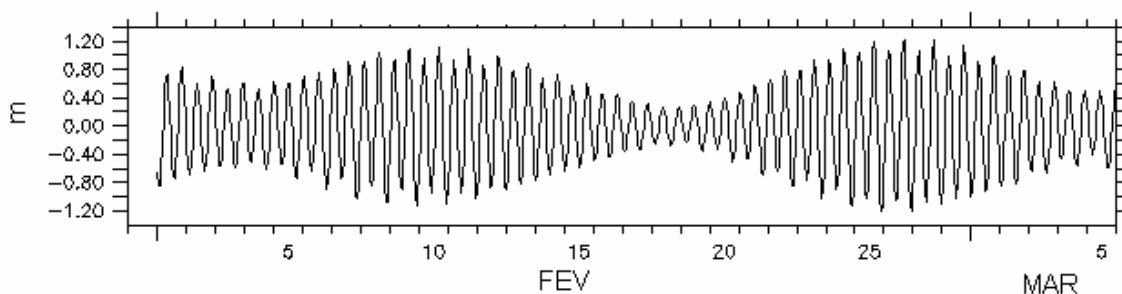
### **IV.3 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E OCEANOGRÁFICAS**

Em relação ao período de modelagem, as simulações para os três trechos a serem dragados foram realizadas por um período de, aproximadamente, 20 dias que englobasse os principais padrões meteorológicos e oceanográficos da região de interesse. Portanto, as simulações compreenderam um período sujeito a marés de sizígia e a marés de quadratura, assim como a eventos atmosféricos anômalos ao padrão regional (por exemplo, inversões no padrão regional de ventos).

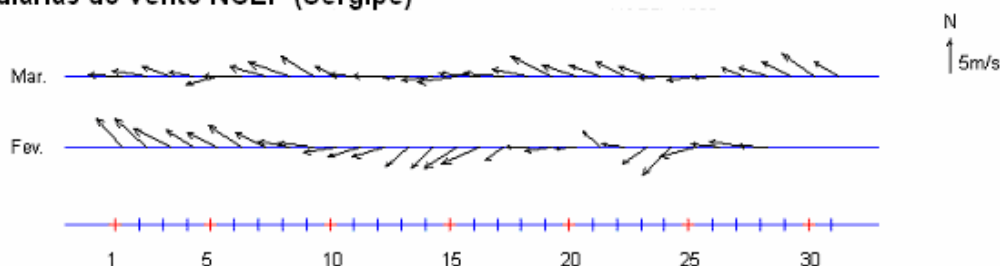
Os principais elementos da caracterização meteorológica e oceanográfica nos quais se baseou a escolha do período simulado é apresentado na Figura 15. Nesta, o painel superior apresenta a elevação do nível do mar (FEMAR); logo abaixo é apresentada média diária do vento NCEP da região (gráfico *stick plot*). No terceiro painel (de cima para baixo) é apresentada a elevação do nível do mar como resultado do modelo hidrodinâmico desenvolvido pela **ASA** e, finalmente, no painel inferior, um gráfico *stick plot* da corrente superficial local (resultado do mesmo modelo).

Vale ressaltar que as simulações foram realizadas no período de verão, época prevista para as operações de dragagem.

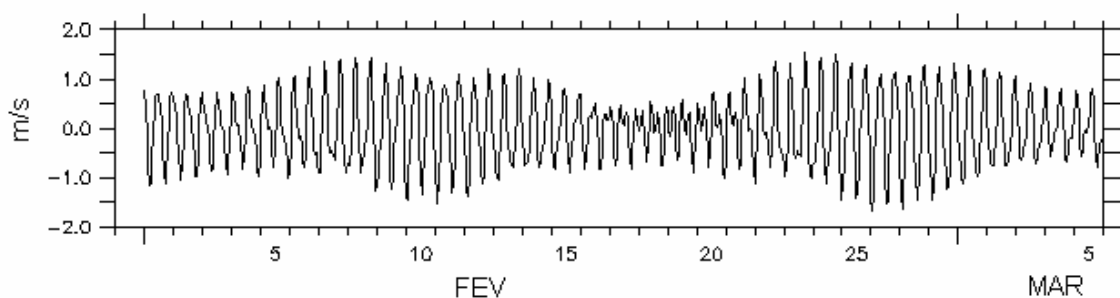
**Elevação do nível do mar (FEMAR)**



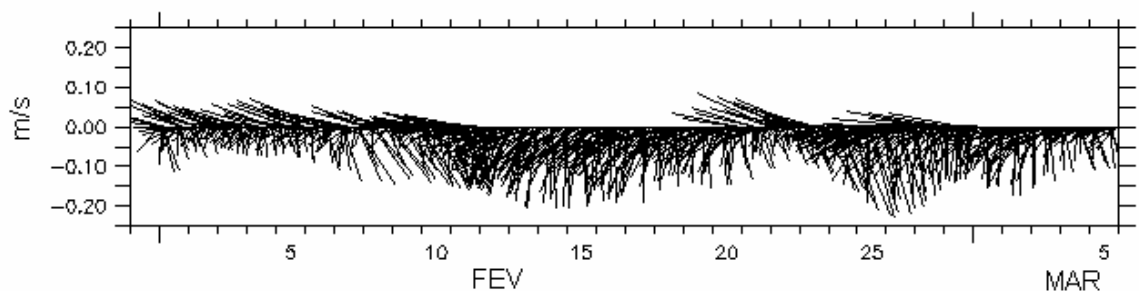
**Médias diárias do vento NCEP (Sergipe)**



**Elevação do nível de mar (resultado do modelo hidrodinâmico desenvolvido pela ASA)**



**Corrente superficial local (resultado do modelo hidrodinâmico desenvolvido pela ASA)**



**Figura 15** - Principais elementos usados na caracterização meteorológica e oceanográfica da região do Terminal Marítimo Inácio Barbosa, em Sergipe.

## IV.4 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Devido às características apresentadas (tipo de sedimento e diferentes maquinários para efetuar as operações de dragagem), as simulações foram também realizadas de acordo com o mapa esquemático mostrado na Figura 1. Ao todo, foram simulados 6 cenários (Tabela 9), considerando 2 áreas de dragagem, 3 trechos de dragagem e 3 pontos de descarte, além de um período de modelagem de 20 dias. A seguinte nomenclatura foi utilizada na representação dos cenários:

- A e B identificam as áreas de dragagem Área A e Área B, respectivamente;
- TR1, TR2 e TR3 identificam os trechos de dragagem Trecho 1, Trecho 2 e Trecho 3, respectivamente;
- ao final do nome, DR e DE identificam os cenários simulados durante as operações de dragagem e descarte, respectivamente.

**Tabela 9** - Cenários simulados no SSFATE.

ÁREAS	TRECHOS	CENÁRIOS	
		DRAGAGEM	DESCARTE
A	1	A_TR1_DR	A_TR1_DE
B	2	B_TR2_DR	B_TR2_DE
	3	B_TR3_DR	B_TR3_DE

## IV.5 RESULTADOS

As Figuras 16 a 63 apresentam os resultados das simulações com o SSFATE. O corte adotado na apresentação dos resultados da dispersão da pluma de sedimentos na coluna d'água foi 50 mg/L, uma vez que, testes realizados com o modelo SSFATE, mostraram que aproximadamente 90% da pluma atinge esta concentração em 9 dias (de modelagem) e que, 1 dia após cessada as operações

de dragagem e descarte modelada para TMIB, 100% da pluma residual encontra-se com concentrações inferiores a 50 mg/L. No caso dos resultados referentes às espessuras de sedimento depositadas, conforme solicitado pela ECOLOGUS, foi adotado o corte de 1 cm.

Dentro do período modelado (*i.e.* 20 dias), foram selecionados três períodos de três dias representativos das características meteorológicas e oceanográficas relevantes à circulação marítima local. Os períodos selecionados, de acordo com a Figura 15, foram: 7 a 9 de fevereiro (sizígia), 16 a 18 de fevereiro (quadratura) e 21 a 23 de fevereiro (sizígia com inversão do padrão de ventos). Para cada um destes períodos apresenta-se a pluma em um determinado instante de tempo, utilizando como critério a maior concentração de sedimentos calculada para a coluna d'água. Vale ressaltar que os instantes de tempo apresentados refletem as situações mais críticas em função das máximas concentrações de sedimentos na água associadas às maiores dimensões das plumas, ou seja, são os instantes mais relevantes e representativos das plumas geradas ao longo das operações de dragagem e descarte na região de estudo.

Com o intuito de facilitar a comparação temporal dos sedimentos suspensos na coluna d'água em cada uma das duas áreas do terminal, os resultados das simulações são apresentados em agrupamentos por trechos e por períodos mais característicos da circulação local. Tais figuras apresentam mapas bidimensionais, nos quais apenas a maior concentração de sedimentos na coluna d'água para cada profundidade são apresentados.

Ainda no contexto da apresentação dos resultados, para os pontos geográficos que apresentaram a máxima concentração para cada um dos instantes de tempo selecionados, apresenta-se também uma série temporal englobando o período de três dias dentro do qual este instante mais crítico (maior concentração) foi selecionado. A opção de apresentar uma série temporal de concentração para tais pontos (posição geográfica de maior concentração relativa a cada uma das plumas) tem por objetivo evidenciar que a máxima concentração é um evento peculiar devido à conjunção de vários fatores (corrente local, maré e vento). Ainda cabe salientar que as séries temporais apresentam instantes com concentração de sedimentos na coluna d'água iguais a zero. O significado físico

(e prático) para tais valores de concentração nulos é explicado pela ausência de pluma naquela posição espacial em dado instante, *i.e.*, como a pluma é conduzida pela corrente, e esta é dependente da maré, como consequência, o posicionamento espacial e temporal da pluma está sujeita as oscilações da maré.

Adicionalmente são apresentadas figuras com a cobertura espacial das plumas (área de influência) de sedimentos, segundo o critério de maior representatividade de influência adotado nos respectivos cenários. Nestas figuras foram considerados todos os instantes de tempo dos três períodos de três dias considerados para a apresentação dos resultados.

Para as simulações realizadas durante as operações de descarte são ainda apresentadas figuras de espessuras máximas de sedimento depositado no fundo do mar. Estas são a máximas espessuras calculadas em função do volume total a ser descartado e do número de descartes efetuados por dia (em um único ponto para cada trecho dragado).

#### ***IV.5.1 Resultados das Operações de Dragagem***

Os resultados apresentados, a seguir, refletem a modelagem da ressuspensão de sedimentos durante as operações de dragagem e são apresentadas figuras referentes às máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água para os três períodos mais representativos da dinâmica local. Salienta-se que as maiores concentrações de sedimento são encontradas nas proximidades do assoalho oceânico.

Adicionalmente são apresentadas figuras com a cobertura espacial das plumas de sedimentos (área de influência total), segundo o critério de maior representatividade de influência adotado nos respectivos cenários.

### **IV.5.1.1 Sedimentos na Coluna D'Água**

As Figuras 16 a 33 apresentam as plumas nos instantes de tempo de máxima concentração de sedimentos na coluna d'água provenientes das operações de dragagem nas áreas A e B, além de uma série temporal de 3 dias (para a posição geográfica de maior concentração de cada pluma). Observa-se que a direção preferencial de dispersão das plumas foi para SW (com exceção da condição de estufa de baixa-mar de quadratura do Trecho 2). Adicionalmente, as maiores concentrações estão associadas aos períodos de maré vazante de sizígia e ao Trecho 1, onde o sedimento possui um maior teor de finos quando comparado aos outros dois trechos.

É importante salientar que o campo de corrente (responsável pela advecção da pluma) é fortemente influenciado pela oscilação de maré, como consequência do caráter barotrópico da região de interesse. Portanto, é de se esperar que a forma e extensão da pluma tenham estreita relação com a intensidade da maré.

#### **IV.5.1.1.1 Área A – Trecho 1**

As Figuras 16, 18 e 20 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de dragagem na Área A – Trecho 1. Enquanto que as Figuras 17, 19 e 21 apresentam as séries temporais de 3 dias, que incluem os instantes de tempo selecionados, para a posição geográfica de máxima concentração.

#### **1º instante de tempo (09/02 – 18:20h GMT):**

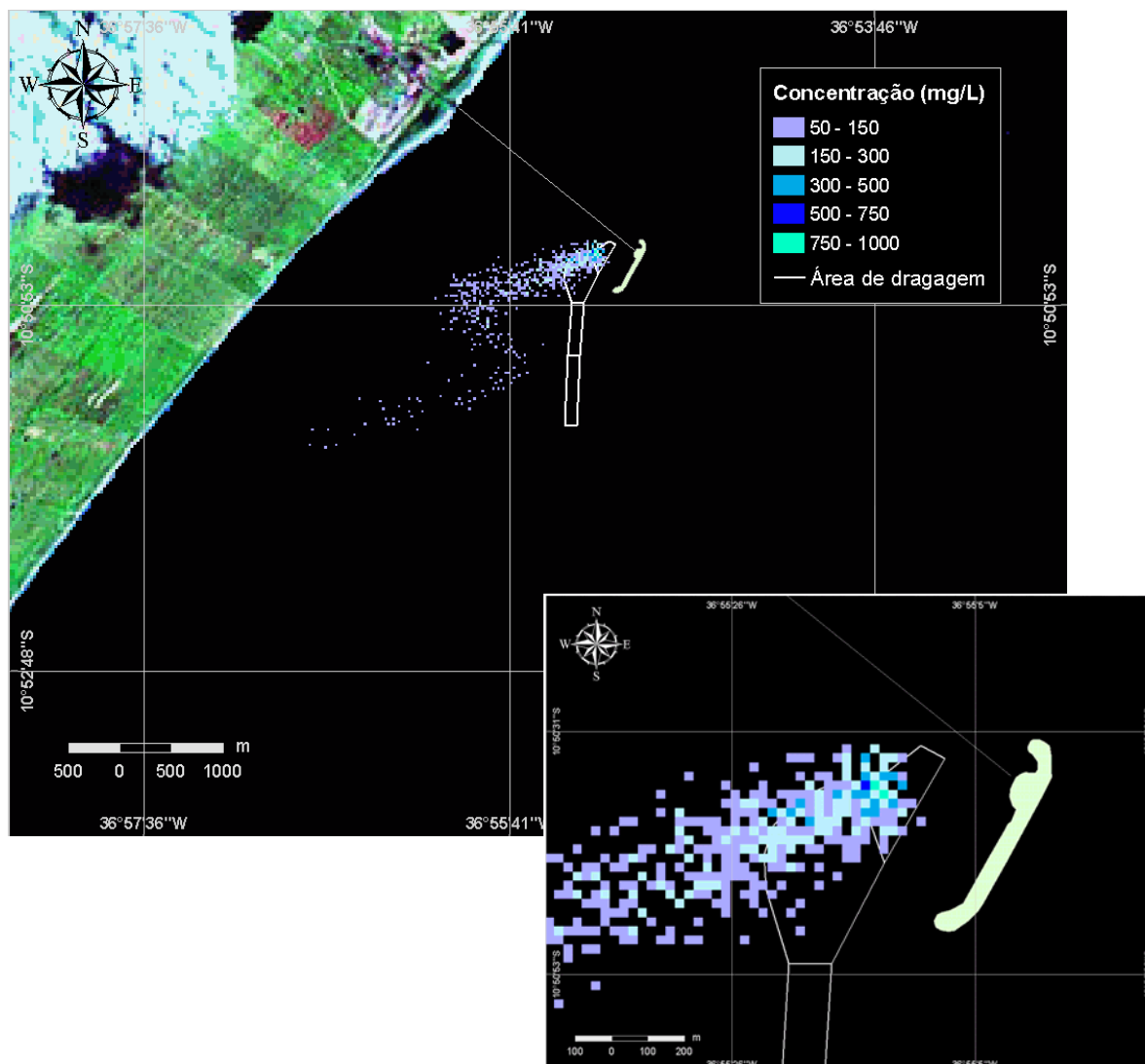
Maré: sizígia → enchente

Corrente: W (para)

Vento: W (proveniente)

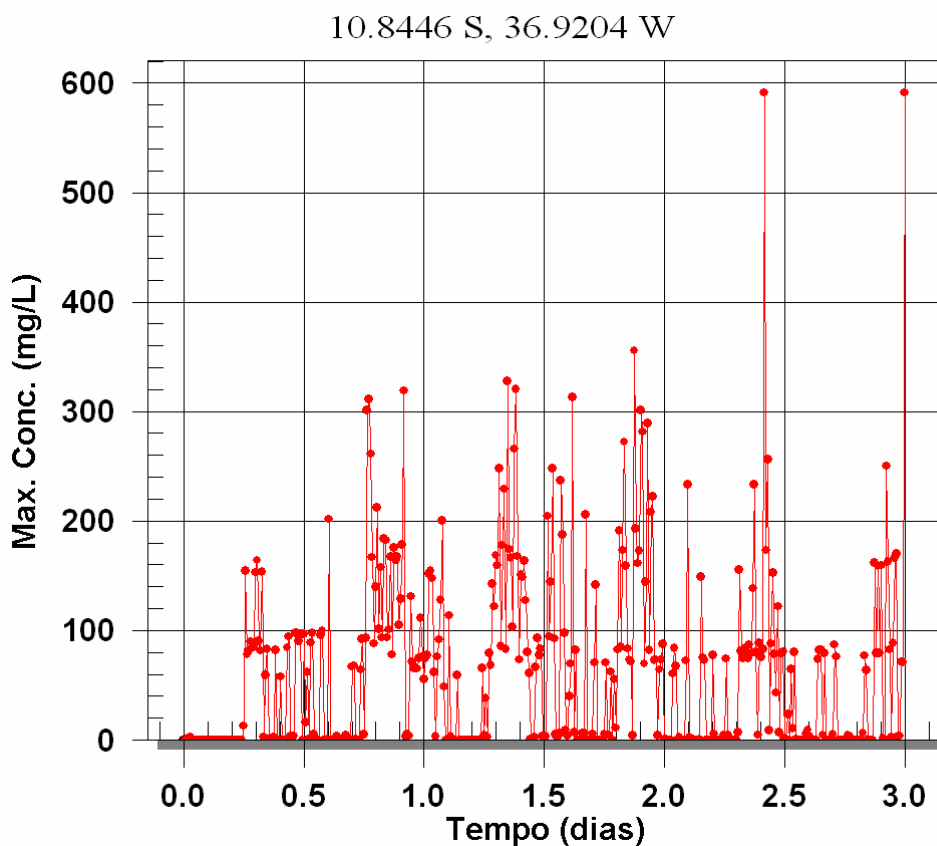
Concentração máxima: 997 mg/L

Área aproximada de influência: 1,61 km<sup>2</sup>



**Figura 16** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de enchente em maré de sizígia (09/02 – 18:20h GMT).

Na Figura 16 observa-se a influência da oscilação de maré na forma da pluma. Nesta simulação houve a ação do vento em oposição a corrente marítima, porém, tal simulação contemplou um período de maré de sizígia e, assim sendo, a direção e sentido da corrente de maré predominaram sobre a influência do vento.



**Figura 17** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 16, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro).

**2º instante de tempo (18/02 – 9:50h GMT):**

Maré: quadratura → enchente (máxima)

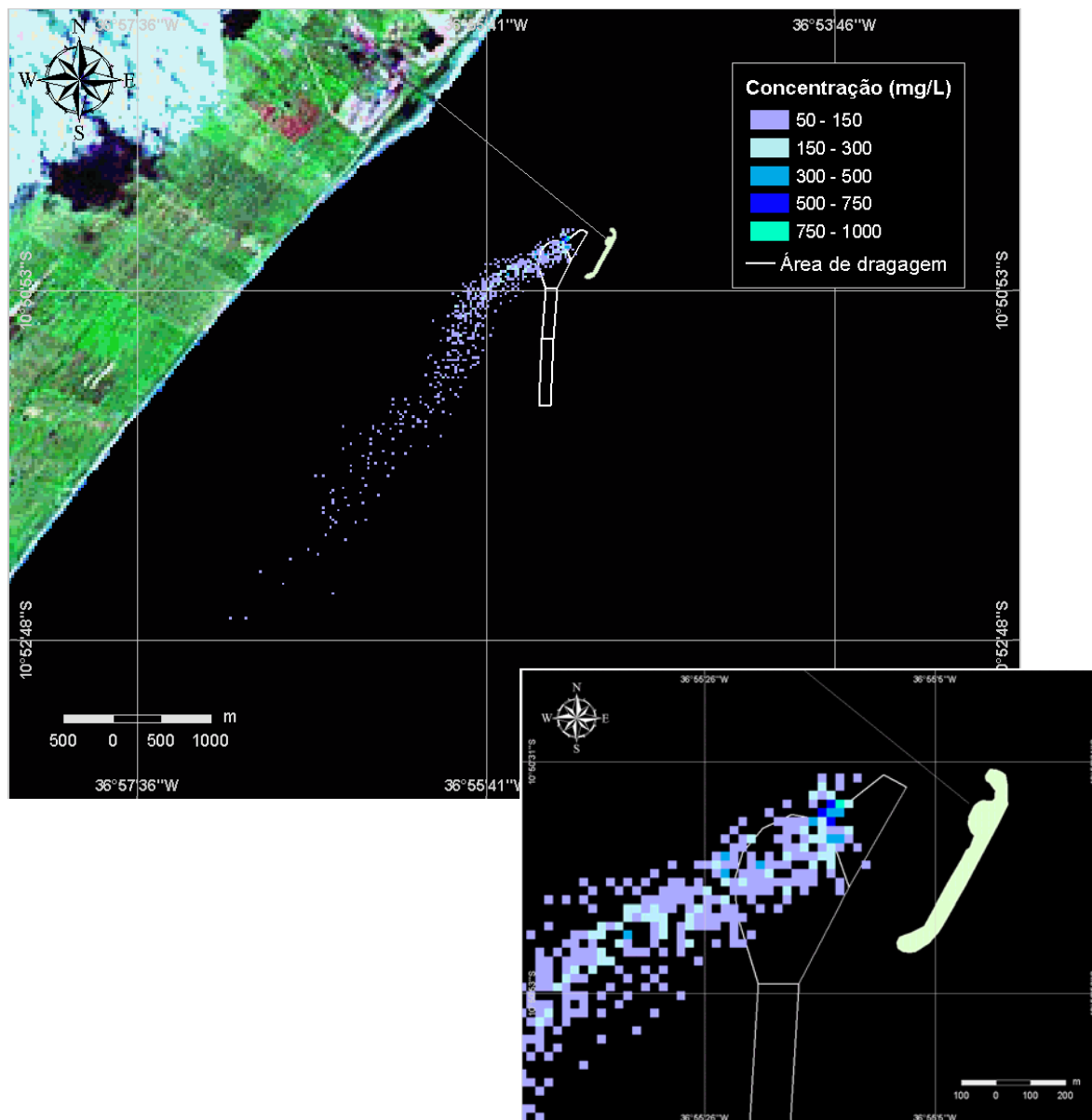
Corrente: SW

Vento: W

Concentração máxima: 822 mg/L

Área aproximada de influência: 2,65 km<sup>2</sup>

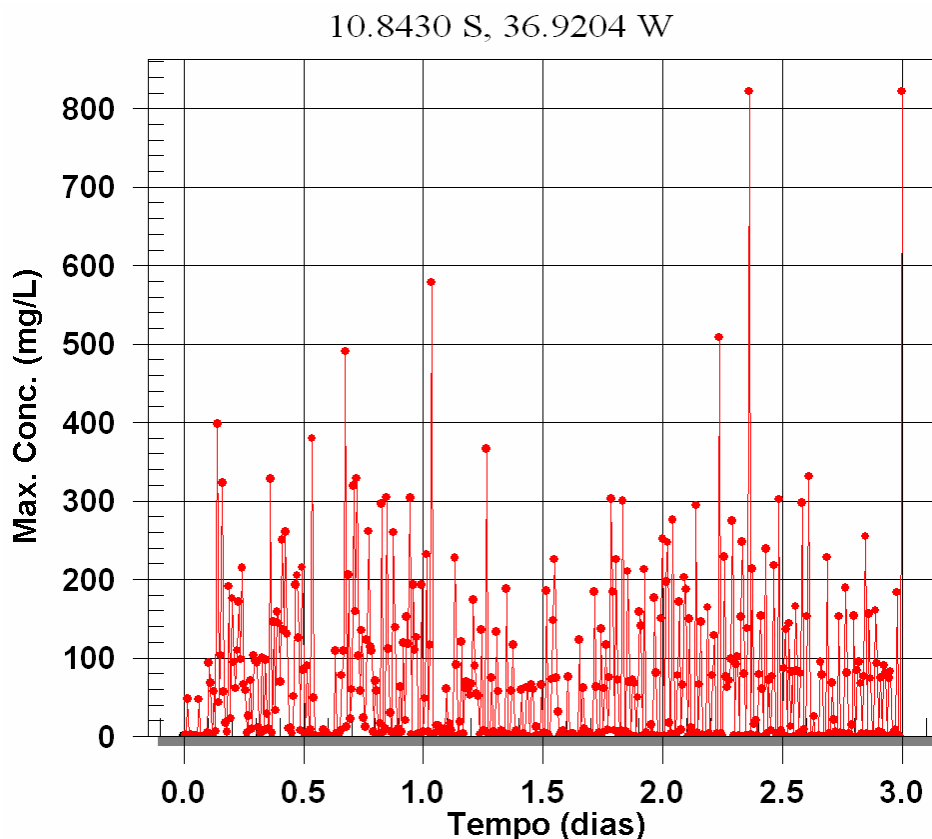




**Figura 18** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de máxima enchente em maré de quadratura (18/02 – 9:50h GMT).

