

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

DANIEL IZOTON SANTIAGO

**APLICAÇÃO DE UM MODELO LAGRANGIANO DE
TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS PARA A MODELAGEM
DA DISPERSÃO EM ÁGUAS RASAS E SIMULAÇÃO DA
DISPERSÃO NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE
VITÓRIA, ES.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana, Dr.


Co-orientador: Prof. Maxsuel Marcos Rocha Pereira, Dr.

VITÓRIA

2007



de Partículas para Modelagem da Dispersão em


Prof. Dr. Valdir Innocentini
Examinador Externo – DMA/CPTEC/INPE

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória, ES, 26 de Fevereiro de 2007.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETÔNICO, PARA FINS DE
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S235a Santiago, Daniel Izoton, 1980-
Aplicação de um modelo lagrangiano de trajetória de partículas
para a modelagem da dispersão em águas rasas e simulação da
dispersão no canal de acesso ao Porto de Vitória, ES. / Daniel
Izoton Santiago. – 2007.

135 f. : il.

Orientador: Julio Tomás Aquije Chacaltana.

Co-Orientador: Maxsuel Marcos Rocha Pereira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Dispersão. 2. Hidrodinâmica. 3. Passeio aleatório
(Matemática). 4. Dinâmica costeira. 5. Escoamento turbulento. 6.
Vitória (ES) – Porto – Canais. I. Chacaltana, Julio Tomás Aquije. II.
Pereira, Maxsuel Marcos Rocha. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

Aos meus pais queridos, Helio e Maria Luiza.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana, pelo apoio, paciência, amizade e motivação na escolha dessa pesquisa. Agradeço ainda pela influência no meu desenvolvimento ao longo da formação acadêmica.

Ao meu co-orientador, Prof. Maxsuel Marcos Rocha Pereira, pela amizade, paciência, dedicação e envolvimento pessoal neste trabalho, particularmente no desenvolvimento dos códigos computacionais em *Fortran* e discussões sobre modelagem lagrangiana.

Aos meus pais, Helio Santiago e Maria Luiza Izoton Santiago; aos meus irmãos Simone Izoton, Denise Izoton e Fábio Izoton; e aos demais familiares e amigos pelos incentivos.

Aos amigos Camila Pacheco, Márcio Alves, Geovane Ceolin, Cláudio de Almeida Teresa Chacaltana, Nelson Viégas, Silvia Batista, e em especial ao estimado Jorlaine Machado, pelo companheirismo durante o desenvolvimento da dissertação e pelos bons momentos compartilhados.

A Erika Pinto da Silva pelo carinho.

Ao GEARH (Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos), em especial ao Prof. Daniel Rigo, pela disponibilização de dados usados nesta pesquisa, pela acolhida e experiências durante a minha graduação em oceanografia e pela amizade.

À Prof^ª. Jane Meri Santos (ex-coordenadora do PPGEA), Teixeira (ex-secretário do PPGEA), Karen (ex-secretária do PPGEA) e Rose (secretária do PPGEA), pelo apoio institucional.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos.

Minha gratidão a todos que direta ou indiretamente contribuíram no desenvolvimento dessa dissertação.

**“Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância.”
Sócrates**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Objetivos	25
1.1.1 Objetivo Geral	25
1.1.2 Objetivos Específicos	25
2. FUNDAMENTOS.....	27
2.1 Hidrodinâmica Costeira e Estuarina.....	27
2.1.1 Marés e Correntes de Maré.....	27
2.1.2 Circulação Estuarina e em Canais de Maré	28
2.2 Transporte de Solutos em Águas Costeiras	29
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1 Modelagem Hidrodinâmica Computacional	33
3.1.1 Estudos de Modelagem Hidrodinâmica em Canais e Estuários	34
3.2 Métodos para a Solução Numérica da Equação de Transporte de Solutos	36
3.2.1 Estudos de Modelagem de Transporte de Solutos.....	39
3.3 Trabalhos Anteriores na Região de Estudo	43
4. O MODELO DIVAST	46
4.1 Equações Governantes dos Processos Físicos.....	46
4.2 Solução das Equações Diferenciais.....	49
4.3 Implementação do DIVAST na área de Estudo	50
5. O MODELO LAGRANGIANO DE PARTÍCULAS DE DESLOCAMENTO ALEATÓRIO	58

5.1 Hipóteses Assumidas.....	61
5.2 Discretização do MLPDA	62
5.3 Condição de Fronteira.....	65
5.4 Algoritmo utilizado.....	67
5.5 Verificação do MLPDA	67
5.5.1 1.º Experimento	68
5.5.2 2.º Experimento	70
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
6.1 Validação do Modelo Hidrodinâmico.....	74
6.2 Hidrodinâmica no canal de acesso ao Porto de Vitória.....	94
6.3 Simulações do Transporte de Traçadores no Canal de Acesso ao Porto de Vitória	110
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
8. REFERÊNCIAS.....	128

ANEXOS

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Variáveis físicas das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento..	48
Tabela 6.1 – Comparação entre erros encontrados e indicados na literatura.....	93
Tabela 6.2 – Simulações com o MLPDA no canal de acesso ao Porto de Vitória.	110

Lista de Figuras

- Figura 4.1 – Representação dos limites da malha computacional (retângulo vermelho) na região de estudo.....52
- Figura 4.2 – Mapa batimétrico da Baía do Espírito Santo e entorno da Ilha de Vitória (adaptado: RIGO, D., 2001; GEARH, 2002). O pontilhado vermelho representa as condições de contorno do domínio computacional na região modelada neste trabalho. O símbolo vermelho (C) próximo à condição de contorno oeste é a estação de monitoramento do correntógrafo, em Santo Antônio..... 54
- Figura 4.3 – Rugosidade no canal de acesso ao Porto de Vitória. As cores correspondem em granulometria: em vermelho, a fração argila; em roxo, a fração de areia media a fina; e em azul, a fração de areia grossa.....56
- Figura 5.1 – Discretização do tempo em intervalos iguais a Δt representada pela função delta de Dirac. 63
- Figura 5.2 – Exemplo da representação da reflexão de uma partícula no modelo de transporte. A célula em amarelo representa a água.....66
- Figura 5.3 – Variação espacial do coeficiente de dispersão.. 68
- Figura 5.4 – Distribuição das partículas ao fim da simulação do 1º experimento..... 69
- Figura 5.5 – Distribuição de probabilidades em função do número de partículas por célula do 1º experimento.. 70
- Figura 5.6 – Variação da profundidade da água no reservatório do 2.º experimento.. 71
- Figura 5.7 – Distribuição das partículas ao fim da simulação do 2.º experimento..... 72
- Figura 6.1 – Comparação entre os valores de velocidade medidos pelo correntógrafo (azul) e os simulados pelo modelo DIVAST (vermelho), na estação Santo Antônio.....74
- Figura 6.2 – Comparação entre magnitude e direção das velocidades medidas pelo correntógrafo (azul) e as simuladas com o DIVAST (vermelho), estação de Santo Antônio. A direção é dada com referência à marcação do ângulo em graus na circunferência. A velocidade é dada pela escala do raio da circunferência, em metros por segundo. a) A velocidade é zero no centro e

aumenta em direção à circunferência. b) A velocidade é zero na circunferência e aumenta em direção ao centro.	76
Figura 6.3 – Estações de monitoramento de elevação e velocidade modeladas.....	77
Figura 6.4 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 1 (a) e 2 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros...	79
Figura 6.5 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 3 (a) e 4 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros...	80
Figura 6.6 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 5 (a) e 6 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros...	81
Figura 6.7 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 7 (a) e 8 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....	82
Figura 6.8 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 9 (a) e 10 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros....	83
Figura 6.9 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 11 (a) e 12 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....	84

- Figura 6.10 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 13 (a) e 14 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....85
- Figura 6.11 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 15 (a) e 16 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....86
- Figura 6.12 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 17 (a) e 18 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....87
- Figura 6.13 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 19 (a) e 20 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....88
- Figura 6.14 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 21 (a) e 22 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....89
- Figura 6.15 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 23 (a) e 24 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem

de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....	90
Figura 6.16 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 25 (a) e 26 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....	91
Figura 6.17 – Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 27 (a) e 28 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.....	92
Figura 6.18 – Identificação das regiões R1 a R8 no canal de acesso ao Porto de Vitória.....	95
Figura 6.19 – Intervalo da maré próximo à de quadratura usado para apresentação dos campos de velocidade. As letras indicam os instantes da maré, em horas, em que o campo de escoamento é apresentado. A=31,5; B=33,5; C=34,8; D=35,6; E=36,5; F=39,5; G=40,5; H=41,5; I=43,5.....	98
Figura 6.20 – Intervalo da maré próximo da sizígia usado para apresentação dos campos de velocidade. As letras indicam os instantes da maré, em horas, em que o escoamento é apresentado. A=224,6; B=228,5; C=229,5; D=231,5; E=233,7; F=236,4; G=238; H=240,6.....	98
Figura 6.21 – Campo de velocidades para o instante de tempo 31,5 hs. de simulação - vazante. a) Velocidades no domínio modelado. b) Detalhamento da região do canal de acesso ao Porto de Vitória.....	99
Figura 6.22 – Campo de velocidades para o instante de tempo 33,5 hs. de simulação - enchente. a) Velocidades no domínio modelado. b) Detalhamento da região do canal de acesso ao Porto de Vitória.....	100
Figura 6.23 – Campo de velocidades para o instante de tempo 34,8 hs. de simulação – enchente.....	101
Figura 6.24 – Campo de velocidades para o instante de tempo 35,6 hs. de simulação – enchente.....	101

