



ASA SOUTH AMERICA
Rua Purpurina, 155, cj 95
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP 05435-030
<http://www.asascience.com.br>



CPEA – Consultoria Paulista de Estudos Ambientais
R.Henrique Monteiro, 90 – 13ºand.
Pinheiros – São Paulo, SP
CEP 05423-020

Estudo da Dispersão e Deposição da Pluma de Material Dragado Descartado na Região Adjacente à Baía de Santos (SP)

Equipe Técnica **ASA SOUTH AMERICA:**

BRENO MENDES QUINTANILHA SIERRA	(Nº IBAMA : 1988616)
EDUARDO AYRES YASSUDA	(Nº IBAMA : 94066)
FÁBIO LUCIANO PINCINATO	(Nº IBAMA : 1821519)
GABRIEL CLAUZET	(Nº IBAMA : 1031373)
MARCO ANTONIO CORRÊA	(Nº IBAMA : 434236)

Consultor Externo:

MOYSES GONSALEZ TESSLER - IOUSP

Revisão 01
Março / 2008

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO	I-1
I.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO	I-3
I.1.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	I-3
I.1.2 CLIMATOLOGIA	I-4
I.1.3 OCEANOGRAFIA	I-5
II ANÁLISE DE DADOS	II-1
II.1 CORRENTES	II-2
II.2 VENTOS	II-7
II.3 MARÉS	II-11
II.4 VAZÃO	II-12
III MODELAGEM HIDRODINÂMICA	III-1
III.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES	III-1
III.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA REGIÃO	III-2
III.2.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	III-4
IV ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DESCARTE DO MATERIAL DRAGADO	IV-1
V MODELAGEM DA DISPERSÃO E DEPOSIÇÃO DO MATERIAL DRAGADO	V-1
V.1 MODELO SSFATE	V-1
V.1.1 DESCRIÇÃO DO MODELO SSFATE	V-1
V.1.2 BASE TEÓRICA	V-3
V.1.3 CENÁRIOS SIMULADOS COM O SSFATE	V-10
V.1.4 CRITÉRIO DE CORTE ADOTADO NA APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	V-11
V.1.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O SSFATE	V-11
VI CONSIDERAÇÕES FINAIS	VI-1
VII BIBLIOGRAFIA	VII-1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amplitude (cm) e fase local ($^{\circ}$) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica de Ilha da Moela (SP) (Fonte: FEMAR (2000)).	II-11
Tabela 2 - Nome, coordenadas e período dos dados de vazões das estações fluviométricas dos rios Quilombo e Cubatão.....	II-12
Tabela 3 - Características do material descartado.	IV-2
Tabela 4 - Classes de tamanho dos sedimentos (SSFATE).....	V-3
Tabela 5 - Valores típicos dos coeficientes de concentração.	V-7
Tabela 6 - Valores típicos para b_i	V-8
Tabela 7 - Valores típicos para τ_{li} e τ_{ul_i}	V-9
Tabela 8 - <i>Nomenclatura dos cenários simulados</i>	V-11
Tabela 9 - Numeração das figuras para os descartes de 1 milhão de m ³	V-12
Tabela 10 – Áreas cobertas com espessuras maiores que 1mm (1 milhão de m ³).	V-13
Tabela 11 - Classificação de cada cenário em função dos maiores valores de espessura e deposição, para os descartes de 1 milhão de m ³	VI-2

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização da área de estudo, dos pontos de descarte adotados, e áreas de buffer e do Parque Estadual Marinho da Laje de Santos.....I-1
- Figura 2** - Diagrama T-S da Baía de Santos do período de verão. Os pontos representam as imagens de todos os pares de valores (S,T) amostrados e a família de linhas paramétricas entre 15 e 23 são isolinhas de densidade (isopicnais) em unidades de Sigma-t (FUNDESPA, 1999).I-7
- Figura 3** - Localização geográfica dos dados disponíveis (corrente e vento) para o período em foco (outono/inverno de 2007).II-1
- Figura 4** - Diagramas Hovmoller de dados de corrente (m/s) coletados ao largo de Santos (SP) entre 20 de julho e 5 de setembro de 2007. Painel superior (a): componente zonal (u) do vetor velocidade; Painel inferior (b): componente meridional (v) do vetor velocidade.II-2
- Figura 5** - Diagramas stick plot do vetor velocidade de corrente para três níveis de profundidade (dados coletados ao largo de Santos - SP): 2 m (a), 8m (b) e 15m (c).....II-3
- Figura 6** - Histogramas direcionais do vetor velocidade calculados a partir dos dados de corrente coletados ao largo de Santos (SP), durante o inverno de 2007, para três profundidades: 2 m (a), 8 m (b) e 15 m (c).II-5
- Figura 7** - Espectros de amplitude das componentes vetoriais dos dados de corrente coletados ao largo de Santos (SP) – inverno de 2007. No painel superior (a), componente zonal (u) e no painel inferior (b), componente meridional (v).II-6
- Figura 8** - Diagrama stick plot de ventos (m/s) para o Aeródromo de Vicente de Carvalho (SP) no período de 15 de julho de 2007 a 15 de agosto de 2007
Fonte dos dados: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMET.II-7
- Figura 9** - Diagrama stick plot dos vetores de vento da região costeira de Santos (SP), para o período de 15 de julho a 15 de agosto de 2007. (Fonte dos dados: Reanálise do NCEP)II-8
- Figura 10** - Histograma direcional do vetor vento, calculado a partir dos dados de vento (NCEP) ao largo de Santos (SP), para o período de 15 de julho a 15 de agosto de 2007.II-9

Figura 11 - Comparação para as componentes U (a) e V (b), do vento local (em preto) e da corrente superficial (em vermelho) para 10 dias de inverno de 2005.....	II-10
Figura 12 - Diagrama stick plot de ventos (m/s) reconstruídos estatisticamente, para o período de 19 de julho de 2007 a 15 de agosto de 2007.	II-10
Figura 13 - Vazões médias mensais (m ³ /s) do rio Cubatão.	II-13
Figura 14 - Vazões médias mensais (m ³ /s) do rio Quilombo.	II-13
Figura 15 - Pontos batimétricos digitalizados das cartas náuticas DHN número 1.700, 1.701 e 1.711.....	III-2
Figura 16 - Grade computacional utilizada no modelo hidrodinâmico, com foco na região da Baía de Santos.	III-3
Figura 17 - Série temporal de maré medida (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para o para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007.....	III-5
Figura 18 - Séries temporais das componentes u e v da velocidade (azul) e a calculadas pelo modelo (vermelho) para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007, a 1 m de profundidade.....	III-6
Figura 19 - Séries temporais das componentes u e v da velocidade (azul) e a calculadas pelo modelo (vermelho) para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007, a 11 m de profundidade.....	III-6
Figura 20 - Instantâneo do campo de correntes simulado pelo modelo hidrodinâmico.	III-7
Figura 21 - P1 1M AR VER- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o verão.....	V-14
Figura 22 - P1 1M AR VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m ²) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o verão.....	V-15
Figura 23 - P1 1M LA VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o verão.	V-16
Figura 24 - P1 1M LA VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m ²) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o verão.....	V-17
Figura 25 - P1 1M AR INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o inverno.....	V-18

- Figura 26 - P1 1M AR INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o inverno. V-19
- Figura 27 - P1 1M LA INV.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal efetuados no ponto 1, durante o inverno. V-20
- Figura 28 - P1 1M LA INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o inverno. V-21
- Figura 29 – P2 1M AR VER.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o verão. V-22
- Figura 30 – P2 1M AR VER-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o verão. V-23
- Figura 31 – P2 1M LA VER.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o verão. V-24
- Figura 32 – P2 1M LA VER-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o verão. V-25
- Figura 33 – P2 1M AR INV.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o inverno. V-26
- Figura 34 – P2 1M AR INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o inverno. V-27
- Figura 35 P2 1M LA INV.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o inverno. V-28
- Figura 36 – P2 1M LA INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o inverno. V-29
- Figura 37 – P3 1M AR VER.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o verão. V-30
- Figura 38 – P3 1M AR VER-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como conseqüência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o verão. V-31

- Figura 39 – P3 1M LA VER.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o verão. V-32
- Figura 40 – P3 1M LA VER-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o verão..... V-33
- Figura 41 – P3 1M AR INV.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o inverno..... V-34
- Figura 42 – P3 1M AR INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o inverno..... V-35
- Figura 43 – P3 1M LA INV.-** Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o inverno..... V-36
- Figura 44 – P3 1M LA INV-** Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o inverno..... V-37

RESUMO

Este relatório apresenta os resultados do estudo de modelagem numérica da dispersão das plumas de sedimentos decorrente dos descartes de material dragado na região do canal do Porto de Santos e lançado na região oceânica próxima à Baía de Santos (SP).

As simulações numéricas apresentadas neste estudo consideram o volume total de descarte em 1 (um) milhão de metros cúbicos. Para este volume foram realizadas simulações com duração de 30 dias tanto no período de verão como no período de inverno.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir de resultados do ORTHOHYDRO, modelo numérico hidrodinâmico desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA)**, que resolve as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, prognosticando os campos de elevação da superfície e de velocidades, através da especificação de vazão, harmônicos de maré e forçantes meteorológicas superficiais, ajustados para reproduzir a dinâmica costeira adjacente à Baía de Santos para o período de julho a setembro de 2007.

As simulações do descarte de material dragado foram conduzidas através da utilização do modelo SSFATE (*Suspended Sediment Fate*) da U.S. Army Corps of Engineers (USACE), em versões customizadas pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.**

A análise dos resultados da modelagem indica que a região estudada possui boa dispersão para sedimentos descartados, sendo que as maiores espessuras e concentrações no leito oceânico são encontradas próximas à área de descarte, e reduzem consideravelmente à medida que as plumas se afastam da mesma.

Considerando o padrão de circulação e transporte característico da área, pode-se concluir que os sedimentos depositados não se acumulam na região de descarte. Os resultados da modelagem mostraram que, para um volume total descartado de 1 (um) milhão de metros cúbicos, o tempo de residência na área de

descarte encontra-se na faixa de 5 a 10 dias, coincidindo com período médio entre passagem de sistemas frontais.

Estudos anteriores realizados por Mahiques *et al.* (2004) indicam que o destino mais provável destes sedimentos é ser transportado pelas correntes de fundo, intensificadas em direção E-NE pela passagem de frentes frias, e se depositarem junto à plataforma continental, preferencialmente ao longo da isóbata de 100m.

I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a Consultoria Paulista de Estudos Ambientais (CPEA) no desenvolvimento de estudos ambientais para o aprofundamento do Canal do Porto de Santos, a **ASA SOUTH AMERICA** apresenta este trabalho de modelagem numérica computacional da deposição e dispersão da pluma de descarte de material dragado na região oceânica próxima à Baía de Santos (SP).

As simulações numéricas apresentadas neste estudo consideram o volume de descarte de 1 (um) milhão de metros cúbicos. Para este volume foram realizadas simulações com duração de 30 dias tanto no período de verão como no período de inverno.

A Figura 1 indica as posições dos três pontos adotados para os descartes, bem como as regiões referentes à área de controle (*buffer*) e ao Parque Estadual Marinho da Laje de Santos.

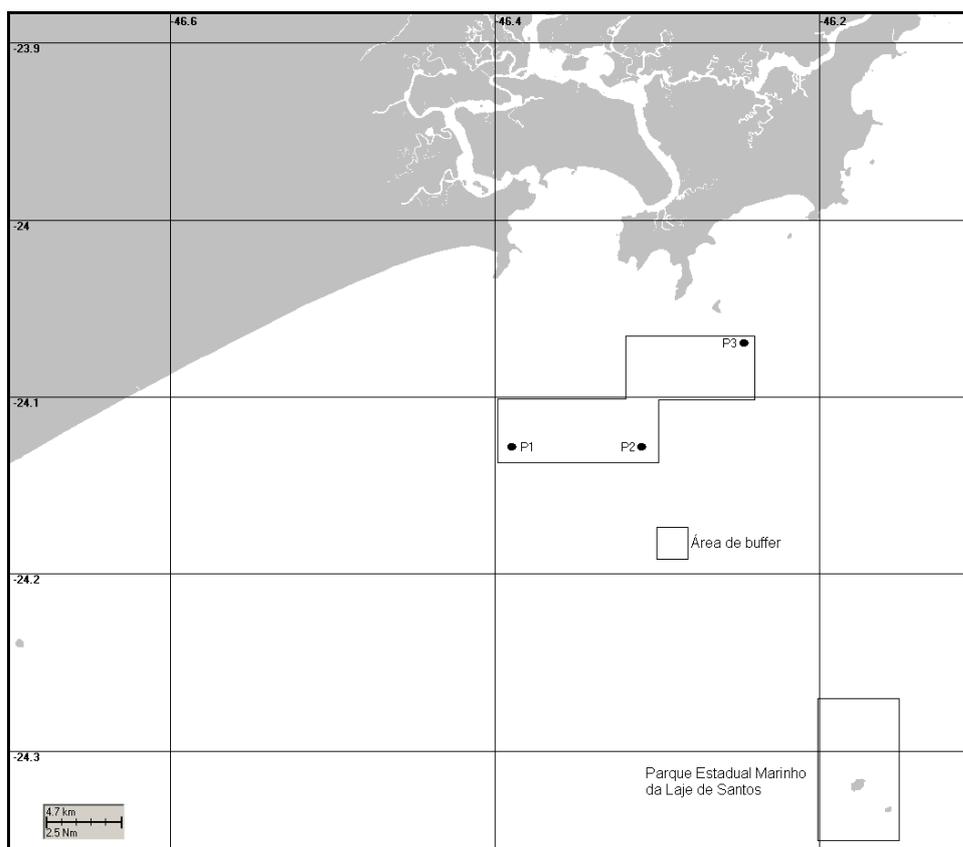


Figura 1 - Localização da área de estudo, dos pontos de descarte adotados, e áreas de buffer e do Parque Estadual Marinho da Laje de Santos.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir de resultados do modelo numérico hidrodinâmico ORTHOHYDRO desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, de forma a reproduzir a circulação oceânica para os períodos de janeiro a março e julho a setembro de 2007.

Análises de dados meteorológicos e oceanográficos pretéritos na região mostram uma grande influência do campo de ventos local sobre a dinâmica de circulação na região adjacente à Baía de Santos. Desta forma, para reprodução numérica de um período específico na região, torna-se de grande importância a obtenção de um conjunto de ventos local que abranjam o período ao qual pretende-se reproduzir. O conjunto de dados de vento é utilizado como forçante atmosférica na modelagem hidrodinâmica para reproduzir o campo de correntes durante os períodos de interesse.

As simulações do descarte de material dragado foram conduzidas através da utilização do modelo SSFATE (*Suspended Sediment Fate*), da USACE¹, em versões customizadas pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** O SSFATE foi utilizado nas simulações de eventos específicos através de múltiplos descartes durante o período das operações de dragagem, fornecendo concentração na coluna d'água e depósitos de sedimento. Para simular o processo de remobilização de sedimentos no leito oceânico em função da ação das correntes de fundo, foi utilizado o modelo TRANSPOR2004 (*Delft Hydraulics*) com o qual é possível estimar o transporte de sedimentos de fundo e em suspensão e, conseqüentemente, a massa de sedimentos remobilizados.

A seguir, o Capítulo I apresenta a caracterização do meio físico. O levantamento e a análise dos dados meteorológicos e oceanográficos são apresentados no Capítulo II. O Capítulo III descreve a implementação do modelo hidrodinâmico e sua validação. O Capítulo IV apresenta as principais características do material dragado, enquanto que o Capítulo V descreve a modelagem do descarte de material dragado e os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo VI apresenta as considerações finais do estudo.

¹ U.S. Army Corps of Engineers.

I.1 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

I.1.1 Descrição da Área de Estudo

A região metropolitana da Baixada Santista é constituída por nove cidades, que possuem um total de aproximadamente 1.300.000 habitantes, distribuídos em 2.887 km². É um dos principais pólos de desenvolvimento do país, devido à intensa atividade industrial de Cubatão, à pesca, ao transporte marítimo e ao lazer.

O Sistema Estuarino de Santos – São Vicente é composto por duas grandes ilhas, a Ilha de São Vicente e a Ilha de Santo Amaro. Na primeira, localizam-se as cidades de Santos e São Vicente, e na segunda, cujo limite com o continente é definido geograficamente pelo Canal de Bertioga, localizam-se o município do Guarujá e seu distrito de Vicente de Carvalho.

Ao norte da Ilha de São Vicente localizam-se os Largos de Santa Rita e do Canéu, as Ilhas de Bagres e Barnabé, o Canal de Piaçagüera (ou canal da COSIPA), o Terminal de Alemoa e a Ilha Duas Barras. A oeste da Ilha de São Vicente encontra-se o Canal de São Vicente, a leste fica o canal do Porto de Santos, que atinge a profundidade de até 25 m. Nele encontram-se o Porto de Santos a oeste e o bairro de Vicente de Carvalho a leste. A saída do canal do Porto é dragada a uma profundidade média de 12 m. Ao sul da Ilha de São Vicente encontra-se a Baía de Santos, que engloba todas as praias das cidades de Santos e São Vicente.

O Sistema Estuarino de Santos – São Vicente é alimentado por um conjunto de mananciais provenientes das encostas da Serra do Mar e de origem da própria baixada. Os rios que nascem na Serra do Mar apresentam um regime torrencial; porém, devido à pequena declividade da baixada, mudam de regime, dificultando o escoamento das águas. Este fenômeno origina o labirinto de canais e meandros, característicos desta região.

I.1.2 Climatologia

A Baixada Santista apresenta clima tropical úmido, sujeito à alta variação térmica e a altos índices pluviométricos. A massa de ar predominante na região é a Tropical Atlântica. Segundo um estudo realizado pela CETESB (1985), três massas de ar atuam na região (além da Tropical Atlântica): Subtropical, Polar e Equatorial Continental.

A região apresenta um dos mais altos índices pluviométricos do país, com alta variabilidade de ano a ano. O mês mais seco do ano é agosto (90,6 mm), enquanto que fevereiro apresenta os maiores índices pluviométricos (301 mm). A temperatura média anual do ar é de 22 °C, com máximos em fevereiro (29,4 °C) e mínimos em julho (14,6 °C).

O padrão característico das condições meteorológicas e circulação atmosférica de baixos níveis na região é dominado pelo Anticiclone semifixo do Atlântico Sul (AAS) ou Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pelo Anticiclone Polar Móvel (APM). Periodicamente, a situação de bom tempo induzida pelo AAS, caracterizada por ventos moderados vindos de nordeste, é perturbada pelo deslocamento de sistemas frontais forçados pelo APM. Estes sistemas frontais formam-se geralmente sobre o Oceano Pacífico Sul, se dirigem para leste até encontrarem os Andes, e, entre 40 e 20°S, seguem no sentido sudoeste-nordeste ao longo da costa leste sul americana. Eventualmente, os sistemas frontais podem atingir latitudes menores do que 13°S (Kousky, 1979, *apud* Castro Filho & Miranda, 1998).

Stech & Lorenzetti (1992) propuseram um modelo conceitual para passagem de frentes frias sobre a Bacia de Santos. Segundo o modelo, um observador localizado sobre um ponto fixo na Plataforma Continental Sudeste (PCSE) presenciaria a evolução do seguinte quadro: antes da passagem do sistema frontal, ventos de NE sopram persistentemente sobre a região com velocidade média de 5 m/s; quando a frente aproxima-se do observador o vento gira de nordeste para noroeste no sentido anti-horário; imediatamente após a passagem da frente fria o vento passa a soprar de sudoeste com velocidade média de 8 m/s; nas 24 horas seguintes o vento roda gradativamente de sudoeste para nordeste

novamente, no sentido anti-horário. O tempo médio de propagação de uma frente fria sobre a PCSE é de 2 dias, o que confere a frente uma velocidade de 500 km/dia. Este quadro se repete em média de 3 a 6 vezes por mês, ou seja, com período entre frentes variando de 5 a 10 dias.

Quando as frentes se propagam para NE, eventualmente estacionam sobre a PCSE causando períodos longos de chuva. O mais comum, entretanto, é a frente dissipar-se ou desviar-se para leste. Assim sendo, a frequência da ocorrência de sistemas frontais diminui em direção ao Equador e aumenta no inverno, quando o APM, fortalecido, empurra as frentes e a AAS mais para o norte.

Na escala temporal diurna existe a influência de circulações locais forçadas pela ação das brisas marinhas e terrestres.

1.1.3 Oceanografia

A Baía de Santos é um ambiente costeiro que recebe influência de águas de origem oceânica através de sua entrada. Como essa baía recebe a massa de água estuarina, ela também é influenciada por águas de origem continental dos Canais de Piaçagüera (Canal do Porto) à leste, e Mar Pequeno (Barra de São Vicente), à oeste. As águas fluviais são captadas pelos rios da bacia de drenagem do complexo Sistema Estuarino de Santos. Essa baía é um sistema cuja circulação é condicionada pela geometria e topografia do fundo submarino, podendo apresentar características de um estuário. De acordo com FUNDESPA (1999), as principais forças geradoras dos movimentos e processos de mistura na baía são: a co-oscilação da maré, o vento, a descarga de água doce, os gradientes de densidade, e a circulação costeira adjacente.

O Rio Cubatão é o mais importante da região, apresentando máximo de vazão em março (aproximadamente 21,5 m³/s), de acordo com dados do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SigRH).

Na Baía de Santos foram realizadas medições hidrográficas por FUNDESPA (op. cit.), para os períodos de transição inverno-primavera (setembro, outubro e novembro de 1997) e verão (dezembro de 1994, fevereiro de 1995 e março de 1998).

No período de inverno-primavera, os dados de superfície apresentaram intervalos de variação de temperatura e salinidade de 21,6 a 24,2 °C e de 30,8 a 34,2, respectivamente. Próximo ao fundo da baía, os intervalos foram de 21,6 °C a 22,2 °C e de 34,6 a 35,2. A densidade variou entre 1.020,0 a 1.024,0 kg/m³ e a estratificação vertical de massa foi pequena. O relatório (FUNDESPA, op. cit.) não apresenta a figura do diagrama T-S da região da Baía de Santos para o período de inverno, mas afirma que o mesmo não apresentou uma configuração regular, refletindo a condição não conservativa de calor e de sal, devido à troca acentuada de energia e massa com a atmosfera nessa época do ano.

Durante os períodos de verão (dezembro de 1994, fevereiro de 1995 e março de 1998) devido ao aquecimento sazonal e à maior descarga de água doce no Sistema Estuarino de Santos – São Vicente, a massa de água da baía apresentou valores elevados de temperatura e salinidade relativamente baixa. Na superfície, a temperatura variou entre 28,2 a 30,2 °C, e a salinidade, entre 21,0 a 31,0. Próximo ao fundo, a temperatura ficou entre 25,4 a 28,8 °C, e a salinidade entre 31,4 a 34,6. Em todas as campanhas, os menores valores de salinidade foram observados na parte leste da baía, adjacente à entrada do canal do porto, tanto na superfície quanto no fundo. Os maiores valores foram observados ao sul da entrada desse canal e também na parte oeste e central da baía. Os mínimos de densidade na superfície ocorreram principalmente na região ao largo da praia e entre a Barra de São Vicente, a oeste, e a entrada do Canal de Piaçagüera (Canal do Porto), a leste. Ao sul, a densidade foi menor do lado leste da baía (1.013,0 a 1.017,2 kg/m³) e maior do lado oeste (1.015,0 - 1.019,0 kg/m³), indicando a maior influência da descarga de águas de baixa salinidade do Canal de Piaçagüera.

Na Figura 2, extraída de FUNDESPA (op. cit.), é apresentado o diagrama T-S construído a partir dos dados obtidos na região da Baía de Santos para o período de verão.

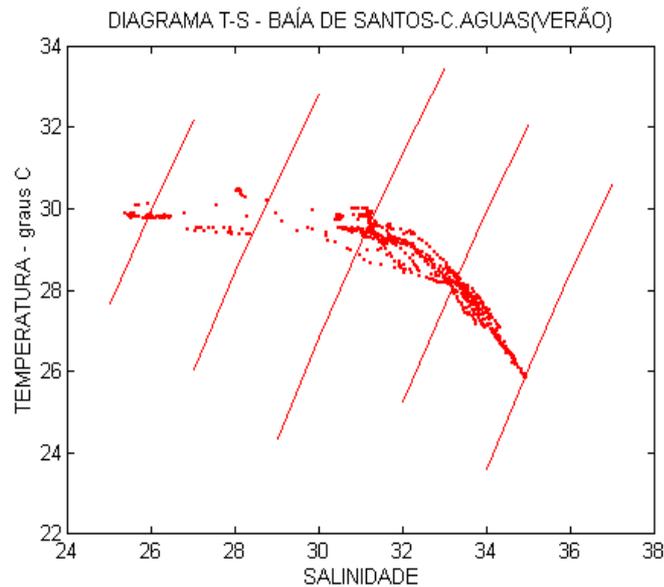


Figura 2 - Diagrama T-S da Baía de Santos do período de verão. Os pontos representam as imagens de todos os pares de valores (S,T) amostrados e a família de linhas paramétricas entre 15 e 23 são isolinhas de densidade (isopicnais) em unidades de Sigma-t (FUNDESPA, 1999).

Segundo os autores, a análise do diagrama mostra que o espalhamento dos pontos decresce ao longo da coluna de água, sendo menor nas camadas mais densas e profundas ($\text{Sigma-t} > 21,0 \text{ kg m}^{-3}$). Essa configuração contrasta com as características termohalinas do inverno, cuja curva T-S não apresentou uma configuração regular.

II ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo são apresentados os dados de corrente; harmônicos de maré, obtidos junto à FEMAR²; resultados de Reanálises do NCEP³ para toda a região; dados de vento local (REDEMET⁴) e dados de vazão obtidos junto ao SigRH⁵ para a área de estudo (Figura 3).