O instante de máxima concentração na coluna d'água para o segundo período foi obtido durante a enchente de maré (o qual compreende um período de maré de quadratura, Figura 15). A oscilação de maré também é observada, porém, de maneira não tão evidente (Figura 18). Isto se deve, essencialmente, ao

fato que períodos de maré de quadratura induzem correntes de maré de menor intensidade quando comparadas àquelas induzidas por marés de sizígia.



**Figura 19** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 18, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro).

**3º instante de tempo (22/02 – 18:30h GMT):**

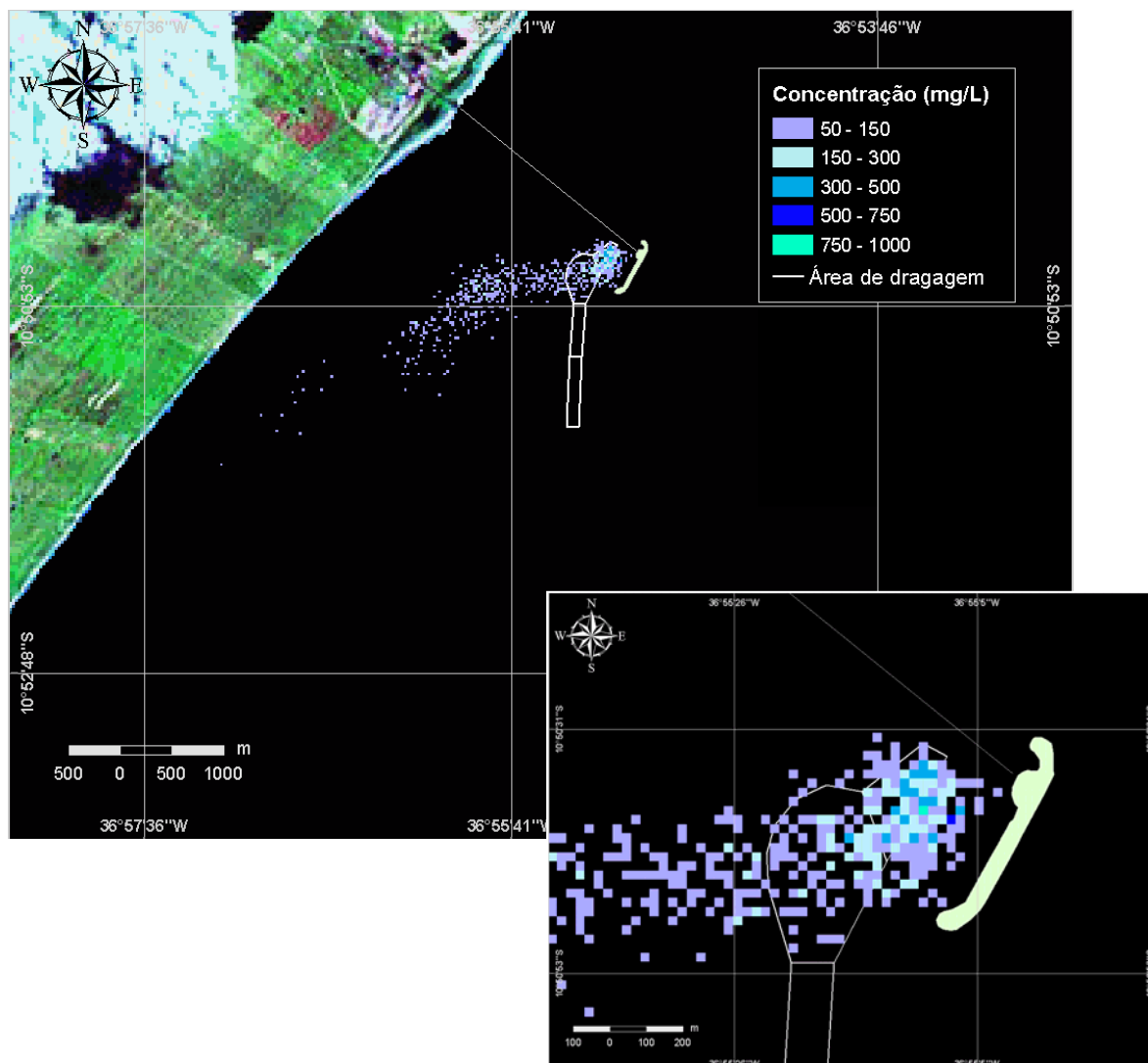
Maré: sizígia → vazante (máxima)

Corrente: SSE

Vento: ESE

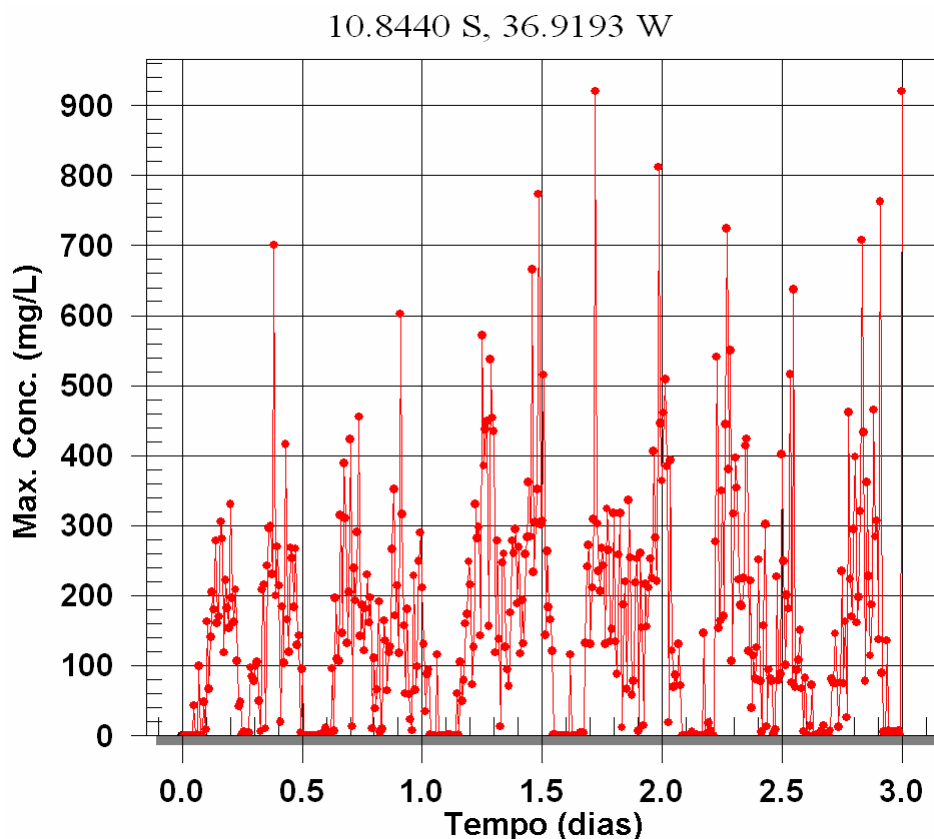
Concentração máxima: 920 mg/L

Área aproximada de influência: 2,24 km<sup>2</sup>



**Figura 20** - Cenário A\_TR1\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de máxima vazante em maré de sizígia (22/02 – 18:30h GMT).

A Figura 20, apesar de ser relativa a um período de maré de sizígia, evidencia como as alterações no vento, em relação ao padrão local (Figura 15), podem interferir no padrão de advecção da pluma de sedimentos resultante do processo de dragagem. Nesta simulação, a alteração na direção do vento provocou o desarranjo no padrão oscilatório da pluma devido a forte maregráfica.



**Figura 21** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 20, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro).

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a modelagem da dispersão de sedimentos resultantes do processo de dragagem no TMIB, referentes à Área B, Trecho 2 e Trecho 3. Nos dois próximos itens (IV.5.1.1.2 e IV .5.1.1.3), com a intenção de evitar a repetição de discussões relativas aos principais agentes meteo-oceanográficos que atuam sobre a forma das respectivas plumas, quando oportuno, referências serão realizadas às figuras já discutidas (Figuras 16 a 21).

E, como base para a interpretação das próximas figuras, cabe lembrar o caráter barotrópico da região (a qual induz a uniformidade vertical do campo de correntes) e que as correntes de maré de sizígia prevalecem sobre o vento

padrão local. Ainda neste sentido, é importante salientar que as alterações no padrão de vento podem influenciar de maneira significativa o padrão da pluma (oscilatório devido ao movimento de maré) em se tratando de períodos de marés de quadratura.

#### **IV.5.1.1.2 Área B – Trecho 2**

As Figuras 22, 24 e 26 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de dragagem na Área B – Trecho 2. Por outro lado, as Figuras 23, 25 e 27 apresentam as séries temporais de 3 dias para a posição geográfica de máxima concentração, que incluem os instantes de tempo selecionados (em referência as figuras imediatamente anteriores).

#### **1º instante de tempo (09/02 – 11:10h GMT):**

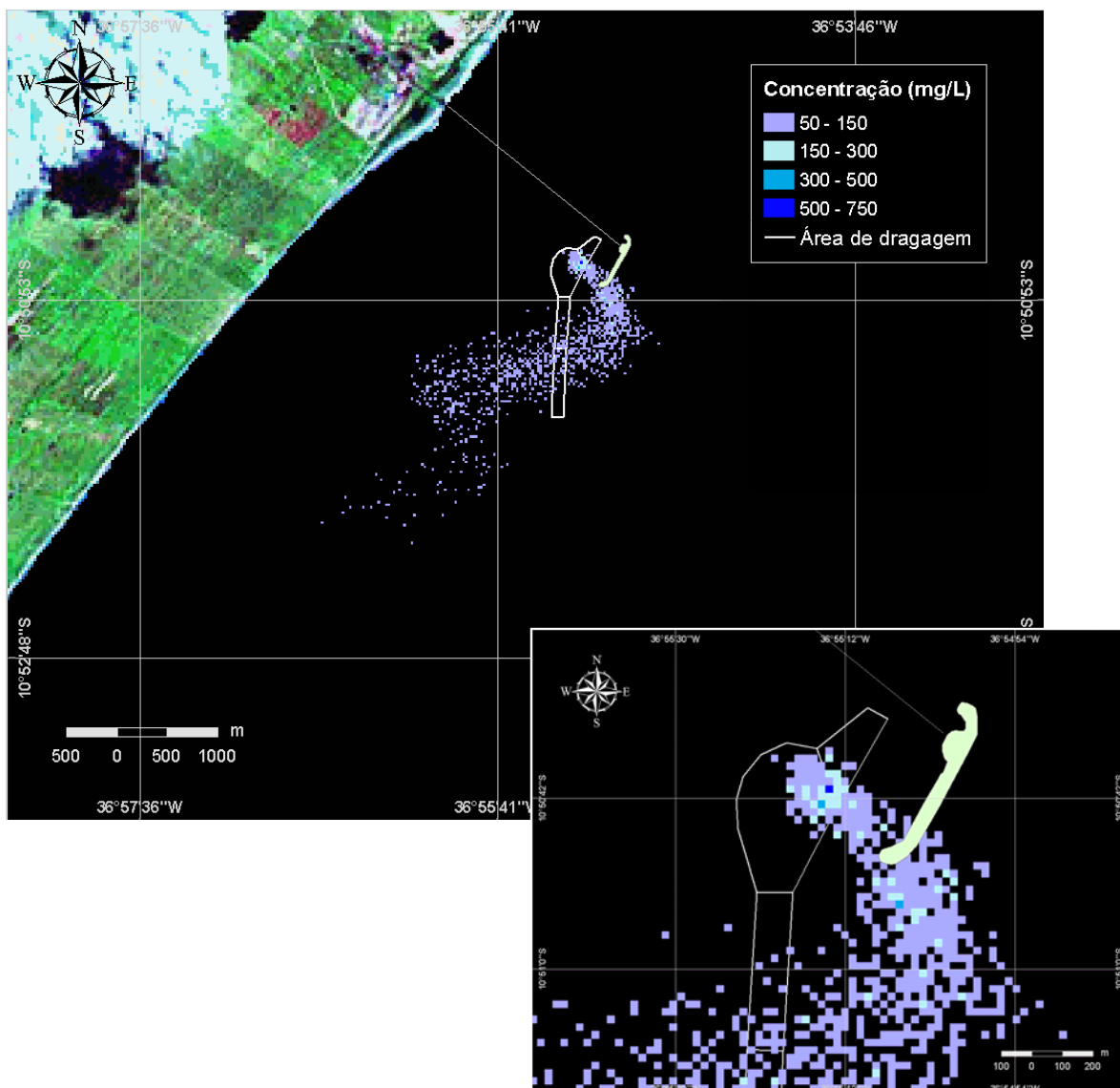
Maré: sizígia → vazante

Corrente: SE

Vento: ESE

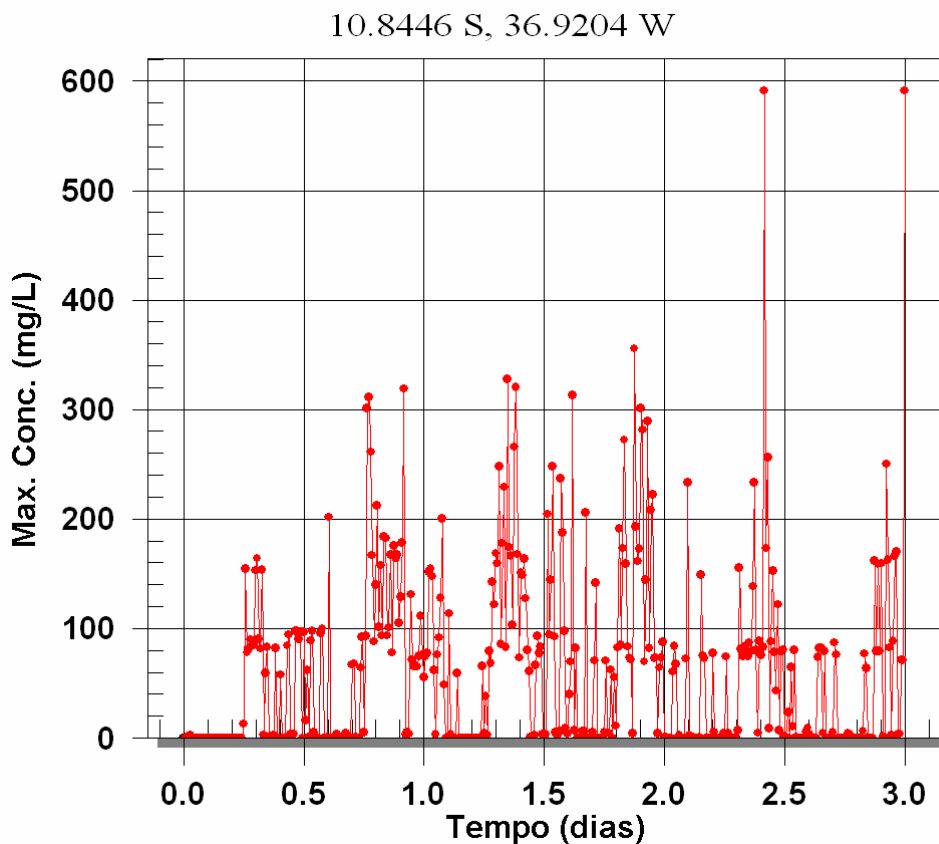
Concentração máxima: 591 mg/L

Área aproximada de influência: 2,84 km<sup>2</sup>



**Figura 22** - Cenário *B\_TR2\_DR* - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia (09/02 – 11:10h GMT).

Para efeito interpretativo, a Figura 22 pode de ser referenciada à Figura 16, pois ambas são relativas ao período de maré de sizígia e à forçante meteorológica típica (vento padrão). Neste contexto, a pluma de sedimentos na coluna d'água apresenta o padrão oscilatório devido, essencialmente, a corrente induzida pela oscilação de maré.



**Figura 23** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 22, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro).

**2º instante de tempo (16/02 – 4:10h GMT):**

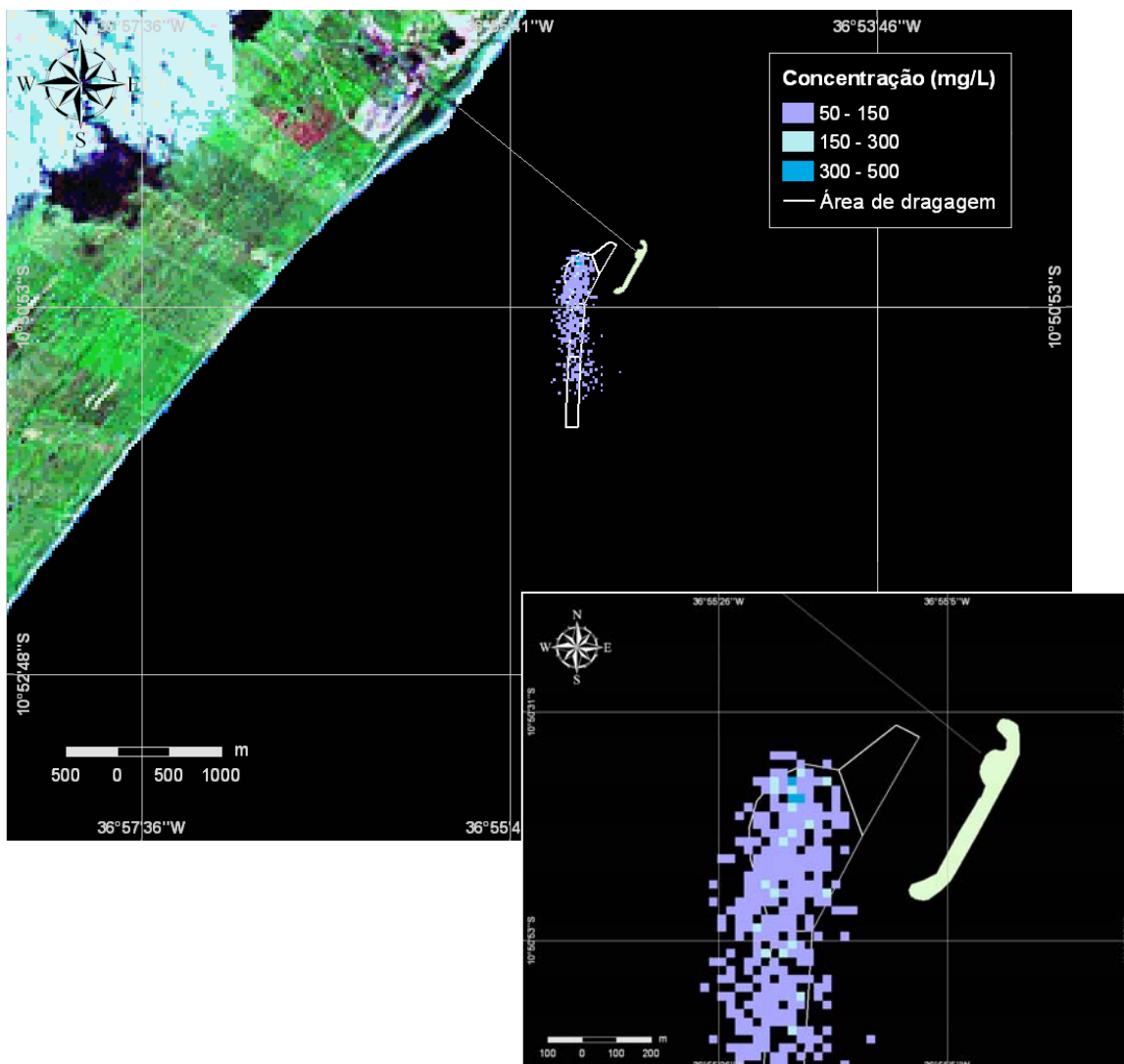
Maré: quadratura → estufa de baixa-mar

Corrente: SW

Vento: NE

Concentração máxima: 498 mg/L

Área aproximada de influência: 0,55 km<sup>2</sup>

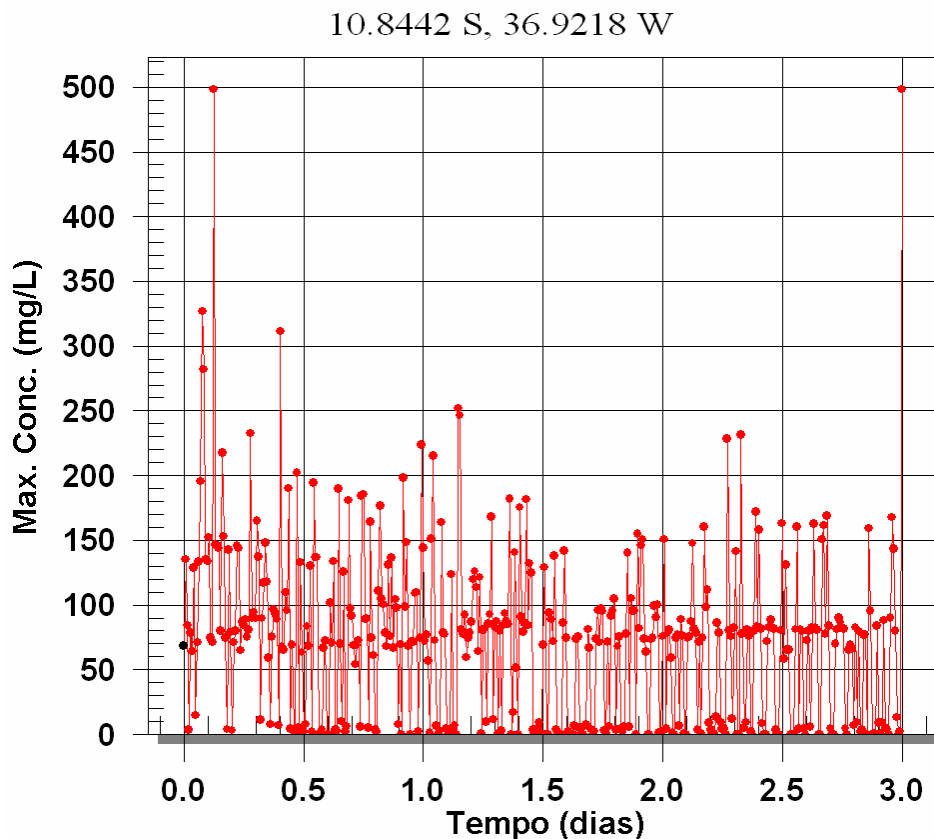


**Figura 24** - Cenário B\_TR2\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de estufa de maré em condição de baixa-mar de quadratura (16/02 – 4:10h GMT).

Na condição de maré de quadratura (Figura 24), a concentração máxima de sedimentos suspensos na coluna d'água (para o período) foi obtida durante a estufa da maré de baixa-mar. Estufa da maré de baixa-mar é o instante em que a maré está em seu nível mais baixo e imediatamente antes de iniciar seu período de enchente (subida). Ou de maneira oposta, a estufa da maré de preamar,



quando a maré encontra-se em seu nível mais cheio e imediatamente antes de iniciar seu período de vazão (descida).



**Figura 25** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 24, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro).