Figura 6.25 – Campo de velocidades para o instante de tempo 36,5 hs. de simulação – enchente.....	102
Figura 6.26 – Campo de velocidades para o instante de tempo 39,5 hs. de simulação – vazante.....	102
Figura 6.27 – Campo de velocidades para o instante de tempo 40,5 hs. de simulação – vazante.....	103
Figura 6.28 – Campo de velocidades para o instante de tempo 41,5 hs. de simulação – vazante.....	103
Figura 6.29 – Campo de velocidades para o instante de tempo 43,5 hs. de simulação – vazante.....	104
Figura 6.30 – Campo de velocidades para o instante de tempo 224,6 hs. de simulação - enchente. a) Velocidades no domínio modelado. b) Detalhamento da região do canal de acesso ao Porto de Vitória.....	105
Figura 6.31 – Campo de velocidades para o instante de tempo 228,5 hs. de simulação - vazante. a) Velocidades no domínio modelado. b) Detalhamento da região do canal de acesso ao Porto de Vitória.....	106
Figura 6.32 – Campo de velocidades para o instante de tempo 229,5 hs. de simulação – vazante.....	107
Figura 6.33 – Campo de velocidades para o instante de tempo 231,5 hs. de simulação – vazante.....	107
Figura 6.34 – Campo de velocidades para o instante de tempo 233,7 hs. de simulação – enchente.....	108
Figura 6.35 – Campo de velocidades para o instante de tempo 236,4 hs. de simulação – enchente.....	108
Figura 6.36 – Campo de velocidades para o instante de tempo 238 hs. de simulação – enchente.....	109
Figura 6.37 – Campo de velocidades para o instante de tempo 240,6 hs. de simulação – vazante.....	109
Figura 6.38 – Nuvens de partículas em instantes após o lançamento para o 1.º experimento, em maré enchente próximo à quadratura..	111
Figura 6.39 – Nuvens de partículas em instantes após o lançamento para o 2.º experimento, em maré enchente próximo à sizígia.....	111

Figura 6.40 – Instante inicial de lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	113
Figura 6.41 – Instante t=10 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	113
Figura 6.42 – Instante t=20 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	114
Figura 6.43 – Instante t=30 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	114
Figura 6.44 – Instante t=40 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	114
Figura 6.45 – Instante t=50 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	115
Figura 6.46 – Instante t=60 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	115
Figura 6.47 – Instante t=70 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	115
Figura 6.48 – Instante t=80 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	116
Figura 6.49 – Instante t=90 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	116
Figura 6.50 – Instante t=100 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	116
Figura 6.51 – Instante t=110 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	117
Figura 6.52 – Instante t=120 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	117
Figura 6.53 – Instante t=130 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	117
Figura 6.54 – Instante t=140 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	118
Figura 6.55 – Instante t=150 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	118

Figura 6.56 – Instante $t=180$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.º experimento. (b) 2.º experimento.....	118
Figura 6.57 – Instante $t=90$ minutos após o lançamento do 1.º experimento.....	119
Figura 6.58 – Instante $t=90$ minutos após o lançamento do 2.º experimento.....	119
Figura 6.59 – Comportamento da nuvem de partículas no 3.º experimento, em maré vazante próximo à quadratura..	120
Figura 6.60 – Detalhe da simulação do 3.º experimento, no instante $t=110$ m após o lançamento. Observa-se que as partículas permaneceram confinadas dentro da grade do DIVAST, que representa a porção de água...	122

LISTA DE SIMBOLOS

p	Vazões unitárias ou descargas por unidade de comprimento nas direções x e y , respectivamente ($m^3 \cdot s^{-1}/m$)
g	Aceleração da gravidade
U	Componentes da velocidade média na vertical nas direções x e y , respectivamente (m/s)
H	Profundidade total da água
h	Profundidade abaixo do nível médio da água
η	Elevação da superfície da água acima do nível médio tomado como referência
β	Fator de correção do momentum para um perfil de velocidade vertical não-uniforme
x, y	Coordenadas cartesianas
ρ_a	Massa específica do ar
ρ	Massa específica do fluido
C	Coeficiente de rugosidade de Chezy ($m^{1/2}/s$)
C_w	Coeficiente de resistência do ar/fluido
ε	Viscosidade turbulenta média na vertical (m^2/s)
W_x	Componente da velocidade do vento na direção x (m/s)
W_y	Componente da tensão do vento na direção y (m/s)
D_{yy}	Componente de dispersão-difusão médio na direção x
D_{yy}	Componente da de dispersão-difusão médio na direção y
k_l	Constante adimensional de dispersão longitudinal
k_t	Constante adimensional de difusão turbulenta lateral
k_s	Coeficiente para o equivalente da rugosidade de fundo (m)
t	Tempo

D_{yy}	Componente da de dispersão-difusão médio na direção y
k_l	Constante adimensional de dispersão longitudinal
k_t	Constante adimensional de difusão turbulenta lateral
k_s	Coeficiente para o equivalente da rugosidade de fundo (m)
t	Tempo

RESUMO

Nesta pesquisa um Modelo Lagrangiano de Partículas de Deslocamento Aleatório (MLPDA) desenvolvido para a modelagem da dispersão em águas rasas é acoplado ao modelo hidrodinâmico DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*) para estudar as características dispersivas na região do canal de acesso ao Porto de Vitória. Inicialmente o modelo DIVAST é utilizado na avaliação da hidrodinâmica induzida pela maré astronômica no canal de acesso ao Porto de Vitória. O DIVAST se fundamenta nas equações não-lineares de águas rasas e considera além do efeito de fricção da vegetação de mangue na hidrodinâmica, o alagamento e a secagem de planícies de marés cobertas com vegetação de mangue. A grade computacional elaborada representa adequadamente a geometria e as ilhas no interior da região de estudo. As condições de contorno fornecidas ao modelo numérico foram elevação no contorno leste e correntes no contorno oeste, que foram obtidas de um modelo global para o complexo estuarino da ilha de Vitória. A validação dos resultados do modelo DIVAST foi realizada pela comparação com dados experimentais de velocidade e com dados numéricos de elevação da superfície da água, mostrando uma boa concordância com os mesmos e indicando que o modelo representa satisfatoriamente a hidrodinâmica da região do canal de acesso ao Porto de Vitória. A observação dos campos de escoamento simulados pelo DIVAST possibilitou identificar e analisar diferentes padrões de escoamento associados a interação do escoamento com a geometria do canal. O MLPDA se fundamenta nas equações de deslocamento aleatório. O MLPDA foi validado a partir da simulação e comparação com experimentos numéricos sugeridos por Heemink (1995). Os resultados do MLPDA reproduziram bem os experimentos numéricos e demonstraram que o modelo é uma ferramenta adequada para a simulação do transporte de solutos. O MLPDA acoplado ao DIVAST foi aplicado para a região do canal de acesso ao Porto de Vitória e demonstrou a capacidade de simular os processos dispersivos em pequena e grande escala. Identificaram-se diferentes zonas na região modelada, observando-se áreas mais dispersivas e áreas que favorecem o acúmulo de constituintes.

ABSTRACT

In this research a Random Walk Lagrangian Particle Model (the MLPDA model) developed for modeling the dispersion in shallow waters is coupled to hydrodynamic model DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*) to study the dispersive characteristics in the region of the canal of access to the port of Vitória. Initially the DIVAST model is used to modeling the hydrodynamic induced by the astronomical tide in the canal of access to the port of Vitória. The DIVAST model is based on the nonlinear shallow water equations and considers beyond the frictional effect of the mangrove on the hydrodynamic, the wetting and drying of tidal plains covered with mangrove. The computational mesh adequately represents geometry and the islands in the region of study. The boundary conditions used were water level along the east limit and current velocity in the west limit, obtained from another model with a wider domain for the whole estuarine region around Vitoria. The model validation focused on comparing computed results with experimental recorded data of current velocities and numerical data of tidal elevations, having shown good agreements, and indicating that the model represents the hydrodynamics on the region of the canal of access to the port of Vitória satisfactorily. The flow fields provided by DIVAST model allowed identify and analyze different flow patterns associated with the geometry of the canal. The MLPDA model is based on the random walk equations. The MLPDA model verification was done by simulations and comparisons with results of numerical experiments suggested by Heemink (1995). The assessment of MLPDA performance demonstrate that the results compare well to numerical experiments and indicate the ability of the model to simulate the transport of solutes. The MLPDA coupled to DIVAST model was applied for the region of the canal of access to the port of Vitória and allowed simulate the dispersive processes in small and great scale. Different zones of the modeled region were identified, observing more dispersive areas and areas that tend to accumulate constituents.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Depth Integrated Velocity and Solute Transport

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral



1.1.2 Objetivos Específicos



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS

2. Fundamentos

2.1 Hidrodinâmica Costeira e Estuarina

2.1.1 Marés e Correntes de Maré

2.1.2 Circulação Estuarina e em Canais de Maré

2.2 Transporte de Solutos em Águas Costeiras

- _____
- _____
- _____

• _____

• _____

• _____

• _____

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Modelagem Hidrodinâmica Computacional

3.1.1 Estudos de modelagem hidrodinâmica em canais e estuários

M_2

3.2 Métodos para a Solução Numérica da Equação de Transporte de Solutos

far field

near field

3.2.1 Estudos de modelagem de transporte de solutos

3.3 Trabalhos anteriores na região de estudo

CAPÍTULO 4

O MODELO DIVAST

4. O Modelo DIVAST

4.1 Equações Governantes dos Processos Físicos

$$\underbrace{\frac{\partial \eta}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_b + \underbrace{\frac{\partial q}{\partial y}}_c = 0$$

a

b c

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial \beta p U}{\partial x} + \frac{\partial \beta p V}{\partial y}}_b &= \underbrace{f q}_c - \underbrace{g H \frac{\partial \eta}{\partial x}}_d + \underbrace{\frac{\rho a}{\rho} C_w W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}_e \\ &- \underbrace{\frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2}}_f + \epsilon \underbrace{2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial y}}_g \end{aligned}$$

a

b

c

d

e

f

g

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \beta q U}{\partial x} + \frac{\partial \beta q V}{\partial y} &= -f p - g H \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho a}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ &- \frac{g q \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned}$$

Tabela 4-1 - Variáveis físicas das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento.