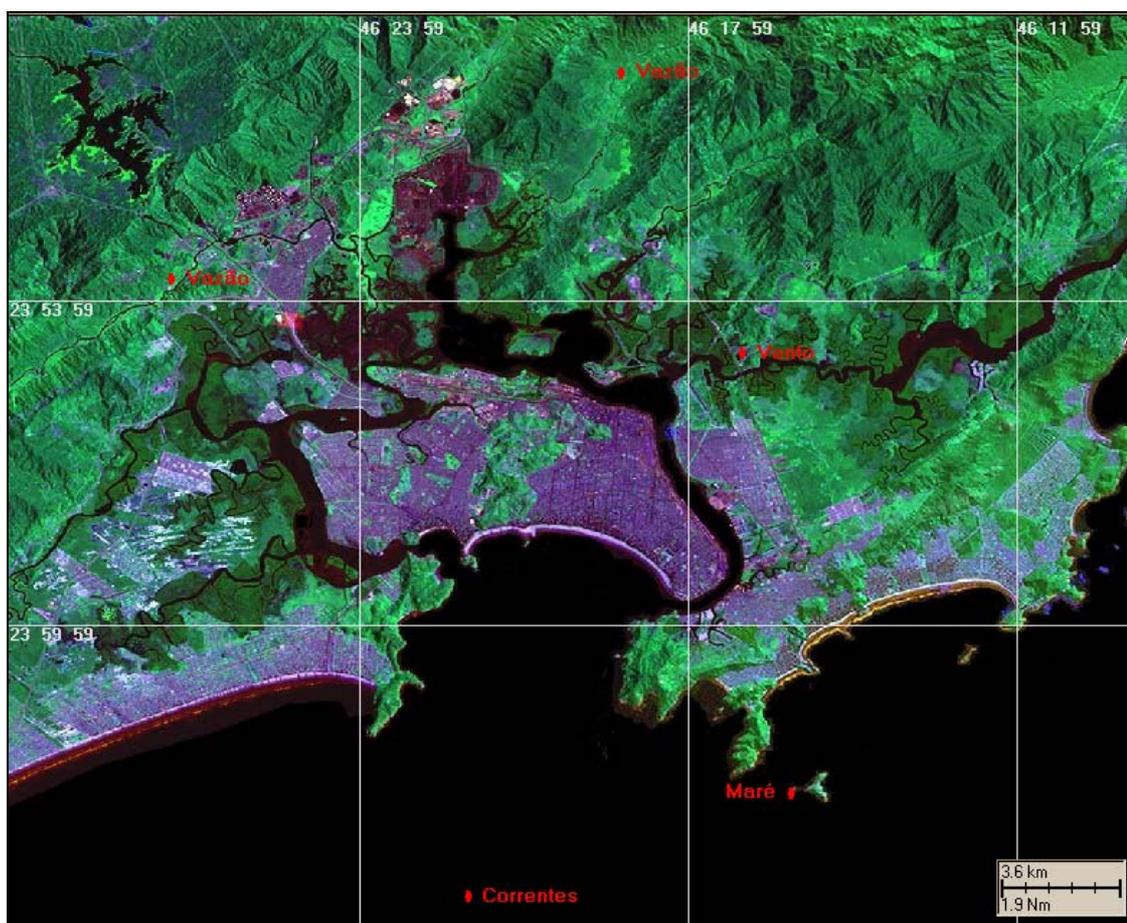


Figura 3 - Localização geográfica dos dados disponíveis (corrente e vento) para o período em foco (outono/inverno de 2007).

² Fundação de Estudos do Mar.

³ National Centers for Environmental Prediction.

⁴ Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica.

⁵ Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

II.1 CORRENTES

A confiabilidade de uma simulação numérica pode ser verificada quando seus resultados são confrontados com dados coletados, os quais se pretende reproduzir numericamente. Neste sentido, foi realizado um estudo prévio dos dados de correntes *in situ*, apresentado a seguir.

Dados de corrente foram coletados pela FUNDESPA, com um *Acoustic Doppler Currentmeter Profile* (ADCP), durante o período de 19 de julho a 6 de setembro de 2007, para a posição geográfica: 24°05'02,20''S e 46°22'02,10''W (WGS 84) (Figura 3). O ADCP foi fixado sobre o fundo oceânico, sendo a primeira amostragem a, aproximadamente, 3,5 m do fundo; as amostragens se deram a cada metro, a partir dessa profundidade, até a superfície, (profundidade local de aproximadamente 19,5 m). Portanto, os dados foram amostrados da superfície livre até 16,0 m de profundidade.

Na Figura 4 são apresentados dois diagramas *Hovmoller* referentes às componentes do vetor velocidade medidas pelo ADCP. No painel superior (a), está a componente zonal (u), e no inferior (b), a componente meridional (v) do vetor velocidade.

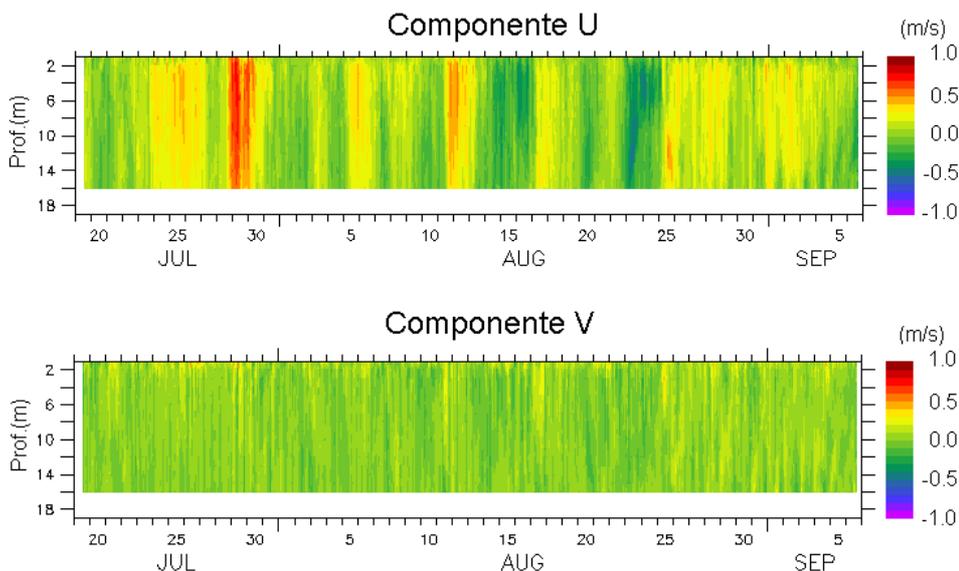


Figura 4 - Diagramas Hovmoller de dados de corrente (m/s) coletados ao largo de Santos (SP) entre 20 de julho e 5 de setembro de 2007. Painel superior (a): componente zonal (u) do vetor velocidade; Painel inferior (b): componente meridional (v) do vetor velocidade.

Estes diagramas (Figura 4) possibilitam a análise simultânea das séries temporais de ambas as componentes da velocidade em diversas profundidades. Observa-se certa homogeneidade vertical, exceção feita à camada superficial. A superfície, sendo interface do sistema oceano-atmosfera, é sujeita às influências atmosféricas e, portanto, apresenta uma maior variabilidade em ambas as componentes do vetor velocidade se comparadas com os maiores níveis de profundidade. A componente U apresenta maior intensidade em relação a componente V, com máximos de até 0,8 m/s.

Na Figura 5 são apresentados os diagramas tipo *stick plot* para os dados de corrente, considerando três diferentes profundidades: imediatamente abaixo da superfície (2 m), 8 e 15 m. Observa-se boa concordância entre os vetores de correntes para as três profundidades mostradas, embora na camada próxima à superfície (painel superior), os vetores apresentem maior variabilidade.

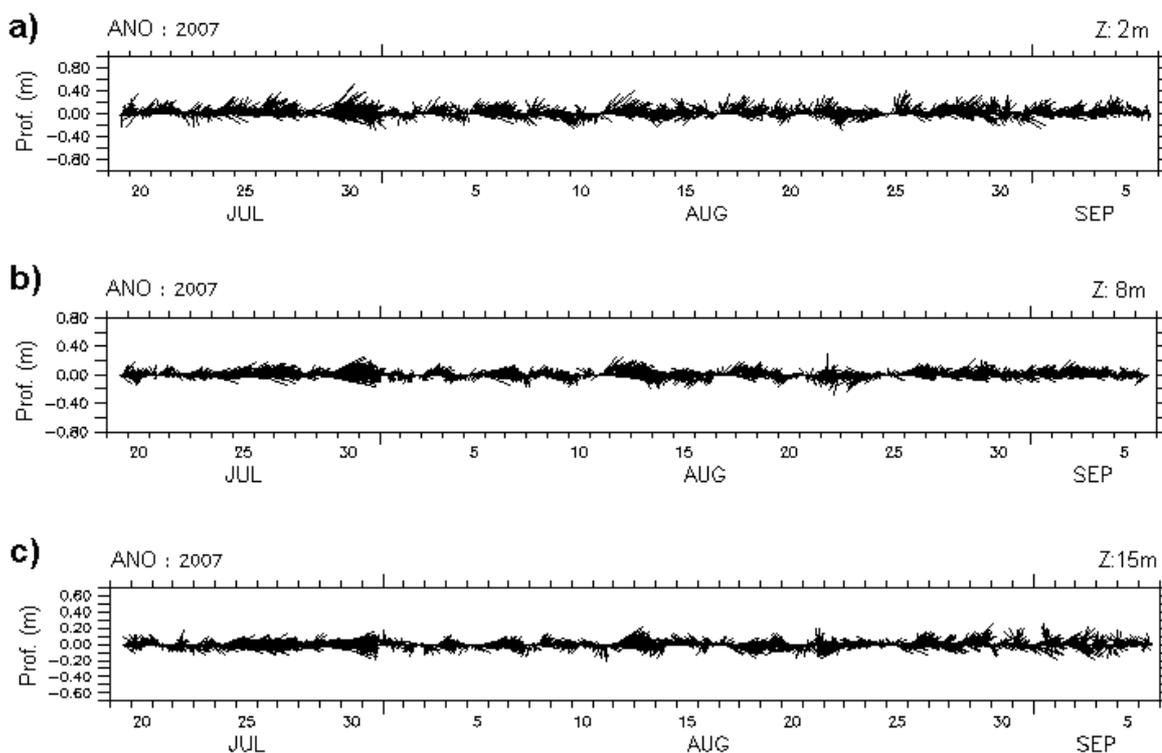


Figura 5 - Diagramas *stick plot* do vetor velocidade de corrente para três níveis de profundidade (dados coletados ao largo de Santos - SP): 2 m (a), 8m (b) e 15m (c).

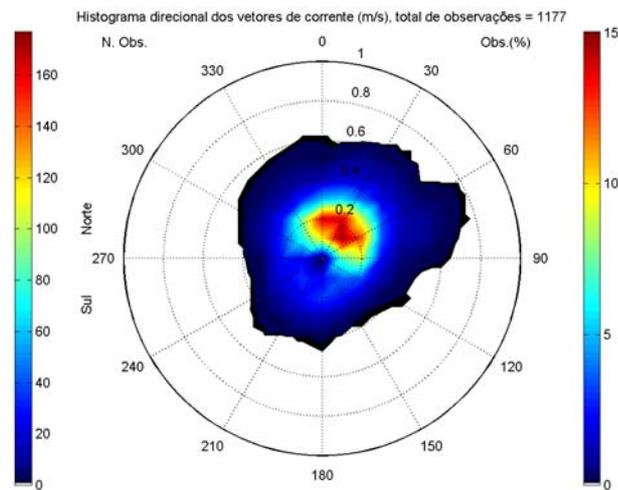
A Figura 6 apresenta os histogramas direcionais do vetor velocidade, calculados para as mesmas séries apresentadas na Figura 5. A direção refere-se ao norte geográfico, a intensidade é apresentada em m/s, enquanto as escalas de cores representam o número e a porcentagem de observações.

Os histogramas direcionais permitem uma melhor visualização do padrão médio e da variabilidade a ele associada. Observa-se que a direção preferencial da corrente apresenta um pequeno giro no sentido horário, a medida em que a profundidade aumenta, passando de NE, próximo à superfície, para E, junto ao fundo. As intensidades médias observadas foram de 0,14 m/s, 0,15 m/s e 0,11 m/s, para 2 m (a), 8 m (b) e 15 m (c), respectivamente.

Para identificar a variabilidade temporal presente dos dados de corrente, calculou-se o espectro de amplitude das componentes u e v , para as três profundidades mostradas nas figuras anteriores (2 m, 8 m e 15 m); o resultado é apresentado na Figura 7 (componente u no painel superior, e v no inferior).

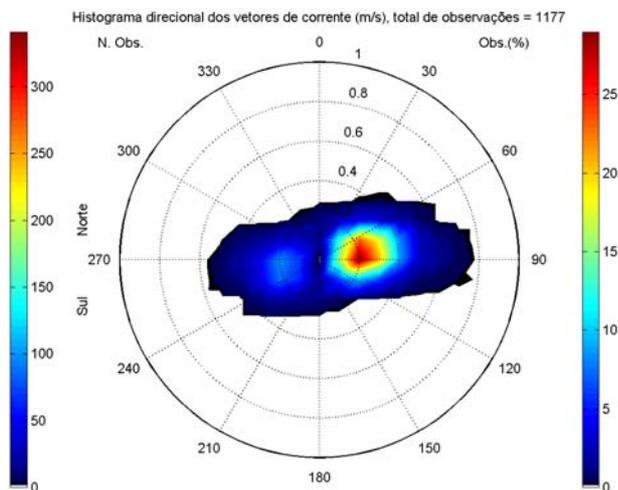
Observa-se que para as três profundidades, a componente u apresenta maior energia em relação à v , principalmente em baixas frequências (oscilações bem pronunciadas entre 3 e 10 dias, associadas à passagem de sistemas frontais pela região). Para ambas as componentes, há influência da maré, com sinal predominantemente semi-diurno (2 cpd).

Portanto, a partir destas análises, realizadas para os dados de correntes coletados pela FUNDESPA, observa-se um padrão de circulação bem definido, com um fluxo predominante para nordeste, orientado paralelamente à costa, e oscilações bem pronunciadas associadas à passagem de sistemas frontais. Na vertical, há pouca estratificação, sendo a componente U mais energética em relação à componente V em todo perfil.



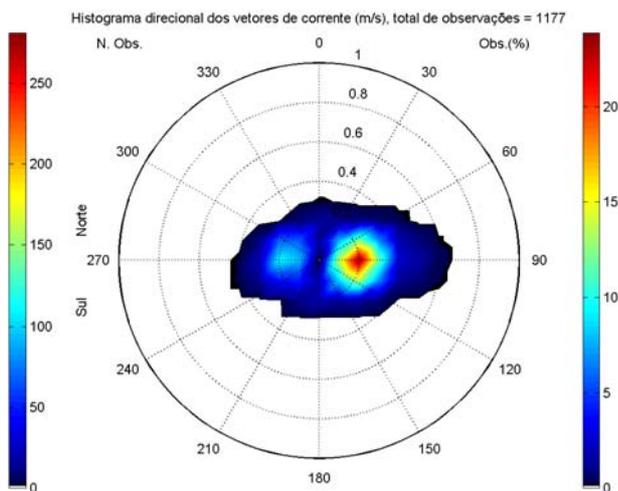
Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.14 m/s

(a)



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.15 m/s

(b)



Direção em graus a partir do norte geográfico, intensidade da veloc. média = 0.11 m/s

(c)

Figura 6 - Histogramas direcionais do vetor velocidade calculados a partir dos dados de corrente coletados ao largo de Santos (SP), durante o inverno de 2007, para três profundidades: 2 m (a), 8 m (b) e 15 m (c).

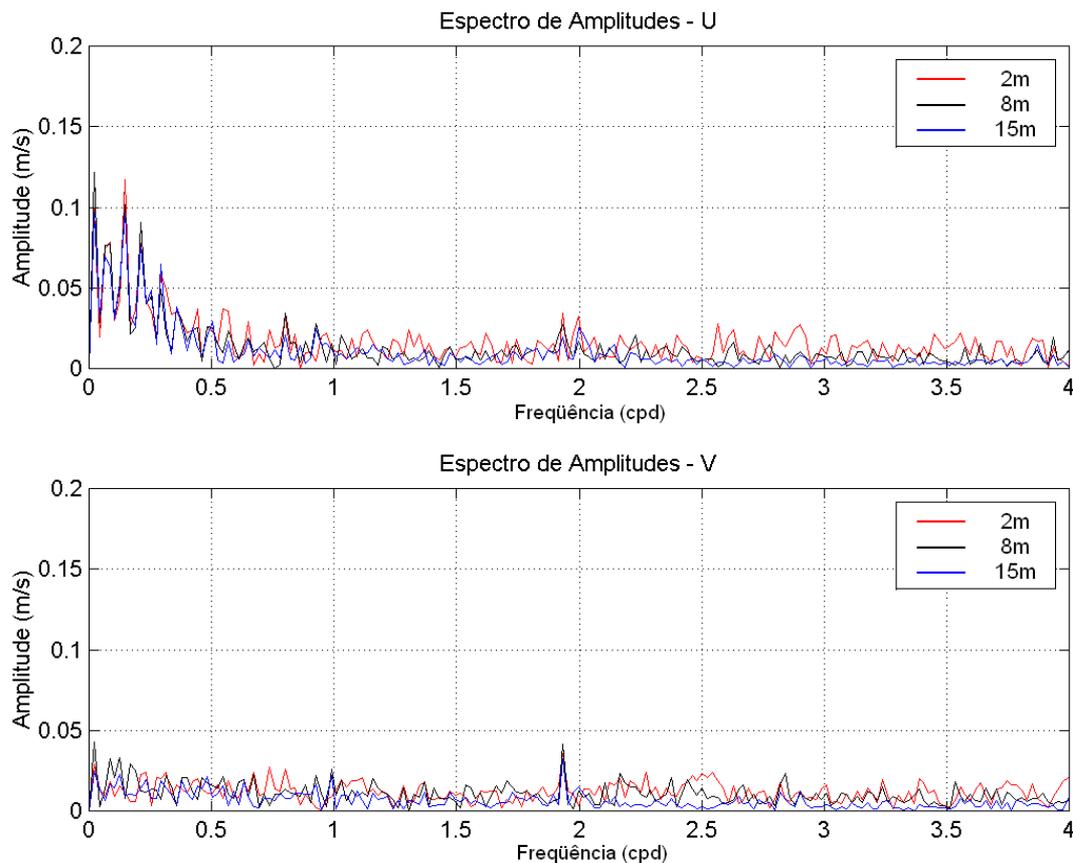


Figura 7 - Espectros de amplitude das componentes vetoriais dos dados de corrente coletados ao largo de Santos (SP) – inverno de 2007. No painel superior (a), componente zonal (u) e no painel inferior (b), componente meridional (v).

Estudos pretéritos realizados nesta região, a partir de simulações numéricas e análise de dados, concordam que o padrão de circulação para o inverno apresente predomínio de correntes para nordeste, embora indicassem que inversões deste padrão médio ocorressem com maior frequência. No período de 19 de julho a 6 de setembro de 2007, as oscilações mais energéticas ocorridas foram àquelas associadas à passagem de sistemas frontais, como verificado na Figura 7; é possível que a grande homogeneidade observada nos dados de corrente para o inverno de 2007 seja decorrente do número e intensidade dos sistemas frontais atuantes na região neste período.

II.2 VENTOS

Para o período de interesse, inverno de 2007, não foram obtidos dados de ventos coletados localmente. Diante da necessidade de caracterização do padrão de ventos na região concomitantemente com o período de coleta de dados de corrente, a **ASA SOUTH AMERICA** realizou um extenso levantamento das possíveis bases de dados existentes na região para este período. Abaixo segue a análise dos conjuntos de dados obtidos.

O primeiro conjunto analisado foi obtido junto a REDEMETS, uma série temporal de ventos para o aeródromo de Vicente de Carvalho (23°55'00,00"S; 46°17'00,00"W, indicado na Figura 3). Tal série temporal é representada na Figura 8 na forma de diagrama *stick plot*.

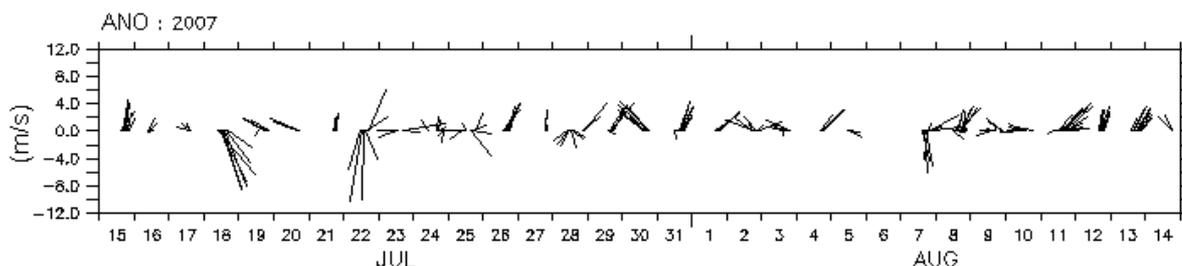


Figura 8 - Diagrama *stick plot* de ventos (m/s) para o Aeródromo de Vicente de Carvalho (SP) no período de 15 de julho de 2007 a 15 de agosto de 2007. Fonte dos dados: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMETS.

Conforme se observa na Figura 8, os dados são disponibilizados apenas para o período diurno, das 9 às 18 GMT, o que restringe o uso dos mesmos como uma amostragem do vento local, impossibilitando a caracterização da variabilidade associada à brisa marinha na região. Outro fator desfavorável com relação a esta série temporal de ventos deve-se ao fato do aeródromo estar em um local que apresenta barreiras topográficas relevantes, além de ser distante do local de coleta de dados de corrente.

O segundo conjunto disponível é proveniente da base de internacional de dados atmosféricos (NCEP). A Figura 9 mostra um diagrama tipo *stick plot* dos resultados de Reanálise do modelo meteorológico NCEP, para um ponto geograficamente localizado ao largo de Santos (SP). Observa-se um padrão predominante de ventos oriundos de nordeste/leste, com inversões em diversos instantes do registro. Conforme comentado anteriormente, este grande número de inversões (associado à passagem de sistemas frontais) corrobora com a pequena variação espacial (*i.e.*, inversões do padrão médio) observada nos dados de correntes neste período.

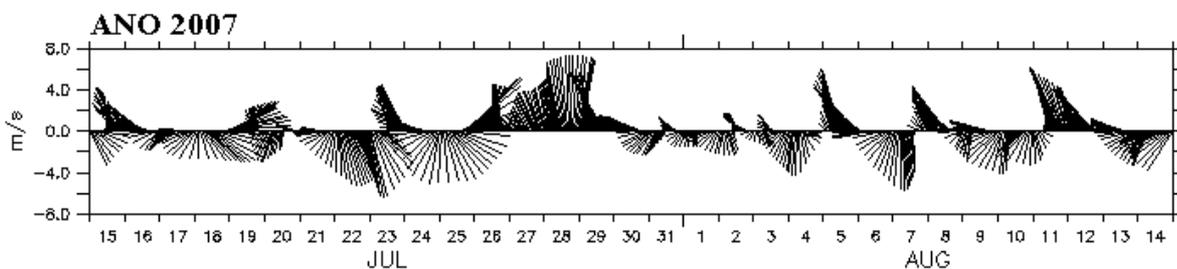


Figura 9 - Diagrama *stick plot* dos vetores de vento da região costeira de Santos (SP), para o período de 15 de julho a 15 de agosto de 2007. (Fonte dos dados: Reanálise do NCEP)

A Figura 10 apresenta o histograma direcional do vetor vento mostrado na Figura 9. 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 a porcentagem de observações.

A partir da Figura 9 observa-se o predomínio de ventos de nordeste, os quais estão associados ao padrão da Alta Sub-tropical do Atlântico Sul (ASAS). As inversões observadas (ventos de sudeste) são associadas às perturbações geradas pela passagem de sistemas frontais.

Os resultados do NCEP, cujo foco é a reprodução de fenômenos atmosféricos de meso e larga-escalas, apresentam resolução espacial de 2,5° e temporal de 6 horas. Assim, embora capturem a incursão de sistemas frontais durante o período, não possui resolução espacial nem temporal apropriada para capturar variabilidades locais de alta frequência.

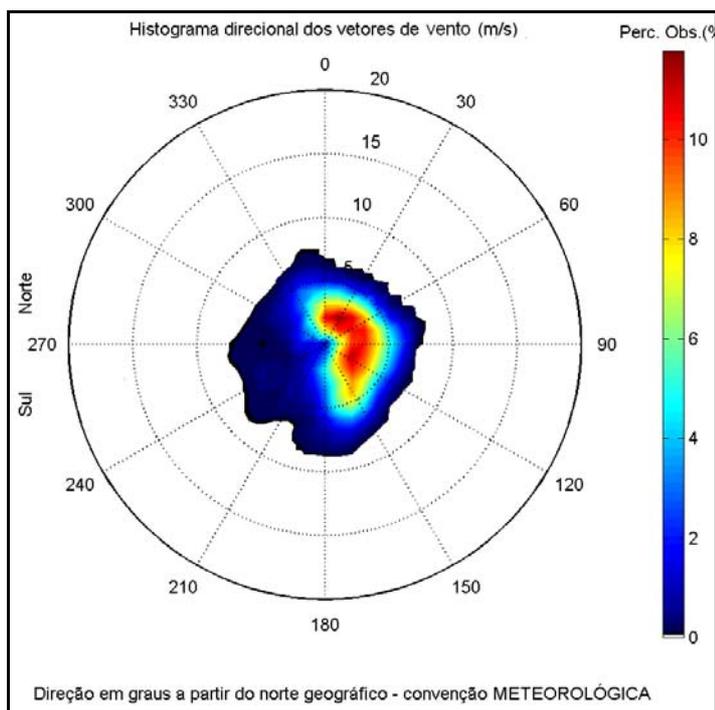


Figura 10 - Histograma direcional do vetor vento, calculado a partir dos dados de vento (NCEP) ao largo de Santos (SP), para o período de 15 de julho a 15 de agosto de 2007.

Análises realizadas pela **ASA SOUTH AMERICA** na região adjacente à Baía de Santos (ASA, 2006), utilizando dados de vento local e corrente superficial para o inverno de 2005, apresentaram alta correlação entre estes campos, indicando a importância do vento local. A Figura 11 (a) e (b) apresenta a comparação para as componentes U e V, respectivamente, do vento local (em preto) e da corrente superficial (em vermelho) para 10 dias de inverno de 2005; as séries foram normalizadas, para possibilitar a comparação visual.