### 3º instante de tempo (22/02 – 7:10h GMT):

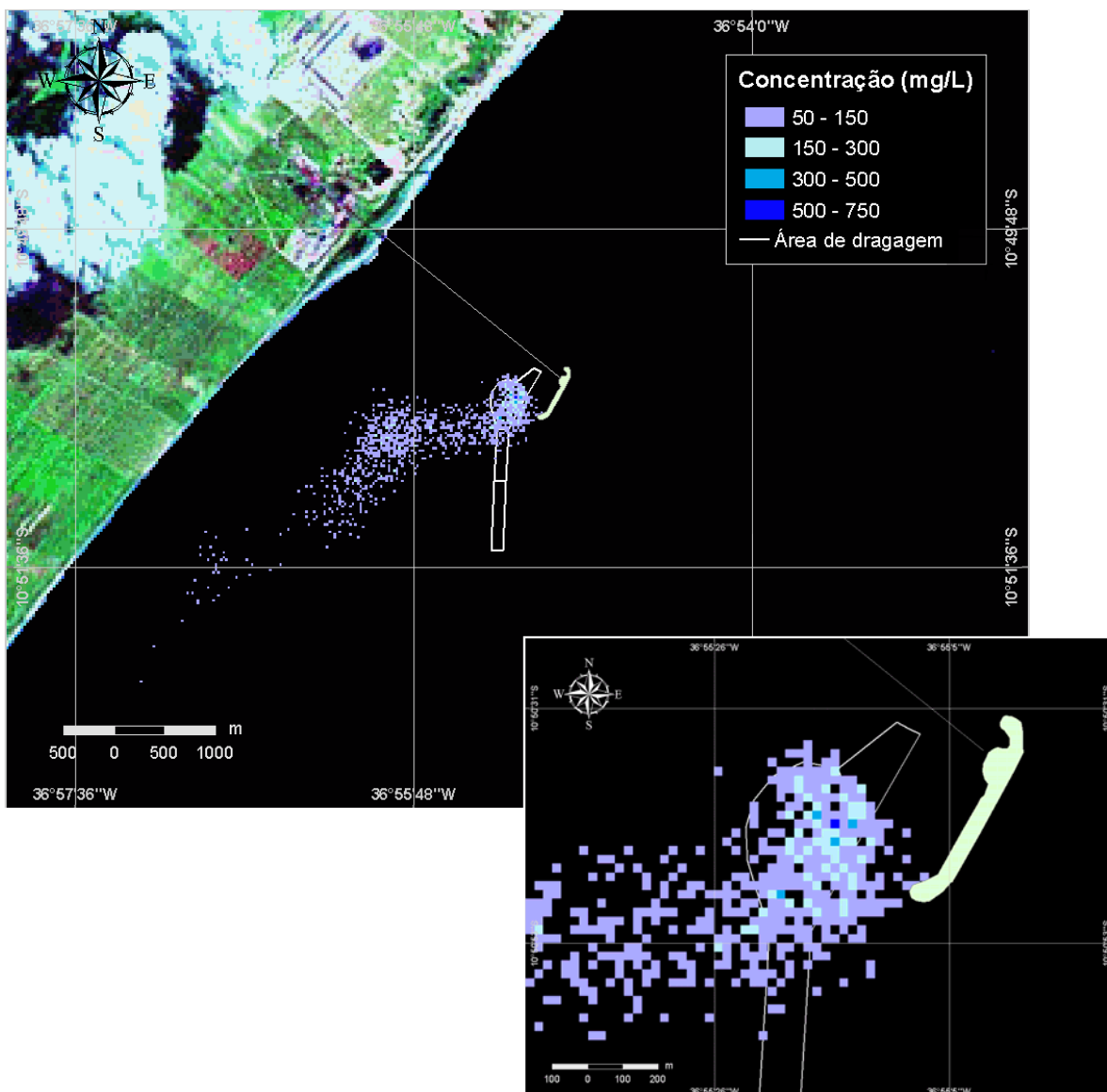
Maré: sizígia → vazante

Corrente: SE

Vento: SE

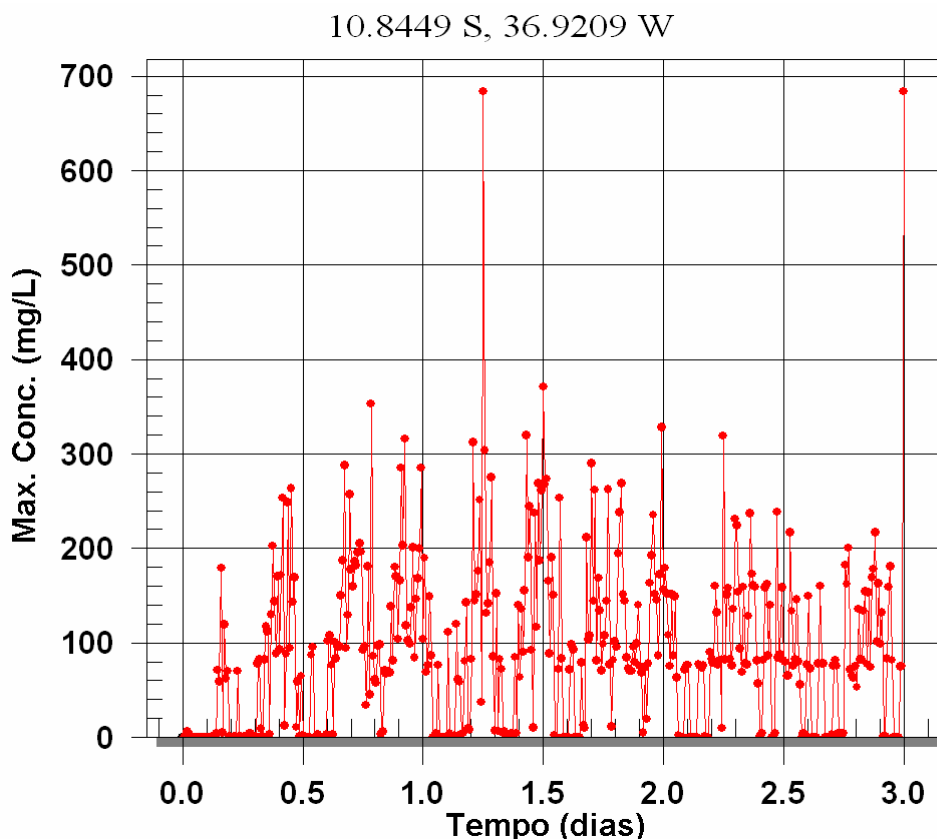
Concentração máxima: 684 mg/L

Área aproximada de influência: 2,93 km<sup>2</sup>



**Figura 26** - Cenário B\_TR2\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia (22/02 – 7:10h GMT).

Assim como na Figura 20, a Figura 26 mostra que, embora sob a condição de maré de sizígia, a inversão da direção do vento, em relação ao padrão típico, faz com que o efeito oscilatório da maré sobre a pluma fosse encoberto pelos efeitos da forçante meteorológica (vento) agindo sobre o sistema.



**Figura 27** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 26, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro).

#### IV.5.1.1.3 Área B – Trecho 3

As Figuras 28, 30 e 32 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de dragagem na Área B – Trecho 3. De maneira análoga as seções precedentes, as Figuras 29, 31 e 33 apresentam as séries temporais de 3 dias para a posição geográfica de máxima concentração, que incluem os instantes de tempo selecionados, respectivas as figuras imediatamente anteriores.

**1º instante de tempo (08/02 – 13:20h GMT):**

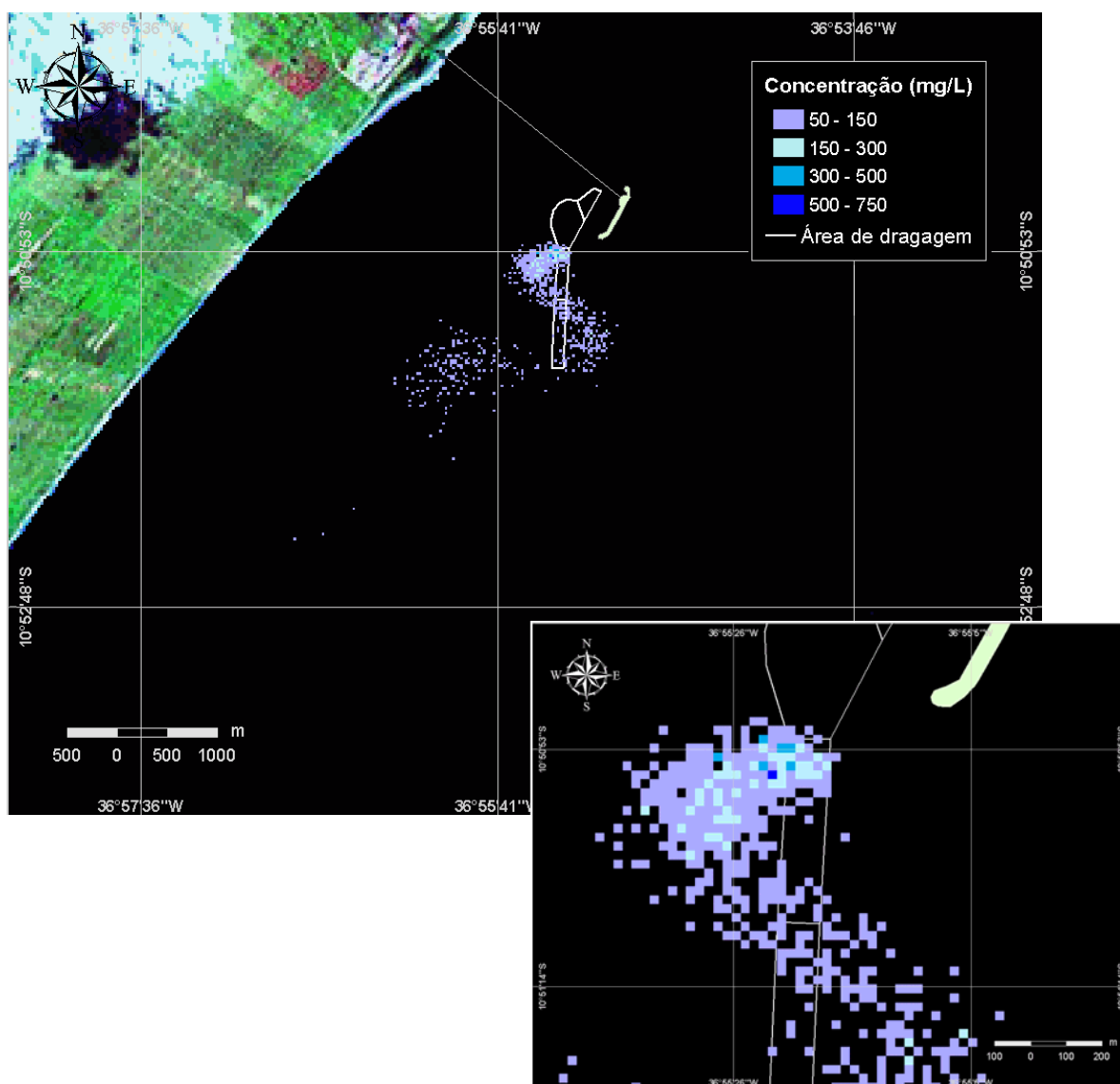
Maré: sizígia → enchente

Corrente: W

Vento: ESE

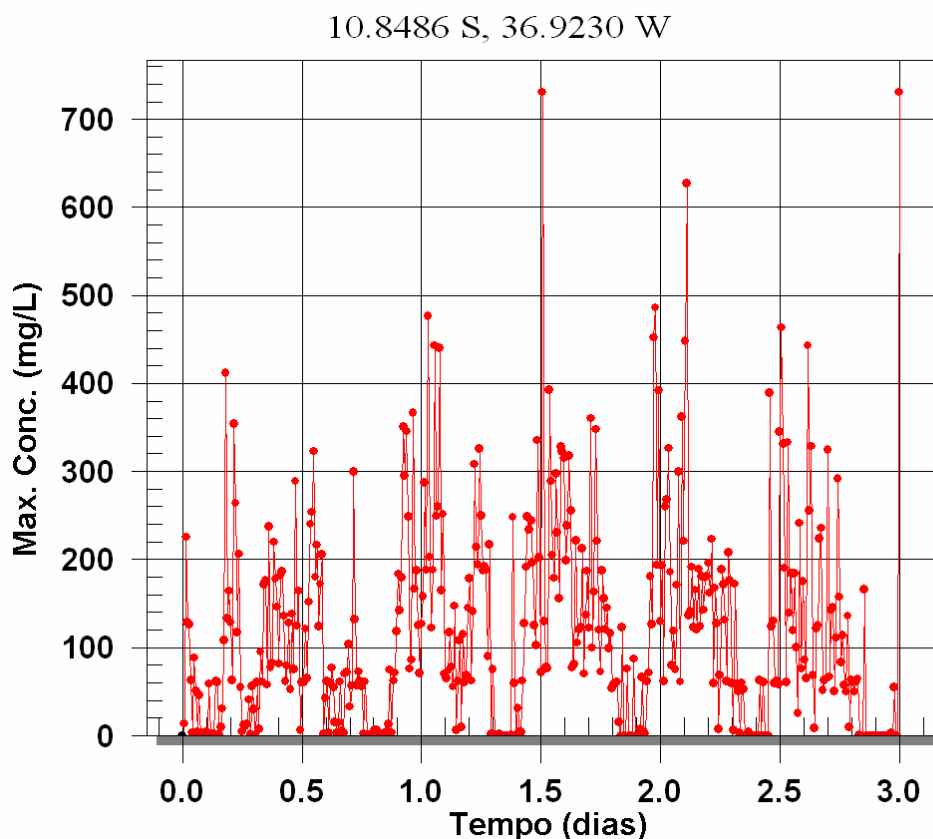
Concentração máxima: 731 mg/L

Área aproximada de influência: 1,90 km<sup>2</sup>



**Figura 28** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de sizígia (08/02 – 13:20h GMT).

Na Figura 28, observa-se que a pluma de sedimentos na coluna d'água segue o padrão oscilatório induzido pela maré (sizígia) sob a condição de ventos típicos da região (assim como nas Figuras 16 e 18).



**Figura 29** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 28, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 07 de fevereiro).

**2º instante de tempo (18/02 – 16:00h GMT):**

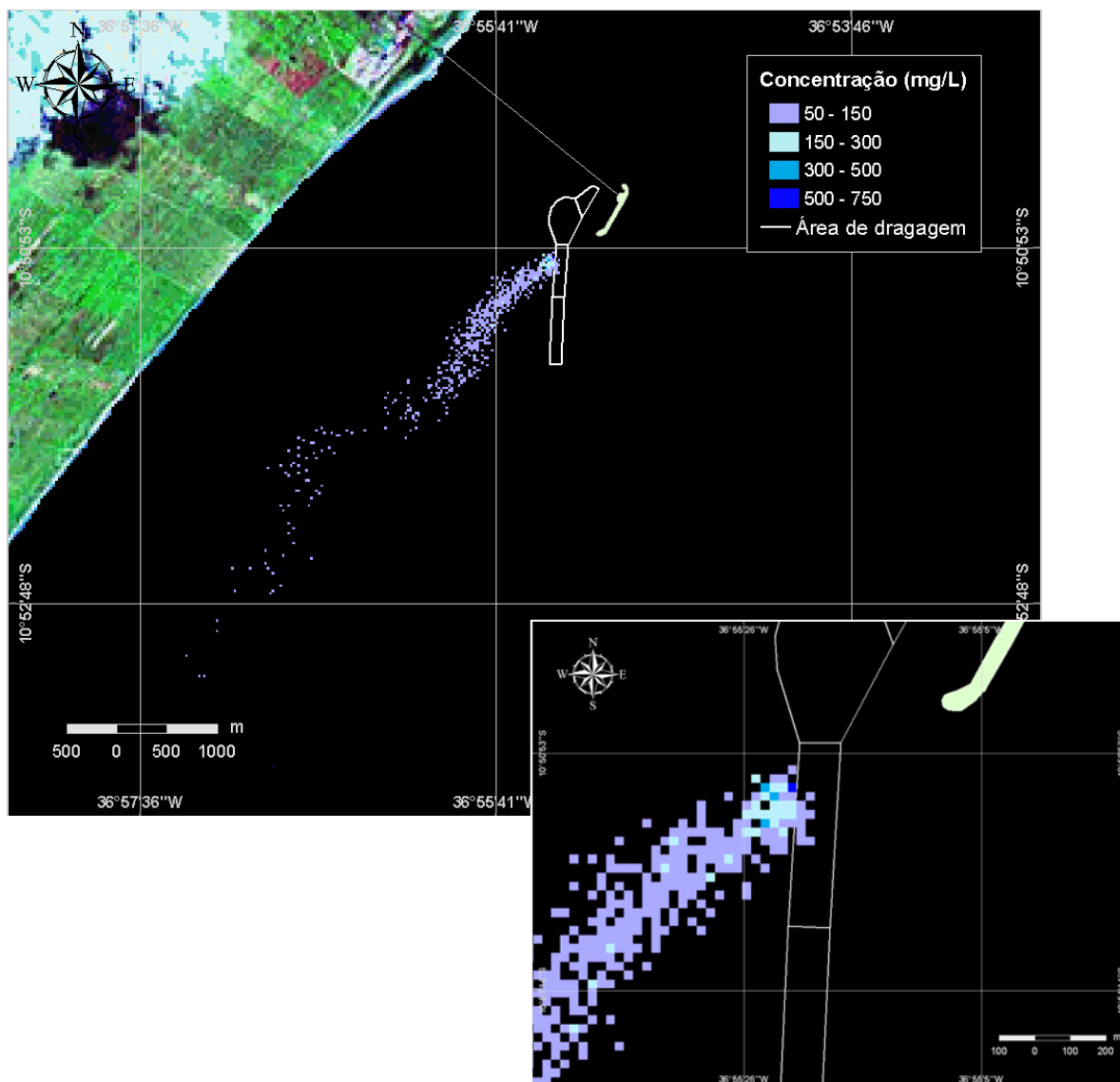
Maré: quadratura → estufa de preamar

Corrente: SW

Vento: NNE

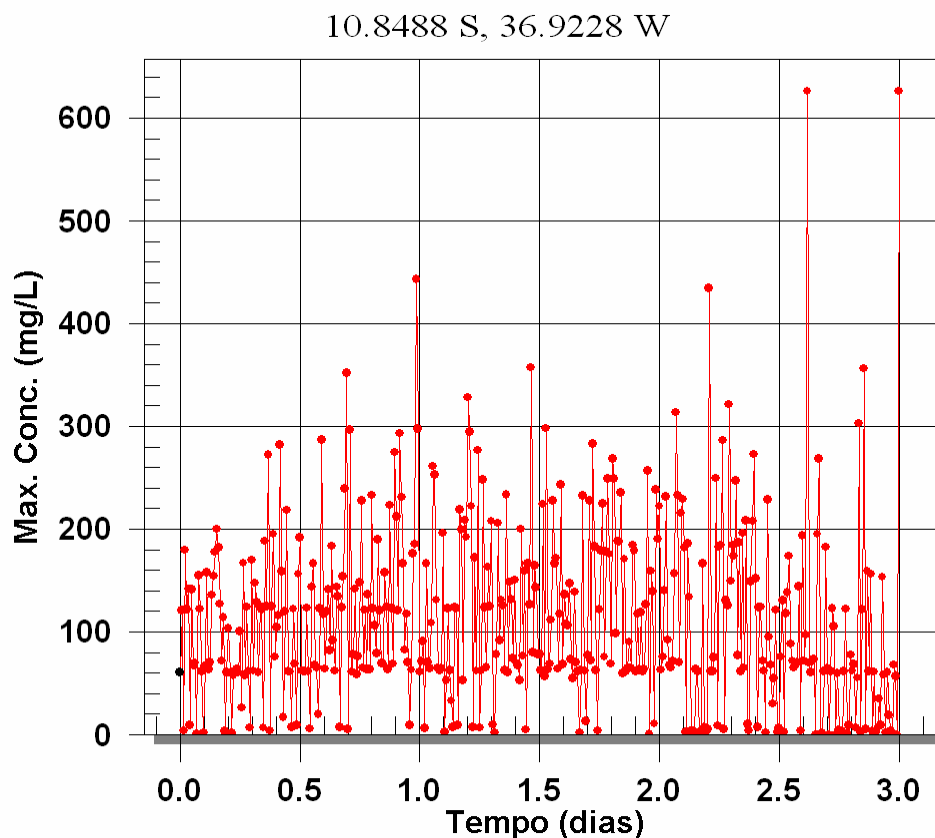
Concentração máxima: 626 mg/L

Área aproximada de influência: 1,80 km<sup>2</sup>



**Figura 30** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de estufa de maré em condição de preamar de quadratura (18/02 – 16:00h GMT).

De maneira análoga à Figura 24, a concentração de sedimentos na coluna d'água neste trecho a ser dragado (Figura 30), apresenta seu máximo durante uma estufa da maré. Porém, a presente situação refere-se à estufa da maré de preamar, enquanto que aquela se referia à estufa da maré de baixa-mar.



**Figura 31** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 30, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 16 de fevereiro).

**3º instante de tempo (23/02 – 00:50h GMT):**

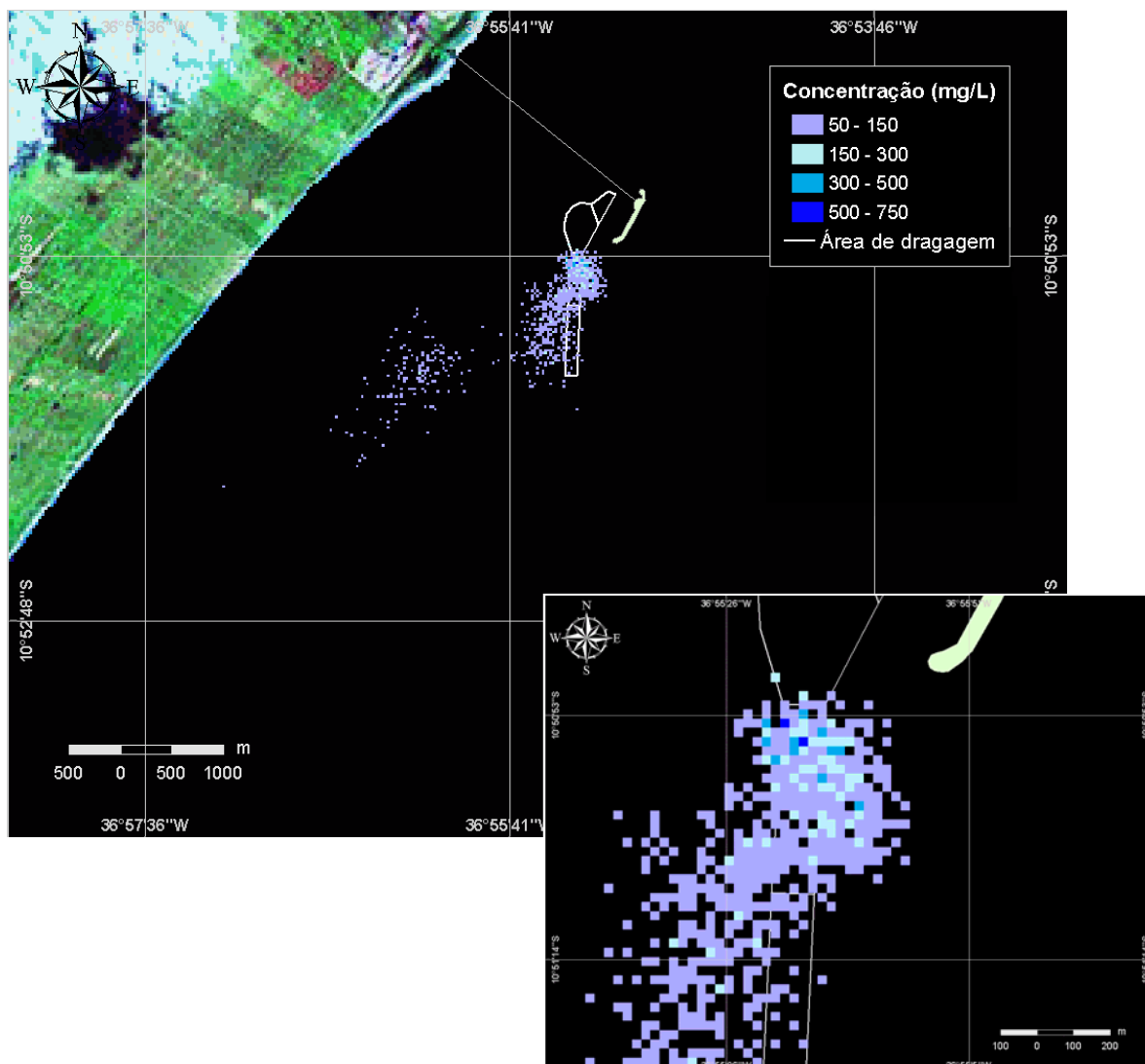
Maré: estofa de baixa-mar

Corrente: SSE

Vento: ESE

Concentração máxima: 680 mg/L

Área aproximada de influência: 2,07 km<sup>2</sup>

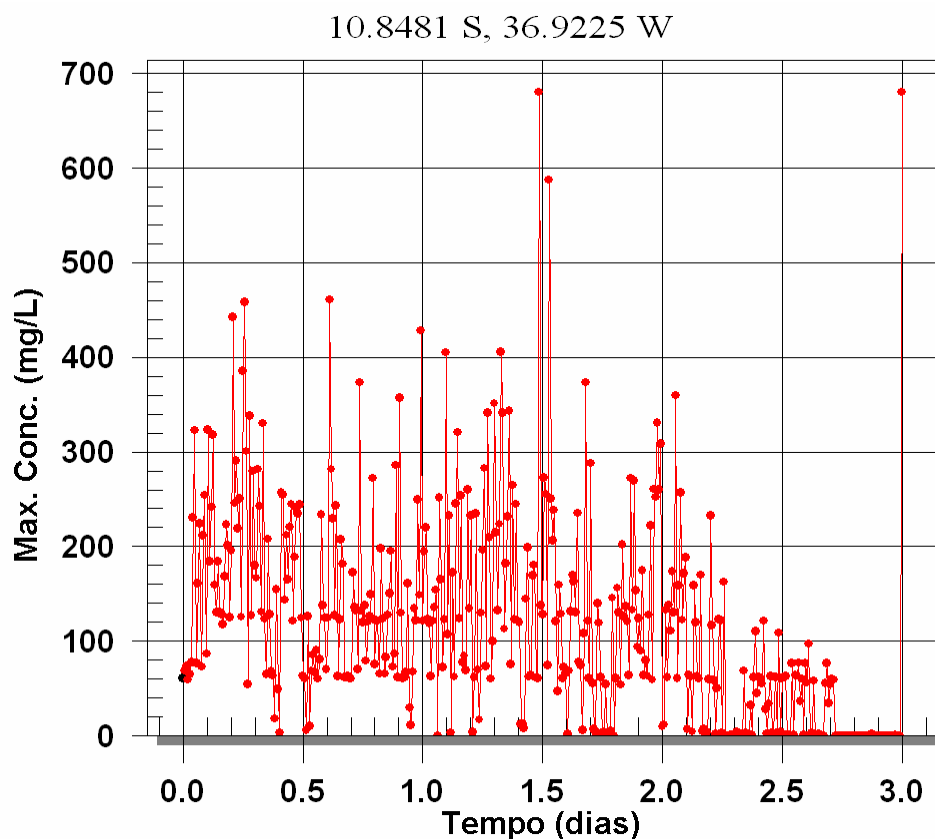


**Figura 32** - Cenário B\_TR3\_DR - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de estofa de maré em condição de baixa-mar de quadratura (23/02 – 00:50h GMT).