$p (=UH),$ $q (=VH)$	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$
U, V	$m \cdot s^{-1}$
β	
f	$\Omega \quad \phi \quad \Omega$ $\phi \quad \Omega \quad \text{radianos} \cdot s^{-1}$
g	$m \cdot s^{-2}$
H	$H = h + \eta$
η	
h	
ρ_a	$\cong \quad kg \cdot m^{-3}$
ρ	$kg \cdot m^{-3} \quad \rho = 1026 \text{ kg} \cdot m^3$
C	$m^{1/2} \cdot s^{-1}$
C_w	
ε	$m^2 \cdot s^{-1}$
x, y	m
	$m \cdot s^{-1}$

$$m^2 \cdot s^{-1}$$

$$D_{xx} = \frac{(k_l p^2 + k_t q^2) \sqrt{g}}{C \sqrt{p^2 + q^2}}$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(k_l - k_t) p q \sqrt{g}}{C \sqrt{p^2 + q^2}}$$

$$D_{yy} = \frac{(k_l q^2 + k_t p^2) \sqrt{g}}{C \sqrt{p^2 + q^2}}$$

$$k_l \quad k_t$$

$$k_l = 13,0 \quad k_t = 1,0$$

$$U \quad V$$

$$H$$

$$D_{xx}$$

$$D_{yy}$$

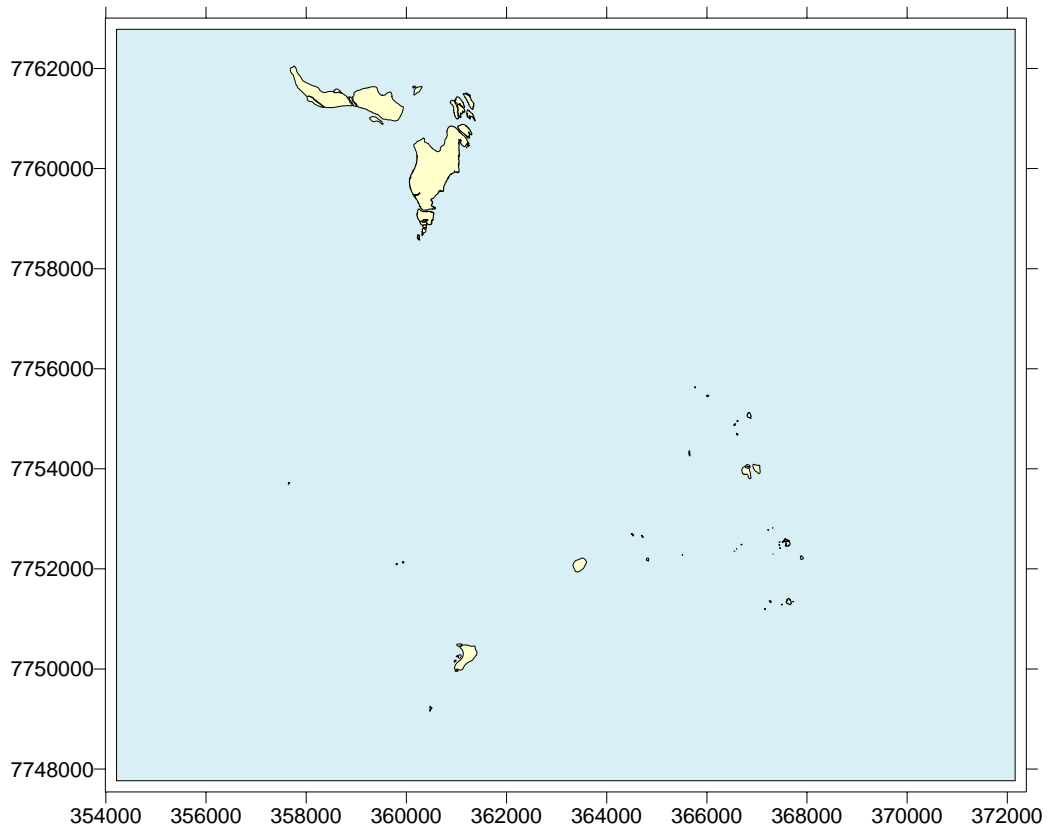
4.2 Solução das Equações Diferenciais

η η η

4.3 Implementação do DIVAST na Área de Estudo

$$H_m = V / A \quad H_m$$

 A



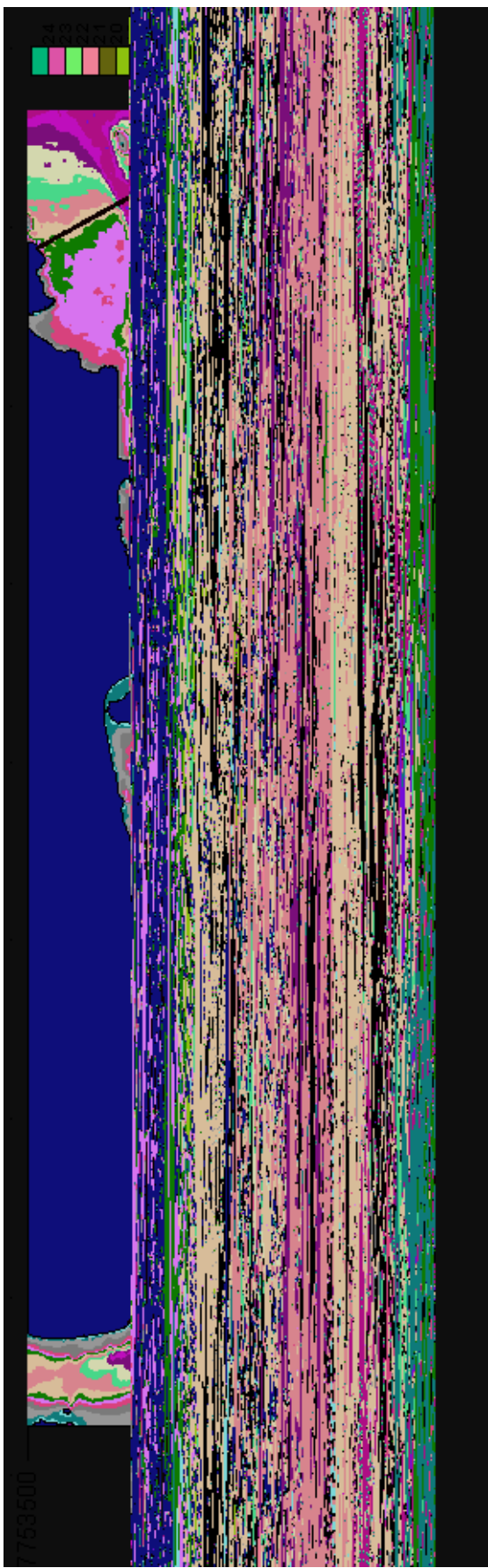


Figura 4-2. Mapa batimétrico da Baía do Espírito Santo e entorno da Ilha de Vitória (adaptado: RIGO, D., 2001; GEARH, 2002). O pontilhado vermelho apresenta as condições de contorno do domínio computacional na região modelada neste trabalho. O símbolo vermelho (C) próximo à condição de contorno oeste é a estação de monitoramento do correntógrafo, em Santo Antônio.

k_s

$$k_s = 0,03m$$

$$k_s = 0,02m$$

$$k_s = 0,01m$$

 C λ

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

 λ

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 5.75 \log 12.27 \frac{H}{k_s}$$

 k_s

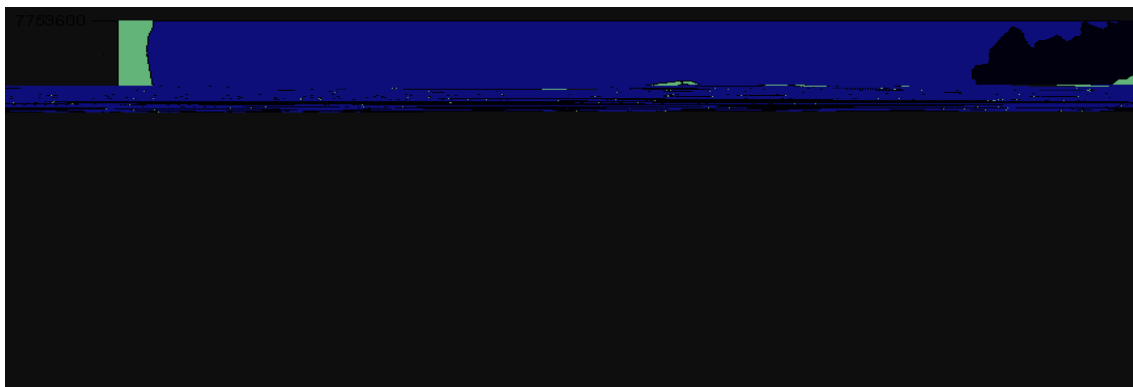


Figura 4-3 - Rugosidade no canal de acesso ao Porto de Vitória. As cores correspondem em granulometria: em vermelho, a fração argila; em roxo, a fração de areia média a fina; e em azul, a fração de areia grossa.

CAPÍTULO 5

O MODELO LAGRANGIANO DE PARTÍCULAS DE DESLOCAMENTO ALEATÓRIO

A equação de Fokker-Planck associada a Eq. (5.1), é uma equação euleriana que descreve o mesmo processo estocástico markoviano da equação de Langevin (RODEAN, 1994, 1996; TOMÉ E OLIVEIRA, 2001 e PEREIRA, 2004) é dada por:

$$\frac{\partial P_E}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(a_i P_E) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \frac{1}{2} b_{ij} b_{jk} P_E \quad , \quad (5.2)$$

onde P_E é a função de probabilidade euleriana, $a_i = a_i(\mathbf{x}, t)$ e $b_{ij} = b_{ij}(\mathbf{x}, t)$.