Assim, para atingir o objetivo proposto, validação do modelo hidrodinâmico para o período outono/inverno de 2007, a equipe da **ASA SOUTH AMERICA** elaborou um conjunto de análises que permitiu a reconstrução estatística de algumas frequências locais identificadas em séries pretéritas de dados de vento para a região (do ano de 2005), com o intuito de incorporar estes sinais no campo do NCEP. É importante salientar que, tanto a simulação para o ano de 2005 (ASA, 2006), quanto à pretendida (ano 2007), compreende o período de outono/inverno. Espera-se que as respectivas variabilidades do campo de ventos

para ambos os anos sejam estatisticamente coerentes entre si. Assumindo essa premissa como verdadeira, o resultado obtido, ilustrado na Figura 12, é o campo de ventos NCEP (apresentado na Figura 9) acrescido de uma variabilidade temporal, estabelecida estatisticamente para a região.

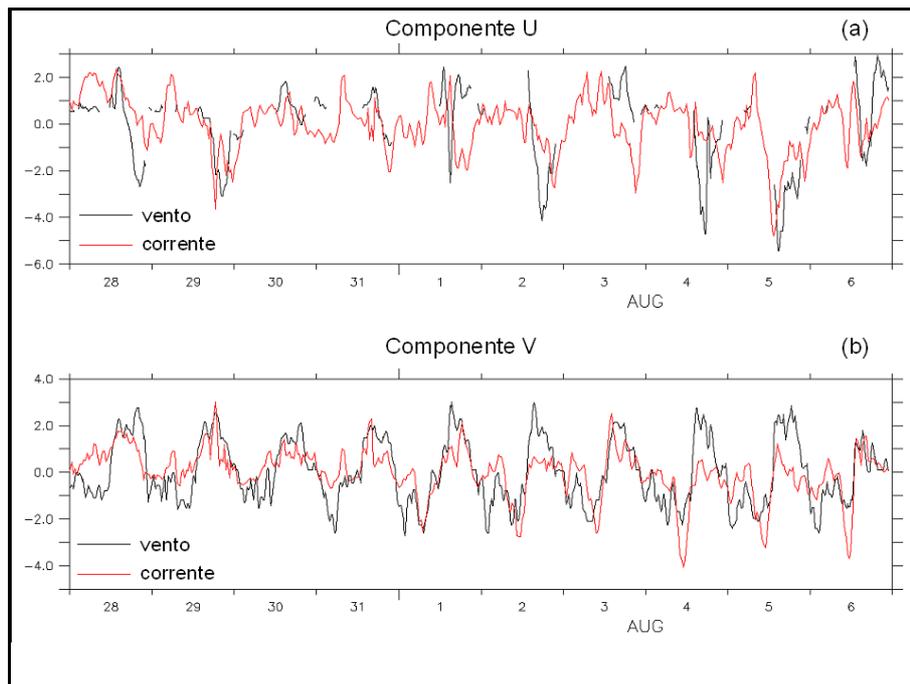


Figura 11 - Comparação para as componentes U (a) e V (b), do vento local (em preto) e da corrente superficial (em vermelho) para 10 dias de inverno de 2005.

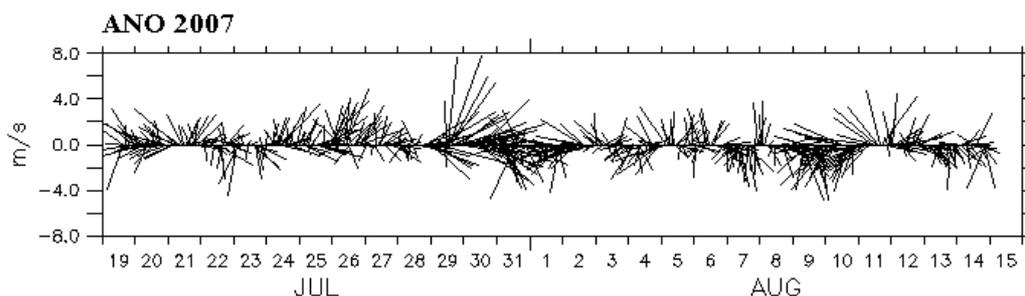


Figura 12 - Diagrama stick plot de ventos (m/s) reconstruídos estatisticamente, para o período de 19 de julho de 2007 a 15 de agosto de 2007.

II.3 MARÉS

Com relação à maré, o Estuário e Baía de Santos têm caráter semidiurno. A Tabela 1 apresenta as constantes harmônicas para a estação maregráfica Ilha da Moela, da FEMAR (24°03,1'S e 46°16,1'W). As principais componentes para a região são M_2 e S_2 , com amplitudes de 32,6 cm e 23,1 cm, respectivamente. A componente Mm tem amplitude de 16,3 cm e, todas as demais componentes apresentam amplitudes inferiores a 12 cm.

Tabela 1 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica de Ilha da Moela (SP) (Fonte: FEMAR (2000)).

Nome da Estação : ILHA DA MOELA (SANTOS) – SP					
Localização : No trapiche de acesso à Ilha					
Organ. Responsável : DHN / IOUSP					
Latitude : 24° 03,1' S			Longitude : 46° 16,1' W		
Período Analisado : 12/07/62 a 12/08/62			Nº de Componentes : 35		
Análise Harmônica : Método Tidal Liverpool Institute					
Classificação : Maré de Desigualdades Diurnas					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		II H 26 min	Nível Médio (Zo):		79 cm acima do NR.
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		147 cm acima do NR.	Média das Preamares Inferiores (MLHW) :		122 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		30 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :		17 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) - graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) - graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	1,4	023
Ssa	-	-	N ₂	3,0	118
Mm	16,3	340	NU ₂	0,6	118
Mf	-	-	M ₂	32,6	073
MTM	-	-	L ₂	1,3	053
Msf	0,2	276	T ₂	1,4	078
Q ₁	4,7	058	S ₂	23,1	078
O ₁	11,5	072	K ₂	6,3	078
M ₁	0,2	284	MO ₃	2,6	334
P ₁	2,8	132	M ₃	4,5	183
K ₁	8,6	132	MK ₃	1,8	095
J ₁	0,6	010	MN ₄	2,2	229
OO ₁	1,5	166	M ₄	2,6	336
MNS ₂	-	-	SN ₄	1,7	291
2N ₂	0,4	062	MS ₄	1,6	069
Referências de Nível: RN-1: situada junto à casa das máquinas do guindaste					
Obs: Não há referências a outros períodos					

Código BNDO: 50235

Segundo Harari & Camargo (1997), as características mais importantes das marés na região são: as diferenças de intensidade de circulação entre a parte costeira profunda e as regiões interiores rasas, contrastes na circulação da Baía de Santos, condições de convergência e divergência nos Canais de Bertioga e de São Vicente, assimetrias de maré nas regiões rasas e rotação anti-horária das correntes nas áreas costeiras. Segundo estes autores, estas feições gerais são comuns a todos os ciclos de maré nesta região.

Ainda, de acordo com Harari & Camargo (1995), para o Porto de Santos, a amplitude média de sizígia é de 1,23 m e a de quadratura é igual a 0,27 m. As frentes frias (freqüentes na região, especialmente durante o inverno), produzem alterações no nível médio do mar, que podem ultrapassar meio metro.

II.4 VAZÃO

Dados de vazão para os rios Cubatão e Quilombo foram obtidos através do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SigRH), para as estações fluviométricas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Nome, coordenadas e período dos dados de vazões das estações fluviométricas dos rios Quilombo e Cubatão.

ESTAÇÃO	NÚMERO	MUNICÍPIO	LATITUDE	LONGITUDE	PERÍODO
Quilombo	80280000	Santos	23°49'49"S	46°19'12"W	1972 a 1986
Ponte Preta	80360000	Cubatão	23°53'39" S	46°27'26" W	1967 a 1968

O Rio Cubatão é o mais importante da região, a vazão média deste rio para o período amostrado é de, aproximadamente, 10,0 m³/s. Para este rio o período de cheia tem início em novembro, com o máximo da vazão em março (aproximadamente 21,5 m³/s). O período de seca ocorre entre os meses de maio a agosto.

As Figuras 13 e 14 apresentam os ciclos sazonais das vazões desses rios para as estações amostradas.

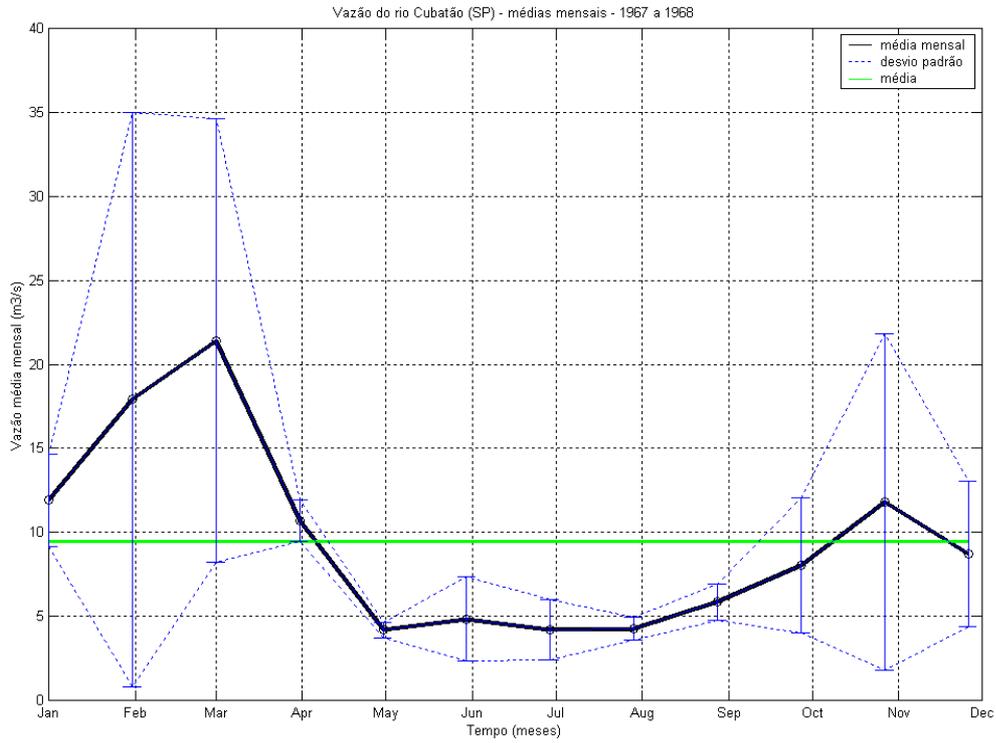


Figura 13 - Vazões médias mensais (m^3/s) do rio Cubatão.

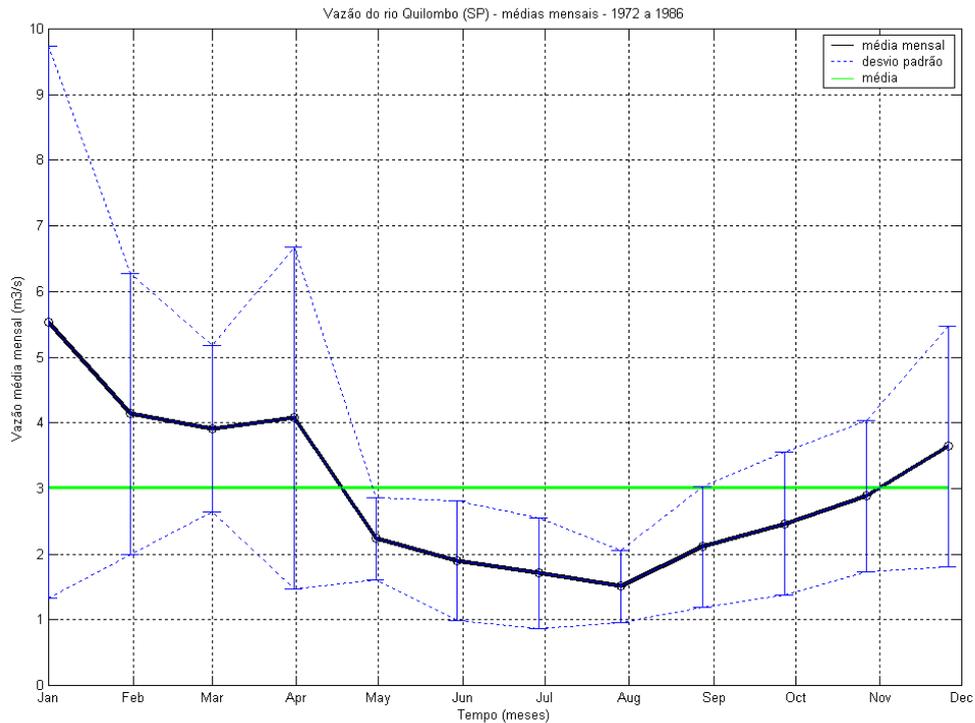


Figura 14 - Vazões médias mensais (m^3/s) do rio Quilombo.

III MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O modelo hidrodinâmico foi implementado visando simular o campo de correntes no Sistema Estuarino de Santos, Baía de Santos e Plataforma adjacente. Nesse estudo, foi implementado o ORTHOHYDRO⁶, modelo hidrodinâmico desenvolvido pela **ASA**, que resolve as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, prognosticando os campos de elevação da superfície e de velocidades, através da especificação de harmônicos de maré, vazão e forçantes meteorológicas superficiais (vento).

III.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES

Para a solução da dinâmica local são consideradas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento em coordenadas esféricas. Também são utilizadas as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq. Embora pouco significativos para o tipo de aplicação, os termos não-lineares de aceleração convectiva, Coriolis e viscosidade horizontal turbulenta são mantidos.

As aproximações para utilização de coordenadas ajustáveis aos contornos são consideradas na solução numérica da formulação descrita. Estas aproximações para grades não-ortogonais utilizam-se de funções de transformações entre os espaços físico e numérico, obtidas por meio da solução de um conjunto acoplado de equações diferenciais parciais elípticas e quase-lineares. Grades conformes, ortogonais ou mesmo grades adensadas são casos particulares resolvidos por esta formulação.

A solução do esquema numérico é iniciada pelo mapeamento da geometria do domínio no espaço matemático, a partir da discretização da área no espaço físico. No espaço matemático (regular) são resolvidas as equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento.

⁶ *Orthogonal Hydrodynamic Model.*

III.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NA REGIÃO

Para simular os padrões de circulação hidrodinâmica na região costeira de Santos, regiões estuarinas e interiores na escala dos processos de transporte e dispersão das plumas provenientes dos descartes de sedimentos, foi implementado um domínio de pequena escala, apropriado às necessidades de resolução destes processos. Os dados de profundidade, utilizados para a elaboração da grade computacional foram obtidos através da digitalização dos valores batimétricos das cartas náuticas da DHN⁷ (números 1.700, 1.701 e 1.711), conforme indicado na Figura 15.

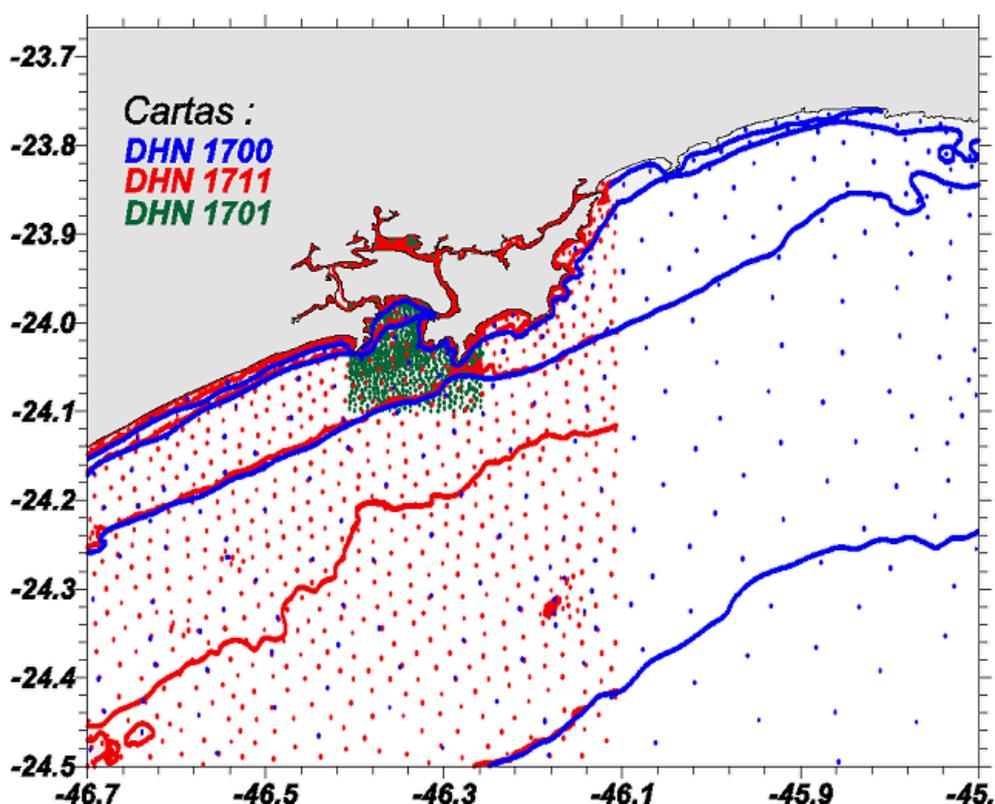


Figura 15 - Pontos batimétricos digitalizados das cartas náuticas DHN número 1.700, 1.701 e 1.711.

⁷ Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

O conjunto de dados batimétricos foi interpolado para todo o domínio e projetado na grade hidrodinâmica de dimensão horizontal de 200x300 pontos, de espaçamento horizontal de 100 metros na região de maior resolução (Figura 16).

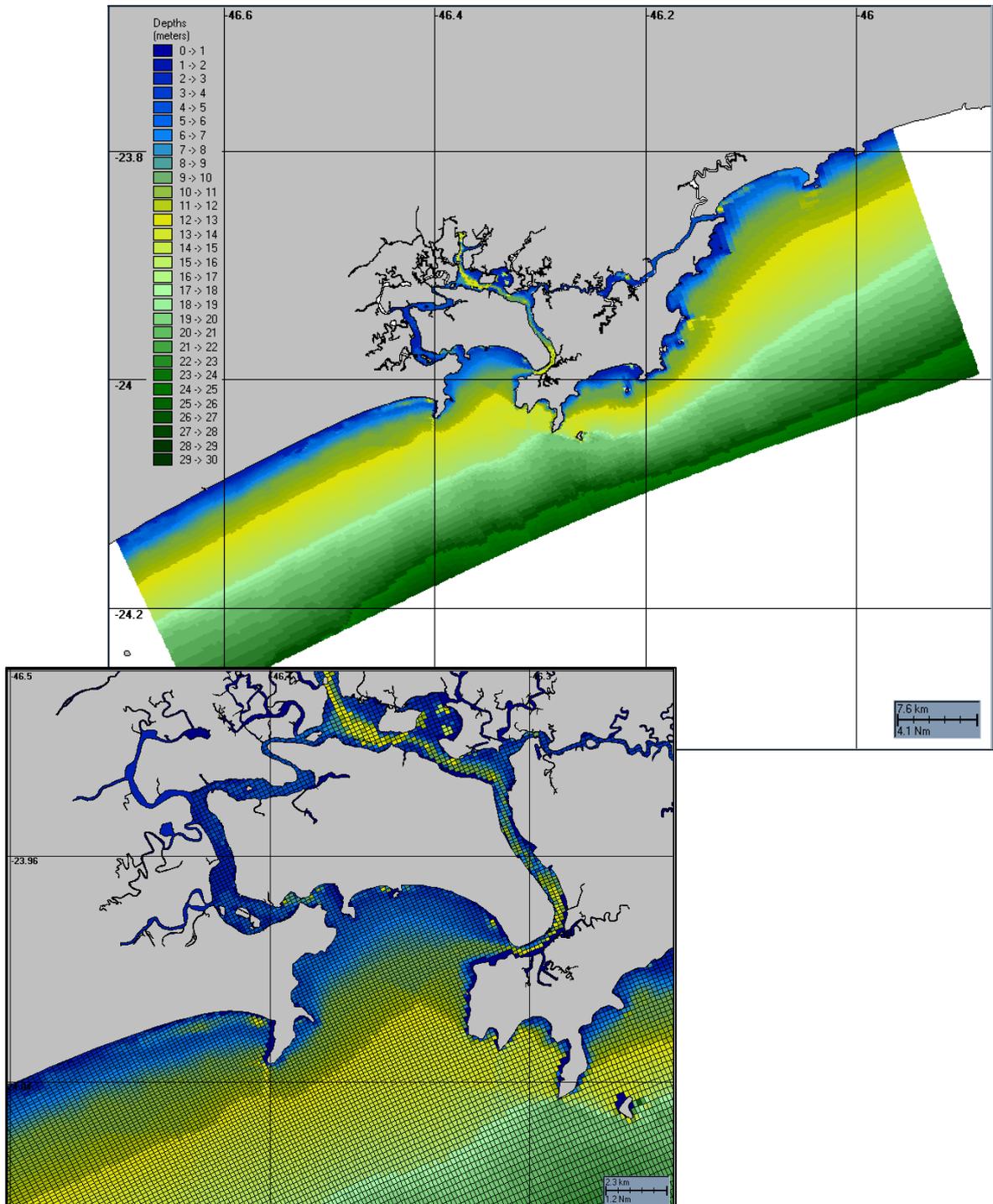


Figura 16 - Grade computacional utilizada no modelo hidrodinâmico, com foco na região da Baía de Santos.

A linha de costa foi digitalizada a partir de imagem Landsat da GeoCover™ - Product Description Sheet Orthorectified Landsat Enhanced Thematic Mapper. Os GeoCover Landsat Mosaics são disponibilizados em projeção/datum UTM (*Universal Transverse Mercator*) / WGS84 (*World Geodetic System 1984*). As imagens estendem-se por 5 graus de latitude ao longo da direção norte-sul, com largura da zona UTM de leste a oeste e têm resolução de 14,25 metros.

Em regiões não hidrografadas ou com baixa qualidade/resolução nos dados foram usados recursos como o georreferenciamento de fotos de satélite, relatos de navegantes, entre outros, para complementar os níveis requeridos à base de dados da **ASA** na região de estudo, visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa.

III.2.1 Calibração do Modelo Hidrodinâmico

Os resultados apresentados neste subitem foram obtidos com os campos de maré e meteorológicos como principais forçantes. Nos contornos abertos, foram utilizadas constantes harmônicas típicas da região, extraídas da FEMAR, e sinais de nível provenientes da meso-escala. Na superfície livre foi utilizado o campo de vento reconstruído estatisticamente, conforme exposto no subitem II.2.

Para aferição da modelagem, utilizou-se o coeficiente de comparação baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio pelo *range* médio do dado:

$$\frac{RMS}{\bar{A}} \quad (1)$$

onde:

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

e \bar{A} é o *range* médio do dado, P = previsão e O = observação.

III.2.1.1 Calibração para o Nível do Mar

Para a calibração da maré, foi utilizada a previsão de maré apresentada no subitem II.3. O coeficiente de comparação obtido foi de 17% para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007. A Figura 17 mostra a comparação entre os resultados dos processamentos para a variável elevação calculada pelo modelo (vermelho) e a série de maré medida (azul).

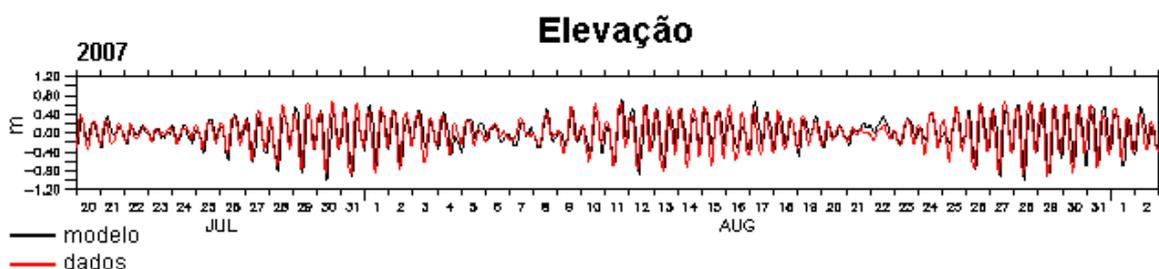


Figura 17 - Série temporal de maré medida (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007.

III.2.1.2 Calibração para as Correntes

No processo de calibração das correntes calculadas pelo modelo, as componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados (apresentados no sub-item II.1), foram comparadas à saída do modelo. A comparação se deu para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007, para as profundidades de 1 e 11 m (Figuras 18 e 19).

Próximo à superfície (1 m, Figura 18), os coeficientes de comparação para as componentes da velocidade foram de 19% para a componente u e 48% para a componente v . Próximo ao fundo (11 m, Figura 19), os erros foram 31% para a componente u e 48% para a componente v .

Neste ponto, poder-se-ia argumentar que o alto erro percentual da componente v para ambas as profundidades (1 e 11 m) indicaria um pequeno índice de validação para tal componente. Contudo, deve-se salientar que a

energia (proporcional ao quadrado da amplitude) associada a componente v é de ordem 10 vezes inferior à energia associada a componente u (vide Figura 7).

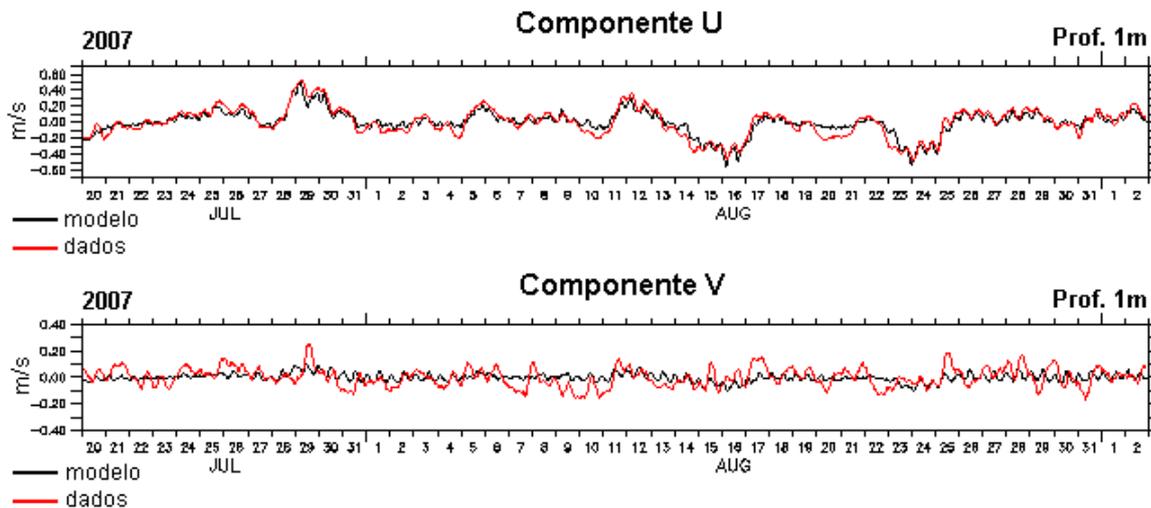


Figura 18 - Séries temporais das componentes u e v da velocidade (azul) e a calculadas pelo modelo (vermelho) para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007, a 1 m de profundidade.