Como mencionado anteriormente, as estofas de maré são caracterizados por correntes com intensidade praticamente zero (induzidas pela maré). Observa-se, assim, na Figura 32 a “assinatura” do padrão oscilatório da maré, porém, de maneira não tão evidente, e tendo duas regiões de pluma de sedimentos espaçadas na coluna d'água. O rompimento da pluma deve-se a fato da ausência de corrente (estofa de maré) advectando os sedimentos ressuspensos devido à



dragagem. Por outro lado, o padrão oscilatório da maré pode ser observado ao se traçar uma linha imaginária unindo as duas regiões de pluma.

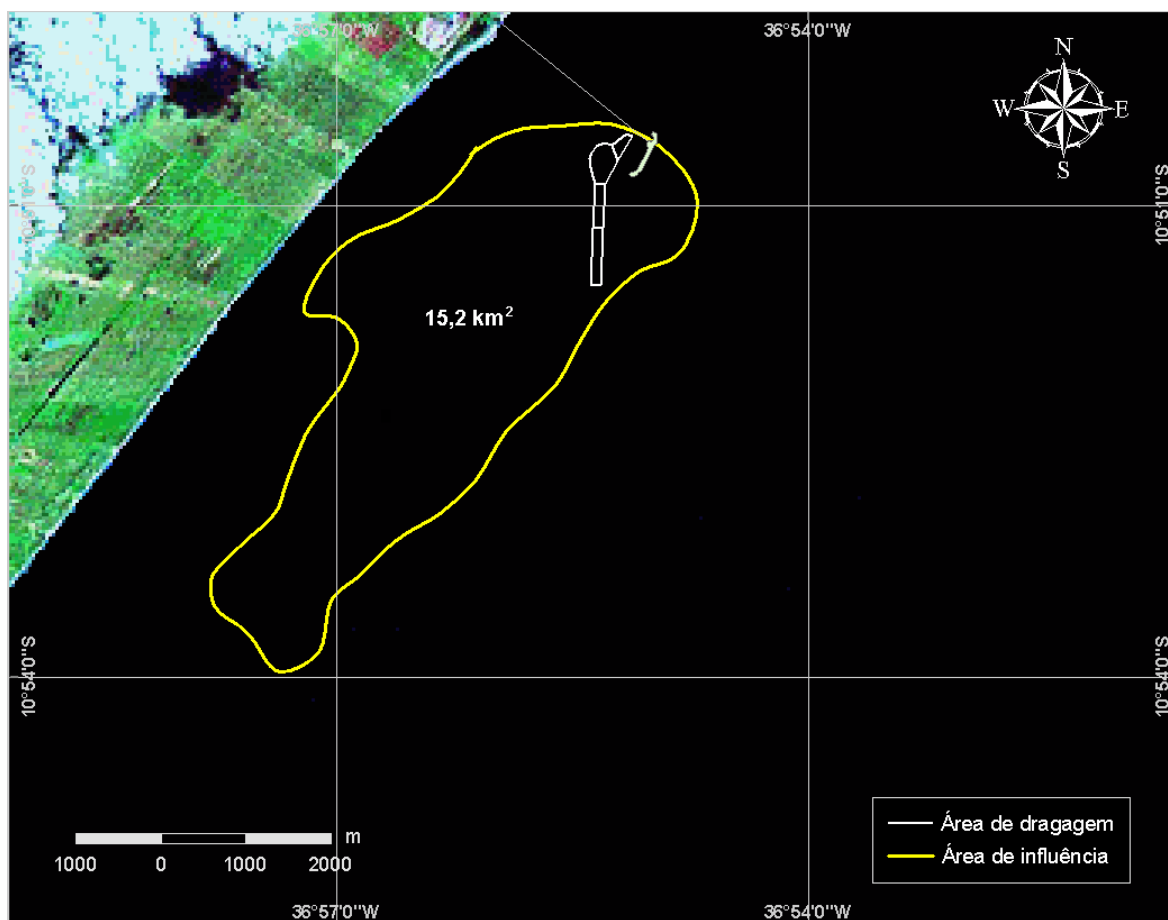


**Figura 33** - Série temporal para a posição geográfica de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 32, ao longo de três dias (instante inicial: 01:00h GMT do dia 21 de fevereiro).

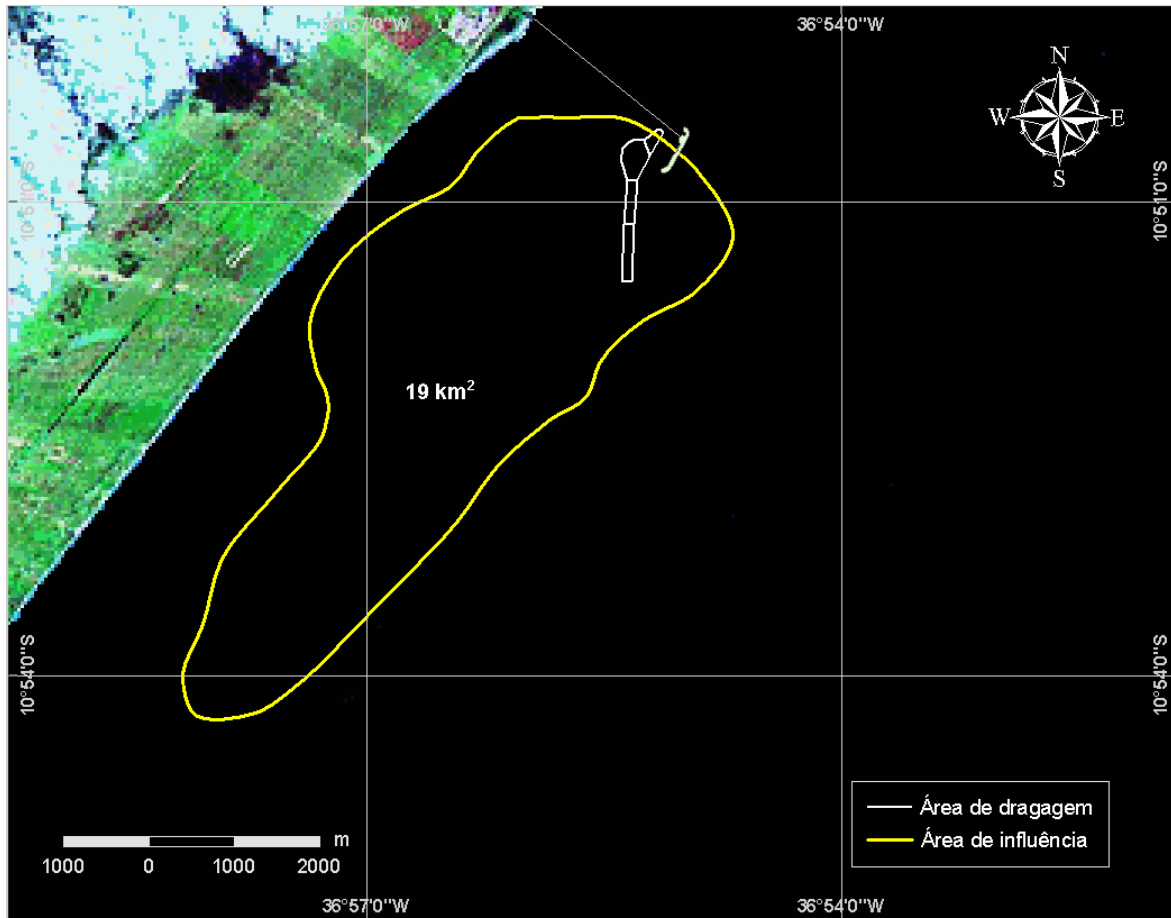
#### IV.5.1.2 Área de Influência das Plumias

As Figuras 34 a 36 apresentam as envoltórias das trajetórias das plumas de sedimento na coluna d'água para os Trechos 1, 2 e 3, segundo o critério de maior representatividade de influência adotado na modelagem. Observa-se que o Trecho 2 apresentou a maior área de influência (19 km<sup>2</sup>), provavelmente relacionada à maior taxa de sedimentos dragados por hora (quando comparado

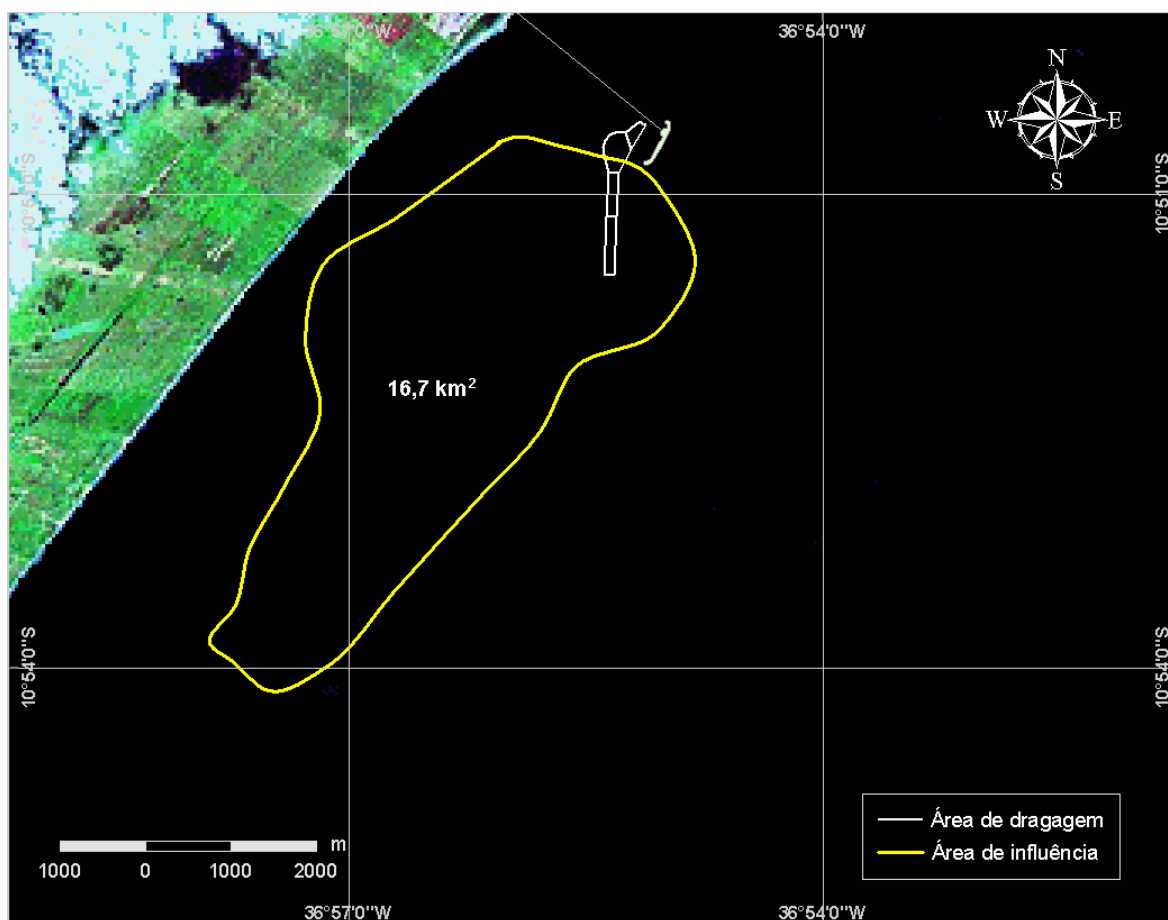
ao Trecho 1) e ao maior teor de sedimentos finos presente no material dragado (quando comparado ao Trecho 3).



**Figura 34** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 1 da Área A.

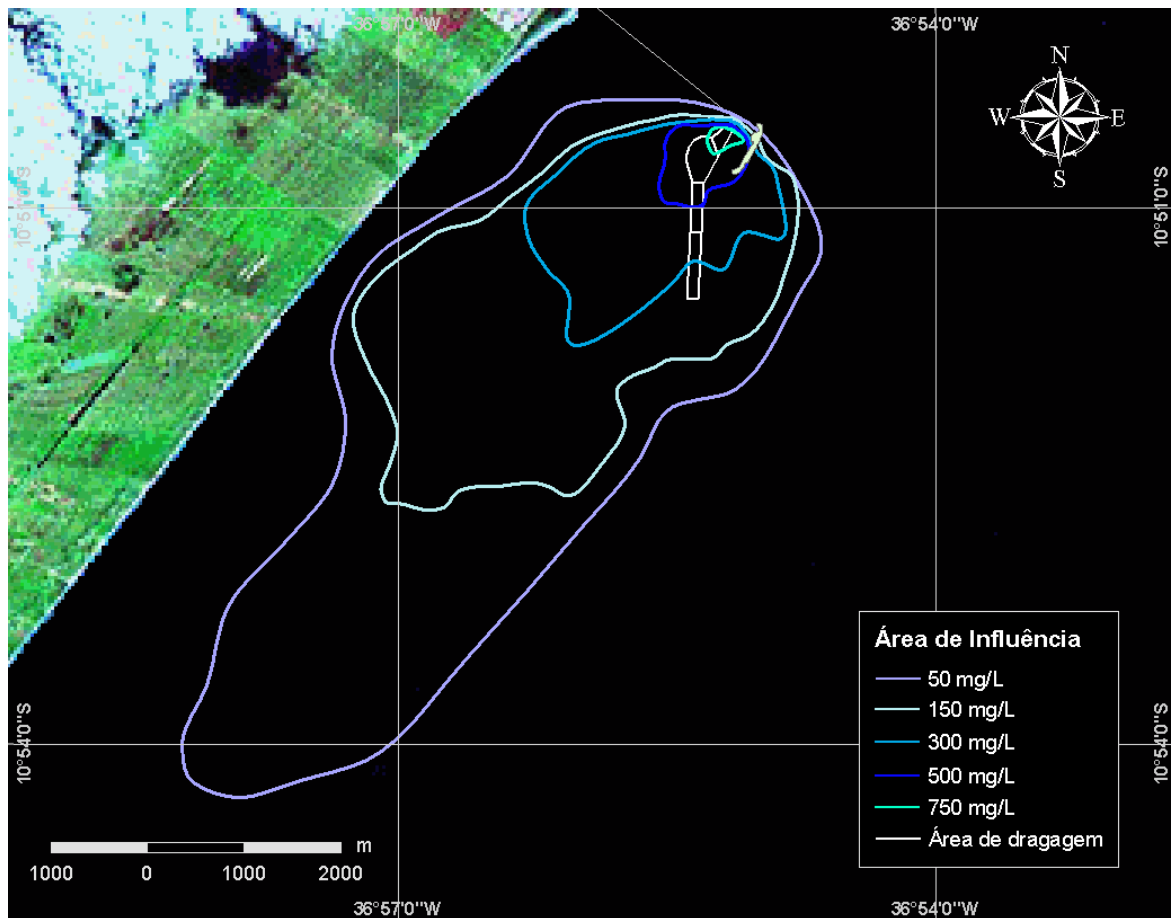


**Figura 35** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 2 da Área B.



**Figura 36** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem no Trecho 3 da Área B.

A Figura 37 apresenta a somatória das envoltórias das trajetórias das plumas de sedimento ressuspensos durante as operações de dragagem nos três trechos, para concentrações maiores ou iguais a 50 mg/L. Foram consideradas as envoltórias das plumas ao longo dos períodos significativos utilizados na apresentação dos resultados até então apresentados. A cobertura espacial total das plumas foi de 22,5 km<sup>2</sup>. Observa-se que as maiores concentrações de sedimento na coluna d'água (concentrações maiores que 500 mg/L) representam as menores áreas de abrangência e estão próximas das áreas de dragagem.



**Figura 37** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de dragagem nos trechos 1, 2 e 3.

### IV.5.2 Resultados das Operações de Descarte

Para as simulações do descarte de material dragado, são também apresentadas figuras de máximas concentrações de sedimento na coluna d'água, séries temporais e cobertura espacial das plumas (área de influência), além de figuras com espessuras de sedimento depositado.

### **IV.5.2.1 Sedimentos na Coluna D'Água**

As Figuras 38 a 55 apresentam as plumas nos instantes de tempo de máxima concentração de sedimentos na coluna d'água provenientes das operações de dragagem nas áreas A e B, além de uma série temporal de 3 dias (para a posição geográfica de maior concentração de cada pluma). Observa-se que a direção preferencial de dispersão das plumas variou entre as direções oeste e sudoeste e que as maiores concentrações estão associadas aos períodos de vazante de sizígia e aos Trechos 2 e 3, onde o volume de sedimentos descartados é maior quando comparado ao Trecho 1. Comparando os Trechos 2 e 3, o 2 apresenta concentrações maiores devido ao maior teor de finos presente no sedimento descartado. Na região do ponto de descarte as maiores concentrações são observadas imediatamente após o início de cada descarte, não havendo indicação de acúmulo de material nessa região de um ciclo para outro.

#### **IV.5.2.1.1 Área A – Trecho 1**

Devido as características de acoplamento entre os equipamentos de dragagem e descarte (tipo de draga e capacidade da cisterna), a frequência prevista para o descarte do material dragado no Trecho 1 é de duas vezes ao dia.

Em adição, os efeitos da maré no tocante a advecção e a dispersão da pluma de sedimentos na coluna d'água, tal qual apresentados para os cenários das operações de dragagem para a região, também são válidos durante o processo de descarte do respectivo sedimento. Portanto, espera-se que uma influência significativa durante ciclos de maré de sizígia em detrimento da influência da maré em ciclos de quadratura. Neste contexto, as Figuras 38, 40 e 42 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de descarte na Área A – Trecho 1. De maneira análoga ao procedimento adotado nos cenários de dragagem, em seqüência, as Figuras 39, 41 e 43 apresentam as séries temporais de 3 dias para a posição geográfica de máxima concentração.

**1º instante de tempo (08/02 – 07:50h GMT):**

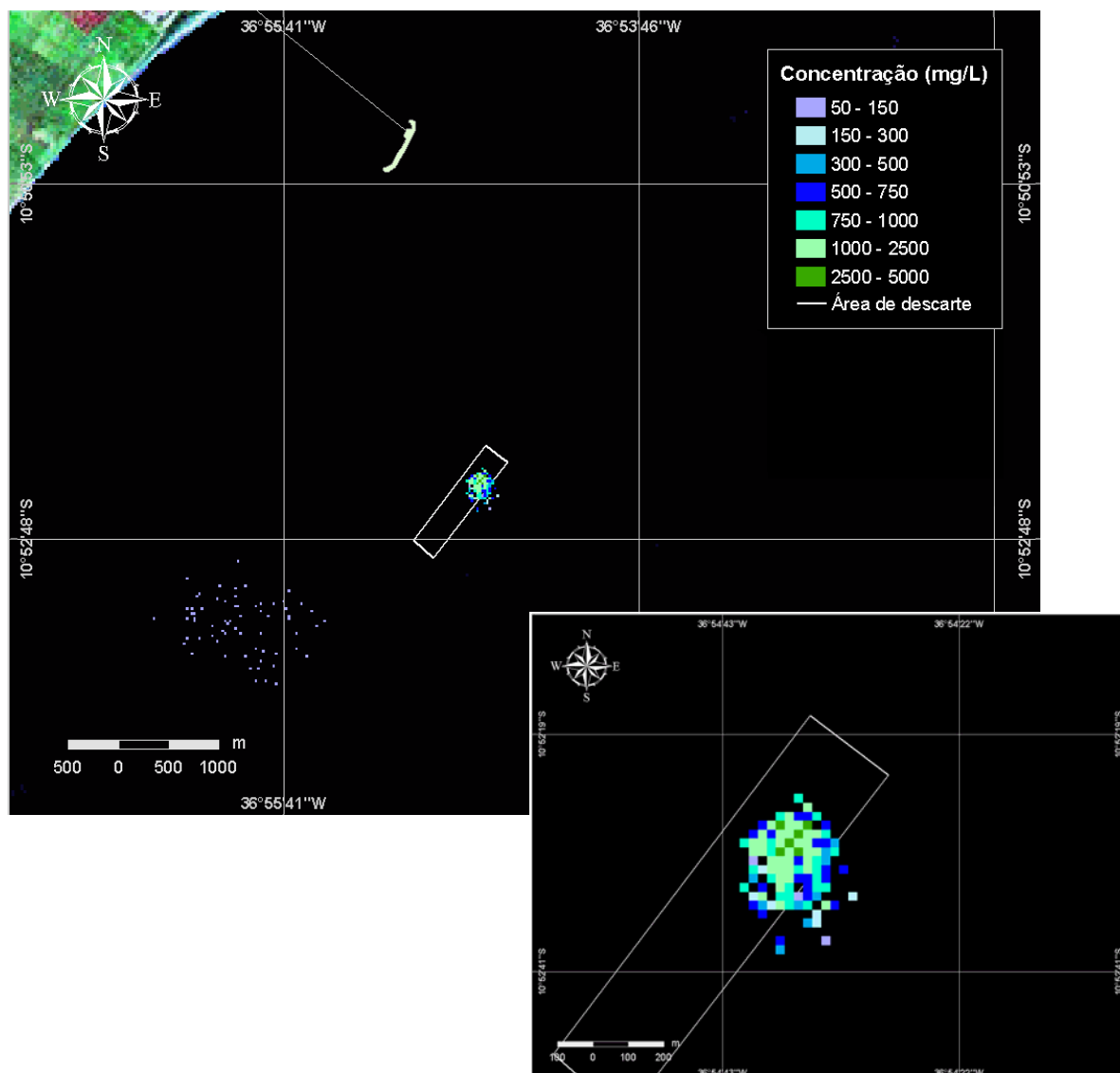
Maré: sizígia → vazante

Corrente: SE (para)

Vento: SE (proveniente)

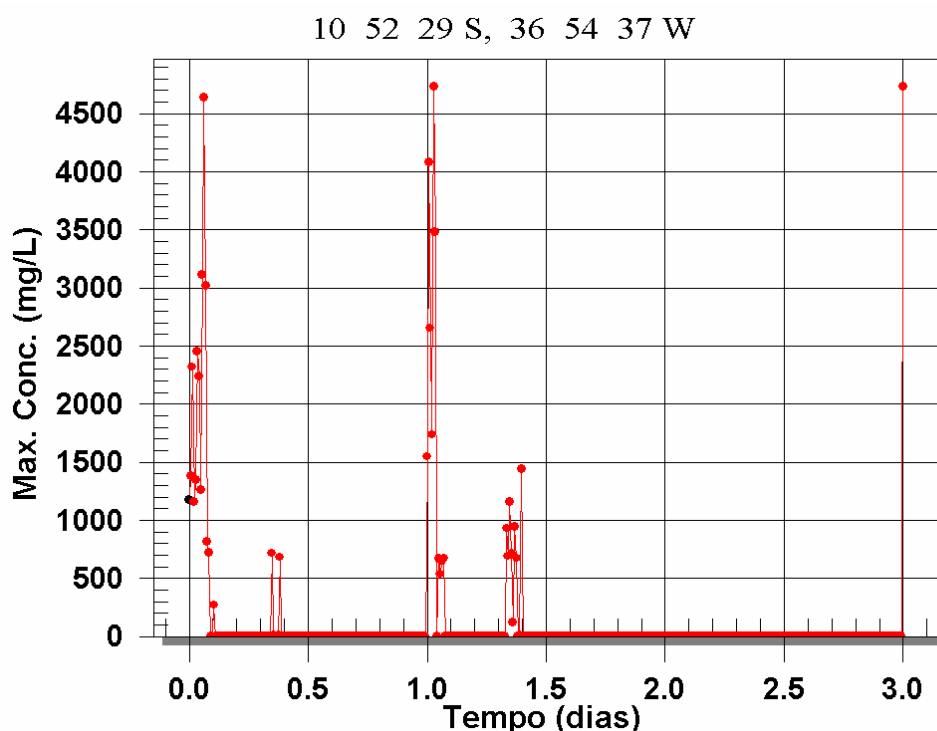
Concentração máxima: 4.729 mg/L

Área aproximada de influência: 1,35 km<sup>2</sup>



**Figura 38** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de vazante em maré de sizígia (08/02 – 07:50h GMT).

Como mencionado anteriormente, a frequência prevista para o descarte do material dragado, assim como a granulometria dos sedimentos, são fatores consideráveis no desenvolvimento e na forma da pluma de sedimentos na coluna d'água, em adição as condições meteo-oceanográficas. Neste contexto, na Figura 38 são observadas duas plumas no instante de máxima concentração para o período mencionado, sendo uma a pluma residual do descarte anterior. Ou seja, como o intervalo entre os descartes é superior a 7 horas, a operação de um descarte subsequente promoveu a formação da segunda pluma sem que a pluma anterior tivesse se diluído por completo no sistema marinho. Quanto à influência oceanográfica sobre as plumas, é possível observar o padrão oscilatório da maré (de sizígia) entre o posicionamento das mesmas.