Para determinar o termo a_i da Eq. (5.1), é necessário impor a condição de boa mistura. Nesta condição, a trajetória das partículas do soluto, inicialmente bem misturadas em um escoamento, devem assim permanecer, de forma que a distribuição de probabilidade lagrangiana da posição da partícula, $P_L(\mathbf{x}, t)$, permaneça a mesma do escoamento, $P_E(\mathbf{x}, t)$. Como consequência, as partículas têm que ter os mesmos momentos estatísticos da posição, velocidade, e as mesmas covariâncias do escoamento. Da equação de transporte de solutos tem-se (FISCHER et al., 1979):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial(UCH)}{\partial x} + \frac{\partial(VCH)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} HD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial y} HD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \quad , \quad (5.3) \end{aligned}$$

onde $C(x, y, t)$ é a concentração média, U e V são as velocidades médias nas direções x e y , respectivamente, H é a profundidade medida a partir do nível médio do mar e $D_{xx}(x, y, t)$, $D_{yy}(x, y, t)$, $D_{xy}(x, y, t)$ e $D_{yx}(x, y, t)$ são coeficientes de dispersão-difusão.

A equação de transporte de solutos pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(CH)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} \right) + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + U \quad CH \\ & -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{D_{yx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + V \quad CH \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (D_{xx} CH) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (D_{yy} CH) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (D_{xy} CH) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (D_{yx} CH) \end{aligned} \quad (5.4)$$

A Eq. (5.4) é equivalente a Eq. (5.2) (TOMÉ E OLIVEIRA, 2001), logo, comparando-se os termos de ambas as equações, temos:

$$a_i = \begin{aligned} & \frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + U \\ & \frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{D_{yx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + V \end{aligned} ; \quad (5.5)$$

$$P_E = P_L = P = CH ; \quad (5.6)$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{BB}^T = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{pmatrix} . \quad (5.7)$$

Considerando o escoamento alinhado com o sistema coordenado, ou inversamente se o sistema coordenado é alinhado ao escoamento, então os termos cruzados são nulos, de forma que a Eq. (5.7) toma a forma

$$\frac{1}{2} \mathbf{BB}^T = \begin{pmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{pmatrix} . \quad (5.8)$$

Quando o escoamento principal tende a um alinhamento com o sistema coordenado, embora essa condição muitas vezes não ocorra em regiões internas do domínio físico modelado com geometria do ambiente complexa, os termos cruzados são comumente negligenciados.

Nessa condição, a Eq.(5.5) pode ser reescrita como

$$a_i = \begin{aligned} & \frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + U \\ & \frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + V \end{aligned} ;$$

Portanto, pela condição de boa mistura, os modelos lagrangianos de partículas de deslocamento aleatório (MLPDA) utilizam para o cálculo de trajetórias de partículas as propriedades estatísticas eulerianas do escoamento, as quais podem ser determinadas por meio de relações empíricas ou por modelos de fechamento de 2.^a ordem (RODI, 1993; OLIVEIRA, 2003).

Substituindo as Eqs. (5.5) e (5.8) na Eq. (5.1), obtém-se:

$$\begin{aligned} dx &= U + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} H) dt + \sqrt{2D_{xx}} dW_x(t); \\ dy &= V + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (D_{yy} H) dt + \sqrt{2D_{yy}} dW_y(t). \end{aligned} \tag{5.9}$$

Observe que a equação de deslocamento aleatório é escrita em termos do coeficiente de difusão. Isto implica em uma relação entre o MLPDA e o DIVAST, ou seja numa relação lagrangiana com a euleriana.

5.1 Hipótese assumidas

Hipóteses e restrições podem ser assumidas para se determinar a trajetória das partículas no escoamento. Estas hipóteses são:

- (a) as partículas são consideradas inertes, não sendo removidas e nem depositadas ao longo de sua trajetória;
- (b) as partículas são consideradas passivas, possuindo o mesmo comportamento de um elemento de fluido no escoamento (condição de boa mistura);

(c) a difusão molecular é desprezível em comparação com a difusão turbulenta.

5.2 Discretização do MLPDA

Esta demonstração é baseada em Pereira (2006).

O processo de Wiener possui as seguintes propriedades:

$$\overline{\Delta W} = 0; \quad (5.10)$$

$$\overline{\Delta W(t) \Delta W(t')} = \overline{\xi(t) \xi(t')} \Delta t^2 = \Delta t. \quad (5.11)$$

Onde $\xi(t)$ é um ruído branco, com as seguintes propriedades:

$$\overline{\xi(t)} = 0;$$

$$\overline{\xi(t) \xi(t')} = \delta(t - t').$$

Onde $\delta(t - t')$ é o delta de Dirac. Isto significa que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \overline{\xi(t) \xi(t')} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t') dt = 1.$$

Discretizando o tempo em intervalos iguais a Δt , uma possível representação para o delta de Dirac é dada pela Fig. 5.1, o que nos leva à seguinte relação no instante $t = n\Delta t (n = 1, 2, \dots)$,

$$\overline{\xi_n \xi_{n'}} = \frac{1}{\Delta t} \delta_{nn'}, \quad (5.12)$$

onde $\delta_{nn'}$ é o delta de Kronecker.

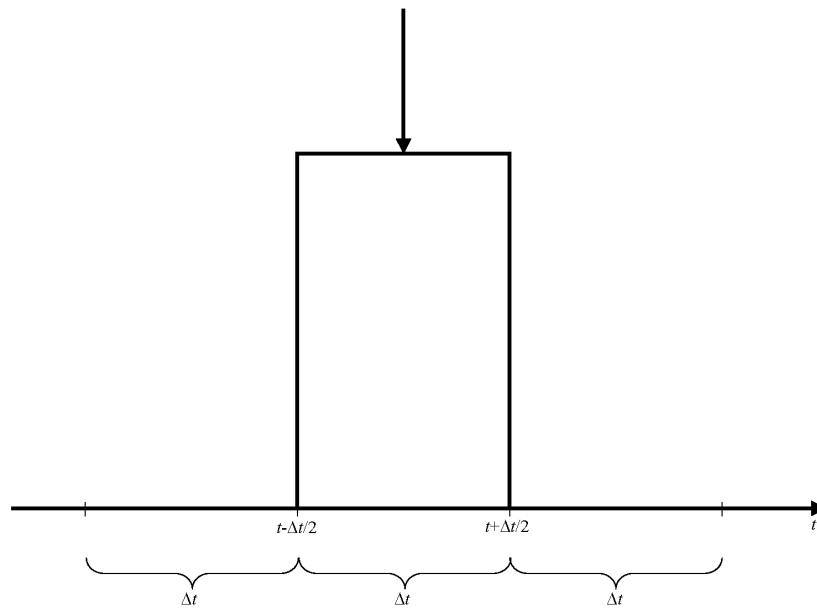


Figura 5-1 – Discretização do tempo em intervalos iguais a Δt representada pela função delta de Dirac.

Por outro lado, também se pode escrever ξ_n , como:

$$\xi_n = K \zeta_n, \quad (5.13)$$

onde K é uma constante, e ζ_n é uma variável aleatória (número aleatório) que possui distribuição normal (gaussiana) com as seguintes propriedades:

$$\overline{\zeta_n} = 0;$$

$$\overline{\zeta_n \zeta_{n'}} = \delta_{nn'}.$$

Assim, a Eq. (5.12) se escreve como

$$K^2 \overline{\zeta_n \zeta_{n'}} = \frac{1}{\Delta t} \delta_{nn'}, \quad (5.14)$$

De modo que

$$K = \sqrt{\frac{1}{\Delta t}}. \quad (5.15)$$

Portanto,

$$\Delta W = \xi_n \Delta t = K \zeta_n \Delta t = \sqrt{\frac{1}{\Delta t}} \Delta t \zeta_n = \sqrt{\Delta t} \zeta_n . \quad (5.16)$$

Na forma discretizada pelo método de diferenças finitas avançado no tempo, o conjunto de Eqs. (5.9) podem ser escritas empregando a Eq. (5.16) como:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + U_n + \frac{D_{xx}}{H} \frac{\Delta H}{\Delta x} + \frac{\Delta D_{xx}}{\Delta x} \Delta t + \sqrt{2D_{xx} \Delta t} \zeta_{x_{n+1}} ; \\ y_{n+1} &= y_n + V_n + \frac{D_{yy}}{H} \frac{\Delta H}{\Delta y} + \frac{\Delta D_{yy}}{\Delta y} \Delta t + \sqrt{2D_{yy} \Delta t} \zeta_{y_{n+1}} . \end{aligned} \quad (5.17)$$

Os números aleatórios ζ_x e ζ_y podem ser gerados por meio de algoritmos disponibilizados na literatura, com o RANDU da IBM (RANDU, 2006), e o GASDEV do *Numerical Recipes* (PRESS, 1992). Entretanto, neste trabalho optou-se pela seguinte formulação (TOMÉ e OLIVEIRA, 2001) para gerar números pseudo-aleatórios que estejam distribuídos de acordo com a distribuição normal a partir de números pseudo-aleatórios gerados com igual probabilidade no intervalo [0,1].

Sejam φ e ψ duas variáveis aleatórias independentes e uniformes distribuídas no intervalo [0,1] e considere as variáveis aleatórias r e θ definidas por

$$r = \sqrt{\frac{2}{\alpha} |\ln 1 - \varphi|} \quad \text{e} \quad \theta = 2\pi\psi , \quad (5.18)$$

onde c é uma constante positiva. Elas possuem as seguintes funções de probabilidades:

$$\rho_1(r) = \alpha r \exp -\frac{\alpha}{2} r^2 \quad , \quad 0 \leq r \leq \infty \quad \text{e} \quad \rho_2(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad , \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad , \quad \text{respectivamente.}$$

Definem-se em seguida as variáveis ζ_x e ζ_y por

$$\zeta_x = r \sin \theta \quad \text{e} \quad \zeta_y = r \cos \theta \quad . \quad (5.19)$$

A distribuição conjunta de probabilidades, $\rho_{conj}(\zeta_x, \zeta_y)$, dessas variáveis é dada por

$$\rho_{conj}(\zeta_x, \zeta_y) d\zeta_x d\zeta_y = \rho_1(r) \rho_2(\theta) dr d\theta .$$

Como $d\zeta_x d\zeta_y = r dr d\theta$, obtém-se então:

$$\rho_{conj}(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{\alpha}{2\pi} \exp -\frac{\alpha}{2}(\zeta_x^2 + \zeta_y^2) .$$

E, portanto, $\rho_{conj}(\zeta_x, \zeta_y) = \rho(\zeta_x) \rho(\zeta_y)$, onde

$$\rho(\zeta_y) = \frac{\alpha}{2\pi}^{1/2} \exp -\frac{\alpha}{2} \zeta_y^2 , \quad (5.20)$$

é a distribuição gaussiana. Note que ζ_x, ζ_y são variáveis aleatórias independentes. Assim, a partir de dois números aleatórios φ e ψ uniformemente distribuídos no intervalo $[0,1]$, pode-se gerar, utilizando as Eqs. (5.18) e (5.19), números aleatórios independentes ζ_x e ζ_y cada um deles distribuídos de acordo com a distribuição gaussiana da Eq. (5.20).