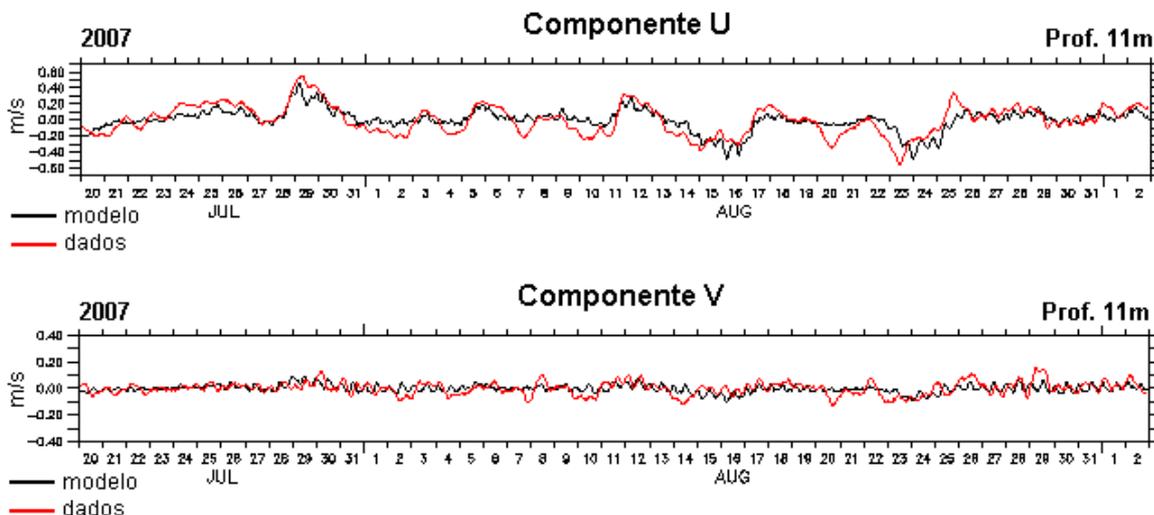


Figura 19 - Séries temporais das componentes u e v da velocidade (azul) e a calculadas pelo modelo (vermelho) para o período de 20 de julho a 02 de setembro de 2007, a 11 m de profundidade.

A seguir, na Figura 20 apresenta um instantâneo do campo de velocidades resultante da modelagem na região da Baía de Santos.

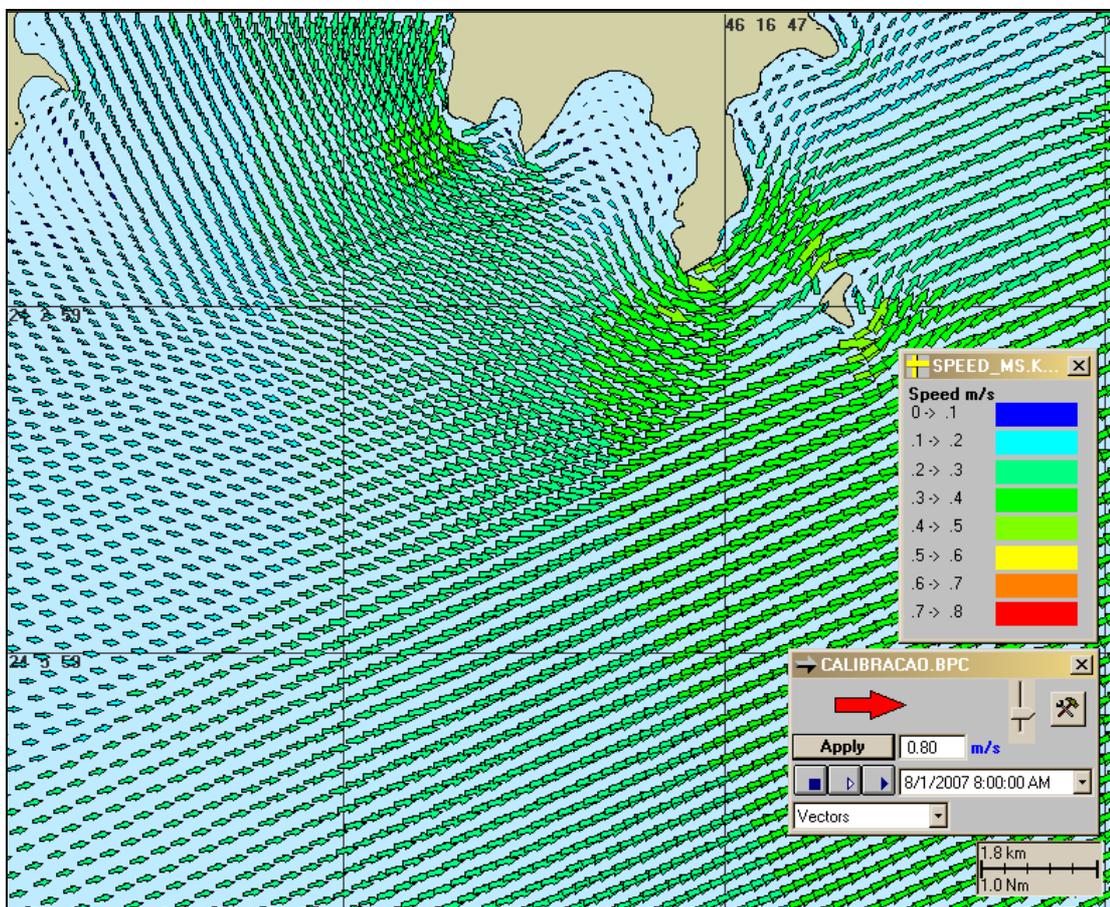


Figura 20 - Instantâneo do campo de correntes simulado pelo modelo hidrodinâmico.

Pode-se observar que o campo de correntes simulado apresenta um padrão em conformidade com as respectivas direção e sentido, obtidas a partir dos dados coletados (Figura 6).

A modelagem hidrodinâmica aqui apresentada considerou como forçantes o vento local (construído estatisticamente) e a elevação do nível do mar (obtida a partir de harmônicos de maré e nível médio obtido a partir do campo de pressão do NCEP). Enfim, pode-se afirmar que, os resultados alcançados nesta implementação apresentaram boa concordância com os padrões de circulação mais energéticos observados nos dados de correntes coletados.

IV ESPECIFICAÇÕES DAS OPERAÇÕES DE DESCARTE DO MATERIAL DRAGADO

As simulações numéricas apresentadas neste estudo consideram o volume de descarte de 1 (um) milhão de metros cúbicos. Para este volume foram realizadas simulações com duração de 30 dias no período de verão e de 30 dias no período de inverno.

Nas simulações para o volume de um milhão de metros cúbicos, os descartes ocorrem ao longo de 25 dias com lançamentos a cada 6 horas, sendo que em cada lançamento é descartado um volume de 10.000 (dez mil) m³. São, portanto, 4 lançamentos por dia perfazendo um volume total de 40.000 m³ por dia, ao final de 25 dias o volume total descartado é de 1.000.000 m³.

Após 25 dias, a simulação continua acompanhando o deslocamento e a deposição da pluma de sedimentos até o trigésimo dia. As simulações têm, portanto, 25 dias de descarte e 30 dias de duração.

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

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

Nas simulações foram utilizadas duas granulometrias, uma característica da área da barra e outra característica da área do canal. A tabela 3 apresenta estas granulometrias (CODESP 2007).

Tabela 3 - Características do material descartado.

	Sedimento - Barra	Sedimento - Canal
Argila	03,0 %	08,0 %
Silte fino	02,5 %	45,0 %
Silte grosso	02,5 %	27,0 %
Areia fina	90,0 %	18,0 %
Areia grossa	02,0 %	02,0 %

V MODELAGEM DA DISPERSÃO E DEPOSIÇÃO DO MATERIAL DRAGADO

As simulações do descarte de material dragado foram conduzidas através da utilização do SSFATE (*Suspended Sediment Fate*), em versão customizada pela **ASA**. O SSFATE foi utilizado nas simulações (campo afastado) de eventos específicos através de múltiplos descartes durante o período simulado, fornecendo concentração na coluna d'água e depósitos de sedimento.

Esse modelo 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 uma 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, possivelmente, presentes nas proximidades do local de deposição dos sedimentos.

A seguir, segue uma descrição mais detalhada do modelo utilizado no estudo proposto e os resultados das simulações de descarte de material dragado.

V.1 MODELO SSFATE

V.1.1 Descrição do Modelo SSFATE

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 dispersão de diferentes classes granulométricas, 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 amplo espectro de cenários de dragagem, considerando os 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.

O modelo SSFATE foi desenvolvido em parceria pela USACE e **ASA**, para estimar as concentrações na coluna d'água de sedimento ressuspendido e os padrões de deposição resultantes das operações de dragagem. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma estimativa consistente do transporte e dispersão de material descartado durante uma operação dragagem. O modelo necessita de especificações sobre a circulação na área de interesse, que pode ser tanto através de medições diretas ou resultados de modelos hidrodinâmicos; tipo de tecnologia de dragagem utilizada, e a taxa de perda de material, além da distribuição vertical inicial do lançamento de sedimento. Através de um processo de *random walk*, o modelo segue classes de partícula representativas à medida que estas se dispersam na coluna d'água e se depositam. As saídas do modelo incluem concentrações de sedimento na coluna d'água e espessuras depositadas no assoalho oceânico.

A validação do modelo SSFATE já foi documentada em uma série de notas técnicas da DOER⁸ (Johnson *et al.*, 2000 e Swanson *et al.*, 2000), em congressos internacionais (Anderson *et al.*, 2001) e, em várias edições da Conferências da “Western Dredging Association” (Swanson *et al.*, 2004; Swanson & Isaji, 2006). Adicionalmente, o modelo foi estendido para incluir a simulação de operações de enterramento de cabos e dutos através de dragas tipo *water jet trenchers* (Swanson *et al.*, 2006).

⁸ USACE *Dredging Operations and Environmental Research*.

V.1.2 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.

O SSFATE é um modelo de partículas para previsão do transporte e dispersão de material descartado. A advecção das partículas é baseada na simples relação de que uma partícula se move linearmente de acordo com a velocidade local, obtida a partir de um modelo hidrodinâmico, para um determinado passo de tempo. Assume-se que a dispersão da partícula segue um processo simples de *random walk* (deslocamento aleatório).

As partículas de sedimento são divididas em cinco classes de tamanho, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e possuem comportamento distinto no modelo.

Tabela 4 - Classes de tamanho dos sedimentos (SSFATE).

CLASSE	TIPO DE SEDIMENTO	INTERVALO DE TAMANHO (MICRAS)
1	Argila	0-7
2	Silte Fino	8-35
3	Silte Grosso	36-74
4	Areia Fina	75-130
5	Areia Grossa	>130

A seguir é descrita a base teórica do modelo, segundo nota técnica do DOER (2000) e os trabalhos de Swanson *et al.* (2007).

V.1.2.1 Transporte de Sedimentos

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

$$X^{n+1} = X^n + \Delta X \quad (\text{V.1.1.1-1})$$

$$Y^{n+1} = Y^n + \Delta Y \quad (\text{V.1.1.1-2})$$

$$Z^{n+1} = Z^n + \Delta Z \quad (\text{V.1.1.1-3})$$

onde

$$\Delta X = U\Delta T + L_x \quad (\text{V.1.1.1-4})$$

$$\Delta Y = V\Delta T + L_y \quad (\text{V.1.1.1-5})$$

$$\Delta Z = W_{s_i}\Delta T + L_z \quad (\text{V.1.1.1-6})$$

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;

ΔT = passo de tempo;

W_{s_i} = velocidade de deposição da classe i de partículas;

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

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

$$L_x = \sqrt{D_h \Delta T} \cos(2\pi R) \quad (\text{V.1.1.1-7})$$

$$L_y = \sqrt{D_h \Delta T} \sin(2\pi R) \quad (\text{V.1.1.1-8})$$

$$L_z = \sqrt{D_z \Delta T} (0,5 - R) \quad (\text{V.1.1.1-9})$$

onde

$D_h, D_z =$ coeficientes horizontal e vertical de dispersão, 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 dispersão artificial próximo aos gradientes de concentração e pode ser facilmente utilizado para vários tipos de sedimento e diferentes tecnologias de dragagem (*e.g.* mecânica, hidráulica). O objetivo inicial 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 no SSFATE.

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, embora previsível, com a interação de diferentes tamanhos de classes, *i.e.* a deposição de um tipo de partícula não é independente dos outros tipos. Estes processos foram adotados no SSFATE e são baseados em estudos prévios da USACE (Teeter, 1998).

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.

V.1.2.2 Velocidade de Deposição de Sedimentos

A velocidade de deposição de cada classe de tamanho de partícula, exceto para areia grossa, é dada por:

$$W_{s_i} = a \left(\frac{C}{C_{ul}} \right)^{n_i} \quad (\text{V.1.1.1-10})$$

$$a = \frac{1}{C} \sum_i a_i C_i \quad (\text{V.1.1.1-11})$$

$$\bar{C}_{ul} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ul_i} C_i \quad (\text{V.1.1.1-12})$$

$$\bar{C}_{ll} = \frac{1}{C} \sum_i C_{ll_i} C_i \quad (\text{V.1.1.1-13})$$

onde

C_{ul_i} , C_{ll_i} = limites de concentração superior e inferior, respectivamente, para uma acentuada deposição da classe i de grão;

a_i = velocidade de deposição da média máxima de uma classe de tamanho de partículas;

C = concentração total para todas as classes de tamanho de grão (exceto areia grossa).

Se $C \geq \bar{C}_{ul}$ então

$$W_{s_i} = a \quad (\text{V.1.1.1-14})$$

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

$$Ws_i = a \left(\frac{\bar{C}_{ll}}{\bar{C}_{ul}} \right)^{n_i} \quad (\text{V.1.1.1-15})$$

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta alguns valores típicos de C_{ll_i} , C_{ul_i} , a_i e n_i para quatro tamanhos de grão considerados no SSFATE. O modelo também considera uma classe granulométrica superior a 4, equivalente à areia grossa (classe 5), com valor de a_i constante e igual a 0,1 m/s.

Tabela 5 - 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
1	0-7 (argila)	50	1.000	0,0008	1,33
2	8-35 (silte fino)	150	3.000	0,0023	1,10
3	36-74 (silte grosso)	250	5.000	0,0038	0,90
4	75-130 (areia fina)	400	8.000	0,0106	0,80

V.1.2.3 Deposição de Sedimentos

A massa de sedimento é removida primeiramente a partir da maior classe de tamanho que ocupa cada célula. A deposição para as classes restantes é, então, computada, começando com a segunda maior 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:

$$Flux_i = \frac{C_i Flux_{i+1}}{C_{i+1} + 1} \quad (\text{V.1.1.1-16})$$

Por outro lado:

$$Flux_i = b_i C_i Ws_i P_i \quad (\text{V.1.1.1-17})$$

onde,

P_i = probabilidade de deposição (descrita abaixo) para cada classe i de grão;

C_i = concentração de sedimento;

W_{s_i} = velocidade de deposição calculada;

b_i = parâmetro empírico que inclui todos os outros fatores que influenciam a deposição, além do atrito.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta valores típicos para o coeficiente b_i , para as quatro menores classes de tamanho de grão.

Tabela 6 - Valores típicos para b_i .

CLASSE	b_i
1 (argila)	0,2
2 (silte fino)	0,4
3 (silte grosso)	0,6
4 (areia fina)	1,0

A probabilidade de deposição P_i é, então, calculada para cada tamanho de classe, como segue, utilizando uma tensão de atrito de fundo (τ) através do campo de correntes:

P_1 , para a classe de tamanho 1 (argila):

$$P_1 = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}}\right), \text{ se } \tau < \tau_{cd} \quad (\text{V.1.1.1-18})$$

$$P_1 = 0, \text{ se } \tau > \tau_{cd} \quad (\text{V.1.1.1-19})$$

onde τ_{cd} é a tensão de atrito crítica para a deposição da fração argila. Um valor típico para τ_{cd} é 0,016 Pa.

P_i , para os outros tamanhos de classe (2, 3 e 4):

$$P_i = 0, \text{ se } \tau \geq \tau_{ul_i} \quad (\text{V.1.1.1-20})$$

$$P_i = 1, \text{ se } \tau \leq \tau_{ll_i} \quad (\text{V.1.1.1-21})$$

onde,

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

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

Para valores de τ entre τ_{ll_i} e τ_{ul_i} , é utilizada uma interpolação linear. Valores típicos para τ_{ll_i} e τ_{ul_i} são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 7 - Valores típicos para τ_{ll_i} e τ_{ul_i} .

CLASSE	τ_{ll_i}	τ_{ul_i}
0	0,016	0,03
1	0,03	0,06
2	0,06	0,20
3	0,20	0,90

O SSFATE representa cada classe de sedimento através de um conjunto de partículas lagrangianas. A locação das partículas corresponde ao centro de uma nuvem da distribuição Gaussiana do sedimento designado. Uma série de “pacotes” de partículas lagrangianas são liberadas (simulando o descarte de sedimento durante operações de dragagem) a cada passo de tempo do modelo. Cada “pacote” Consiste de 25 partículas que representam os tipos de sedimento (argila, silte fino, silte grosso, areia fina e areia grossa) e as distribuições verticais. Para cada 5 “pacotes” liberados em simulações de 5 dias, por exemplo, o número total de partículas lagrangianas seria de 180.000 (25 x 5 pacotes por cada passo de tempo (5 min) durante 5 dias). Partículas lagrangianas não se depositam como

um todo, mas sim como frações baseadas no cálculo do fluxo descrito nas formulações acima. A deposição real pode continuar ocorrendo indefinidamente a partir da massa de partículas remanescentes (para cada classe de tamanho e localização de deposição). A distribuição da massa depositada é mapeada na mesma grade de concentração na coluna d'água.

Para parametrizar os efeitos da remobilização do material depositado foi utilizado o modelo TRANSPOR2004 (Delft Hydraulics), com o qual é possível estimar o transporte de sedimentos de fundo e conseqüentemente a massa de sedimentos remobilizados, a partir das informações sobre a profundidade local, velocidade das correntes de fundo, altura significativa de onda e período de pico, ângulo entre a direção de propagação da onda e das correntes e, características do sedimento.

V.1.3 Cenários Simulados com o SSFATE

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

O campo de correntes variável no tempo e no espaço utilizado foi gerado pelo modelo hidrodinâmico descrito no Capítulo III. A região de descarte, (Pontos P1, P2 e P3), é apresentada na Figura 1. Os cenários simulados foram divididos em períodos sazonais (verão – inverno). As informações sobre o número total de descartes, volume médio, granulometria e outras informações necessárias foram apresentadas no Capítulo IV.

A tabela 4 mostra os cenários simulados. Os nomes dos cenários são dados de acordo com o ponto de descarte (P1, P2 ou P3), volume descartado (1M – 1 milhão de m³), tipo de sedimento (AR – sedimento proveniente da barra e LA – sedimento do canal do porto) e estação do ano (VER – verão e INV – inverno).

Tabela 8 - Nomenclatura dos cenários simulados

	Pontos	Verão		Inverno	
		BARRA	CANAL	BARRA	CANAL
1 milhão m ³	P1	P1 1M AR VER	P1 1M LA VER	P1 1M AR INV	P1 1M LA INV
	P2	P2 1M AR VER	P2 1M LA VER	P2 1M AR INV	P2 1M LA INV
	P3	P3 1M AR VER	P3 1M LA VER	P3 1M AR INV	P3 1M LA INV

V.1.4 Critério de corte adotado na apresentação dos resultados.

Na apresentação dos resultados, foi adotado como critério de corte as espessuras maiores ou iguais a 1 mm. Este critério foi definido em função de:

- Em áreas dragadas (regiões costeiras), organismos (considerando diferentes espécies e estágios de vida) precisariam de espessuras superiores a 1 mm para sofrer efeitos letais significativos (ASA, 2003). Para o descarte de material dragado em região *offshore*, esta seria uma espessura bastante conservativa.

Para as figuras de deposição no fundo, a área de corte foi delimitada em função da região em que a espessura apresentou valores maiores ou iguais à 1 mm. Desta forma, as figuras de espessura e deposição junto ao fundo de cada um dos cenários simulados apresentam mesmo formato e tamanho.

V.1.5 Resultados das Simulações com o SSFATE

A Tabela 9 apresenta a numeração das figuras que contêm os resultados obtidos pelas simulações feitas com o modelo SSFATE, mostrando a espessura de sedimento no fundo (m) e deposição no fundo ($g \times m^{-2}$), de acordo com o volume descartado. As figuras correspondentes encontram-se após as tabelas.

Tabela 9 - Numeração das figuras para os descartes de 1 milhão de m³.

	Pontos	Verão		Inverno	
		BARRA	CANAL	BARRA	CANAL
1 milhão	P1	P1 1M AR VER	P1 1M LA VER	P1 1M AR INV	P1 1M LA INV
	Espessura	Figura 21	Figura 23	Figura 25	Figura 27
	Deposição	Figura 22	Figura 24	Figura 26	Figura 28
	P2	P2 1M AR VER	P2 1M LA VER	P2 1M AR INV	P2 1M LA INV
	Espessura	Figura 29	Figura 31	Figura 33	Figura 35
	Deposição	Figura 30	Figura 32	Figura 34	Figura 36
	P3	P3 1M AR VER	P3 1M LA VER	P3 1M AR INV	P3 1M LA INV
	Espessura	Figura 37	Figura 39	Figura 41	Figura 43
	Deposição	Figura 38	Figura 40	Figura 42	Figura 44

A seguir, são apresentados os resultados gráficos das simulações feitas com o modelo SSFATE. Primeiramente, são mostrados os resultados de espessura seguidos pela deposição junto ao fundo para cada um dos cenários simulados.

V.1.5.1 Descartes de um milhão de metros cúbicos

A seguir são apresentados os resultados correspondentes aos cenários com volume total descartado igual a 1 milhão de m³.

A Tabela 10 mostra cada um dos cenários em que foram descartados 1 milhão de m³ e a respectiva área com espessuras maiores que 1 mm.

Tabela 10 – Áreas cobertas com espessuras maiores que 1mm (1 milhão de m³).

Cenário	Área (km ²)
p1_1m_ar_ver	0,347
p1_1m_la_ver	0,276
p1_1m_ar_inv	0,676
p1_1m_la_inv	0,754
p2_1m_ar_ver	0,368
p2_1m_la_ver	0,719
p2_1m_ar_inv	0,300
p2_1m_la_inv	0,795
p3_1m_ar_ver	0,366
p3_1m_la_ver	0,683
p3_1m_ar_inv	0,289
p3_1m_la_inv	0,761

Na seqüência, são mostrados os resultados gráficos na forma de figuras de espessura e deposição junto ao fundo para cada um dos cenários simulados.

A Figura 21 mostra o resultado obtido para os descartes efetuados no Ponto 1, perfazendo um total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de verão, a extensão que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente 0,35 km². A maior espessura atingida foi de 0,66 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando a pouco mais de 810 kg/m².

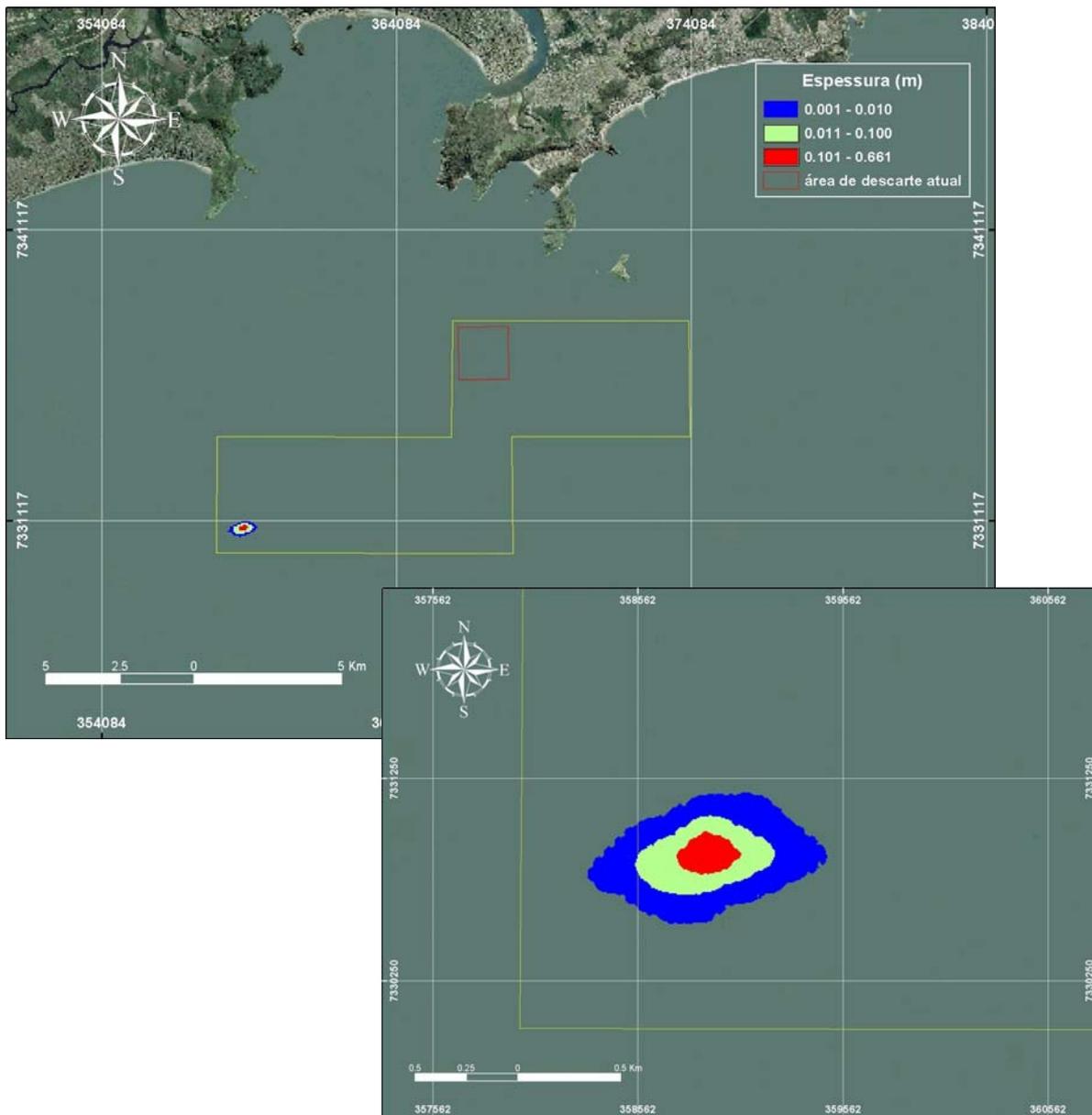


Figura 21 - P1 1M AR VER- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o verão.