**Figura 39** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 38, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro).



**2º instante de tempo (17/02 – 8:20h GMT):**

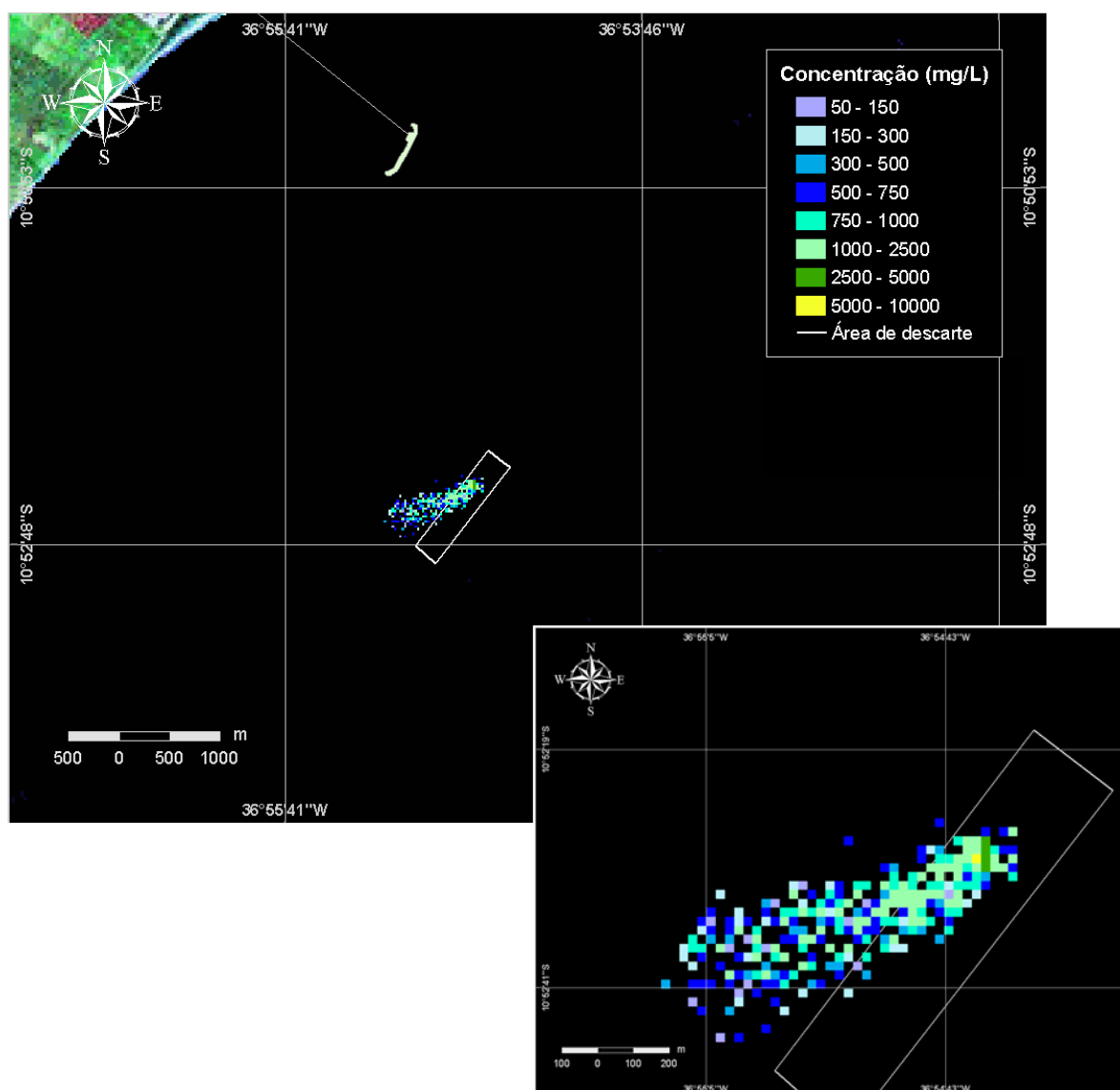
Maré: quadratura → enchente

Corrente: SW

Vento: NNE

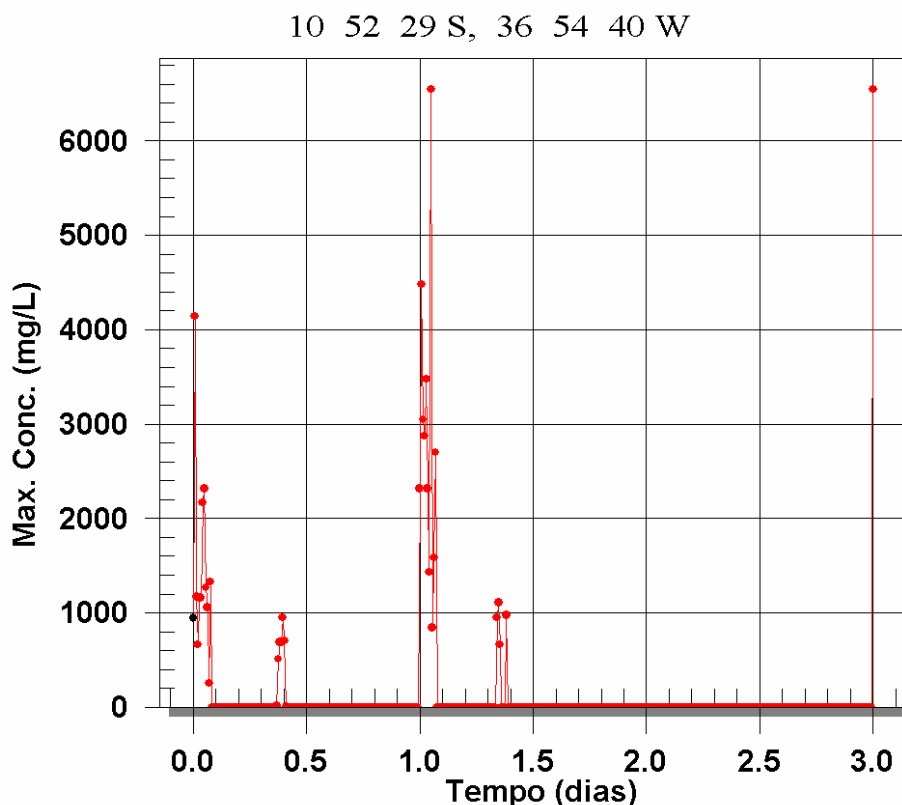
Concentração máxima: 6.544 mg/L

Área aproximada de influência: 0,32 km<sup>2</sup>



**Figura 40** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de enchente em maré de quadratura (17/02 – 8:20h GMT).

A Figura 40 ilustra a pluma de sedimentos na coluna d'água em seu instante de maior concentração para o período de maré de quadratura, a qual, diferentemente do cenário anterior, quando o período simulado englobava um período de maré de sizígia, apresenta uma pluma apenas. A não formação de duas plumas está relacionada pela eficácia das correntes induzidas pela maré em dispersar a pluma inicial. Como as correntes de maré no ciclo de maré de quadratura possuem intensidades inferiores em intensidade às induzidas por ciclo de maré de sizígia, o descarte subsequente promove a adição dos sedimentos atuais à pluma residual pluma, ainda não totalmente dispersada, referente ao descarte anterior. Ainda neste contexto, é possível observar que o valor absoluto da concentração de sedimentos na coluna d'água é maior no período de maré de quadratura do que aquela no período de maré de sizígia.



**Figura 41** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 40, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro).

### 3º instante de tempo (21/02 – 9:00h GMT):

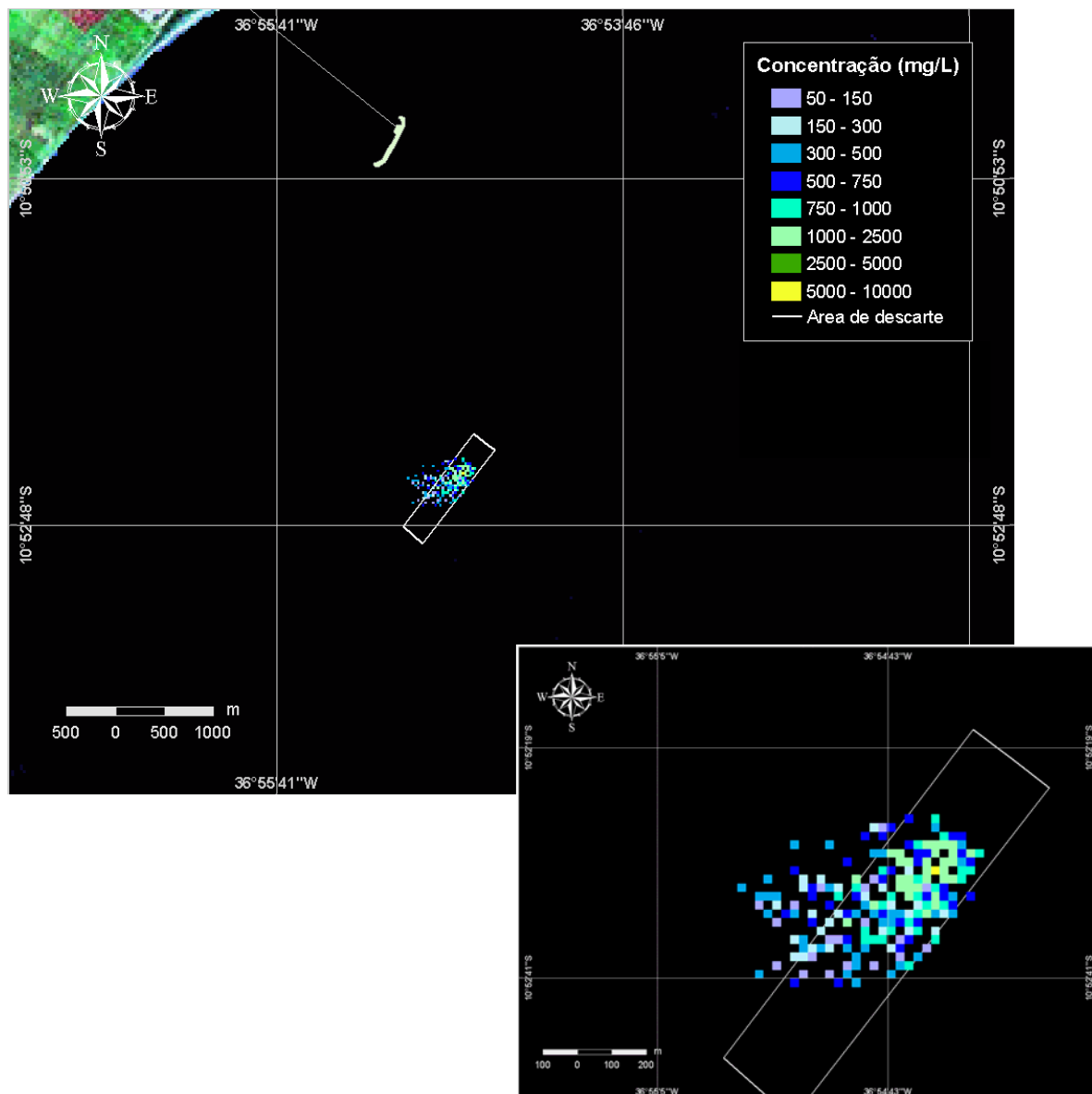
Maré: sizígia → vazante

Corrente: SSE

Vento: SE

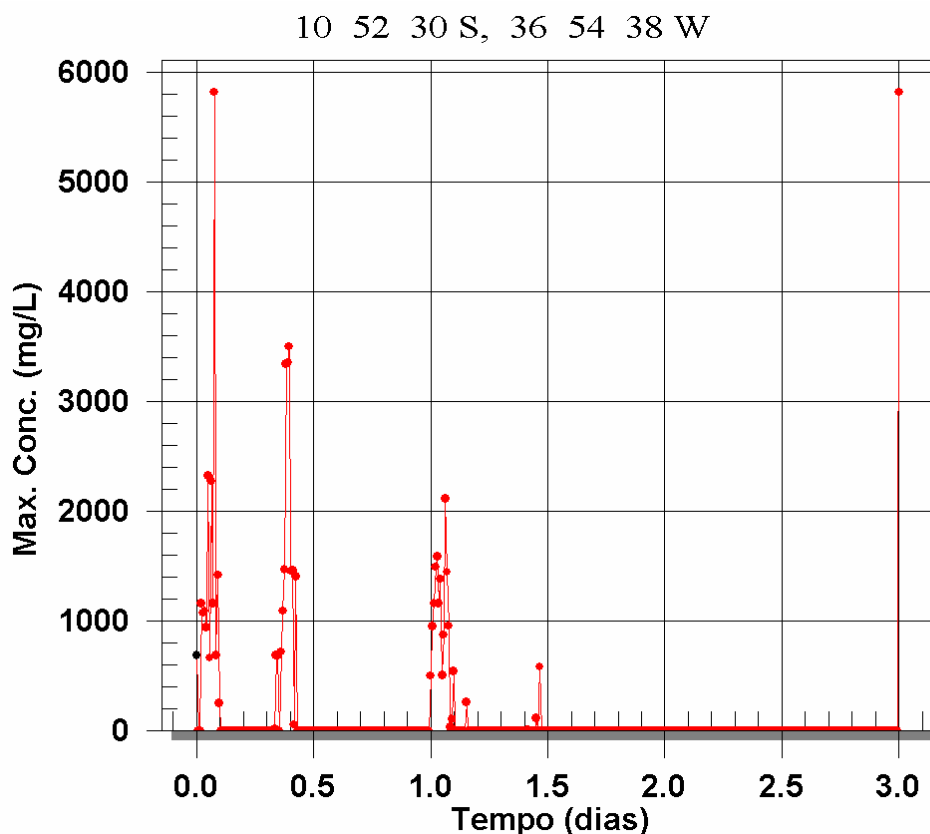
Concentração máxima: 5.814 mg/L

Área aproximada de influência: 0,24 km<sup>2</sup>



**Figura 42** - Cenário A\_TR1\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 1, localizado na Área A, para o instante de vazante em maré de sizígia.

A Figura 42 apresenta a pluma de sedimentos na coluna d'água durante as operações de descarte, para um período englobando um ciclo de maré de sizígia e uma condição meteorológica (vento) anômala ao padrão típico local. Não obstante, obteve-se uma pluma de sedimento na coluna d'água análogo aquele apresentado na Figura 40, quando o ciclo de maré era de quadratura e vento típico. Assim, apesar da corrente de maré favorecer a advecção e dispersão da pluma (maré de sizígia), o vento teve papel preponderante na forma e na concentração de sedimentos na coluna d'água da mesma.



**Figura 43** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 42, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro).

Em continuidade, a apresentação dos cenários das operações de descarte de material dragado na região, a seguir, são apresentadas os cenários referentes à Área B, Trechos 2 e 3. É importante mencionar que as características da dragagem (tipo de draga e capacidade da cisterna) nesta área permitem uma frequência de descarte (11 ao dia) superior aquela possibilitada nos descartes realizados na Área A (2 ao dia).

Genericamente, o aumento na frequência de descarte dos sedimentos acarreta que descartes subseqüentes sejam realizados sem que os sedimentos, devidos a descartes anteriores, tenham-se dissipados por completo na região, aos níveis mínimos de concentração apresentados nos resultados (50 mg/L). Por conseguinte, as plumas de sedimentos resultantes de tais descartes apresentam um aspecto alongado, por alusão a somatória da pluma do descarte atual com as concentrações na coluna d'água remanescentes de descartes anteriores.

#### **IV.5.2.1.2 Área B – Trecho 2**

As Figuras 44, 46 e 48 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de descarte na Área B – Trecho 2. Já as Figuras 45, 47 e 49 apresentam as séries temporais de 3 dias para a posição geográfica de máxima concentração, que incluem os instantes de tempo selecionados.

##### **1º instante de tempo (07/02 – 3:50h GMT):**

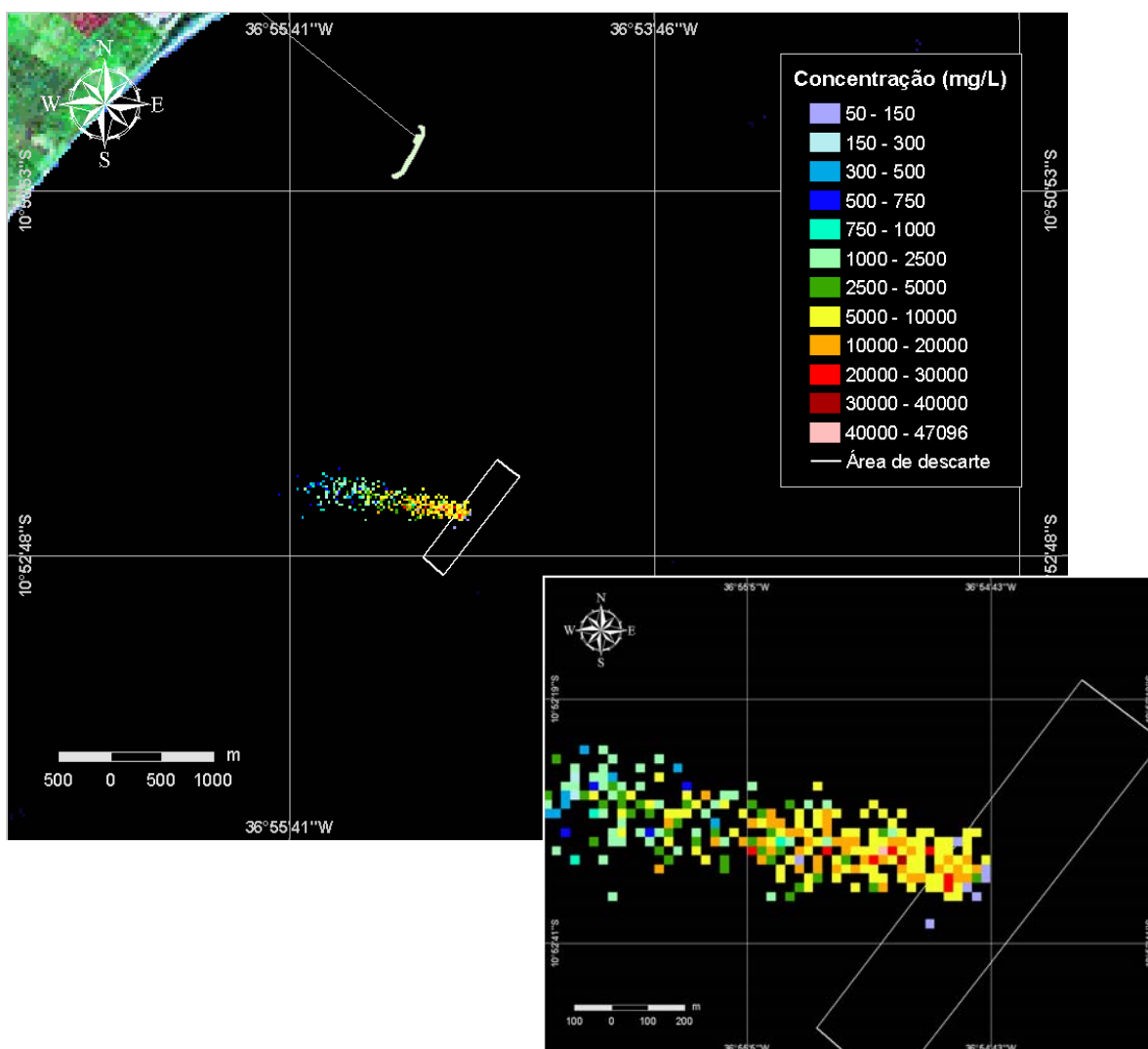
Maré: sizígia → enchente

Corrente: W

Vento: E

Concentração máxima: 44.923 mg/L

Área aproximada de influência: 0,62 km<sup>2</sup>

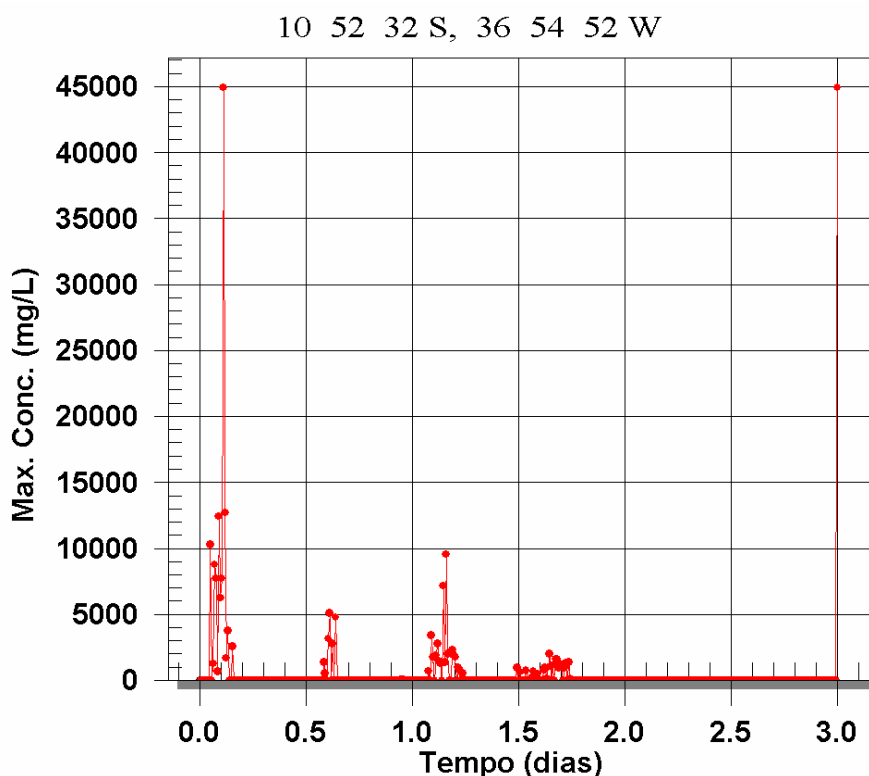


**Figura 44** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de sizígia.

A conjunção de corrente de maré e vento apresentou o potencial de alinhar, a estes, a pluma de sedimentos na coluna d'água (Figura 44). Como mencionado anteriormente, o aspecto alongado da pluma deve-se à frequência estimada de descartes (11 vezes ao dia), o que promove o efeito somatório da concentração de sedimentos na coluna d'água referente ao descarte atual e aos descartes anteriores.

A Figura 45 apresenta a série temporal da concentração de sedimentos na coluna d'água para o ponto geográfico que apresentou a máxima concentração de

sedimentos apresentado na figura anterior (Figura 44). Nota-se que, o ponto geográfico de máxima concentração para dado instante de tempo (Figura 45), não necessita, fundamentalmente, experimentar concentrações relevantes, isto é, acima da concentração mínima de corte de apresentação dos resultados (50 mg/L). Como citado anteriormente, a concentração nula de sedimentos na coluna d'água, para qualquer ponto geográfico da região, somente evidencia que não houve a passagem da pluma por tal posição, durante aquele instante. Ainda com relação à série temporal apresentada na Figura 45, observam-se picos de concentração com intervalos de seis horas. Como a advecção e dispersão da pluma está intrinsecamente relacionada as correntes de maré (caráter barotrópico da região), tais picos fazem referência às estofas de maré. Nestes instantes a corrente de maré é praticamente nula, o que resulta em um baixo nível de advecção e dispersão dos sedimentos descartados.



**Figura 45** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 44, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro).