5.3 Condição de fronteira

As condições de fronteiras podem ser de dois tipos: de absorção ou reflexão perfeita. Na condição de absorção assume-se que os contornos são permeáveis, de modo que quando a partícula sai do domínio computacional pela fronteira aberta ou atinge a terra, automaticamente desaparece dos cálculos computacionais subseqüentes. Como conseqüência, a massa total dentro do domínio decai com o passar do tempo. Na condição de reflexão perfeita, se uma partícula atinge a terra, uma nova posição dentro do domínio é dada à partícula. Este tipo de reflexão pode ser entendida como a reflexão de uma bola em uma mesa de bilhar. A nova posição (x_1^r, y_1^r) é dada por (Figura 5-2):

$$x_1^r = 2x_{fronteira} - x_1;$$

$$y_1^r = y_1.$$

Para as condições de fronteira foi utilizada a definição dos contornos em terra ou água por meio de um código binário associado a representação da malha do modelo hidrodinâmico DIVAST. Cada célula da malha é representada por um algarismo, sendo 0 (zero) para célula da malha em terra, e 1 (um), para célula da malha em água. No MLPDA, a cada passo de tempo da simulação, cada partícula deve ser localizada na malha do DIVAST, para então ser associada ao código binário correspondente a célula que ocupa. Se esta célula for zero, então a partícula é refletida ou absorvida, dependendo dos parâmetros de *input* do DIVAST. Em ambos os casos, quando uma partícula deixa o domínio computacional ocorre a condição de absorção.

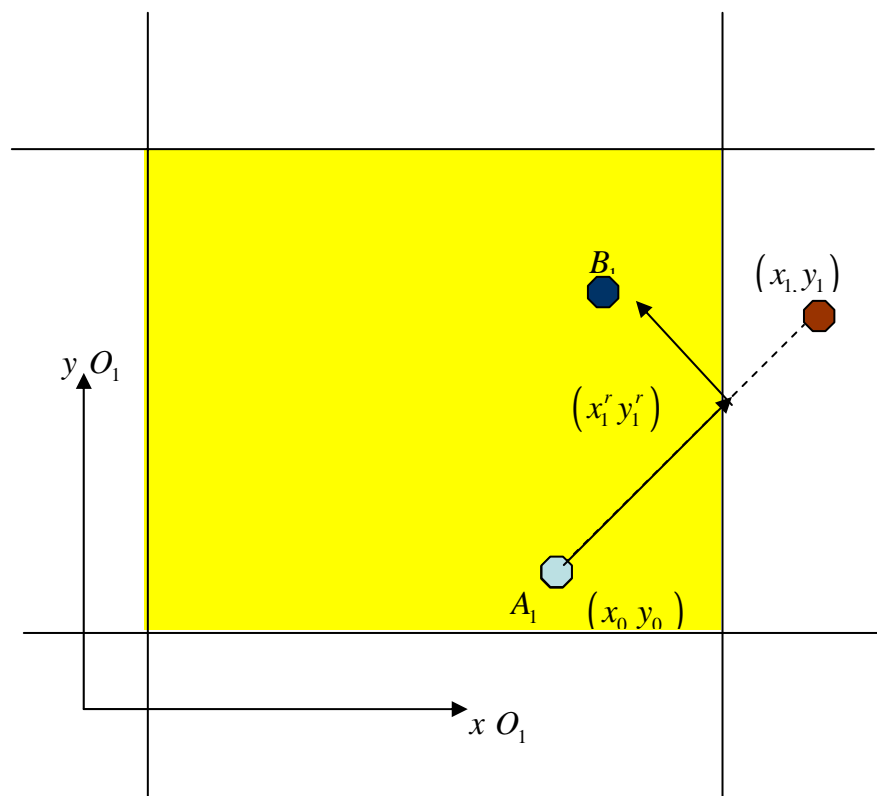


Figura 5-2 - Exemplo da representação da reflexão de uma partícula no modelo de transporte. A célula em amarelo representa a água.

5.4 Algoritmo utilizado

Foram realizados testes iniciais para diferentes tipos de casos e situações, que possibilitaram a correção do algoritmo e a eliminação de erros, sendo que o código computacional foi desenvolvido por Pereira (2004) e adaptado para o MLPDA por Pereira & Chacaltana (2006). Sua formulação é descrita a seguir:

1. $t = t_0$ (onde t é o tempo total de simulação e t_0 é o tempo inicial de lançamento das partículas);
2. enquanto $t_i \leq t$ (enquanto o tempo não é alcançado o tempo total de simulação), faça-se:
 - a. achar a partícula no domínio computacional;
 - b. determinar os valores interpolados de U , D_{xx} , D_{yy} e H na posição da partícula;
 - c. gerar os números pseudo-aleatórios de ζ_x e ζ_y ;
 - d. calcular a nova posição da partícula pela Eq. (5.17);
 - e. verificar se a partícula está na terra ou fora do domínio;
 - se sim, refletir ou absorver a partícula;
 - f. calcular o novo passo no tempo;
3. fim do algoritmo.

5.5 Verificação do MLPDA

Nesta fase, é verificada a consistência do modelo por meio de dois experimentos numéricos propostos por Heemink (1990). Estes testes são realizados em um reservatório de 25 km×25 km, com espaçamento de grade de 2,5 km. Um total de

1.000 partículas são liberadas do centro do domínio instantaneamente, considerando a condição de reflexão perfeita. O tempo total de simulação é de 400 horas, com passo de tempo de 30 minutos. Os resultados são descritos a seguir.

5.5.1 1.º Experimento

Neste primeiro experimento, toma-se a profundidade do reservatório como uniforme, e igual a 10 metros, e escoamento sem advecção, ou seja, somente difusivo. Considera-se um coeficiente de difusão variável espacialmente, sendo maior no centro do reservatório e diminuindo em direção às bordas, conforme a Figura 5-3.

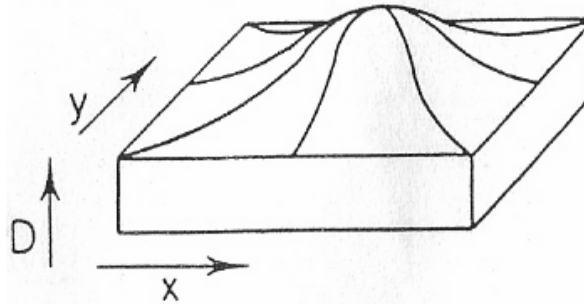


Figura 5-3 - Variação espacial do coeficiente de dispersão.

Ao término da simulação, conta-se o número médio de partículas por célula da malha ao longo do período simulado, permitindo a construção do histograma de distribuição de partículas por célula, que é dado pela distribuição de Poisson.

$$P(X = k) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^k}{k!}, \quad (5.21)$$

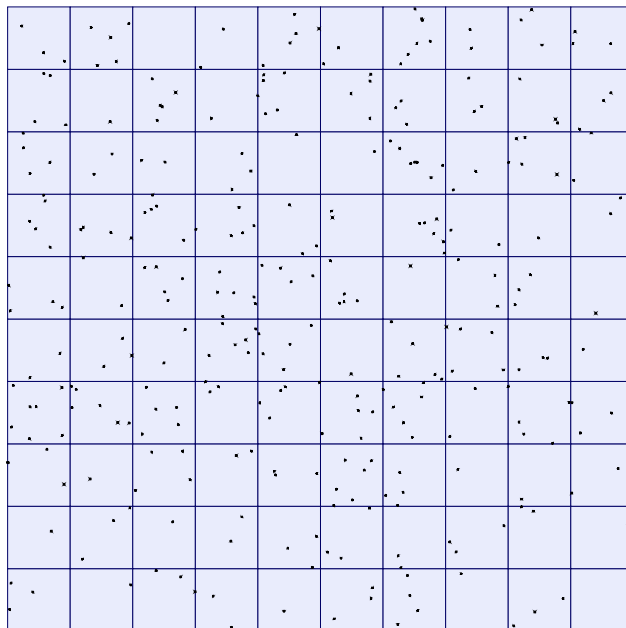
onde $k = 3, 4, 5, \dots, 18$, é o número de partículas e o parâmetro α , é calculado como:

$$\alpha = (\text{n}^\circ \text{ total de partículas}) \times \frac{(\text{volume de uma célula do reservatório})}{(\text{volume total do reservatório})} = 10.$$

A Figura 5-4 mostra a distribuição das partículas ao final da simulação do 1.º experimento. As partículas se apresentaram bem distribuídas por todo o domínio ao

término da simulação, como era esperado, pois em decorrência do coeficiente de dispersão imposto, as partículas se espalham no reservatório no decorrer do experimento. A Figura 5-5 compara os resultados deste experimento com o de Heemink (1990) e com a solução exata de Poisson, utilizando a distribuição de probabilidades para encontrar um determinado número de partículas ($X = k$) em uma célula. Tal distribuição de probabilidade é calculada tomando-se o valor médio da quantidade de partículas por célula durante o experimento, distribuídas no domínio computacional.