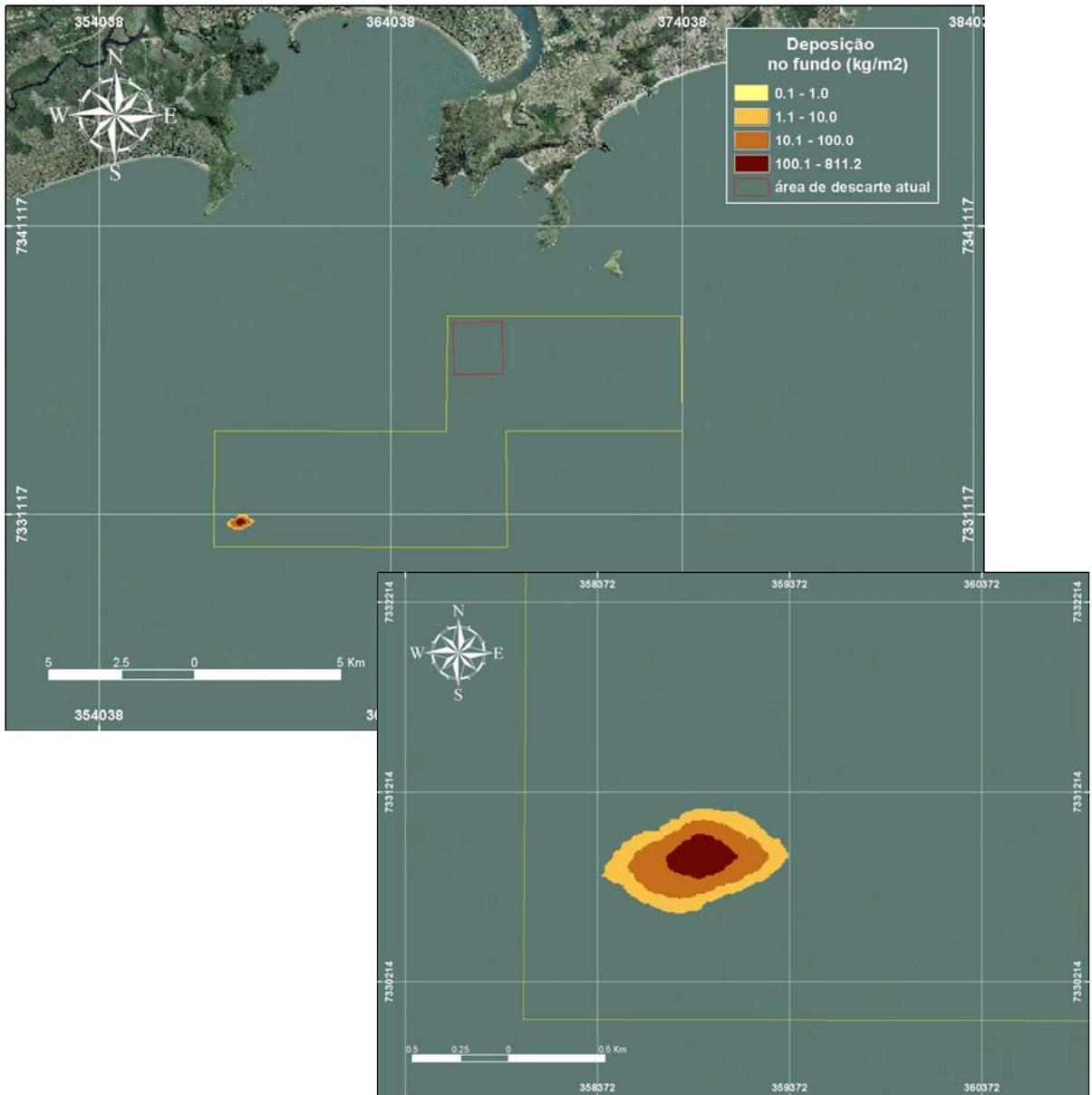


Figura 22 - P1 1M AR VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o verão.

Para o mesmo ponto, período e volume, mas de sedimentos provenientes do canal, a área que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,68 km². A maior espessura atingida foi de cerca de 0,48 m, com valor máximo de deposição junto ao fundo chegando próximo a 534 kg/m².

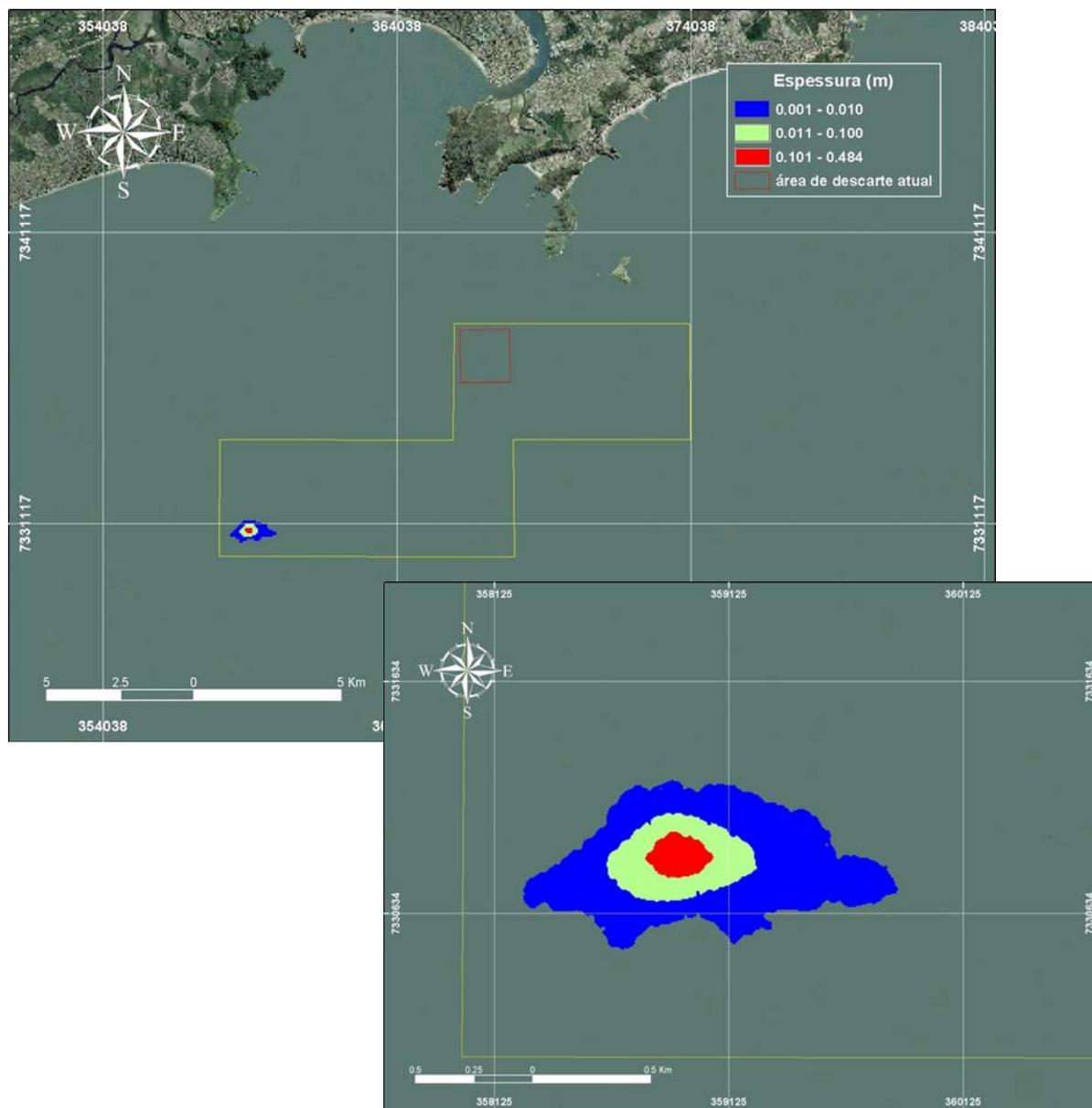


Figura 23 - P1 1M LA VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o verão.

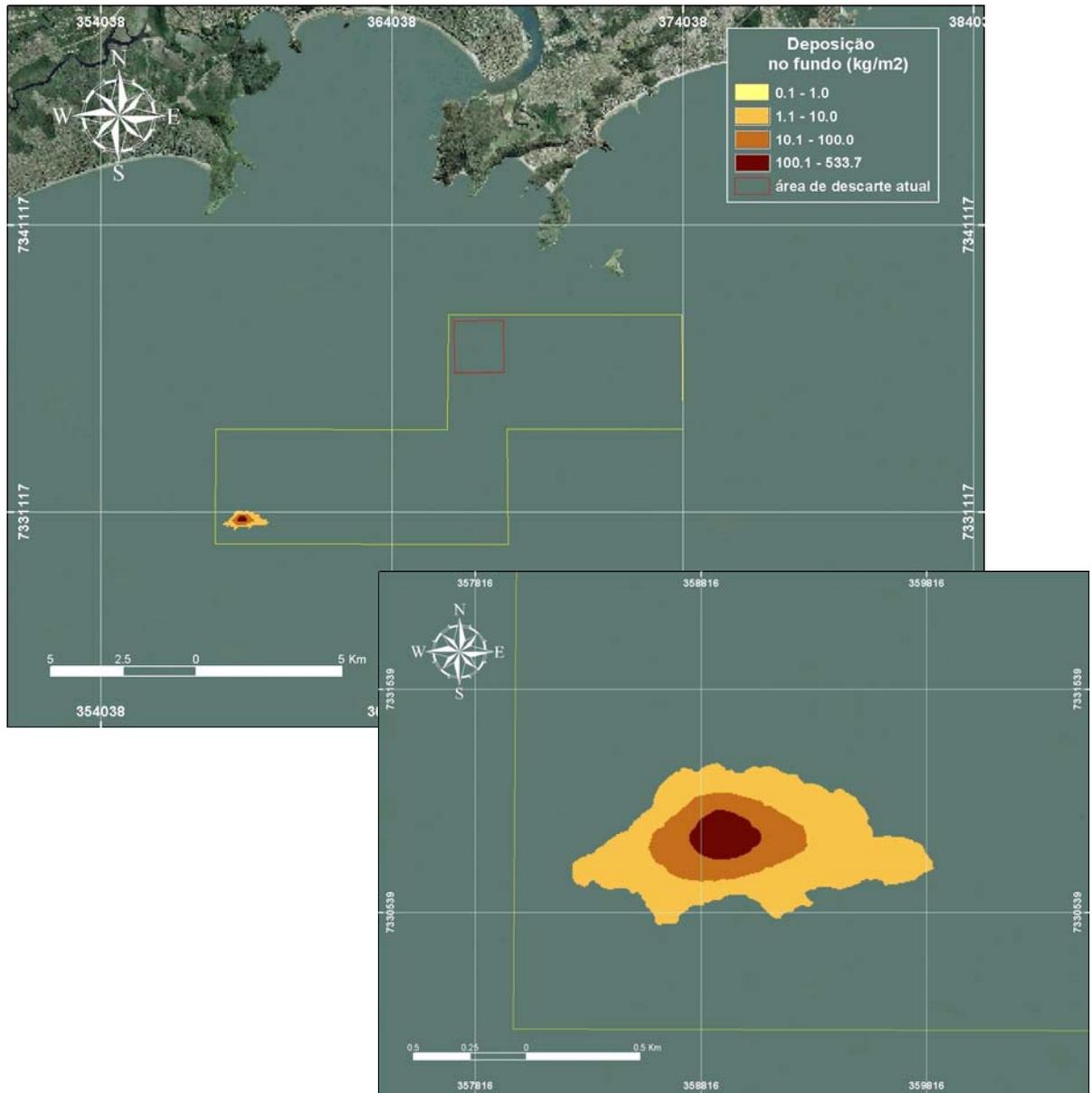


Figura 24 - P1 1M LA VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o verão.

Para o total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de inverno, no Ponto 1, a extensão que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,28 km². A maior espessura atingida foi de 0,48 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando próximo a 643 kg/m².

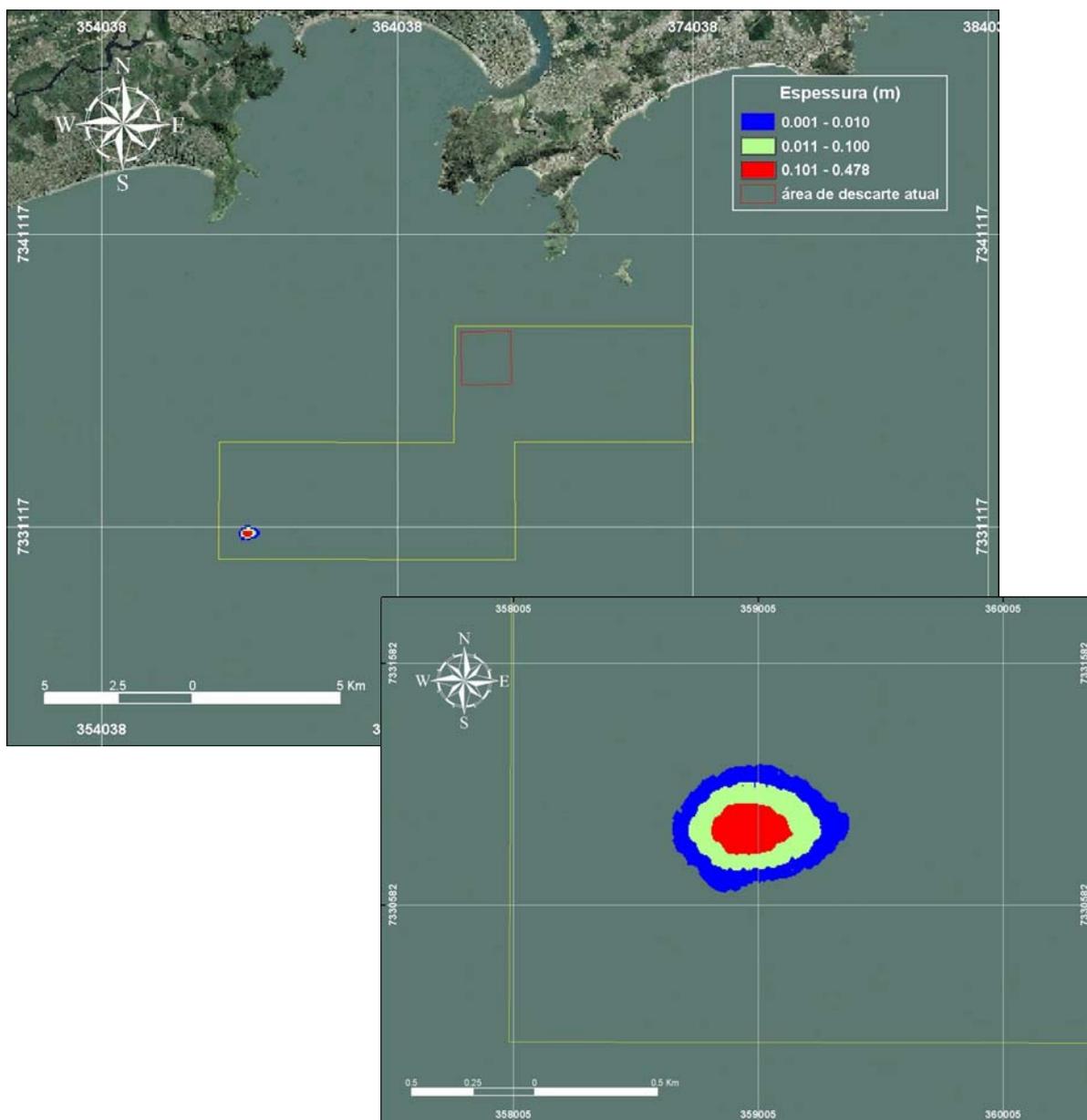


Figura 25 - P1 1M AR INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o inverno.

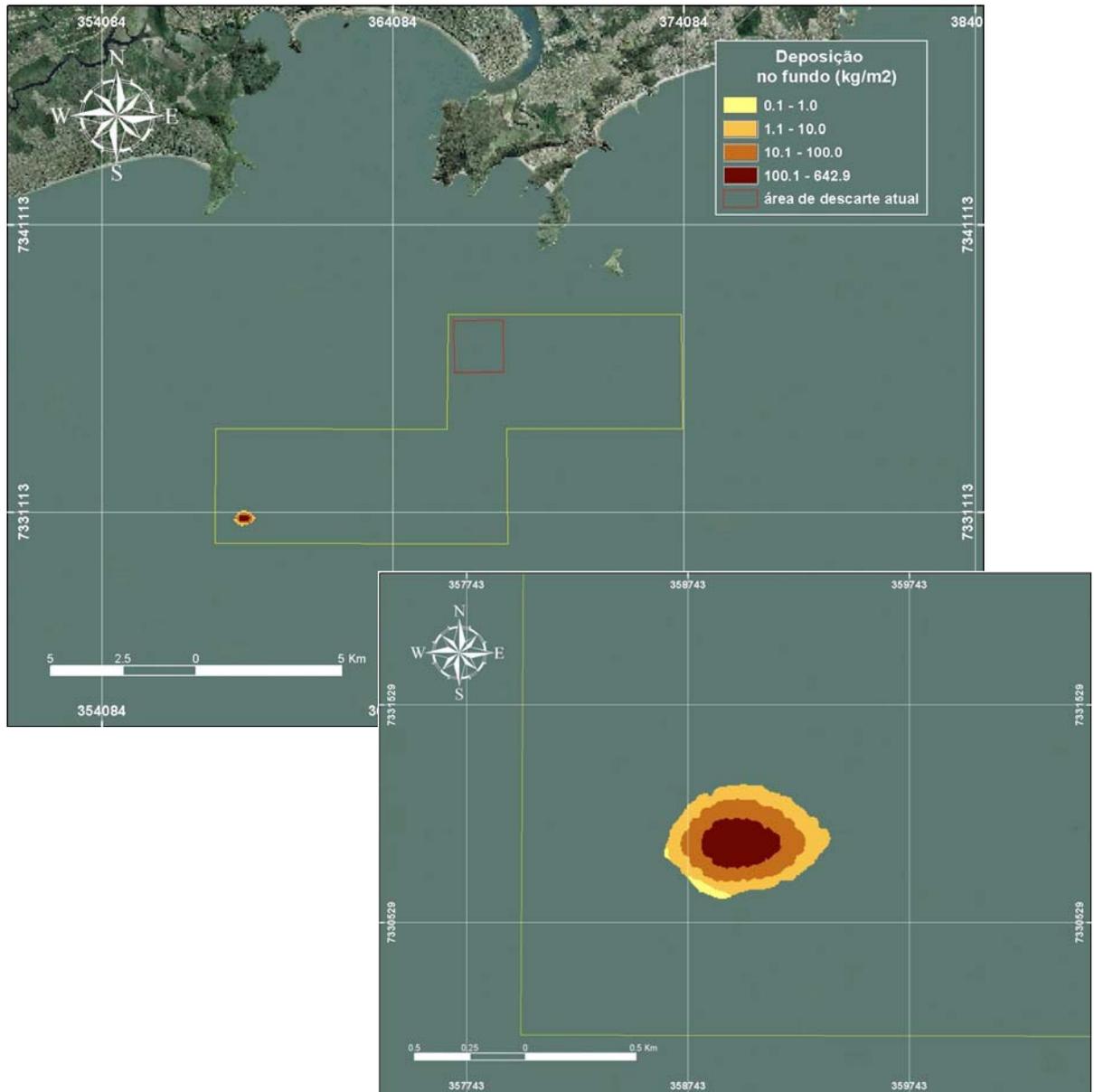


Figura 26 - P1 1M AR INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 1, durante o inverno.

Para os sedimentos do canal, com descartes no período de inverno realizado no Ponto 1, somando um total de 1 milhão de metros cúbicos, a extensão com espessuras maiores que 1 mm foi cerca 0,75 km². A maior espessura atingida foi de, aproximadamente, 0,46 m, com valor máximo aproximado de deposição junto ao fundo chegando a 628 kg/m².

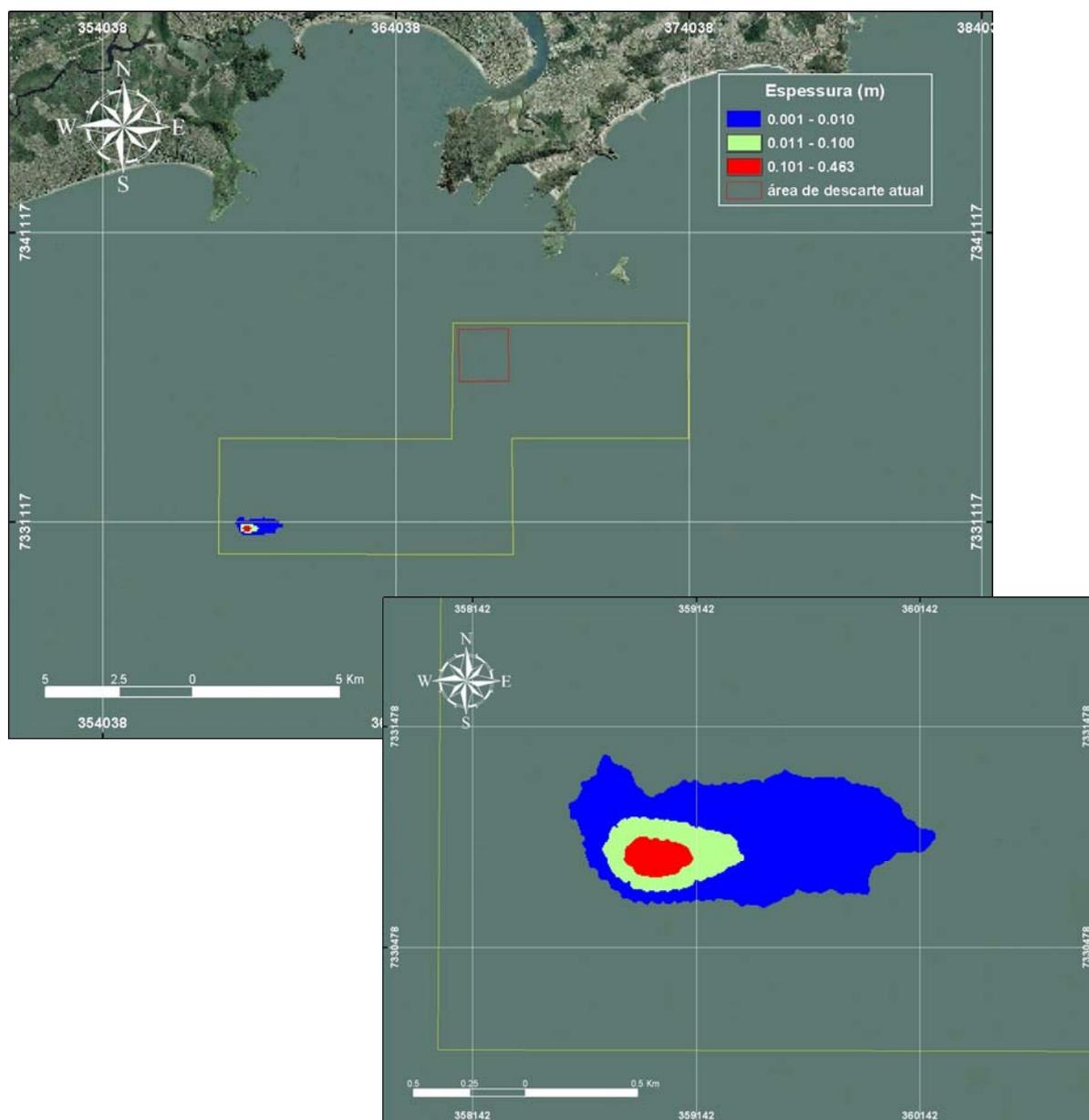


Figura 27 - P1 1M LA INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal efetuados no ponto 1, durante o inverno.