**2º instante de tempo (17/02 – 19:20h GMT):**

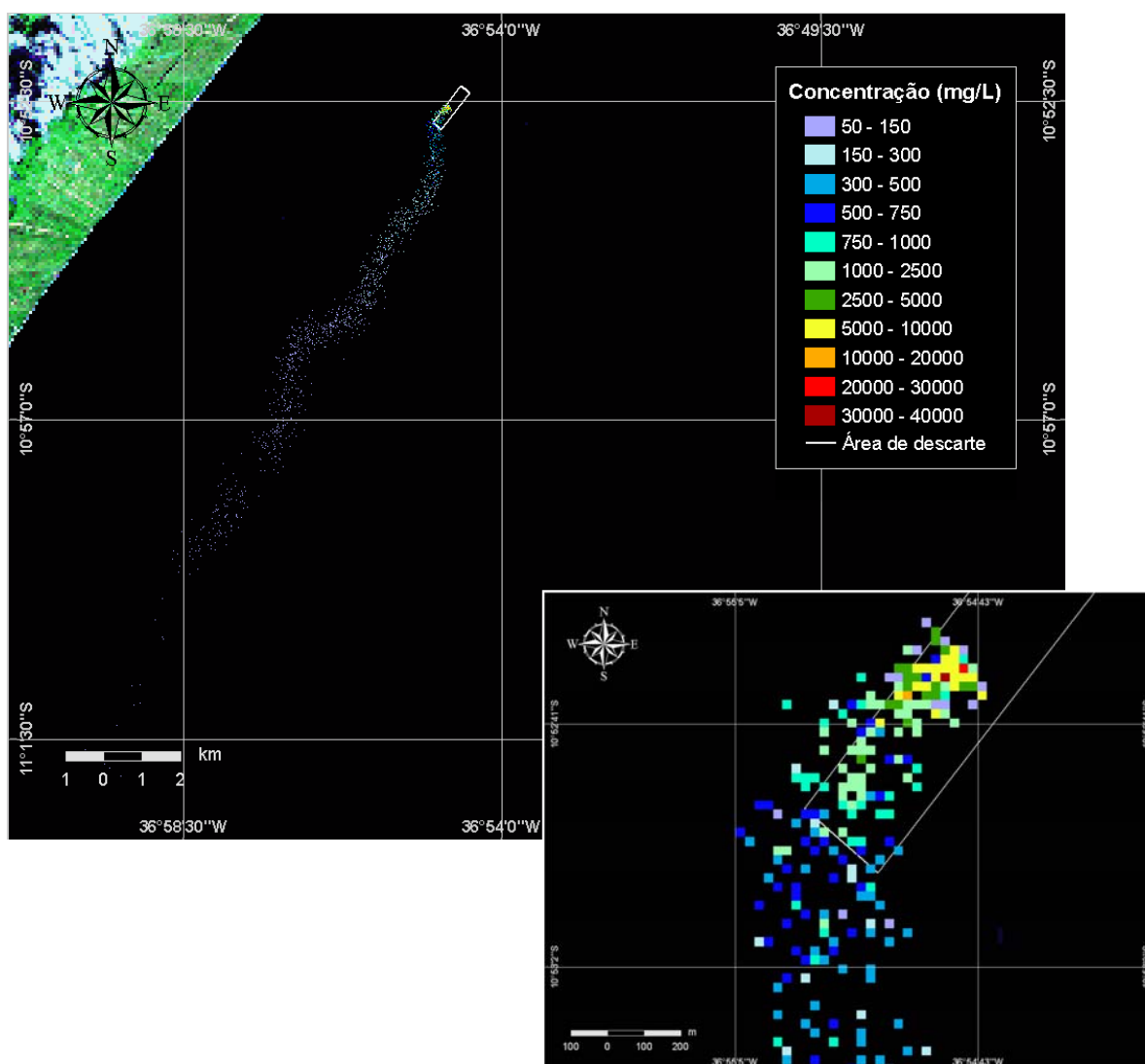
Maré: quadratura → enchente

Corrente: WSW

Vento: NNE

Concentração máxima: 37.455 mg/L

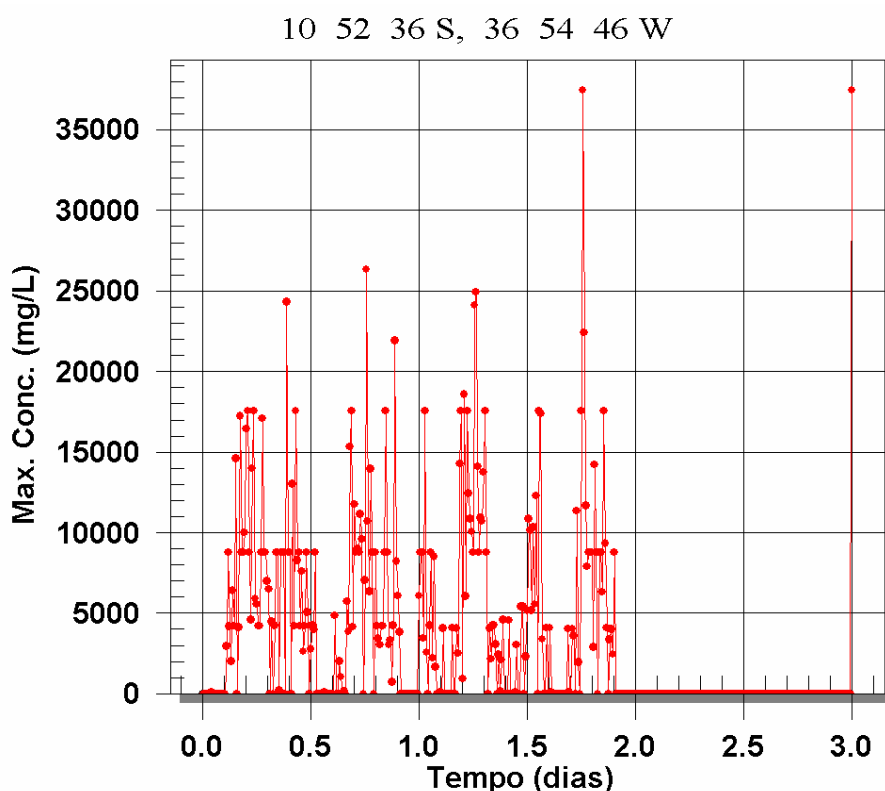
Área aproximada de influência: 12,00 km<sup>2</sup>



**Figura 46** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de quadratura.



As condições meteo-oceanográficas do instante de tempo apresentado na Figura 46 favorecem a dispersão e o alongamento da pluma (além do fato da frequência de descartes – como já citado anteriormente). Embora a máxima concentração durante o período de maré de quadratura seja menos favorável ao alongamento da pluma, neste caso, a frequência dos descartes desempenhou um papel preponderante.



**Figura 47** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 46, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro).

A Figura 47 reforça o papel importante que o vento exerce na concentração máxima de sedimentos na coluna d'água, tal qual apresentada na Figura 46. Observa-se na Figura 47 que o ciclo de maré (evidente na série temporal de concentrações apresentada na Figura 45) não se apresenta de maneira pronunciada, mostrando a ação do vento sobre a corrente, e, por conseguinte, na advecção e na dispersão da pluma.

**3º instante de tempo (22/02 – 15:20h GMT):**

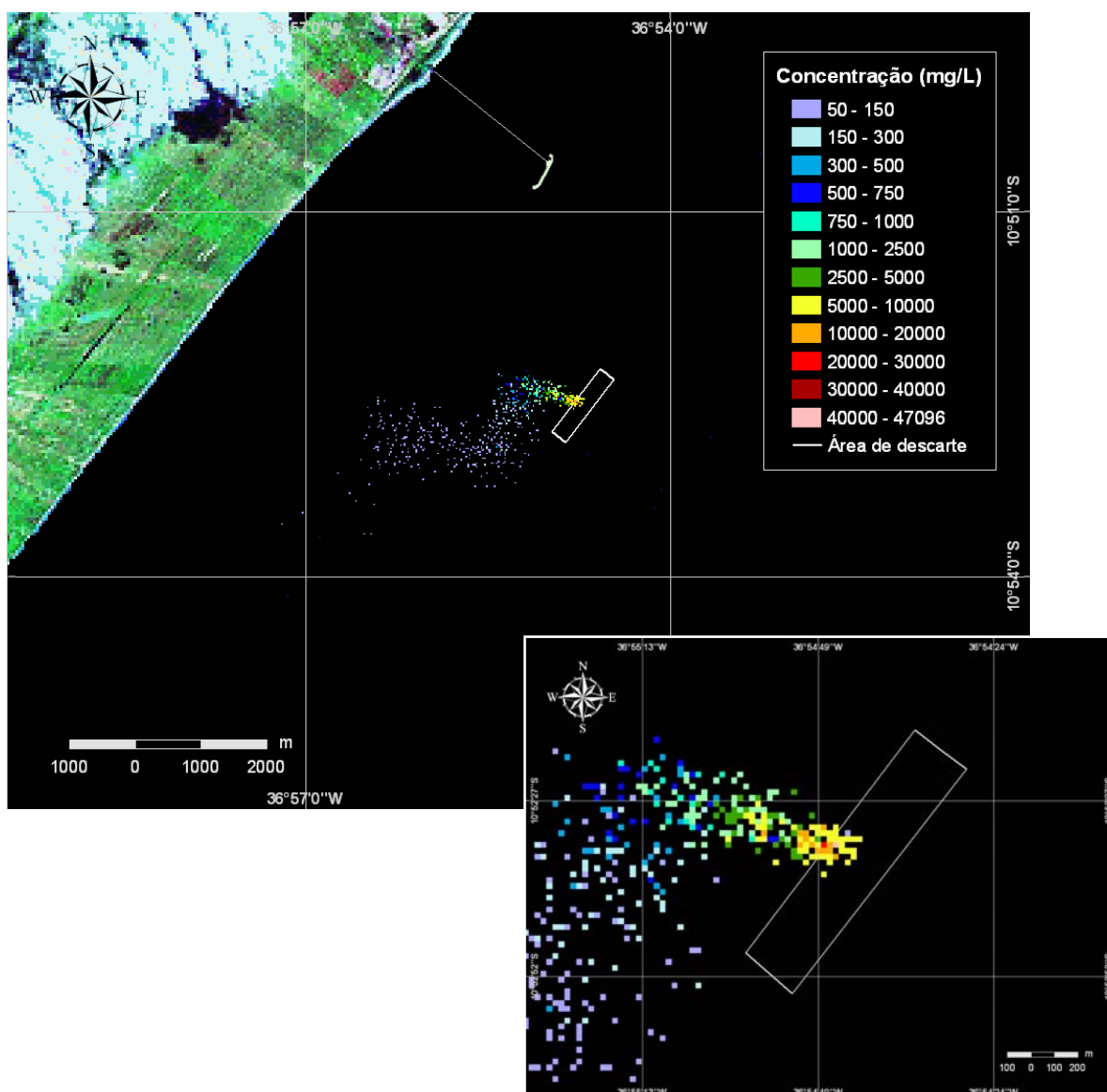
Maré: sizígia → enchente

Corrente: WNW

Vento: SE

Concentração máxima: 47.096 mg/L

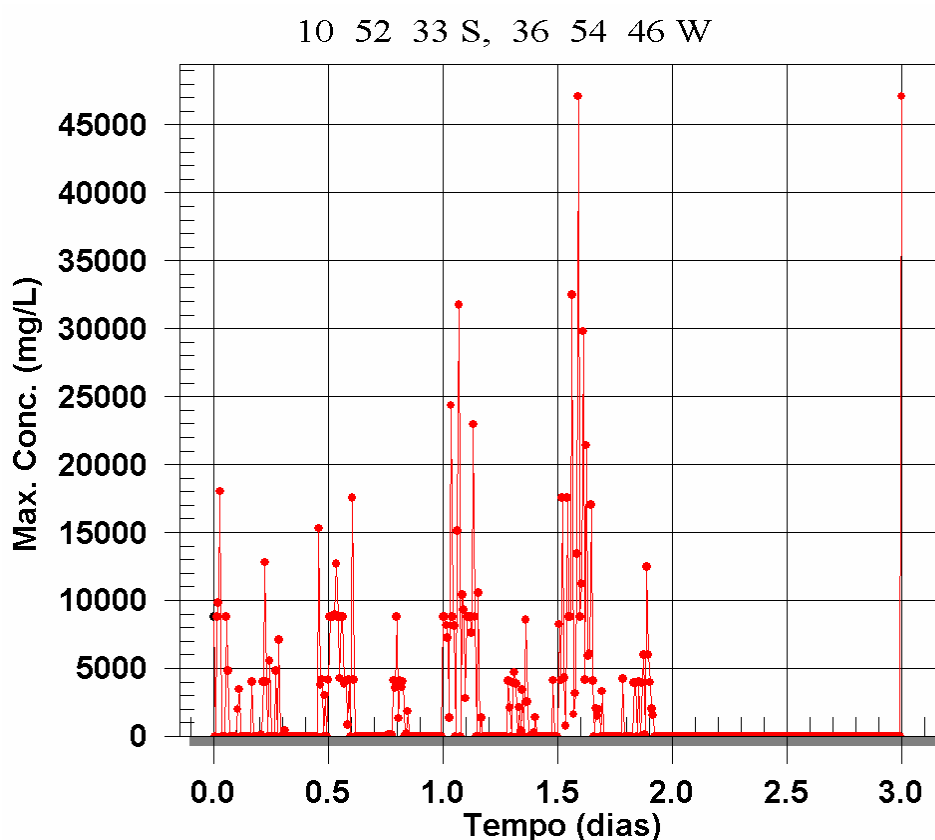
Área aproximada de influência: 4,28 km<sup>2</sup>



**Figura 48** - Cenário B\_TR2\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 2, localizado na Área B, para o instante de enchente em maré de quadratura.

A Figura 48 apresenta uma pluma de sedimentos evidenciando o caráter oscilatório que a maré impõe à corrente e, conseqüentemente, para a advecção e para a dispersão da pluma de sedimentos na coluna d'água.

Em uma análise visual da Figura 49, observa-se um período de aproximadamente seis horas. Tal período está relacionado ao período da maré na região – marés semi-diurnas. Portanto, e assim como exposto na Figura 45, fica evidenciada a importância das marés dispersão das plumas de sedimento na coluna d'água durante as operações de descarte.



**Figura 49** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 48, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro).

### **IV.5.2.1.3 Área B – Trecho 3**

As Figuras 50, 52 e 54 apresentam ilustrações para três instantes de tempo com as máximas concentrações de sedimentos na coluna d'água durante o processo de descarte na Área B – Trecho 3. Enquanto que as Figuras 51, 53 e 55 apresentam as séries temporais de 3 dias para a posição geográfica de máxima concentração, que incluem os instantes de tempo selecionados. Os instantes em questão são aqueles apresentados nas respectivas figuras imediatamente anteriores, apresentados na forma de mapas bidimensionais para a pluma de sedimentos na coluna d'água.

Com o intuito de evitar análises repetitivas dos resultados abaixo, quando oportuno, a análise será referenciada as análises já descritas anteriormente.

#### **1º instante de tempo (07/02 – 5:30h GMT):**

Maré: sizígia → vazante

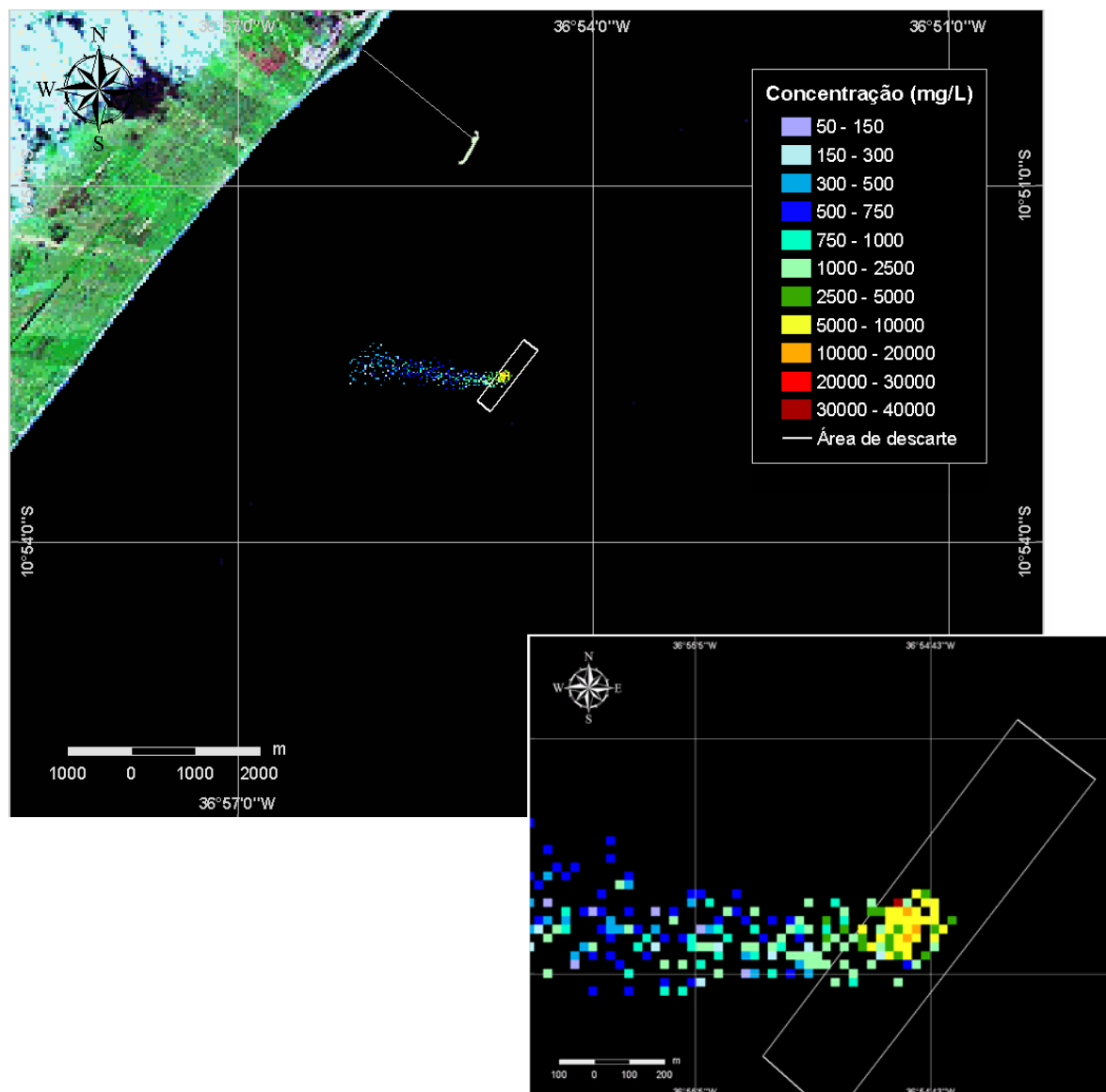
Corrente: S

Vento: E

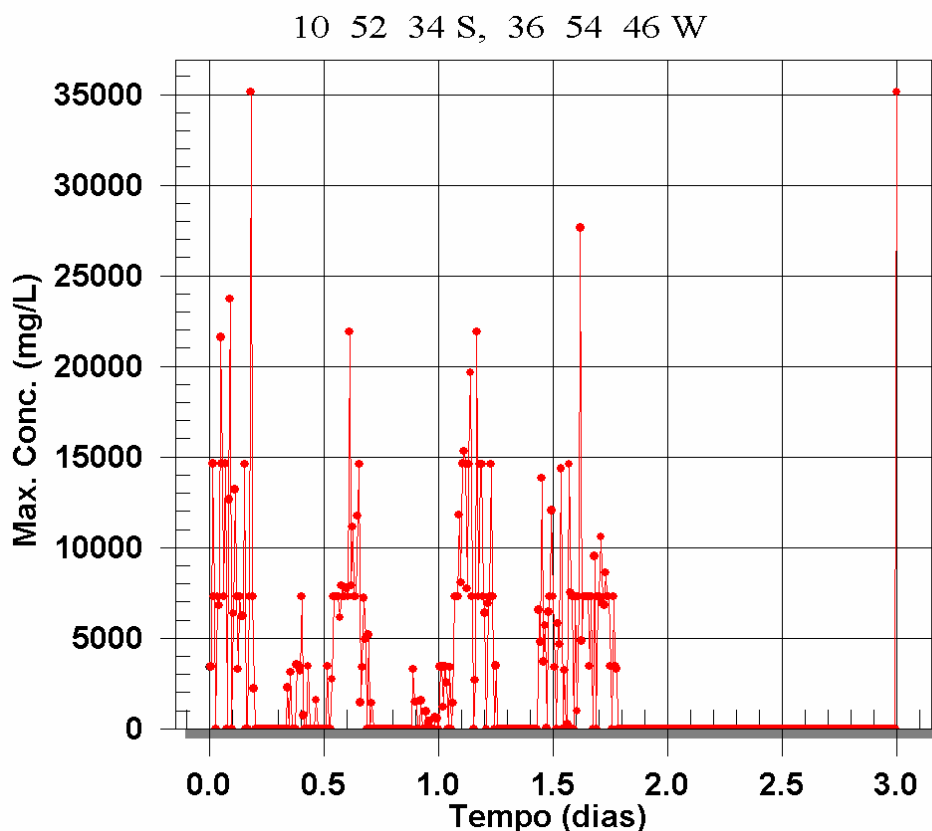
Concentração máxima: 35.138 mg/L

Área aproximada de influência: 1,03 km<sup>2</sup>

As análises físicas para as Figuras 50 e 51, a seguir, são análogas às apresentadas para as Figura 44 e 45, respectivamente.



**Figura 50** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia.



**Figura 51** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 50, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 07 de fevereiro).

**2º instante de tempo (17/02 – 9:20h GMT):**

Maré: quadratura → vazante

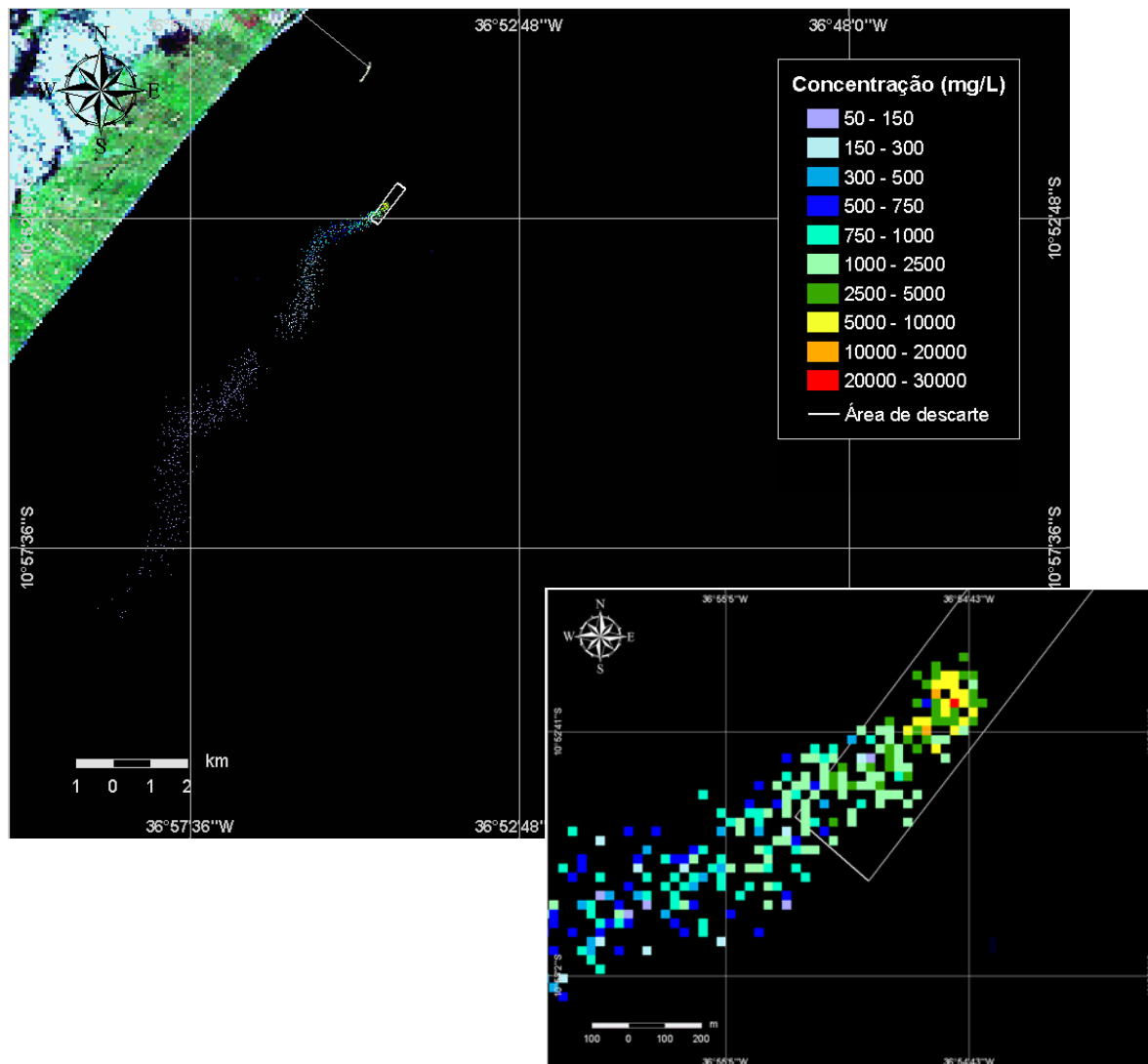
Corrente: SW

Vento: NE

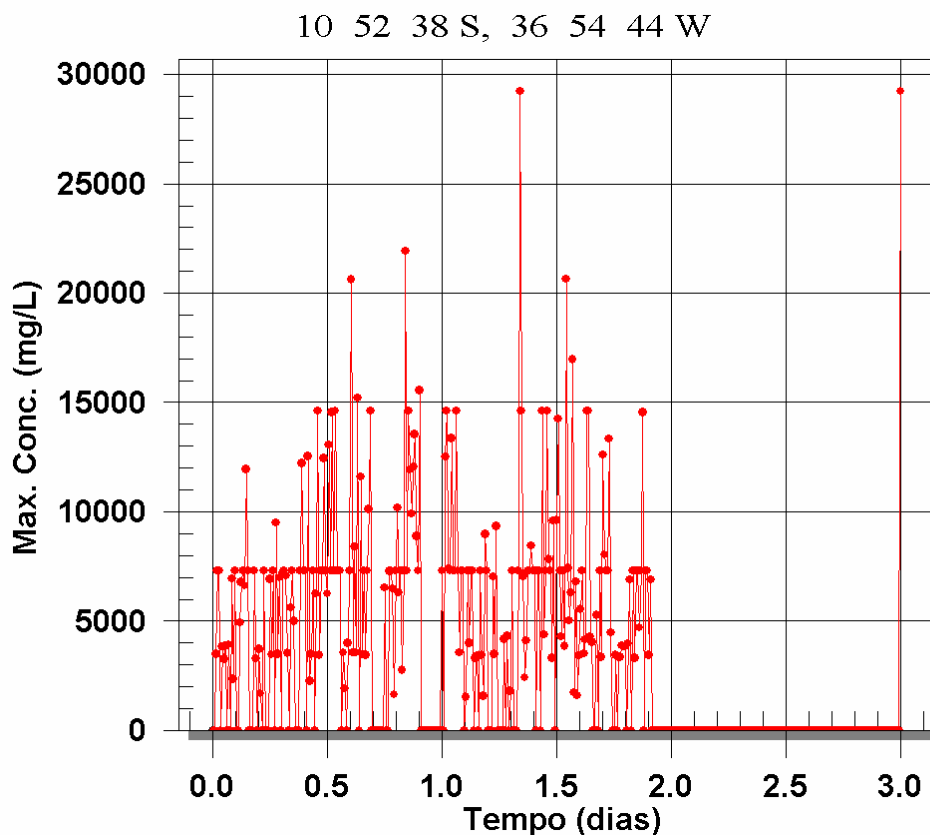
Concentração máxima: 29.227 mg/L

Área aproximada de influência: 11,50 km<sup>2</sup>

As análises das Figuras 52 e 53, a seguir, são análogas àquelas apresentadas para as Figuras 46 e 47.