Os resultados obtidos mostram que o modelo apresenta a maior probabilidade de encontrar 10 partículas em cada célula, em concordância com a distribuição de Poisson e do experimento de Heemink (1990), que ficaram entre 9 e 10 partículas por célula. Diferenças observadas entre os resultados do experimento realizado neste trabalho e os resultados de Heemink (1990) para a probabilidade de encontrar um determinado número de partículas ($X = k$), podem estar relacionadas aos diferentes geradores de números pseudo-aleatórios e aos diferentes coeficientes de dispersão utilizados por Heemink (1990) e este trabalho. Uma vez que o modelo de trajetória de partículas é altamente dependente das propriedades estatísticas do escoamento.



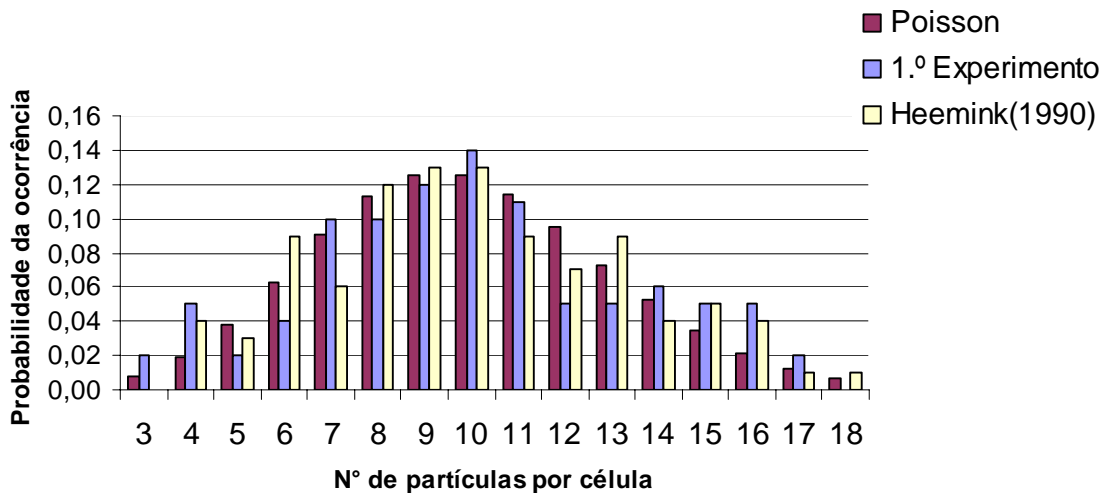


Figura 5-5 - Distribuição de probabilidades em função do número de partículas por célula do 1.º experimento.

5.5.2 2.º Experimento

No segundo experimento é introduzida uma variação espacial na profundidade do reservatório, conforme mostra a Figura 5-6. O coeficiente de difusão varia conforme a Figura 5-3. Nesse caso, as partículas observadas em uma área limitada para um tempo longo de simulação, devem se tornar linearmente dependentes com a profundidade d'água (Heemink, 1990). Após a simulação, conta-se o número médio de partículas por célula da malha ao longo do período simulado.

A quantidade média de partículas por célula é dada pelo coeficiente α , calculado da seguinte forma:

1. na área com profundidade 10 metros (laterais):

$$\alpha = (\text{n}^\circ \text{ total de partículas}) \times \frac{(\text{volume de uma célula do reservatório})}{(\text{volume total do reservatório})} = 7,14;$$

2. na área central onde a profundidade é 20 metros:

$$\alpha = (\text{n}^\circ \text{ total de partículas}) \times \frac{(\text{volume de uma célula do reservatório})}{(\text{volume total do reservatório})} = 14,28.$$

Desta forma, o coeficiente α mostra que há uma probabilidade de se encontrar o dobro de partículas na região de profundidade 20 m.

A Figura 5-7 mostra a distribuição das partículas ao fim do experimento. Para a área de profundidade de 10 m, encontrou-se o coeficiente $\alpha = 7,7$, o que representa uma superestimação de 7,27% com relação a solução exata ($\alpha = 7,14$). Na área onde a profundidade é igual a 20m, encontrou-se o coeficiente $\alpha = 12,9$, o que representa uma subestimação de 9,66% com relação a solução exata ($\alpha = 14,28$). Já Heemink (1990) encontrou $\alpha = 7,35$ para a profundidade de 10 m e $\alpha = 14,10$ para a profundidade de 20 m. Os resultados encontrados neste trabalho portanto, apresentaram boa aproximação com a solução exata.

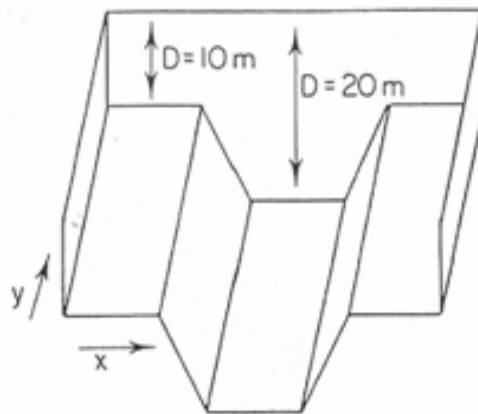
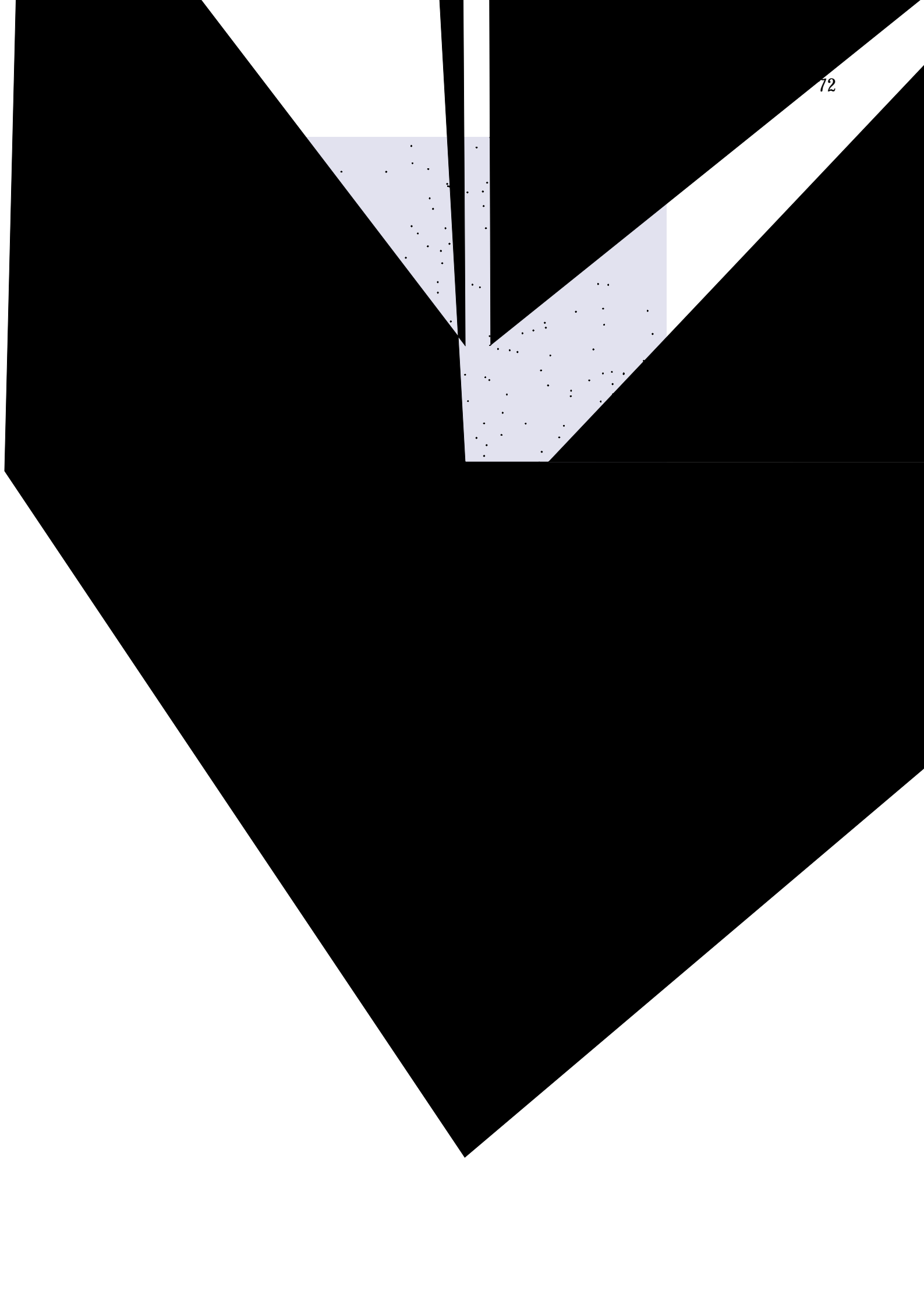


Figura 5-6 - Variação da profundidade da água no reservatório do 2.º experimento.



CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

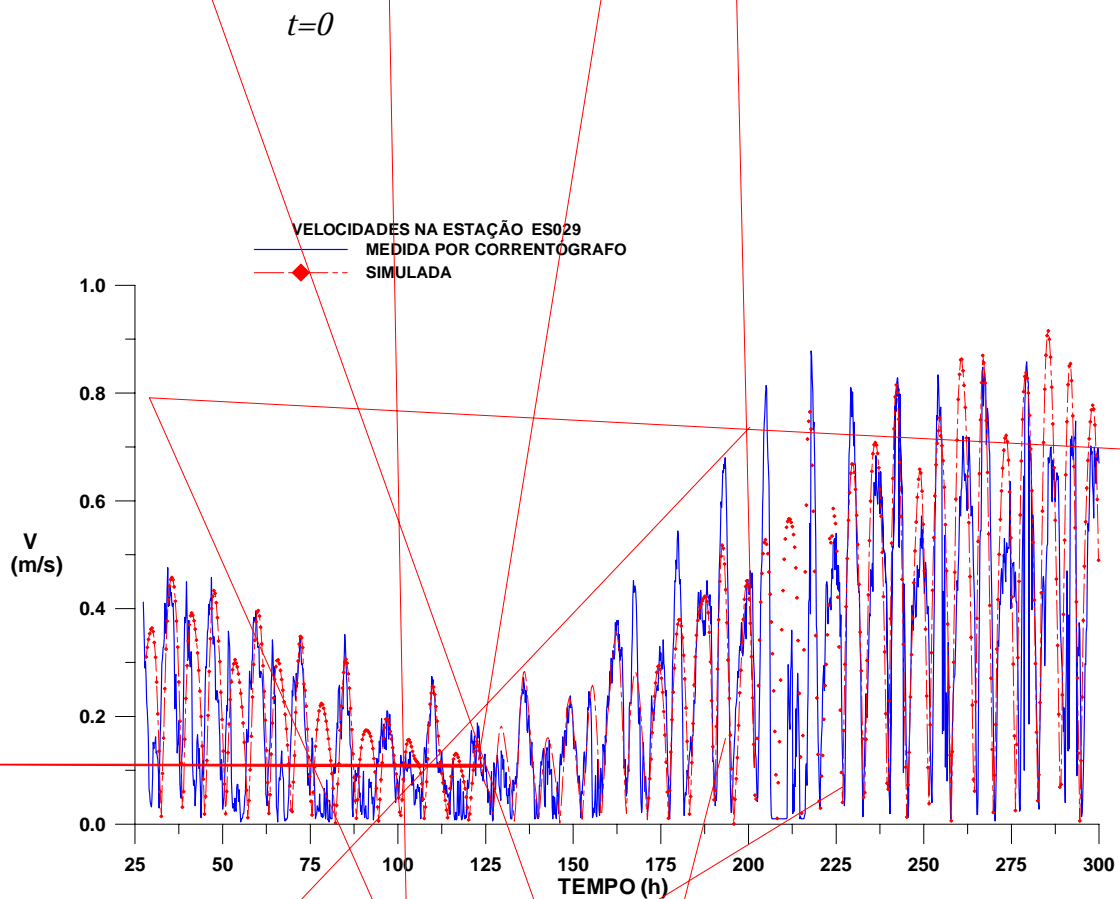
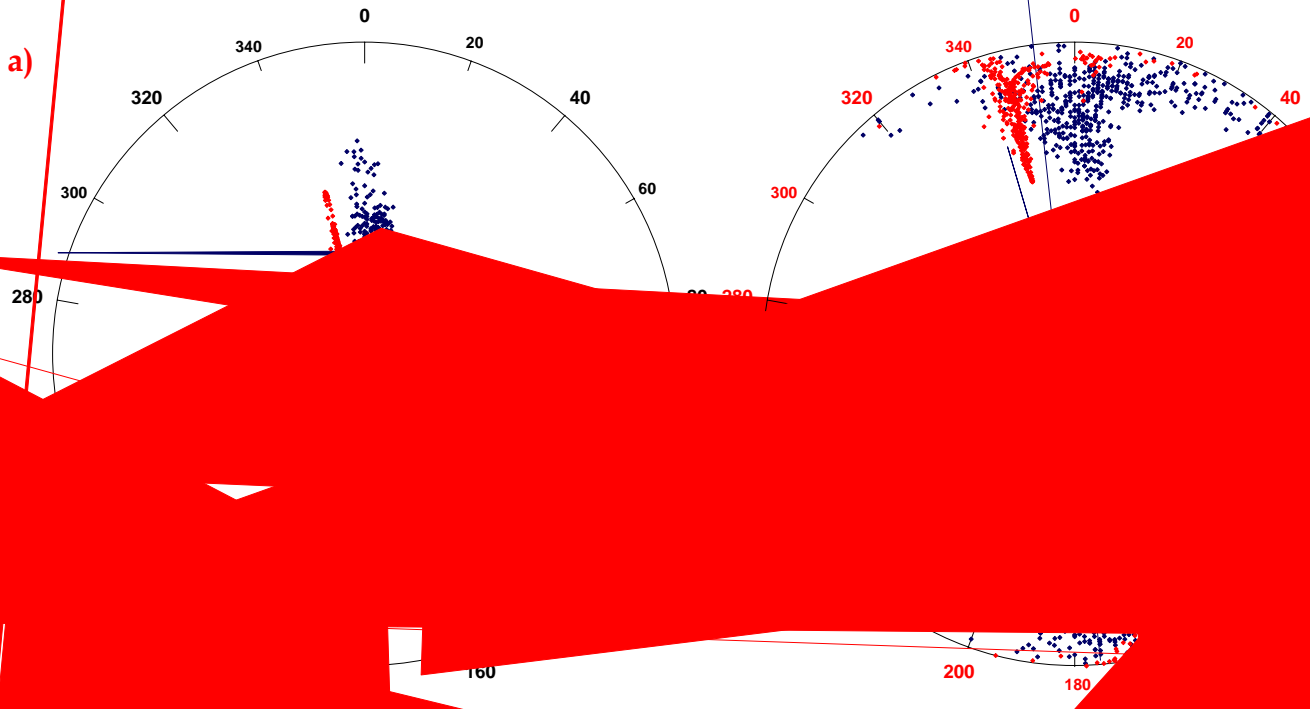


Figura 6-1 - Comparação entre os valores de velocidade medidos pelo correntógrafo (azul) e os simulados pelo modelo DIVAST (vermelho), na estação Santo Antônio.



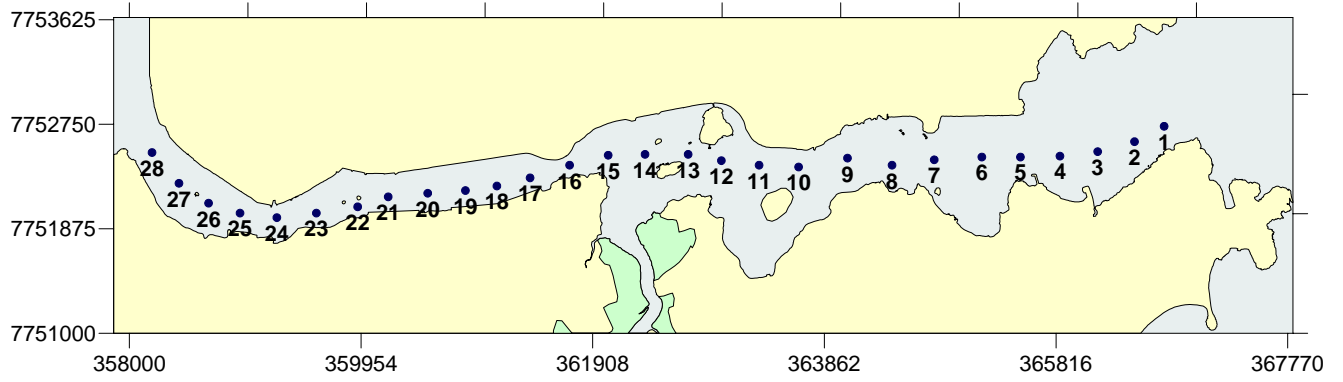
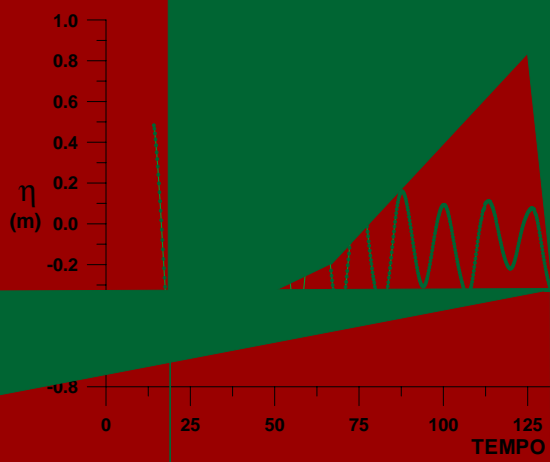
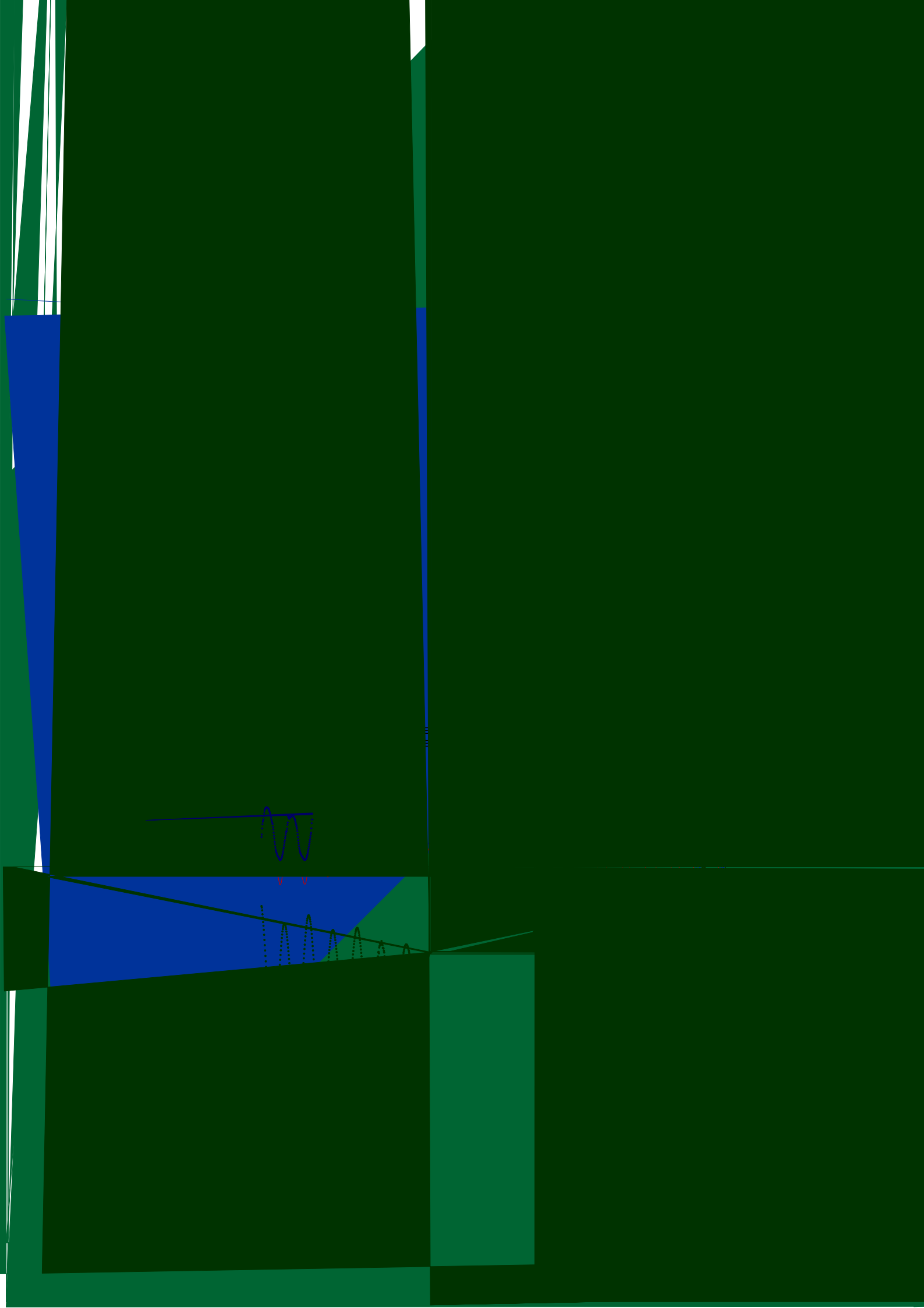