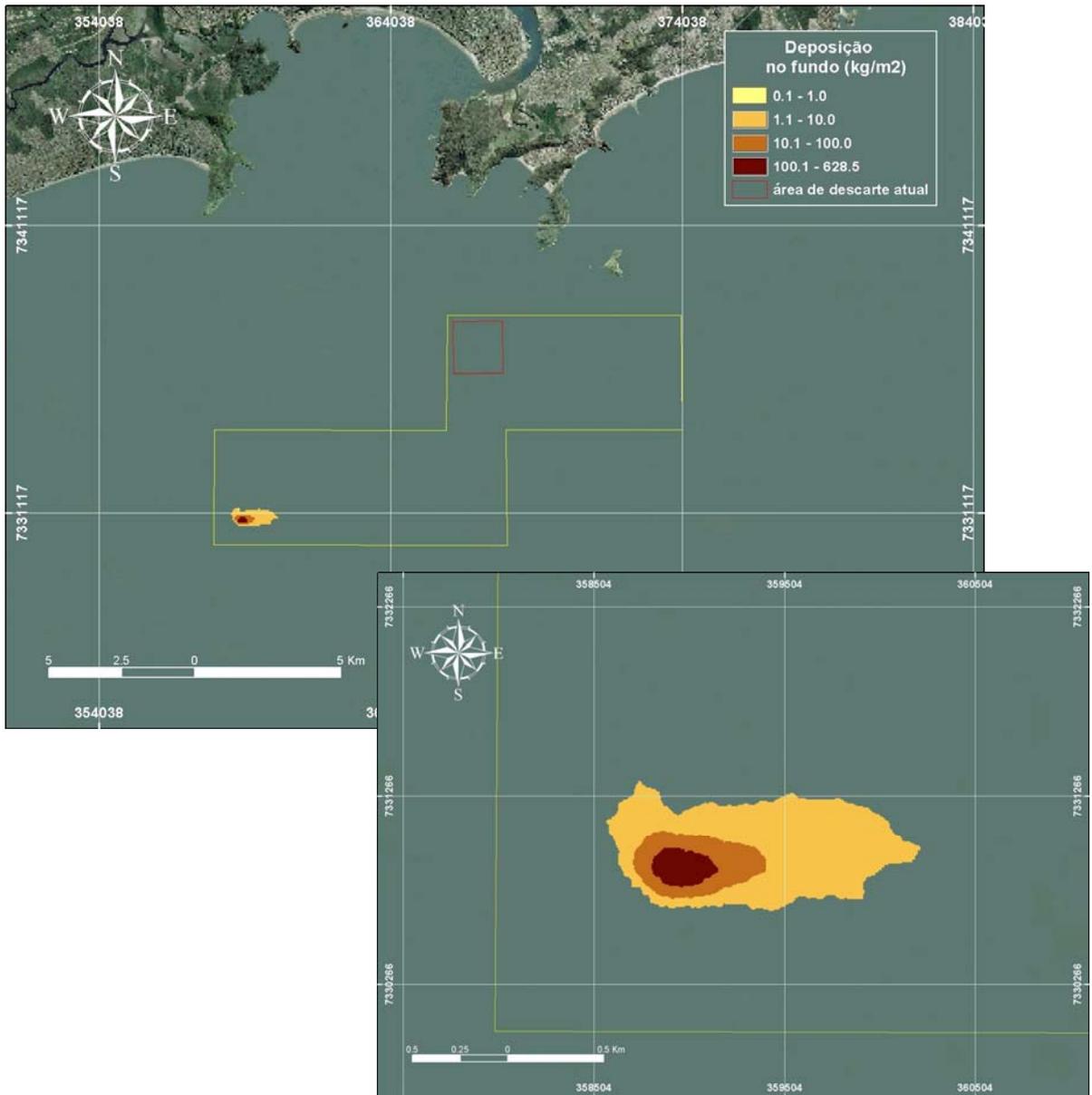


Figura 28 - P1 1M LA INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 1, durante o inverno.

Para os descartes efetuados no Ponto 2, perfazendo um total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de verão, a extensão que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente 0,37 km². A maior espessura atingida foi de 0,62 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando a quase de 829 kg/m².

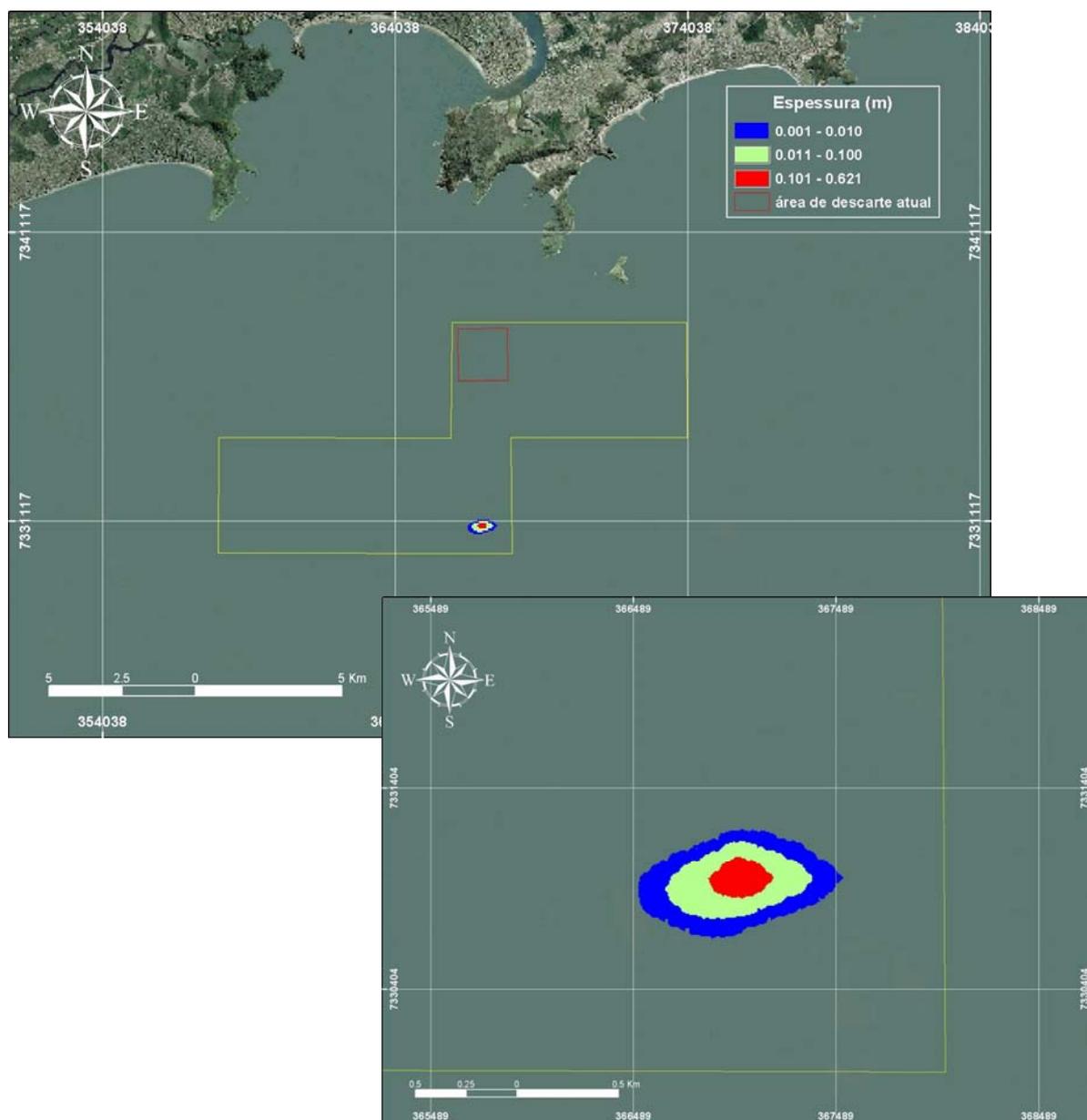


Figura 29 – P2 1M AR VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o verão.

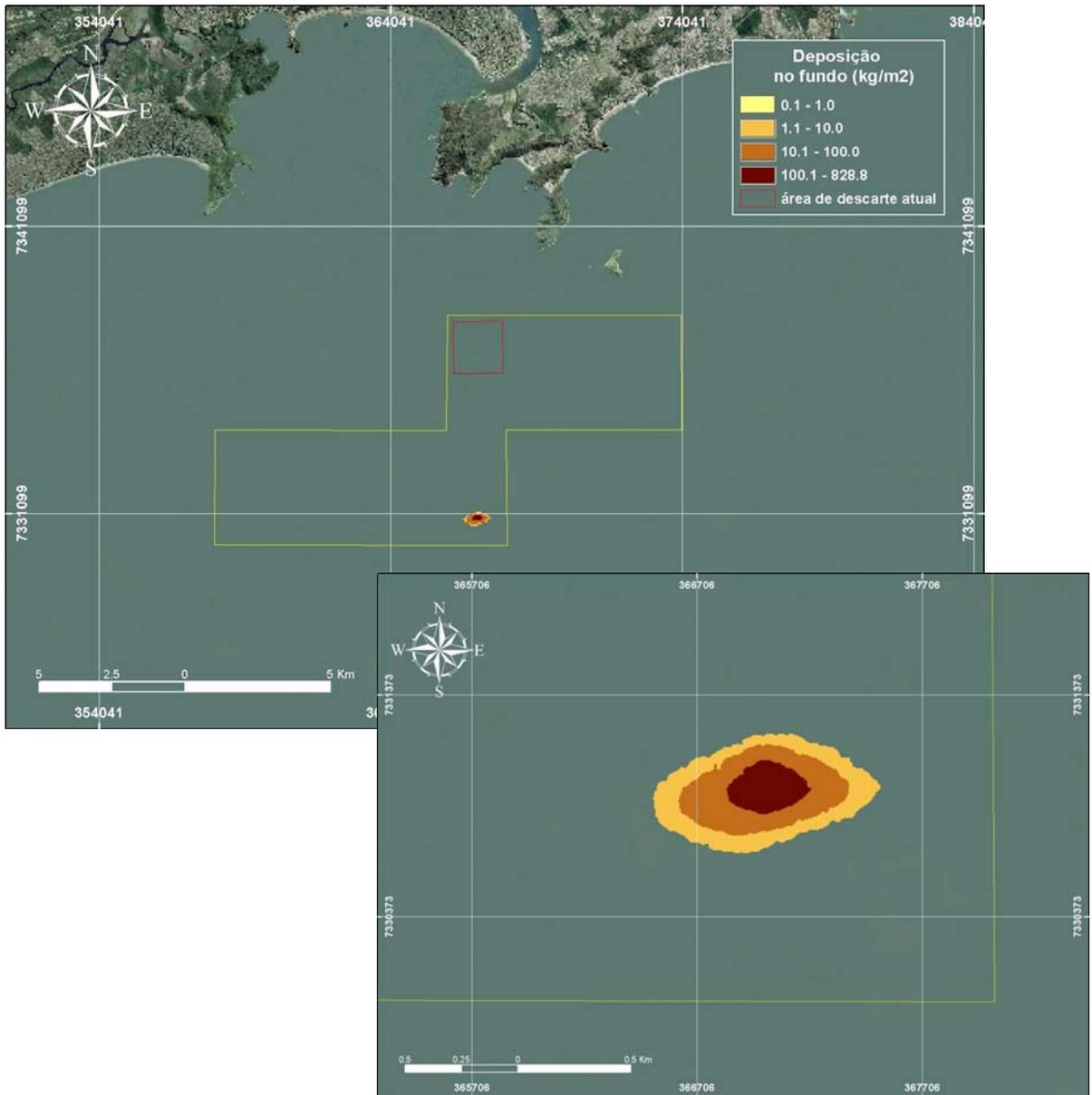


Figura 30 – P2 1M AR VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o verão.

Para o mesmo ponto, período e volume, mas de sedimentos provenientes do canal, a área que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,72 km². A maior espessura atingida foi de cerca de 0,46 m, com valor máximo de deposição junto ao fundo chegando a 614 kg/m².

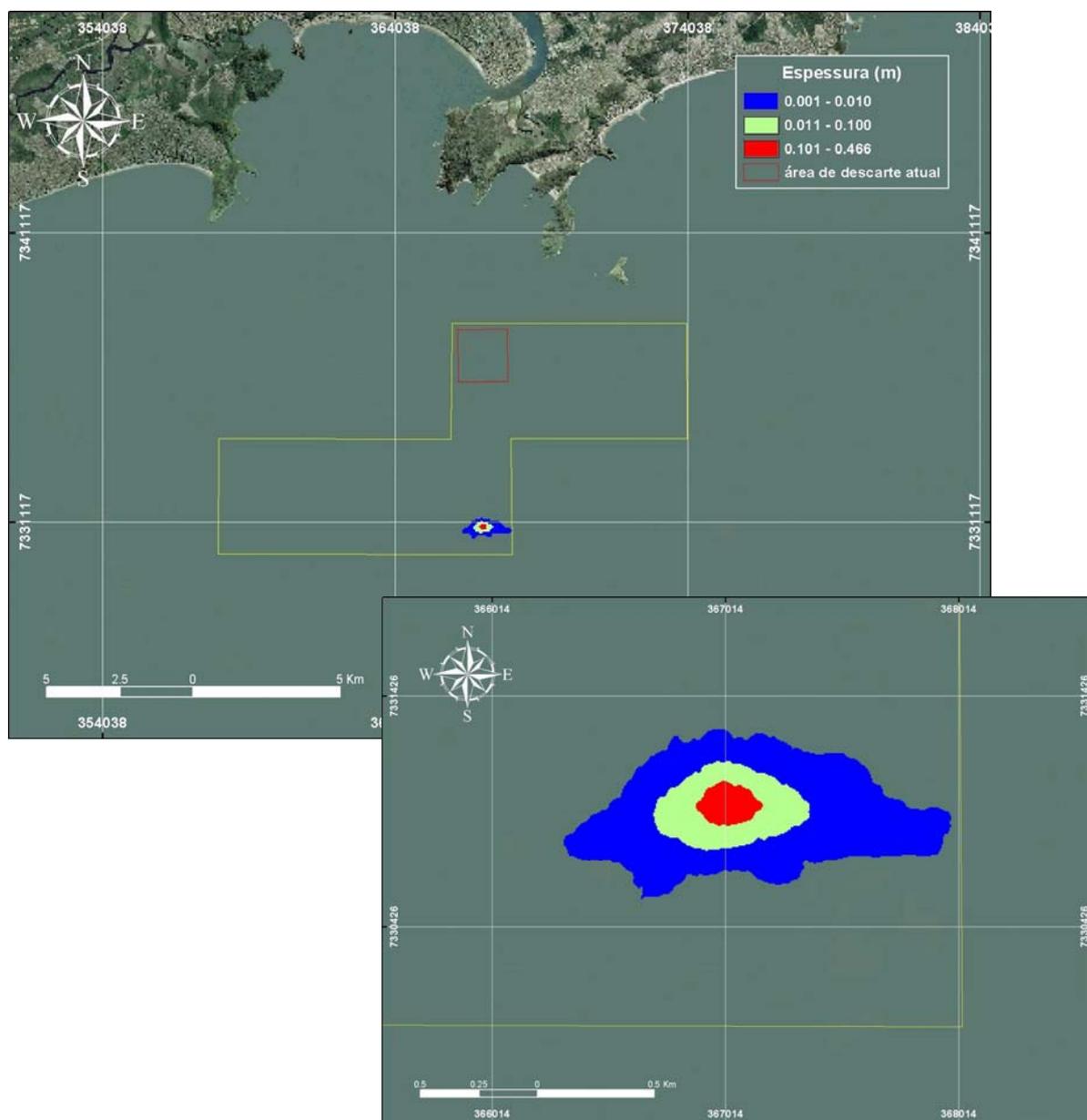


Figura 31 – P2 1M LA VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o verão.

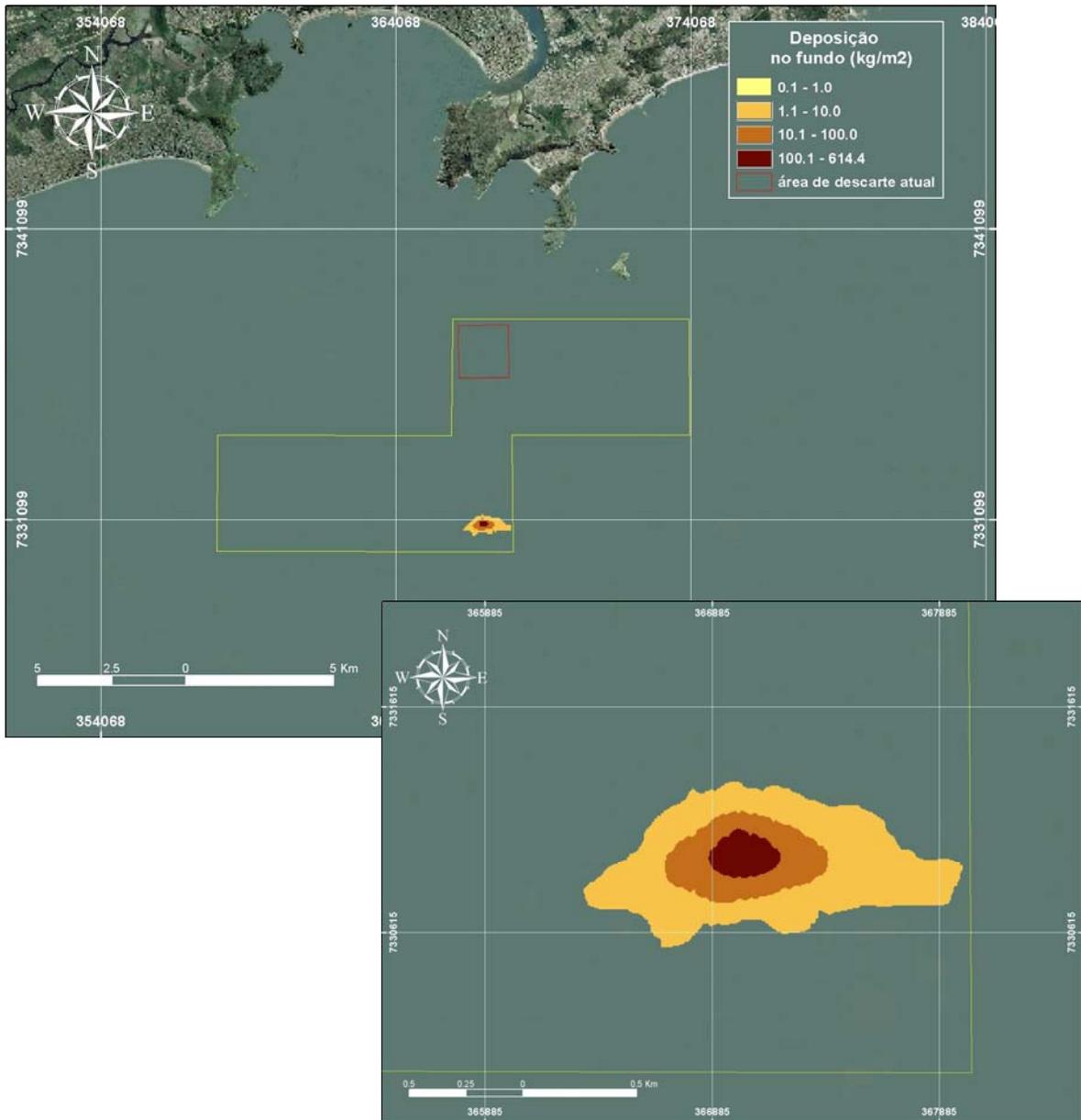


Figura 32 – P2 1M LA VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o verão.

Para o total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de inverno, no Ponto 2, a extensão que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,30 km². A maior espessura atingida foi de 0,45 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando a 643 kg/m².

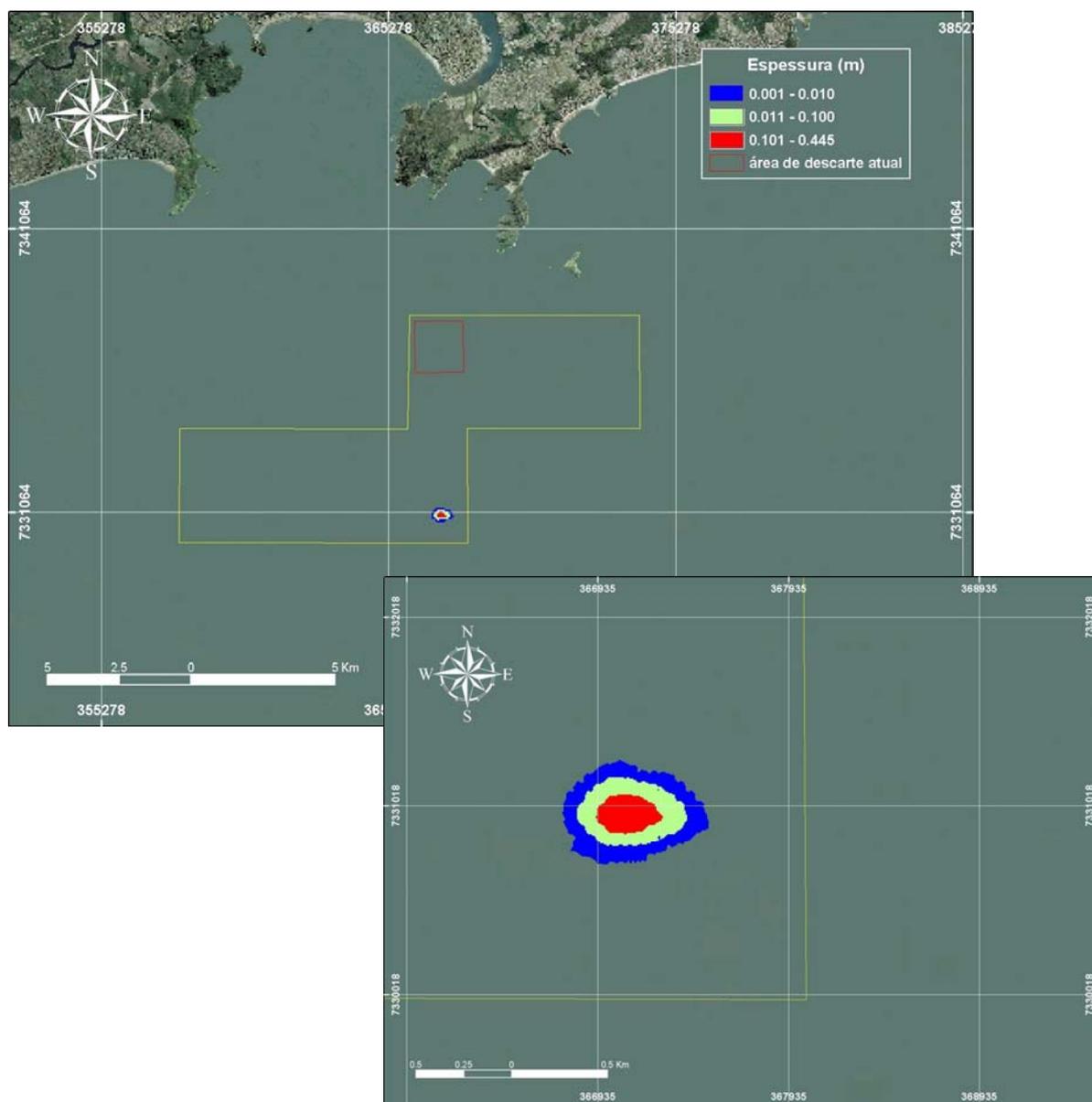


Figura 33 – P2 1M AR INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o inverno.

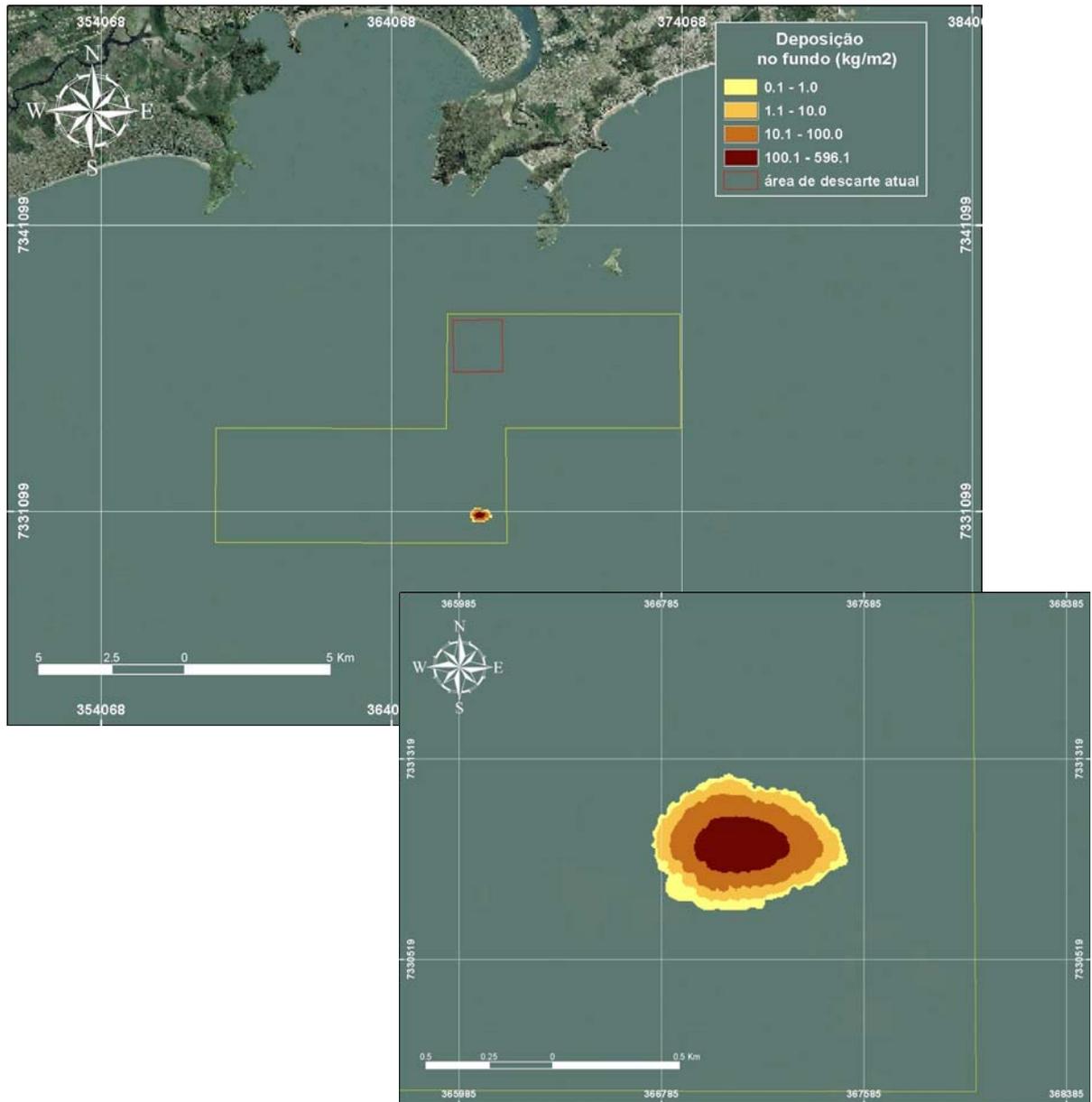


Figura 34 – P2 1M AR INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 2, durante o inverno.

Para os sedimentos do canal, com descartes no período de inverno realizado no Ponto 2, somando um total de 1 milhão de metros cúbicos, a extensão com espessuras maiores que 1 mm foi cerca 0,72 km². A maior espessura atingida foi de, aproximadamente, 0,41 m, com valor máximo aproximado de deposição junto ao fundo chegando a 547 kg/m².