**Figura 52** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de quadratura.



**Figura 53** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 52, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 16 de fevereiro).

**3º instante de tempo (21/02 – 3:50h GMT):**

Maré: sizígia → vazante

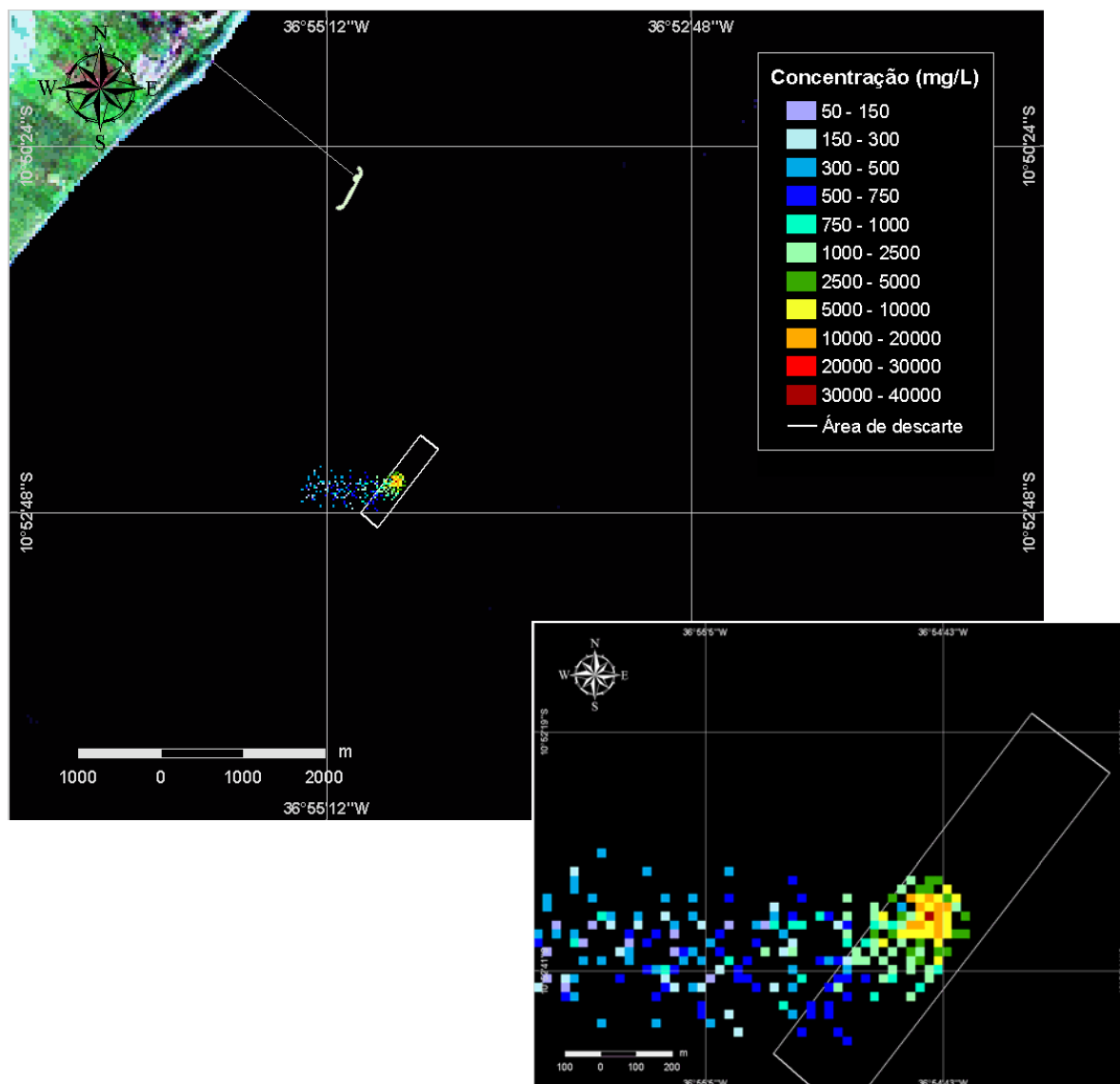
Corrente: SSE

Vento: ESE

Concentração máxima: 36.539 mg/L

Área aproximada de influência: 0,49 km<sup>2</sup>

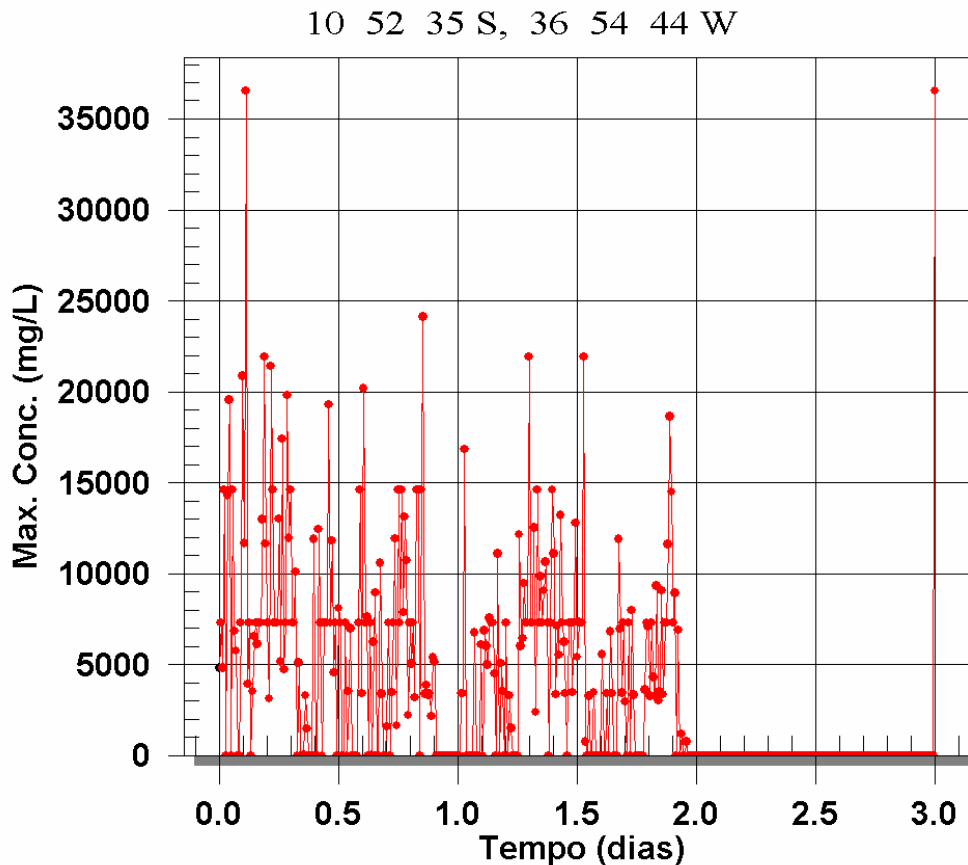




**Figura 54** - Cenário B\_TR3\_DE - concentração (mg/L) de sedimentos na coluna d'água para a simulação do Trecho 3, localizado na Área B, para o instante de vazante em maré de sizígia.

A conjugação de corrente de maré e vento em oposição apresentou as condições em que não prevalecesse uma única força na configuração da pluma de sedimentos (Figura 54). Através da Figura 55, verifica-se o papel importante que o vento exerce na concentração máxima de sedimentos na coluna d'água, tal qual apresentada na Figura 46. Ao analisar esta série temporal

(Figura 55), não se observa claramente o ciclo de maré, evidenciando a ação do vento sobre a corrente e, por conseguinte, na advecção e na dispersão da pluma.

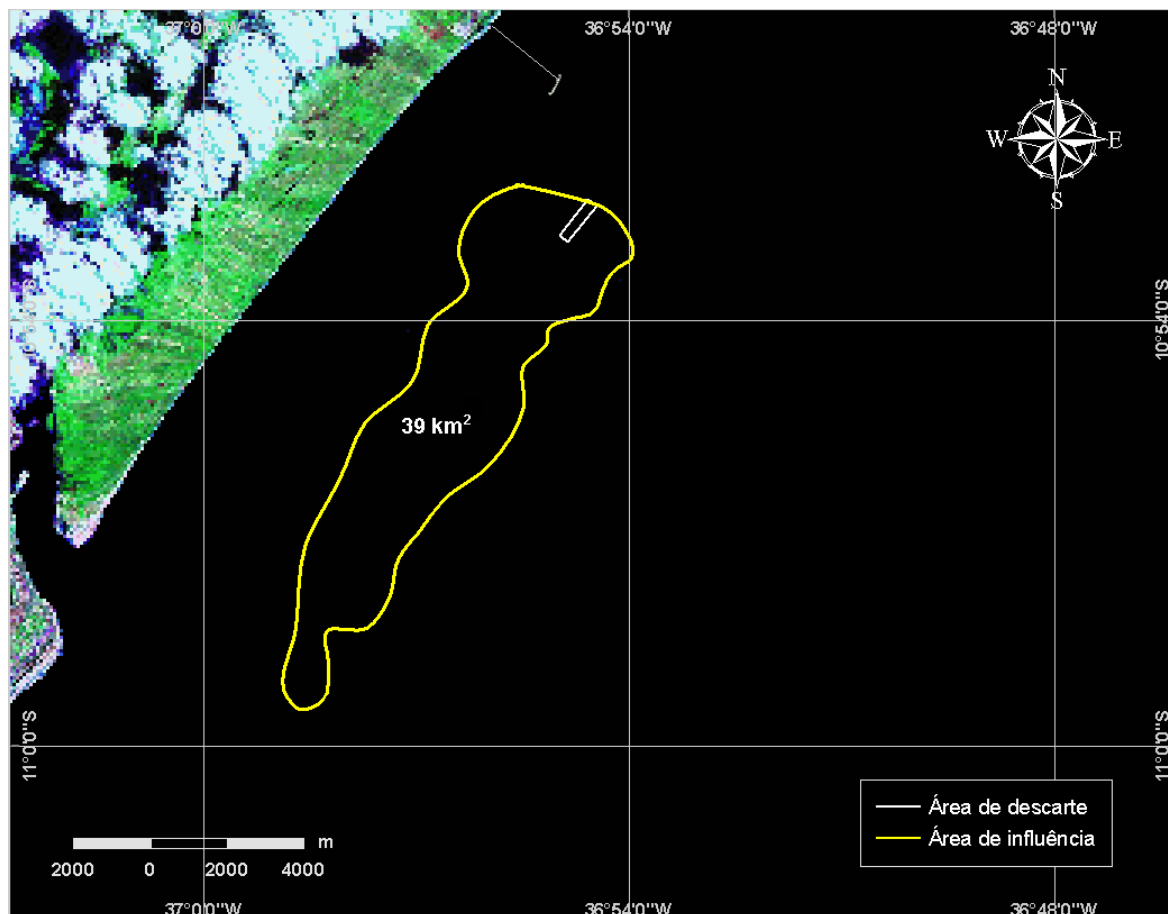


**Figura 55** - Série temporal para a posição de maior concentração de sedimentos na coluna d'água apresentada na Figura 54, ao longo de três dias (instante inicial 01:00 h GMT do dia 21 de fevereiro).

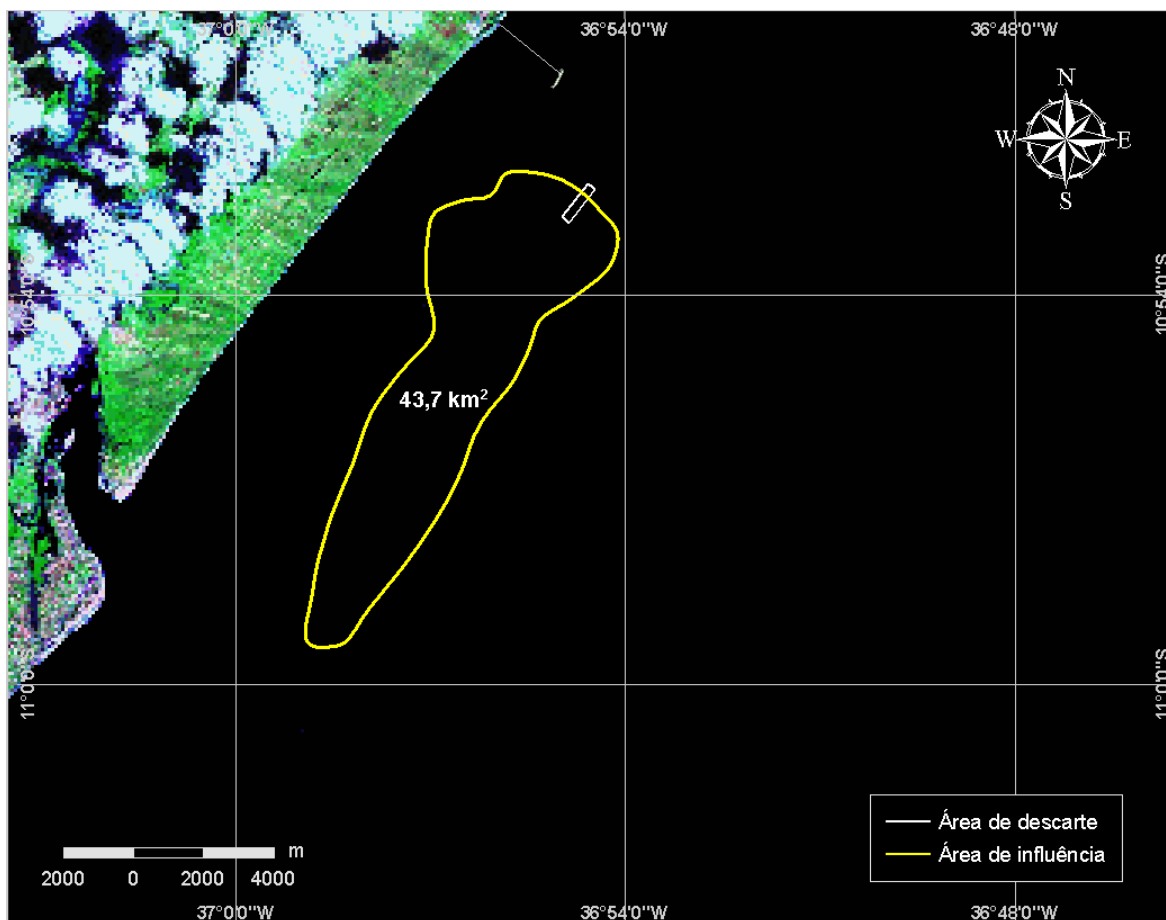
#### IV.5.2.2 Área de Influência das Plumas

As Figuras 56 a 58 apresentam as envoltórias das trajetórias das plumas de sedimento na coluna d'água para os Trechos 1, 2 e 3, segundo o critério de maior representatividade de influência adotado na modelagem das operações de descarte. Observa-se que os Trechos 2 e 3 apresentaram as maiores áreas de influência (44 e 47 km<sup>2</sup>, respectivamente). Comparado ao Trecho 1 (2 descartes

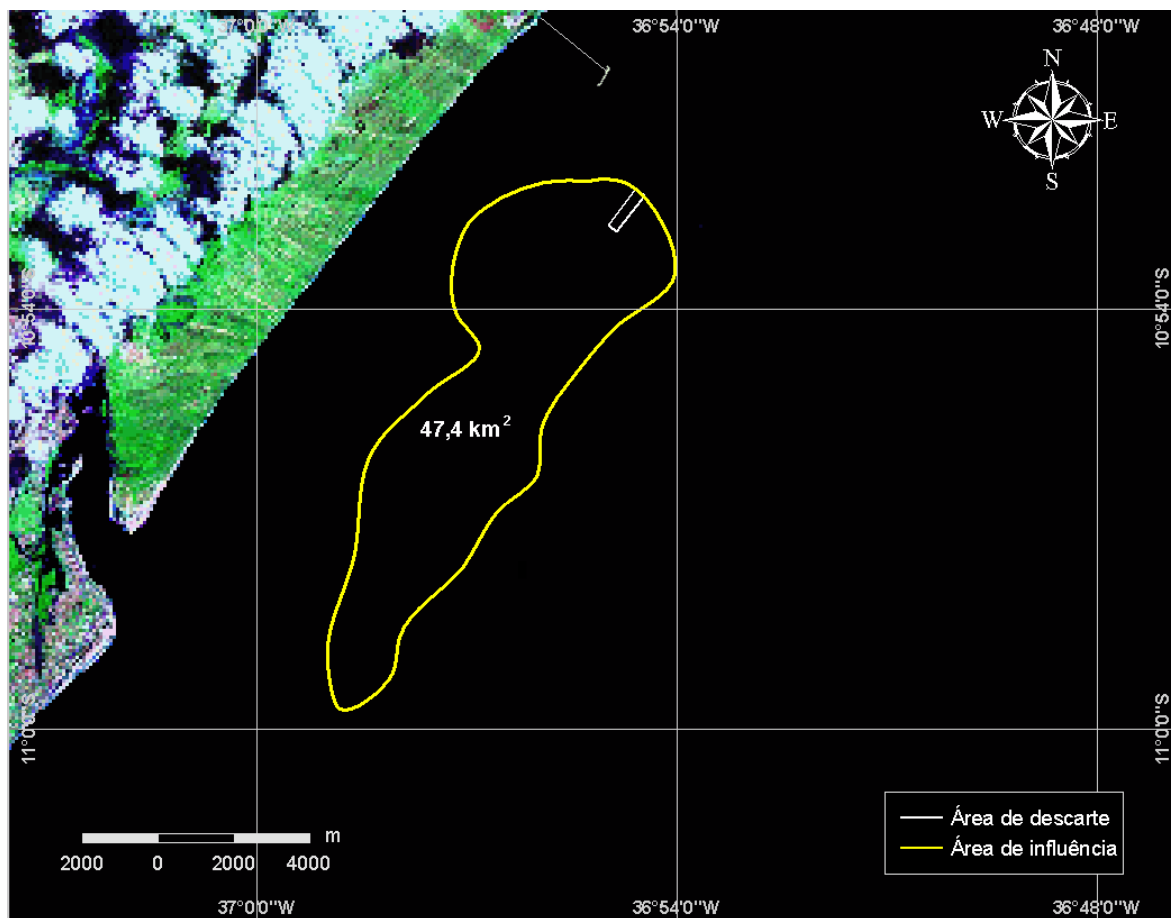
ao dia), nota-se que em ambos os trechos foram descartados os maiores volumes de sedimento (11 descartes ao dia). Além disso, no Trecho 3, a massa de sedimentos descartada por ciclo é maior que a dos demais trechos (pois o conteúdo de água presente na cisterna, devido ao material dragado ser mais arenoso, é menor).



**Figura 56** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 1 da Área A.

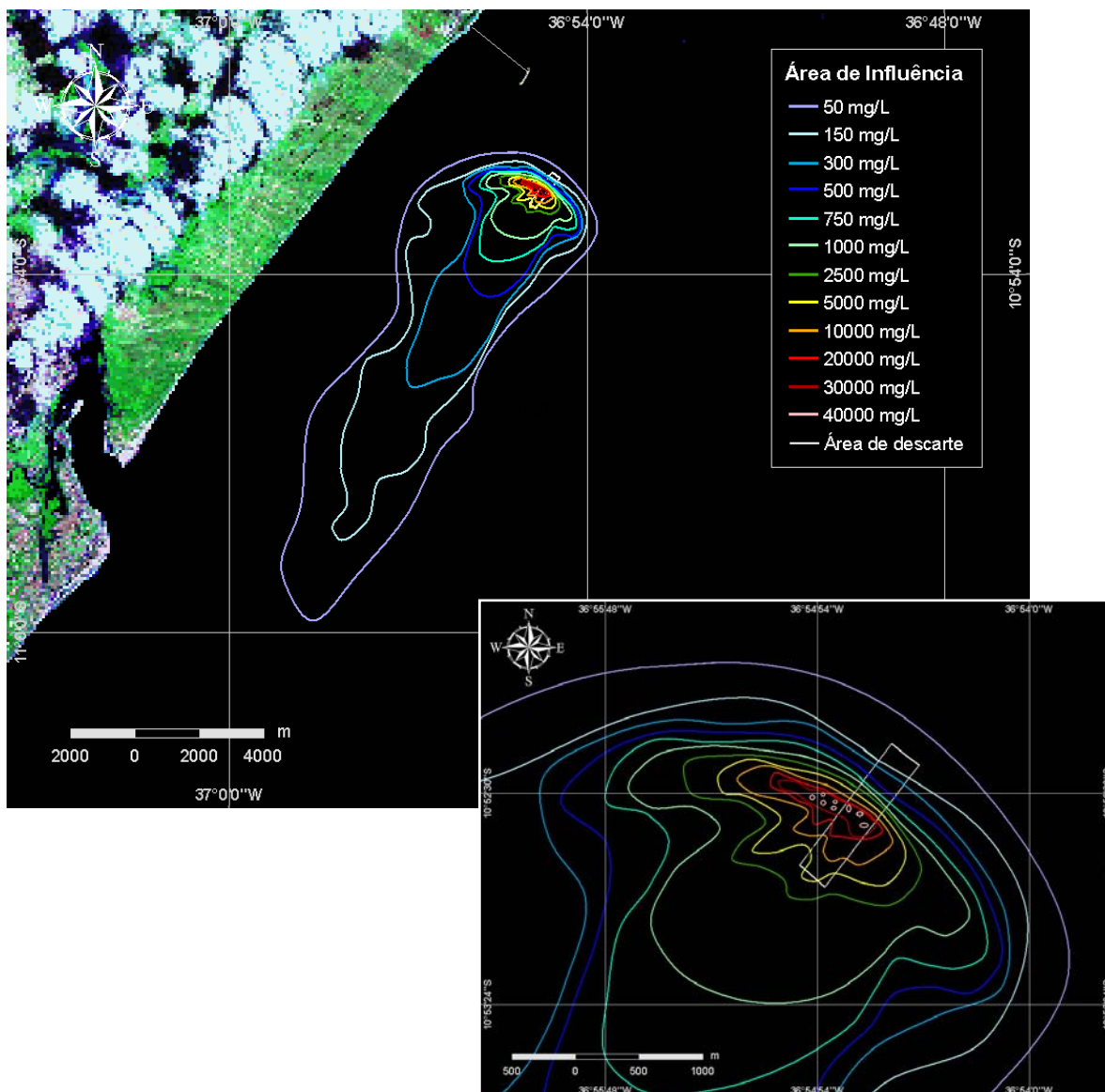


**Figura 57** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 2 da Área B.



**Figura 58** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte no Trecho 3 da Área B.

A Figura 59 apresenta a somatória das envoltórias das trajetórias das plumas de sedimento na coluna d'água provenientes das operações de descarte nos três trechos, para concentrações maiores ou iguais a 50 mg/L. Foram consideradas as envoltórias das plumas (todos os instantes de tempo) ao longo dos períodos significativos utilizados na apresentação dos resultados até então apresentados. A cobertura espacial total das plumas foi de 56,4 km<sup>2</sup>. Observa-se que as maiores concentrações de sedimento na coluna d'água (concentrações maiores que 20.000 mg/L) representam as menores áreas de abrangência e estão próximas da área de descarte.