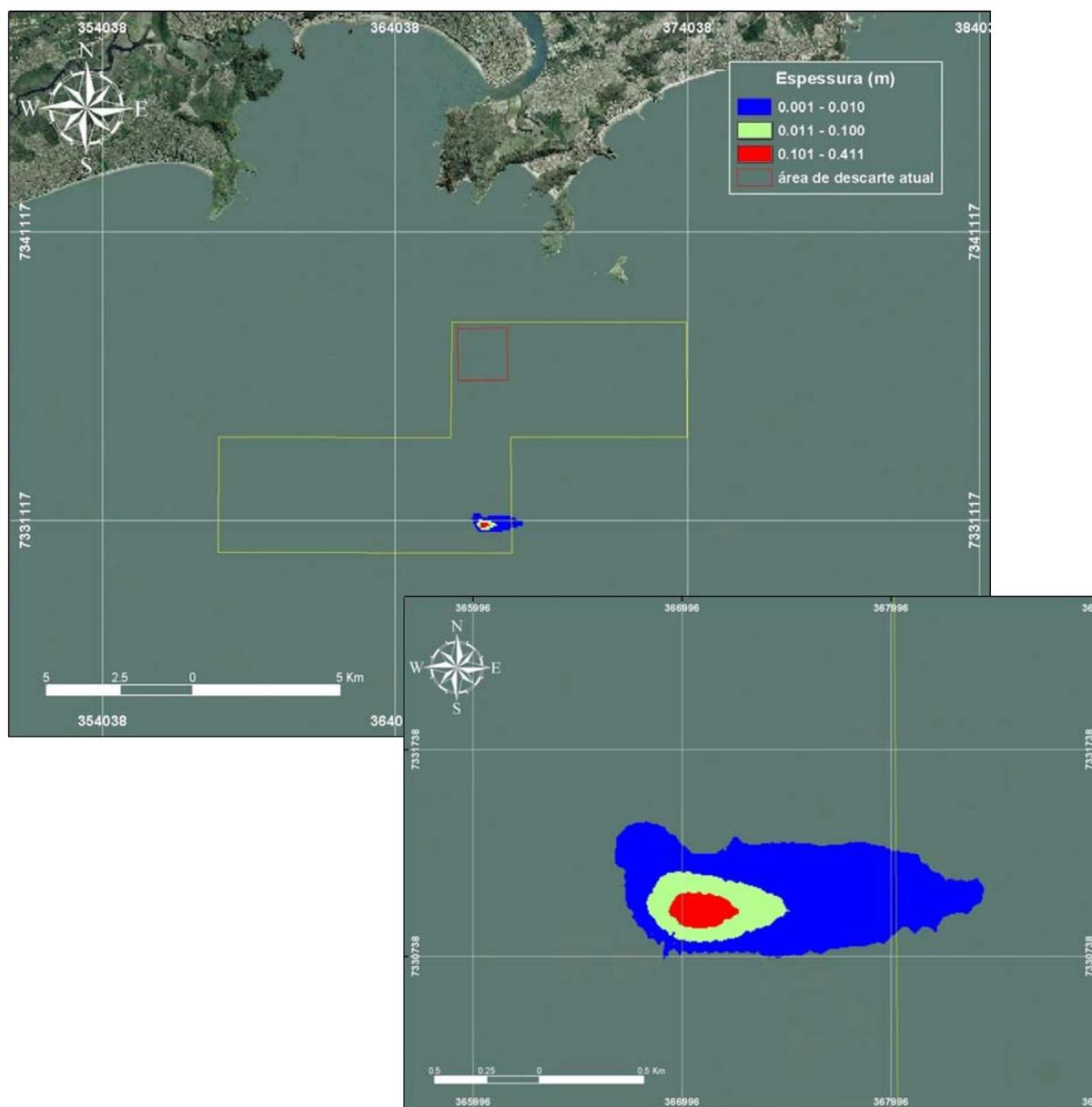


Figura 35 P2 1M LA INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o inverno.

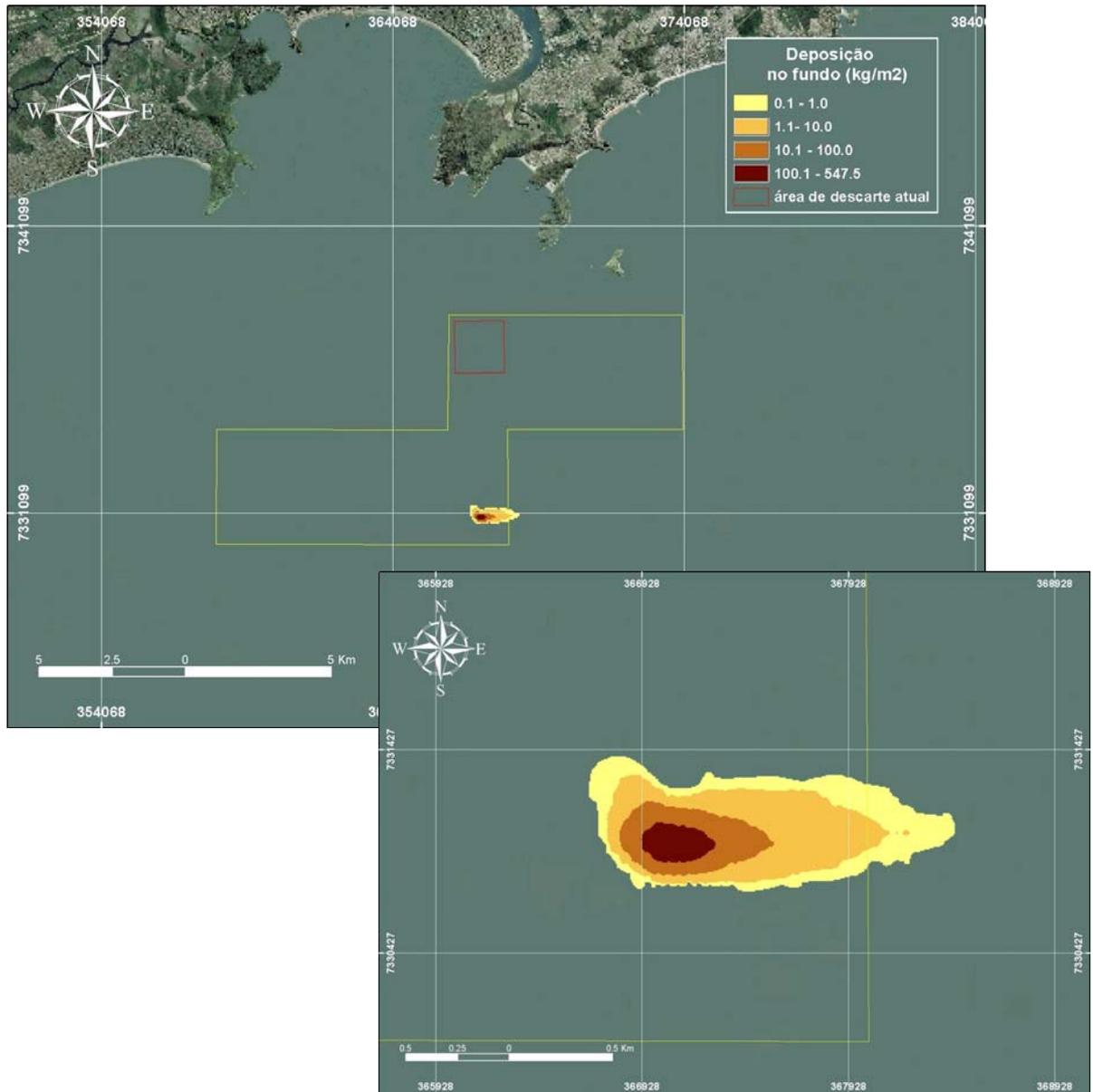


Figura 36 – P2 1M LA INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 2, durante o inverno.

Para os descartes efetuados no Ponto 3, perfazendo um total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de verão, a extensão que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente 0,37 km². A maior espessura atingida foi de 0,68 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando a pouco mais de 875 kg/m².

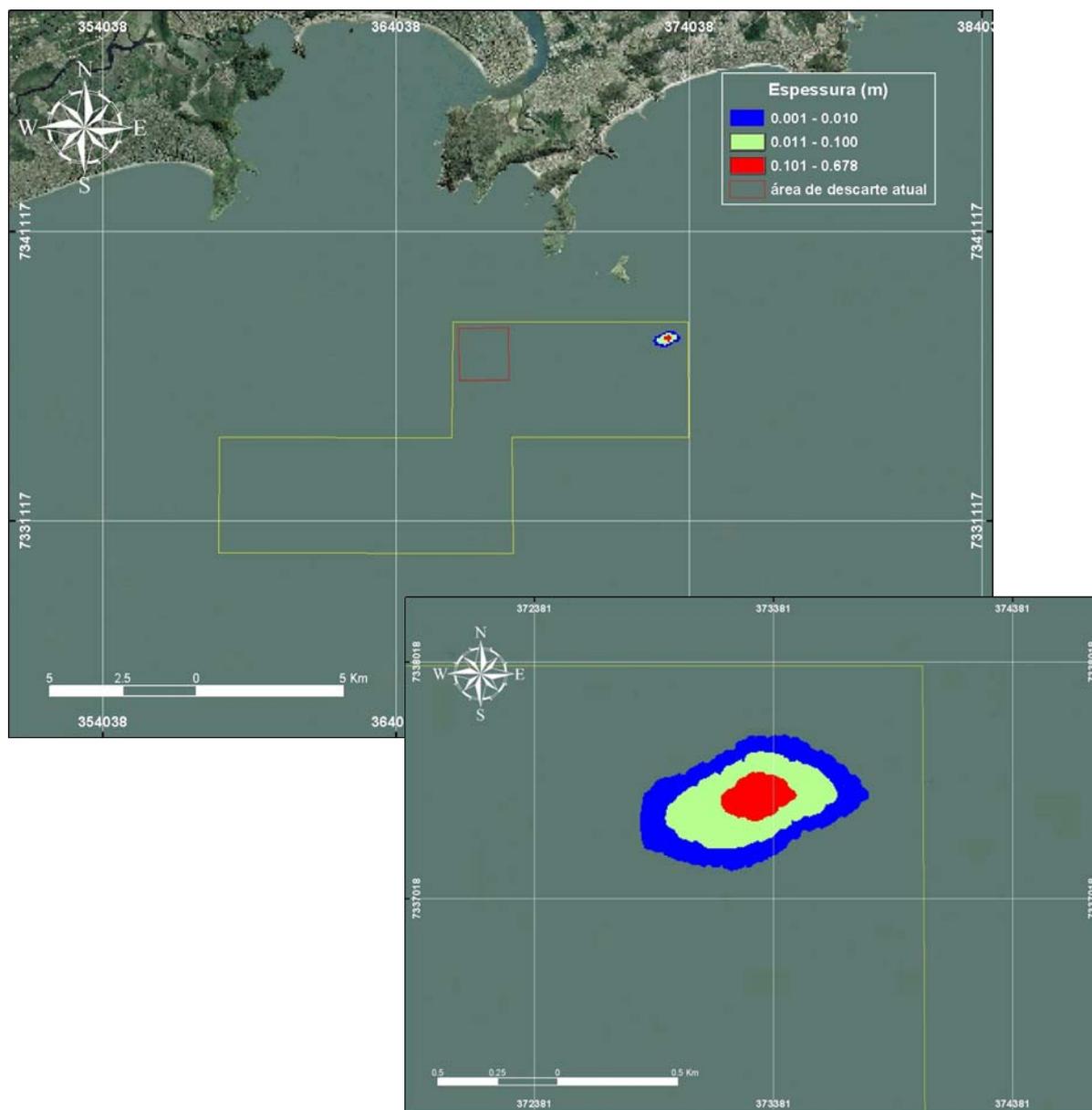


Figura 37 – P3 1M AR VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o verão.

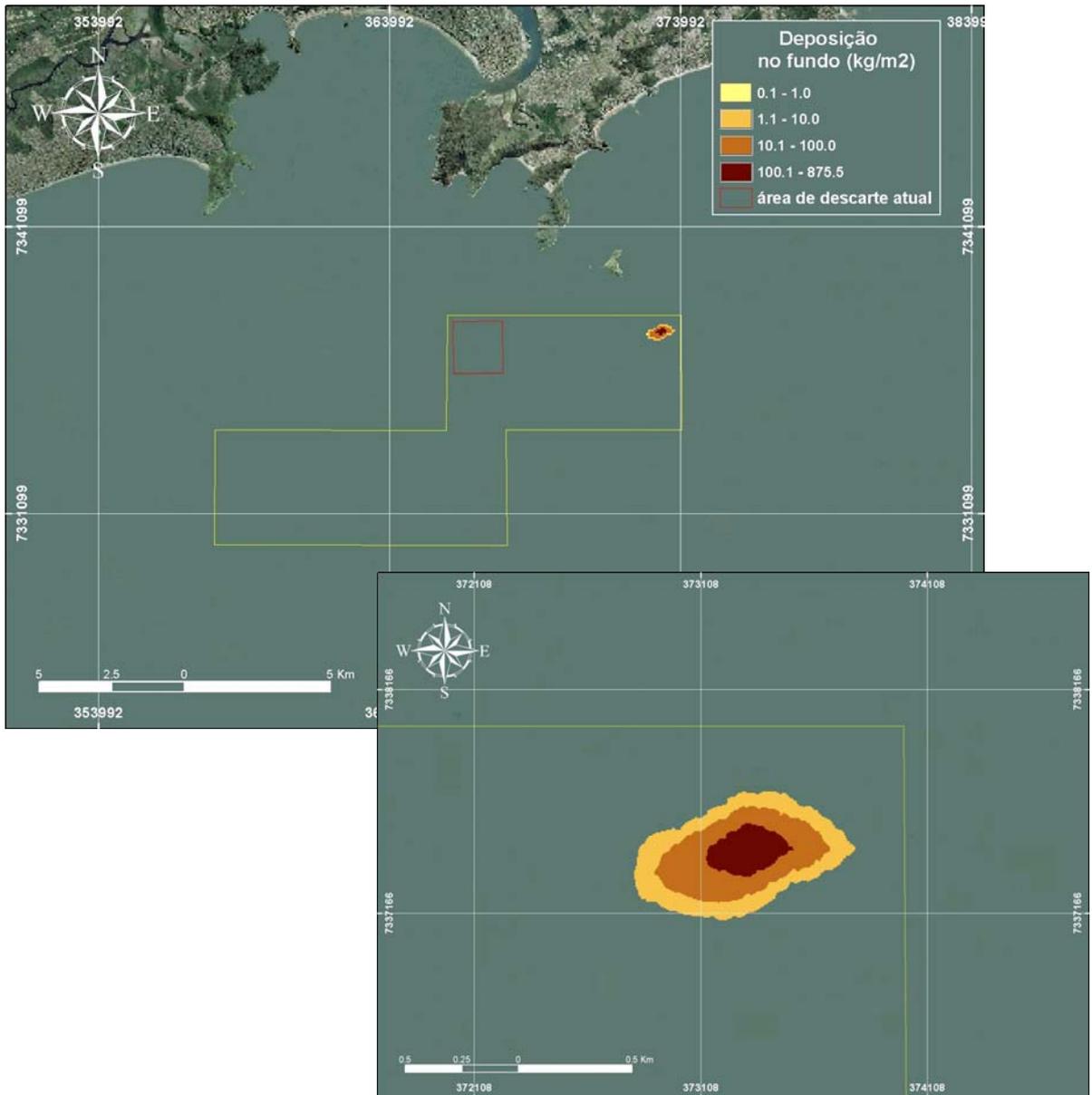


Figura 38 – P3 1M AR VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o verão.

Para o mesmo ponto, período e volume, mas de sedimentos provenientes do canal, a área que apresentou espessura maior que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,68 km². A maior espessura atingida foi de cerca de 0,48 m, com valor máximo de deposição junto ao fundo chegando a 620 kg/m².

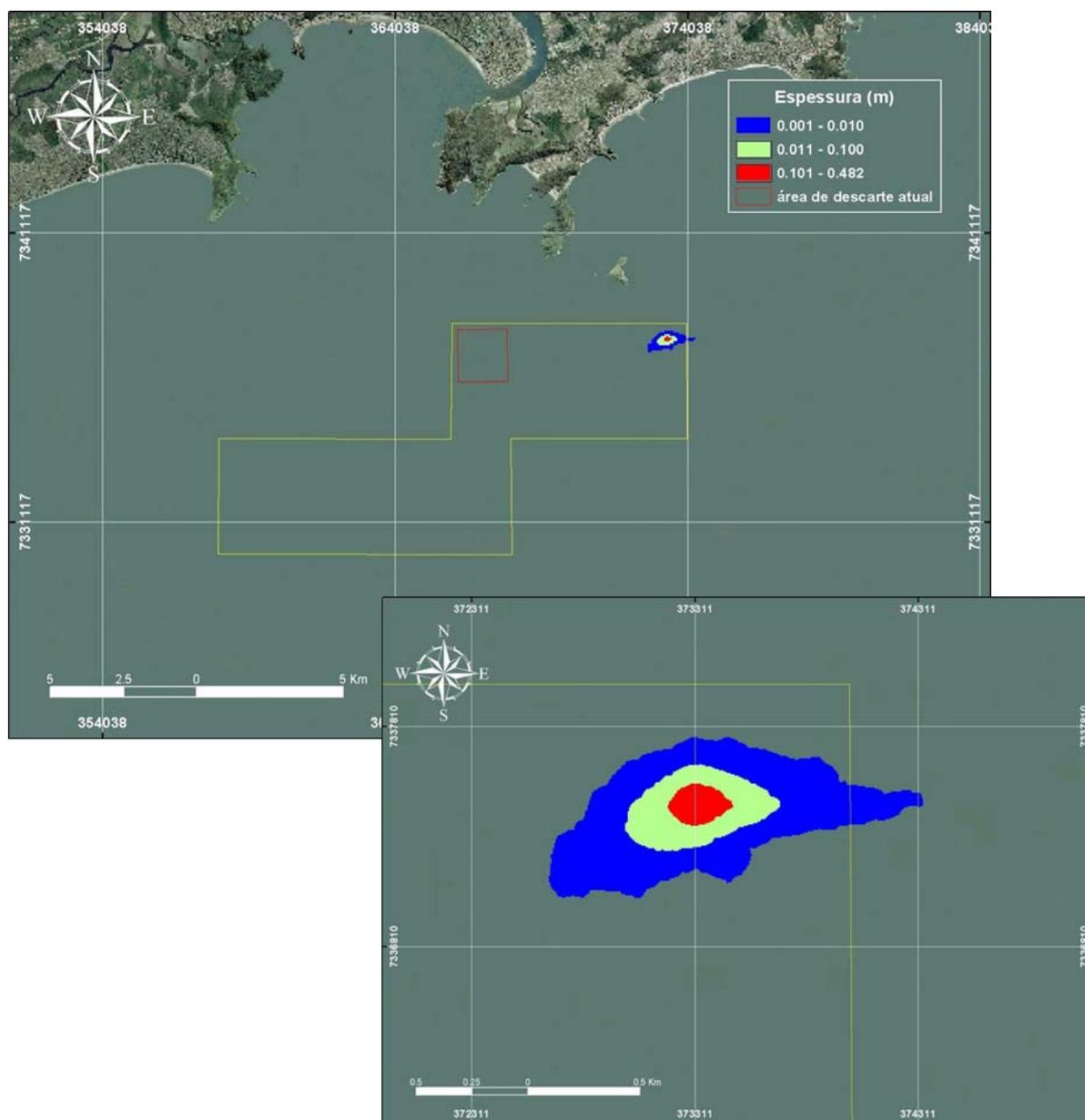


Figura 39 – P3 1M LA VER.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o verão.

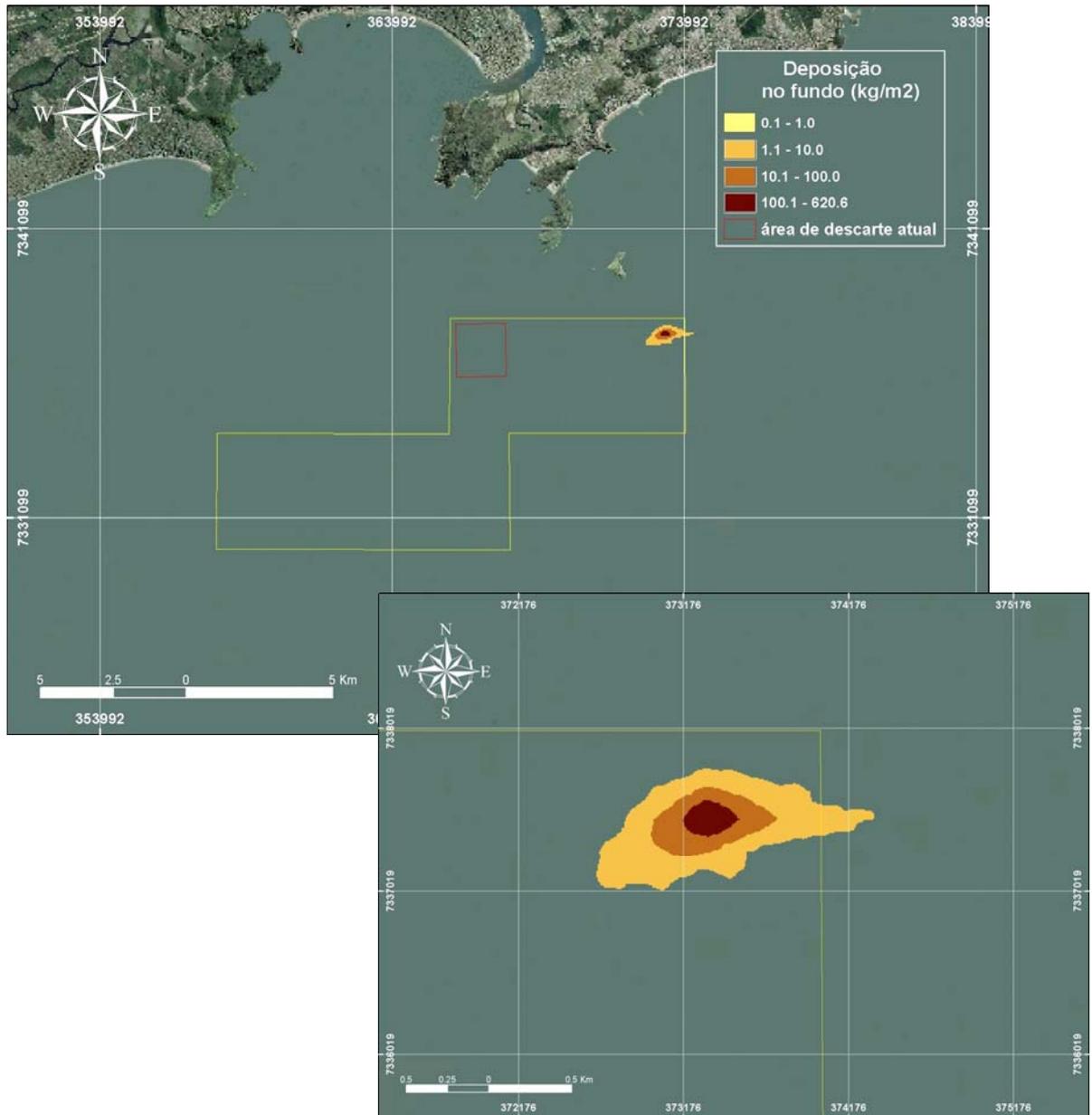


Figura 40 – P3 1M LA VER- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o verão.

Para o total de 1 milhão de metros cúbicos de sedimentos da barra descartados no período de inverno, no Ponto 3, a área com espessuras maiores que 1 mm foi de, aproximadamente, 0,29 km². A maior espessura atingida foi de 0,44 m aproximadamente, com valores máximos de deposição junto ao fundo chegando a 567 kg/m².

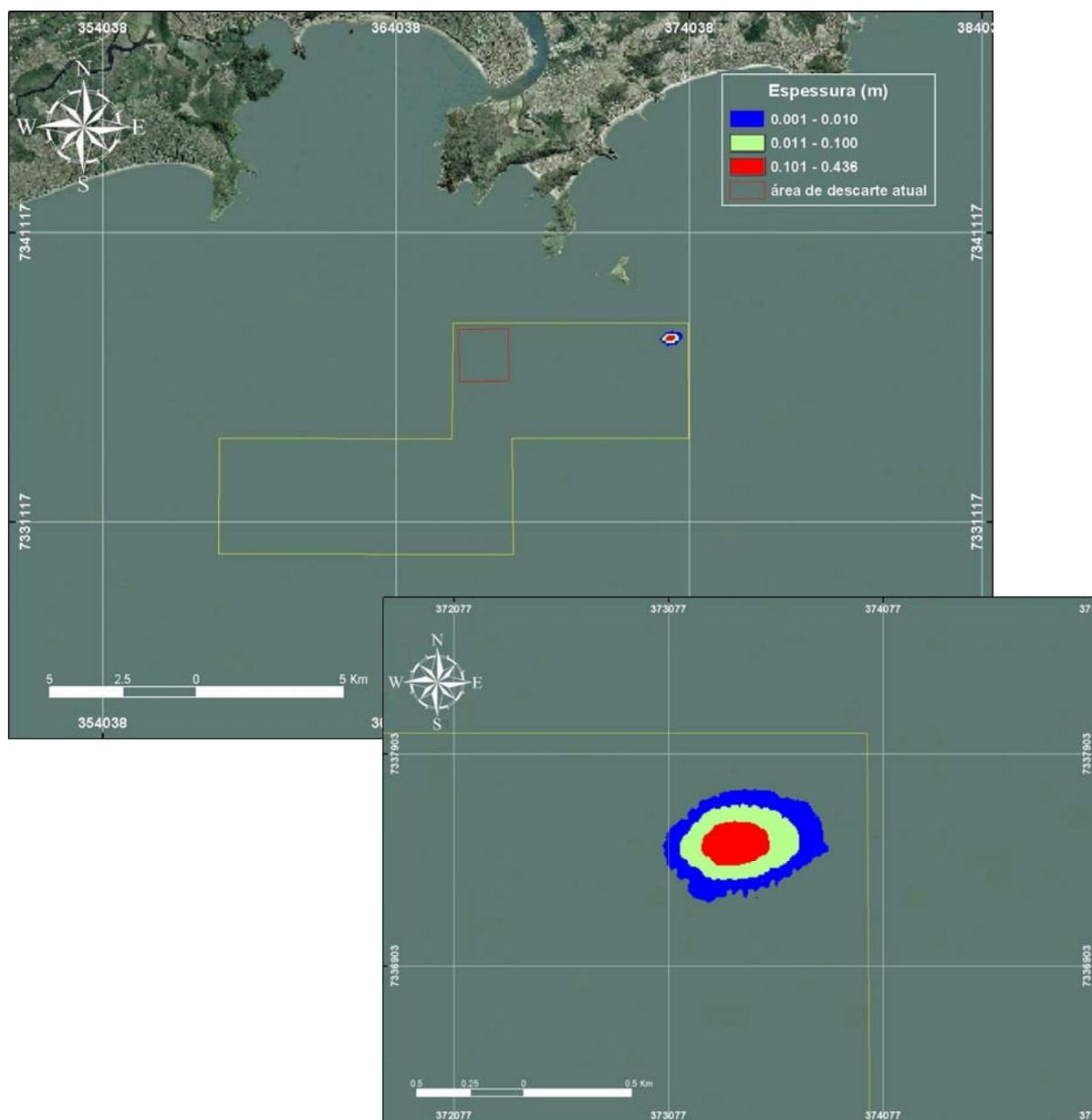


Figura 41 – P3 1M AR INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o inverno.