**Figura 59** - Envoltória das trajetórias das plumas de sedimento referentes à modelagem das operações de descarte nos trechos 1, 2 e 3.

### IV.5.2.3 Sedimentos Depositados

A Tabela 10 fornece as características da deposição de sedimentos, calculadas pelo SSFATE, provenientes do descarte do volume total de material dragado nas áreas A e B. Essa tabela mostra a área coberta por depósitos de

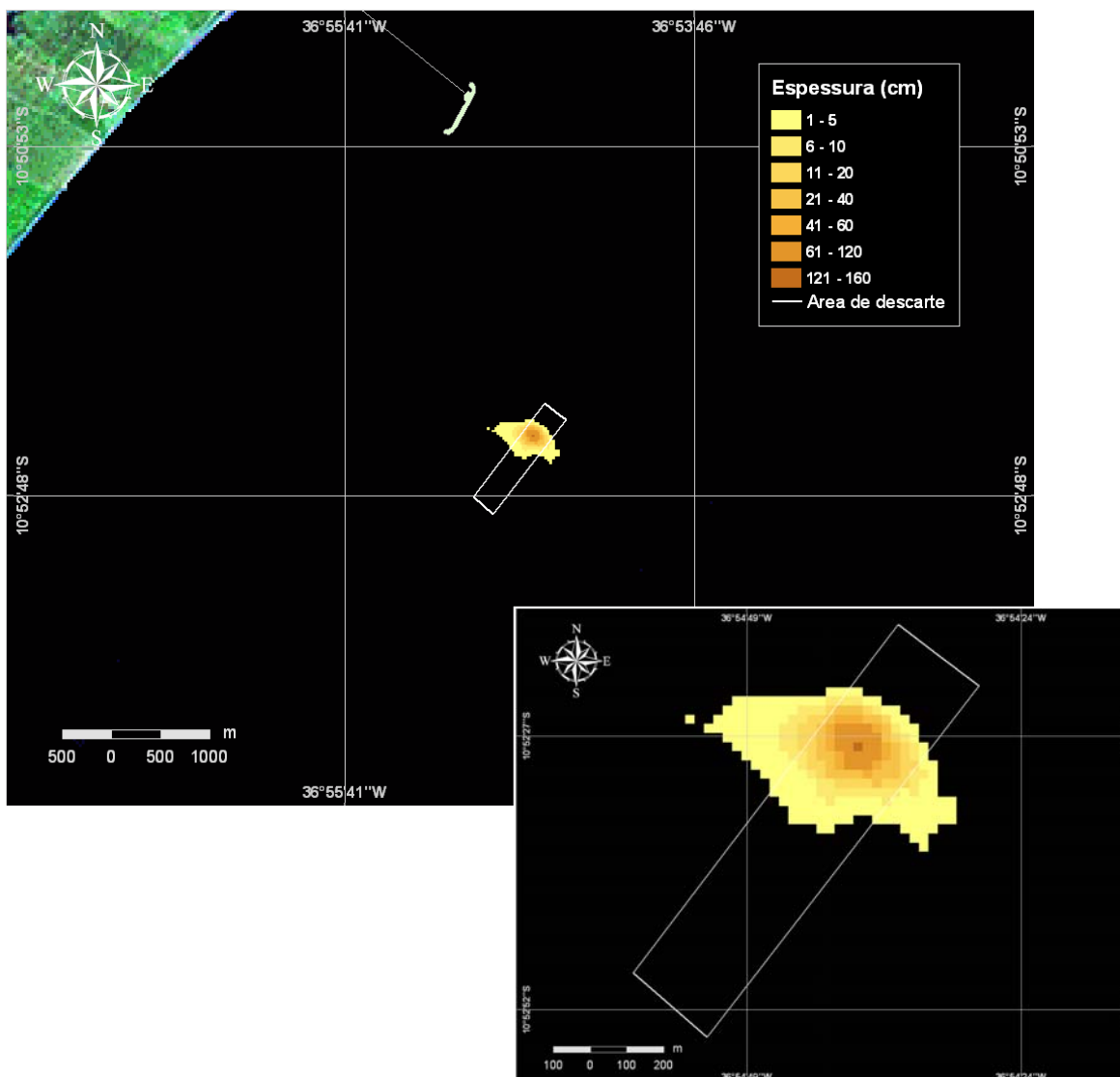
sedimento com espessuras maiores que 1 cm, as espessuras máximas depositadas, além da porcentagem de sedimentos depositados.

Salienta-se que as espessuras calculadas são as máximas possíveis considerando-se o número de descartes diários e o volume total dragado em cada trecho. Adicionalmente, não foram considerados os processos de remobilização dos sedimentos depositados. Observa-se que praticamente todo o sedimento descartado depositou-se ao final das simulações.

**Tabela 10 - Características da deposição de sedimentos descartados na região do TMIB.**

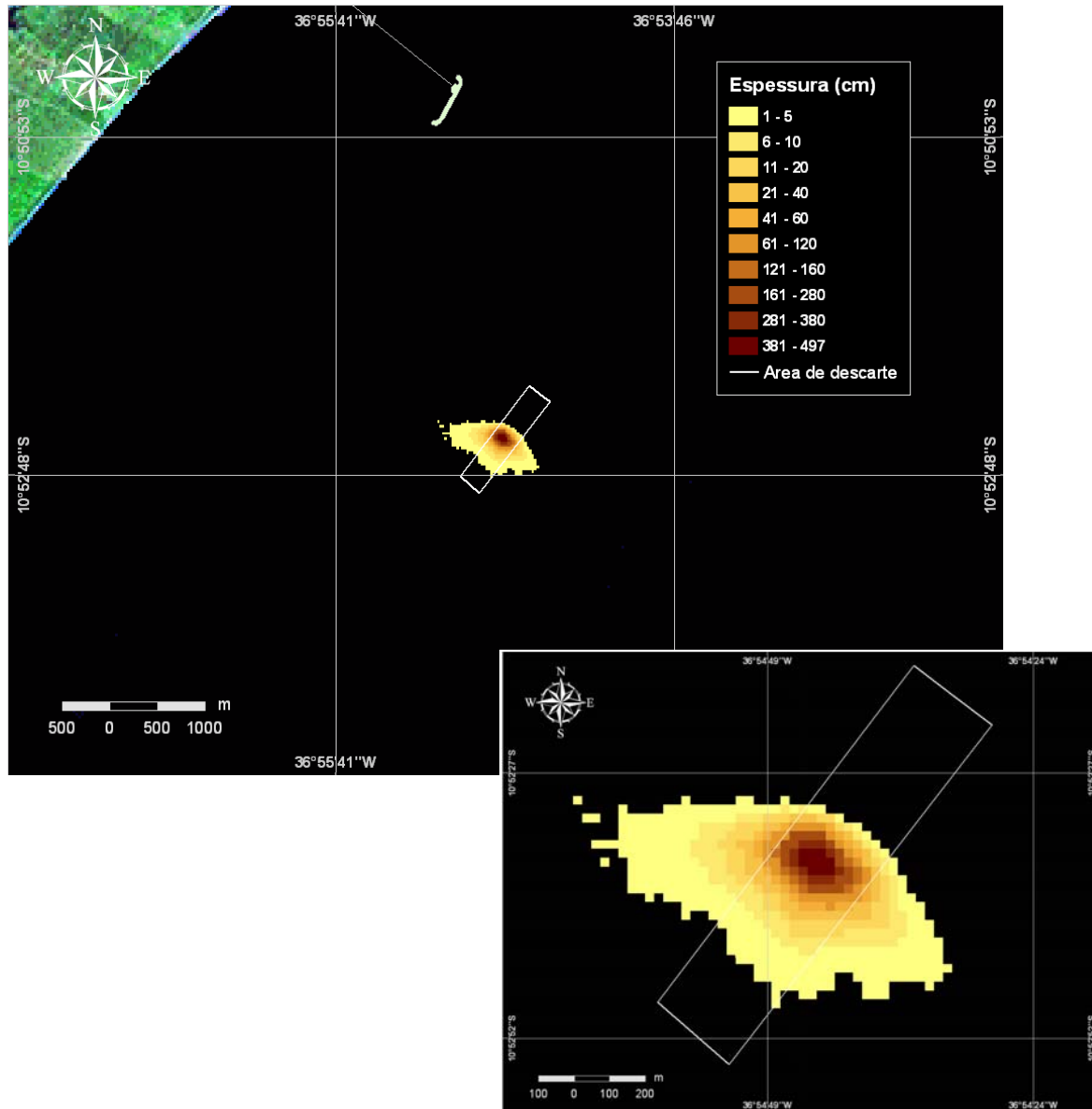
CENÁRIOS	ÁREA (km <sup>2</sup> ) TOTAL DE ABRANGÊNCIA DE ESPESSURAS MAIORES QUE 1 cm	ESPESSURA MÁXIMA DEPOSITADA (cm)	% DEPOSITADA (CONSIDERANDO TODAS AS ESPESSURAS)
A_TR1_DE	0,18	128	99,9
B_TR2_DE	0,37	497	99,9
B_TR3_DE	0,20	380	99,9

As Figuras 60 a 62 mostram os resultados referentes ao sedimento depositado na área de descarte. Observa-se que a simulação que apresentou as maiores espessuras (497 cm) de sedimento depositado foi para os descartes realizados a partir do Trecho 2, onde o volume total descartado é superior aos outros dois trechos.

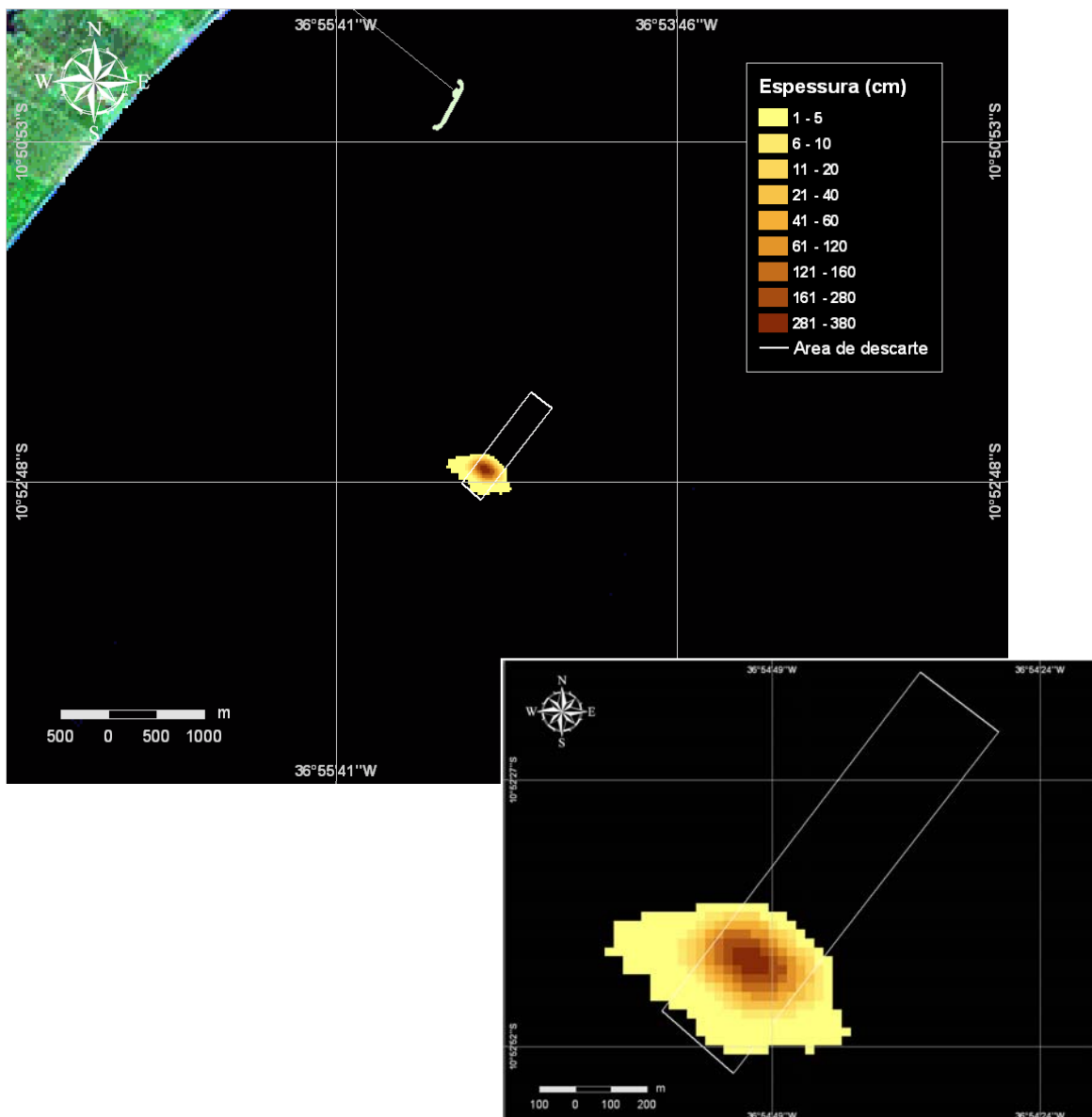


**Figura 60** - Cenário A\_TR1\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 1, localizado na Área A.



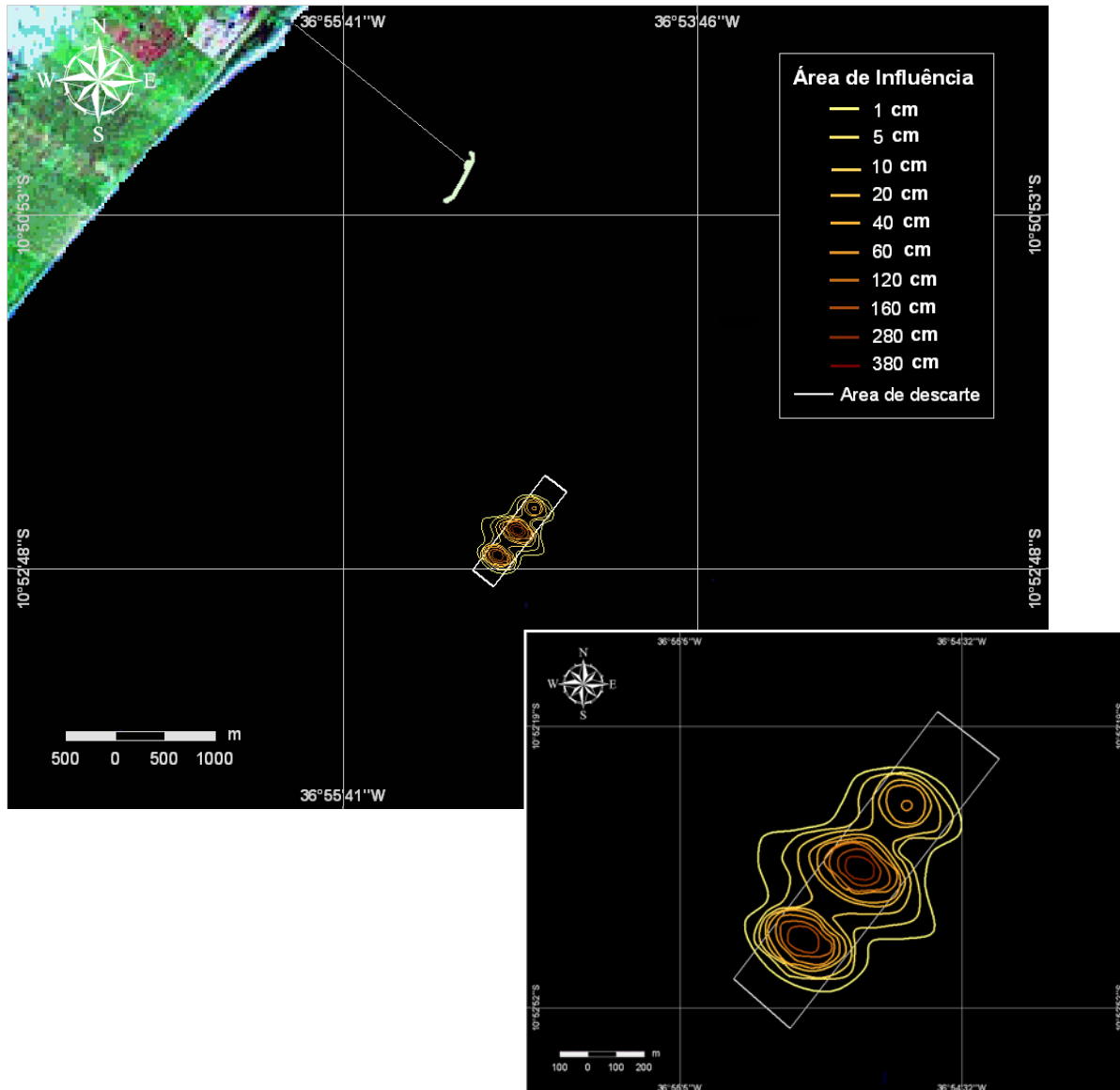


**Figura 61** - Cenário B\_TR2\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 2, localizado na Área B.



**Figura 62** - Cenário B\_TR3\_DE: espessura total (cm) de sedimentos depositados durante o descarte de material dragado no Trecho 3, localizado na Área B.

A Figura 63 apresenta a área de influência total dos depósitos de sedimento oriundos dos descartes efetuados a partir das operações de dragagem dos trechos 1, 2 e 3, para espessuras maiores ou iguais a 1 cm. Observa-se que a área de influência total é de 0,67 km<sup>2</sup> e que as maiores espessuras estão concentradas no interior da área de descarte.



**Figura 63** - Área de influência total dos descartes efetuados a partir das operações de dragagem dos trechos 1, 2 e 3.

## V CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo computacional SSFATE foi utilizado para simular a ressuspensão, dispersão e a deposição de sedimentos provenientes das operações de dragagem e descarte na região adjacente ao Terminal Marítimo Inácio Barbosa - TMIB, SE.

Devido às características do tipo de sedimento e diferentes maquinários utilizados nas operações de dragagem, as simulações foram realizadas dividindo-se as áreas de dragagem em três trechos. O Trecho 1, localizado na Área A, será dragado com uma draga menor e possui sedimento com o maior teor de sedimentos finos de todos os três trechos. Os Trechos 2 e 3, localizados na Área B, serão dragados com uma draga maior, sendo que o Trecho 3 possui sedimento com maior teor de areia, o que propicia uma maior efetividade de dragagem (*i.e.* um maior volume de material dragado por hora e descartado por ciclo, com menor conteúdo de água na cisterna da draga).

É importante salientar que o campo de correntes (responsável pela advecção da pluma) é fortemente influenciado pela oscilação de maré, como consequência do caráter barotrópico da região de interesse. Portanto, é de se esperar que a forma e extensão das plumas tenham estreita relação com a intensidade da maré. No que concerne à máxima concentração de sedimentos na coluna d'água, esta se refere a um evento peculiar devido à conjunção de vários fatores como a corrente local, maré e vento.

Com relação aos resultados das simulações durante as operações de dragagem, as maiores concentrações estão associadas aos períodos de maré vazante de sizígia e ao Trecho 1, cujo sedimento possui um maior teor de sedimentos finos quando comparado aos demais trechos. A maior concentração calculada de sedimento na coluna d'água foi de, aproximadamente, 997 mg/L (Trecho 1) e a direção preferencial de dispersão das plumas foi para SW, com exceção da condição de estofa de baixa-mar de quadratura do Trecho 2 (direção sul).

Com relação aos resultados das simulações das operações de descarte, a direção preferencial de dispersão das plumas variou entre as direções oeste e

sudoeste e as maiores concentrações estão associadas aos períodos de vazante de sizígia e aos Trechos 2 e 3, onde o volume de sedimentos descartados é maior quando comparado ao Trecho 1. Comparando os Trechos 2 e 3, o primeiro apresenta concentrações maiores devido ao maior teor de finos presente no sedimento descartado. Na região do ponto de descarte as maiores concentrações são observadas imediatamente após o início de cada descarte, não havendo indicação de acúmulo de material nessa região de um ciclo para outro. A maior concentração calculada de sedimento na coluna d'água foi de, aproximadamente, 47.096 mg/L (Trecho 2). Com relação às espessuras depositadas, praticamente todo o material descartado deposita-se no período simulado, com espessuras máximas da ordem de 128 cm no Trecho 1, 497 cm no Trecho 2 e 380 cm no Trecho 3. Salienta-se que as espessuras calculadas são as máximas possíveis (*i.e.* conservativas) considerando-se o volume total dragado em cada trecho e o número de descartes diários (efetuados em um único ponto de descarte para cada trecho dragado). Adicionalmente, a deposição de sedimentos calculada no SSFATE é acumulativa e não são considerados os processos de remobilização do sedimento.

As áreas de influência total das plumas de sedimento na coluna d'água nos três trechos considerados, para concentrações maiores ou iguais a 50 mg/L, foram de 22,5 km<sup>2</sup> para as operações de dragagem e de 56,4 km<sup>2</sup> para as operações de descarte. A área das plumas dos descartes é maior que as geradas pela dragagem, devido principalmente à maior quantidade de sedimentos disponíveis para a coluna d'água (por passo de tempo) durante as operações de descarte.

No caso das operações de dragagem, o Trecho 2 apresentou a maior área de influência (19 km<sup>2</sup>), provavelmente relacionada à maior taxa de sedimentos dragados por hora (quando comparado ao Trecho 1) e ao maior teor de sedimentos finos presente no material dragado (quando comparado ao Trecho 3). Nas operações de descarte, os Trechos 2 e 3 apresentaram as maiores áreas de influência (44 e 47 km<sup>2</sup>, respectivamente). Comparado ao Trecho 1, onde serão efetuados 2 descartes ao dia, nota-se que em ambos os trechos foram descartados os maiores volumes de sedimento (sendo 11 descartes ao dia). Além disso, no Trecho 3, a massa de sedimentos descartada por ciclo é maior que a

dos demais trechos (o conteúdo de água presente na cisterna é menor, devido ao material dragado ser mais arenoso).

A área de influência total dos sedimentos depositados durante as operações de descarte foi de 0,67 km<sup>2</sup>, para espessuras maiores ou iguais a 1 cm.

No geral, a região estudada possui uma boa dispersão para sedimentos em suspensão, sendo que as maiores concentrações na coluna d'água são encontradas próximas às áreas de dragagem e de descarte, e reduzem consideravelmente à medida que as plumas se afastam das mesmas.



---

## **VI BIBLIOGRAFIA**

**ASA (Applied Science Associates, Inc.), 2001.** SSFATE user manual version 4.0. 69pp.

**BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L., 1987.** A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. *Heaps (Ed.), Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models*. American Geophysical Union, pp. 1-16.

**CASTRO FILHO, B.M.C. & MIRANDA, L.B., 1998.** Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4° N and 34° S. *The Sea*. John Wiley & Sons, Inc. 11: p. 209-251.

**DOER (Dredging Operations and Environmental Research), 2000.** Description of the SSFATE numerical modeling system. Technical Note. ERDC-TN-DOER-E10.

**FONTES, A.L. 1990.** Aspectos geológicos e geomorfológicos da planície costeira entre os estuários dos rios Sergipe e Japarutuba, Sergipe. In: *Congresso Brasileiro de Geologia 36*, Natal. Anais: 36(2): p. 700-708.

**KOUSKY, V.E, 1980.** Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Mon. Weather Rev.*, 108: p. 488-498.

**MELLOR, G.L. & YAMADA, T., 1982.** Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, nº 4, p. 851-875.

**REINE, K.J.; D.D. DICKERSON & D.G. CLARKE, 1998.** Environmental windows associated with dredging operations. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E2). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

**RIEHL, H., 1965.** Meteorologia Tropical. Ao Livro Técnico S.A.