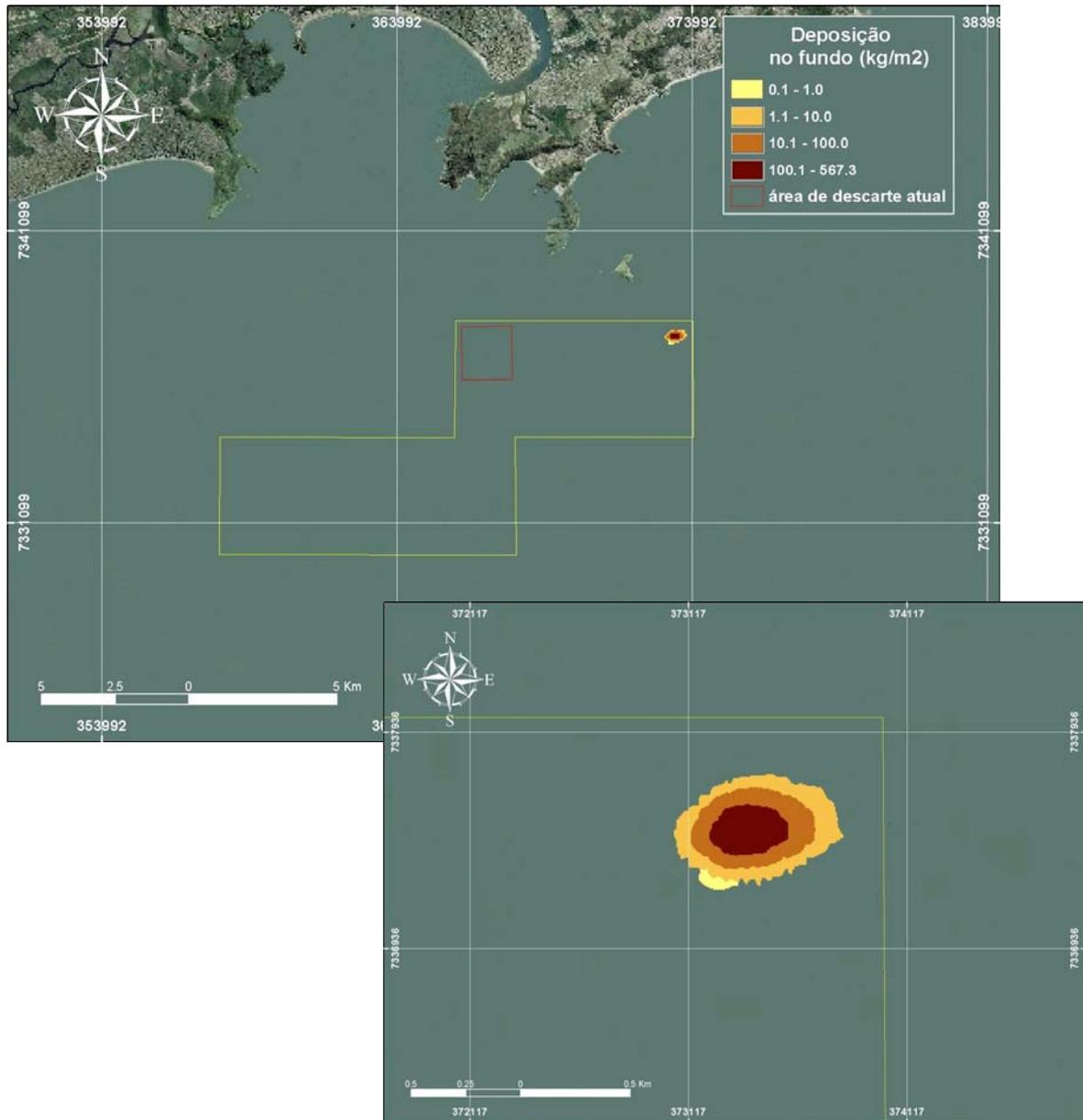


Figura 42 – P3 1M AR INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos da barra, efetuados no ponto 3, durante o inverno.

Para os sedimentos do canal, com descartes no período de inverno realizado no Ponto 3, somando um total de 1 milhão de metros cúbicos, a extensão com espessuras maiores que 1 mm foi cerca 0,76 km². A maior espessura atingida foi de, aproximadamente, 0,41 m, com valor máximo aproximado de deposição junto ao fundo chegando perto de 553 kg/m².

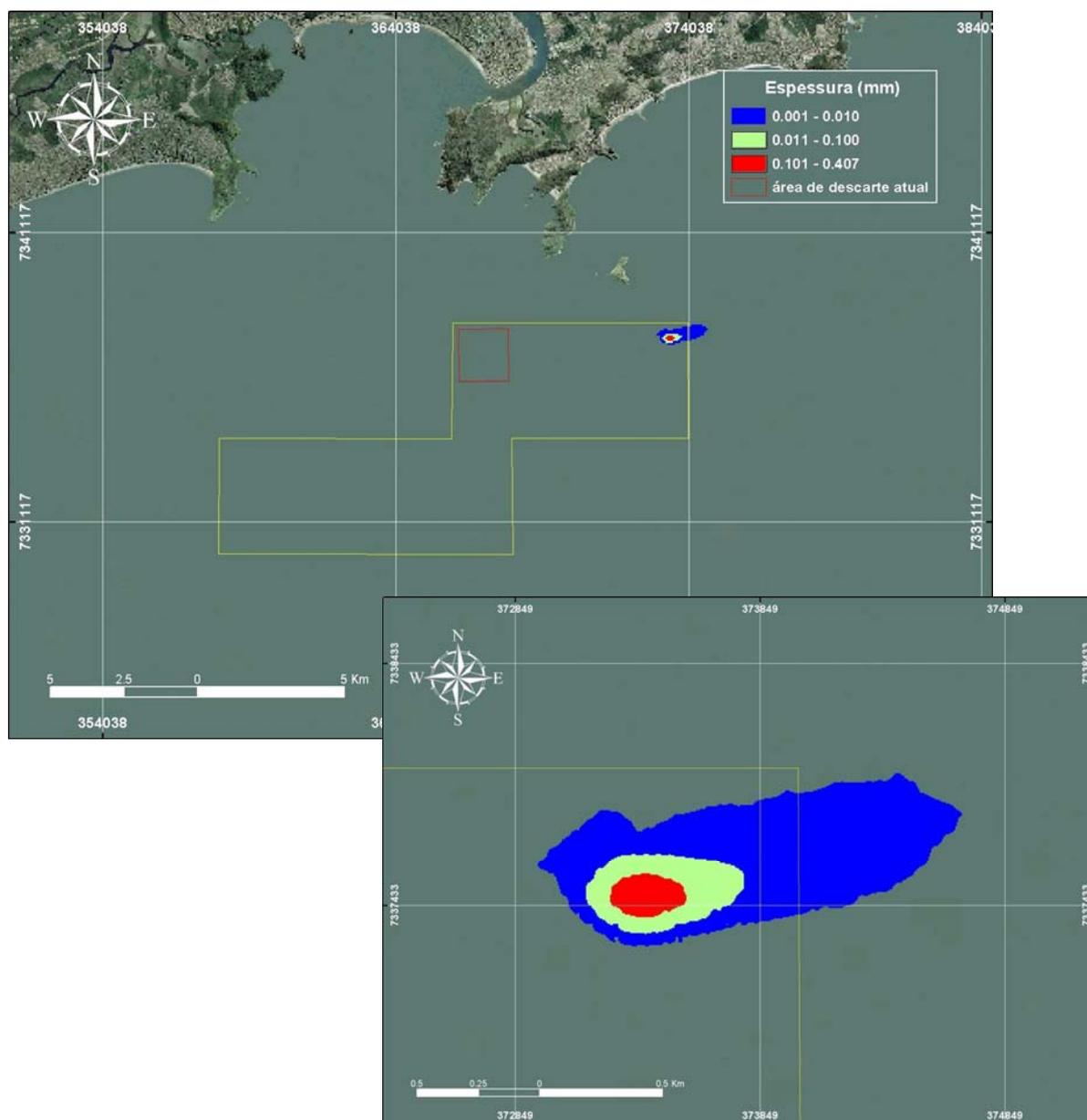


Figura 43 – P3 1M LA INV.- Distribuição espacial das espessuras (m) de materiais depositados como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o inverno.

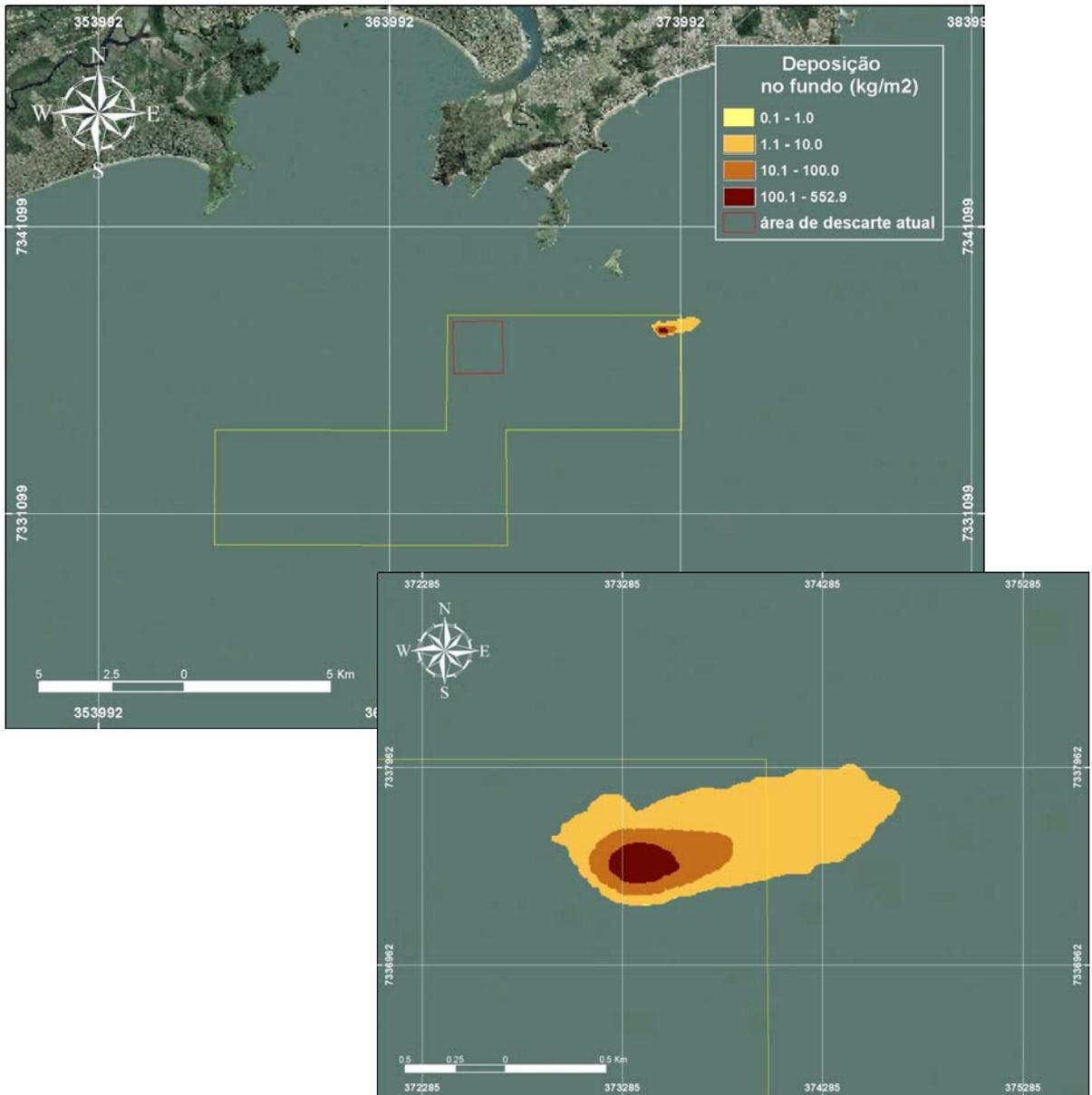


Figura 44 – P3 1M LA INV- Deposição de sedimentos junto ao fundo (kg/m^2) como consequência dos descartes de sedimentos do canal, efetuados no ponto 3, durante o inverno.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de dar suporte a Consultoria Paulista de Estudos Ambientais (CPEA) no desenvolvimento de estudos ambientais para o aprofundamento do Canal do Porto de Santos, a **ASA SOUTH AMERICA** apresenta este trabalho de modelagem numérica computacional da deposição e dispersão da pluma de descarte de material dragado na região oceânica próxima à Baía de Santos (SP). Nas simulações foram considerados o volume total de descarte de 1 (um) milhão de metros cúbicos. Para este volume foram realizadas simulações com duração de 30 dias tanto no período de verão como no período de inverno.

A caracterização dos padrões de circulação oceânica na região foi obtida a partir de resultados do modelo numérico hidrodinâmico ORTHOHYDRO, desenvolvido pela **ASA**. A modelagem hidrodinâmica aqui apresentada considerou como forçantes o vento local e a elevação do nível do mar. Os resultados alcançados nesta implementação apresentaram boa concordância com os padrões de circulação observados nos dados de correntes coletados na região. Análises de dados meteorológicos e oceanográficos na região mostram uma grande influência do campo de ventos local sobre a dinâmica de circulação na região adjacente à Baía de Santos.

As simulações do descarte de material dragado foram conduzidas através da utilização dos modelos SSFATE (*Suspended Sediment Fate*) versão customizada pela **ASA** e TRANSPOR2004 de Delft Hydraulics, para a simulação do efeito da remobilização.

As análises decorrentes das simulações sugerem que as plumas de sedimentos tendem a ocorrer alinhada a linha de costa na direção SE-NE com forte tendência para NE nas simulações do período de inverno.

Com relação às espessuras depositadas, estas são maiores nas proximidades do ponto de descarte e as simulações de verão são as que apresentaram as maiores espessuras.

A Tabela 11 a seguir apresenta uma síntese das condições de operações de descarte, com a classificação de cada cenário em função dos maiores valores de espessura e deposição (g/m^2) estimados pela modelagem.

Tabela 11 - Classificação de cada cenário em função dos maiores valores de espessura e deposição, para os descartes de 1 milhão de m³.

		Verão		Inverno	
		BARRA	CANAL	BARRA	CANAL
1 milhão m ³	Espessura	P1 1M AR VER	P1 1M LA VER	P1 1M AR INV	P1 1M LA INV
		1	4	6	8
		P2 1M AR VER	P2 1M LA VER	P2 1M AR INV	P2 1M LA INV
		3	7	9	11
		P3 1M AR VER	P3 1M LA VER	P3 1M AR INV	P3 1M LA INV
		2	5	10	12
	Deposição	P1 1M AR VER	P1 1M LA VER	P1 1M AR INV	P1 1M LA INV
		1	6	8	5
		P2 1M AR VER	P2 1M LA VER	P2 1M AR INV	P2 1M LA INV
		3	7	9	11
		P3 1M AR VER	P3 1M LA VER	P3 1M AR INV	P3 1M LA INV
		2	4	10	12

A análise desta tabela indica que condição na qual ocorre a maior espessura é a correspondente ao cenário de verão no ponto P1 para descarte de sedimento proveniente da barra para o descarte de 1 milhão de m³.

A condição na qual ocorre a maior deposição (massa por unidade de área) é a correspondente ao cenário de verão para o ponto P1, com sedimentos provenientes da barra.

Cabe ressaltar que os resultados apresentados são bastante conservativos uma vez que o modelo simula o lançamento como sendo estático e localizado em apenas um ponto localizado no centro de uma quadrícula de aproximadamente 1 x 1 milha náutica. Considerando os efeitos de agitação e dispersão devidos ao deslocamento da embarcação dentro desta quadrícula, os resultados devem apresentar valores de espessura e deposição junto ao fundo, consideravelmente, menores.

A análise dos resultados da modelagem indica que a região estudada possui boa dispersão para sedimentos descartados, sendo que as maiores espessuras e

concentrações no leito oceânico são encontradas próximas à área de descarte, e reduzem consideravelmente à medida que as plumas se afastam da mesma.

Considerando o padrão de circulação e transporte característico da área, pode-se concluir que os sedimentos depositados não se acumulam na região de descarte. Os resultados da modelagem mostraram que, para um volume total descartado de 1 (um) milhão de metros cúbicos, o tempo de residência na área de descarte encontra-se na faixa de 5 a 10 dias, coincidindo com período médio entre passagem de sistemas frontais.

Estudos anteriores realizados por Mahiques *et al.* (2004) indicam que o destino mais provável destes sedimentos é ser transportado pelas correntes de fundo, intensificadas em direção E-NE pela passagem de frentes frias, e se depositarem junto à plataforma continental, preferencialmente ao longo da isóbata de 100m.

VII BIBLIOGRAFIA

ACKERS, P., & R.W. WHITE, 1973. “Sediment transport: New approach and analysis”, Journal of the Hydraulics Division 99 (HY11), 2041-2060

ANDERSON, E., B. JOHNSON, T. ISAJI & E. HOWLETT. 2001. SSFATE (Suspended Sediment FATE), a model of sediment movement from dredging operations. Presented at WODCON XVI World Dredging Congress, 2-5 April 2001, Kuala Lumpur, Malaysia.

ARIATHURAI, R., R.C. MACARTHUR, & R.B. KRONE, 1977. “Mathematical model of estuarial sediment transport”. Technical Report D-77-12, U.S. Army Engineer Waterways Station, Vicksburg, MS.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003. Weavers Cove Energy Final Report. Technical Report. December 12th, 2003.

ASA (Applied Science Associates South America), 2004. Estudo do Transporte, Dispersão e Deposição do Descarte de Material Dragado – Ponta da Munduba, Santos – SP. Relatório Técnico, CONSULTORIA PAULISTA-CODESP, 88p.

ASA (Applied Science Associates South America), 2006. Estudo de Modelagem Numérica Hidrodinâmica para a região de Praia Grande e Santos – SP. Relatório Técnico, ENCIBRA – FALCÃO – BAUER – TECAM, 129p.

BAPTISTELLI, S.C., 2003. Modelação Numérica da Circulação de Correntes de Maré e Induzidas pelo Vento Aplicada a Estudos de Disposição Oceânica de Efluentes na Praia Grande – São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 168p.

- BIJKER, E.W., 1971.** “Longshore transport computations”. Journal of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division (WW4), 687-701.
- BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 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*, p. 1-16.
- BOKUNIEWICZ, H.J. et al., 1978.** Field study for the mechanisms of the placement of dredged material at open-water disposal sites. Technical Report D-78-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- BOWERS, G.W. & M.K. GOLDENBLATT, 1978.** Calibration of a predictive model for instantaneously discharged dredged material. U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR. EPA-699/3-78-089.
- BRANDSMA, M.G. & D.J. DIVOKY, 1976.** Development of models for prediction of short-term fate of dredged material discharged in estuarine environment. Contract Report D-76-5, DACW39-74-C-0075, preparado por Tetra Tech Inc, sob contrato da U.S. Army Engineer Waterways Research Co., Houston, TX.
- CARGILL, K.W., 1982.** “Consolidation of soft layers by finite strain theory”, Miscellaneous Paper GL-82-3, U.S. Army Engineer Waterways Station, Vicksburg, MS
- CARGILL, K.W., 1985.** “Mathematical model of the consolidation/desiccation process in dredged material”, Technical Report D-85-4, U.S. Army Engineer Waterways Station, Vicksburg, MS
- CASTRO FILHO, B.M.C. & L.B. MIRANDA, 1998.** Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°N and 34°S. The Sea. John Wiley & Sons, Inc.. 11:209-251.

- CETESB, 1985.** Baixada Santista, carta do meio ambiente e de sua dinâmica (Memorial Descritivo). CETESB –SP, 33p.
- CODESP, 2007.** Caracterização do Sedimento das Seções 1 E 2 do Canal de Acesso do Porto de Santos, Município de Santos – SP. DTA Engenharia & Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP) Relatório Técnico – Barra.
- DOER (DREDGING OPERATIONS AND ENVIRONMENTAL RESEARCH), 2000.** Description of the SSFATE numerical modeling system. Technical Note. ERDC-TN-DOER-E10.
- FUNDESPA, 1999.** Levantamento Oceanográfico da Área Diretamente Afetada por Efluentes dos Emissários Submarinos de Esgotos da SABESP, Entre os Municípios de São Sebastião e Mongaguá, Estado de São Paulo.
- GIBSON, R.E., G.L. ENGLAND, & M.J.L. HUSSEY, 1967.** “The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays; I, Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers”, *Geotechnique* 17(3), 261-273
- HARARI, J. & R. CAMARGO, 1995.** Tides and mean sea level variability in Santos (SP), 1944 to 1989. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, no. 36, p. 1-15.
- HARARI, J. & R. CAMARGO, 1997.** Simulação da circulação de maré na região costeira de Santos(SP), com modelo numérico hidrodinâmico. *Suplemento da Revista Pesquisa Naval/Revista Marítima Brasileira*, vol. 10, p. 173-188.
- JOHNSON, B.H., 1990.** "User's Guide for Models of Dredged Material Disposal in Open Water", Environmental Laboratory TR D-90-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

JOHNSON, B.H., D.N. MCCOMAS, D.C. MCVAN & M.J. TRAWLE. 1994.

Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water. Report 1, Physical model tests of dredged material disposal from a split-hull barge and a multiple bin vessel. Draft Technical Report, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

JOHNSON, B.H., E. ANDERSON, T. ISAJI, & D.G. CLARKE, 2000.

Description of the SSFATE numerical modeling system. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E10). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://www.wes.army.mil/el/dots/doer/pdf/doere10.pdf>.

KOH, R.C.Y. & Y.C. CHANG. 1973.

Mathematical model for barged ocean disposal of waste. Environmental Protection Technology Series EPA 660/2-73-029, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

MAHIQUES, M. M. ; CALADO, Leandro ; SILVEIRA, Ison Carlos Almeida da ;

LIMA, Andrea França. 2004. The role of meandering of Brazil Current in the sedimentation of the outer shelf upper slope off southeastern Brazil under different climatic conditions: sedimentological data and a numerical modelling approach. In: IGCP-464 4th Annual Conference, 2004, Roma. Abstract Book, 2004. v. 1. p. 18-19.

MEHTA, A.J., E.J. HAYTER, W.R. PARKER, R.B. KRONE, & A.M. TEETER,

1989. "Cohesive sediment transport – I: Process description". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 115(3): 1076-1093.

MELLOR, G.L. & T. YAMADA, 1982.

Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, n. 4, p. 851-875.

MORITZ, H.R. & R.E. RANDALL, 1995. “Simulating Dredged-Material Placement at Open-Water Disposal Sites”, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Volume 121, Issue 1, pp. 36-48

POINDEXTER-ROLLINGS, M.E., 1990. “Methodology for analysis of subaqueous sediments mounds”. Technical Report D-90-2, U.S. Army Engineer Waterways Station, Vicksburg, MS

REINE, K.J.; DICKERSON, D.D. & CLARKE, D.G. 1998. Environmental windows associated with dredging operations. *DOER Technical Notes Collection* (TN

SCHEFFNER, N.W., 1991. “A systematic analysis of disposal site stability”. Proceedings of Coastal Sediments '91, ASCE, 2012-2026

SCHEFFNER, N.W. & J.R. TALLENT, 1994. "Dispersion Analysis of Charleston, South Carolina, Ocean Dredged Material Disposal Site", Coastal Engineering Research Center TR DRP-90-00, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

STECH J.L. & J.A. LORENZZETTI, 1992. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research* 97, 9507-9520.

SWANSON, J.C.; T. ISAJI; M. WARD; B.H. JOHNSON; A. TEETER & D.G. CLARKE, 2000. Demonstration of the SSFATE numerical modeling system. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E12). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://www.wes.army.mil/el/dots/doer/pdf/doere12.pdf>.

SWANSON, J.C, ISAJI, T., CLARKE, D., & DICKERSON, C., 2004. Simulations of dredging and dredged material disposal operations in Chesapeake Bay, Maryland and Saint Andrew Bay, Florida. Presented at WEDA XXIV / 36th TAMU Dredging Seminar, July 7-9, 2004, Orlando, Florida.

- SWANSON, J.C, & T. ISAJI, 2006.** Modeling dredge-induced suspended sediment transport and deposition in the Taunton River and Mt. Hope Bay, Massachusetts. Presented at WEDA XXVI / 38th TAMU Dredging Seminar, June 25-28, San Diego, CA.
- SWANSON, J. C.; C. GALAGAN & T. ISAJI, 2006.** Transport and fate of sediment suspended from jetting operations for undersea cable burial, Proceedings of OCEANS'06 MTS/IEEE, Boston, MA 18-21 September, 2006.
- SWANSON, J.C.; ISAJI, T. & GALAGAN, C., 2007.** Modeling the ultimate transport and fate of dredge-induced suspended sediment transport and deposition. Prepared for Proceedings of WODCON VII Conference, Western Dredging Association, Lake Buena Vista. 18pp.
- SWART, D.H., 1976.** "Predictive equations regarding coastal transports". Proceedings of th 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1113-1132.
- TEETER, A.M. & W. PANKOW, 1989.** "Schematic numerical modelin of harbor deepening effects on sedimentation, Charleston, SC". Miscellaneous Paper HL-89-7, U.S. Army Engineer Waterways Station, Vicksburg, MS.
- TEETER, A.M. 1998.** Cohesive sediment modeling using multiple grain classes, Part I: settling and deposition. Proceedings of INTERCOH 98 - Coastal and Estuaries Fine Sediment Transport: Processes and Applications, South Korea.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) and U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 1995.** Evaluation of dredged material proposed for discharge in waters of the U.S. – Testing Manual (Final, Working Group Draft). Appendix C. 80pp.