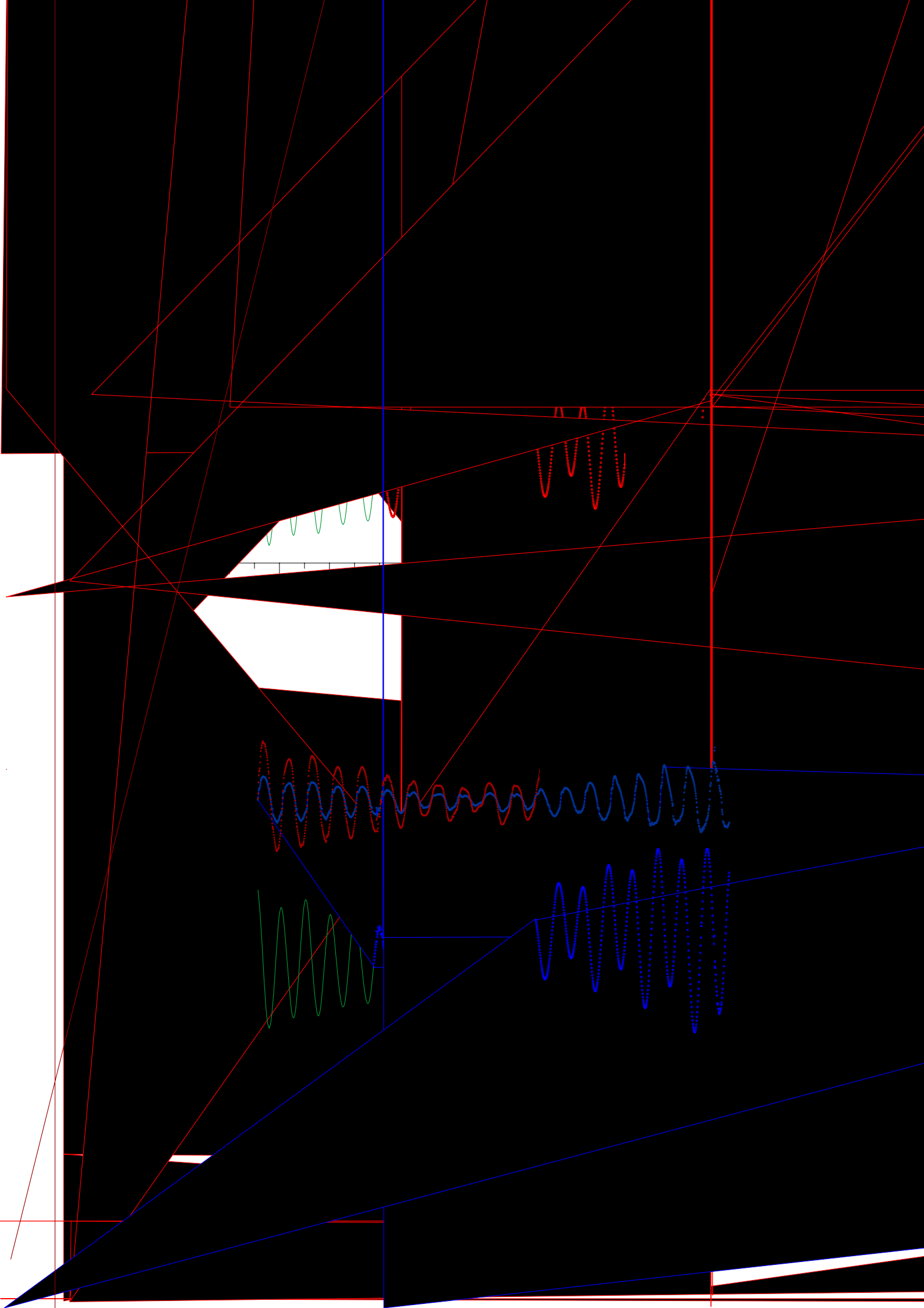
Figura 6-3 -Estações de monitoramento de elevação e velocidade modeladas.

M_2

(b)







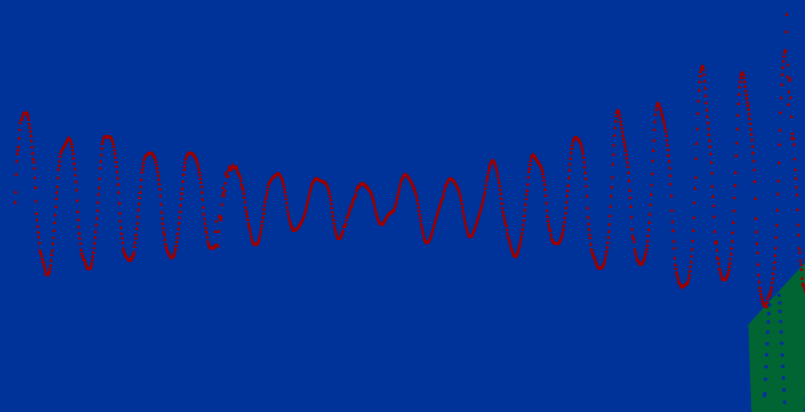
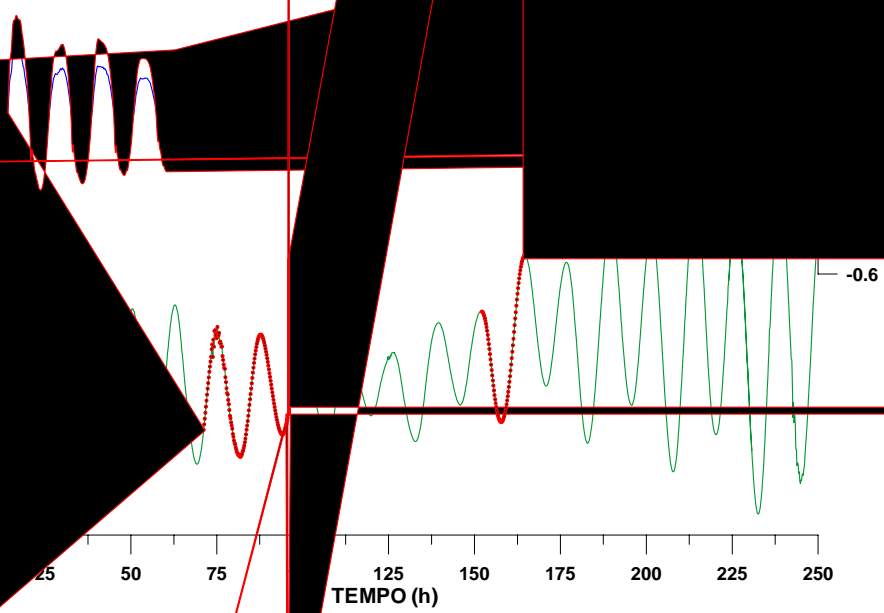


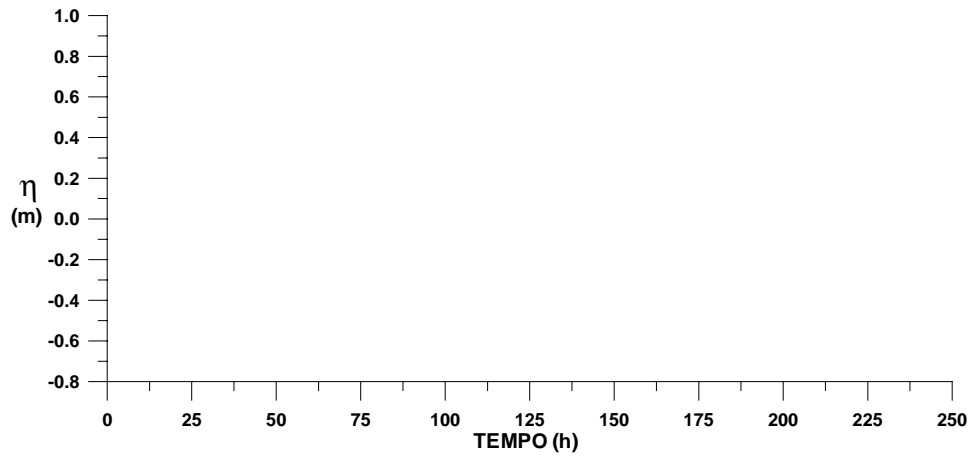
Figura 6-7 - Comparação entre resultados de magnitude das componentes das velocidades e de elevações obtidas com as malhas de grade de espaçamento de 25 metros e de 10 metros para as estações 7 (a) e 8 (b) . As linhas contínuas são os resultados da grade de espaçamento 10 metros. A plotagem de símbolos é referente aos resultados da grade de espaçamento 25 metros.

(a)

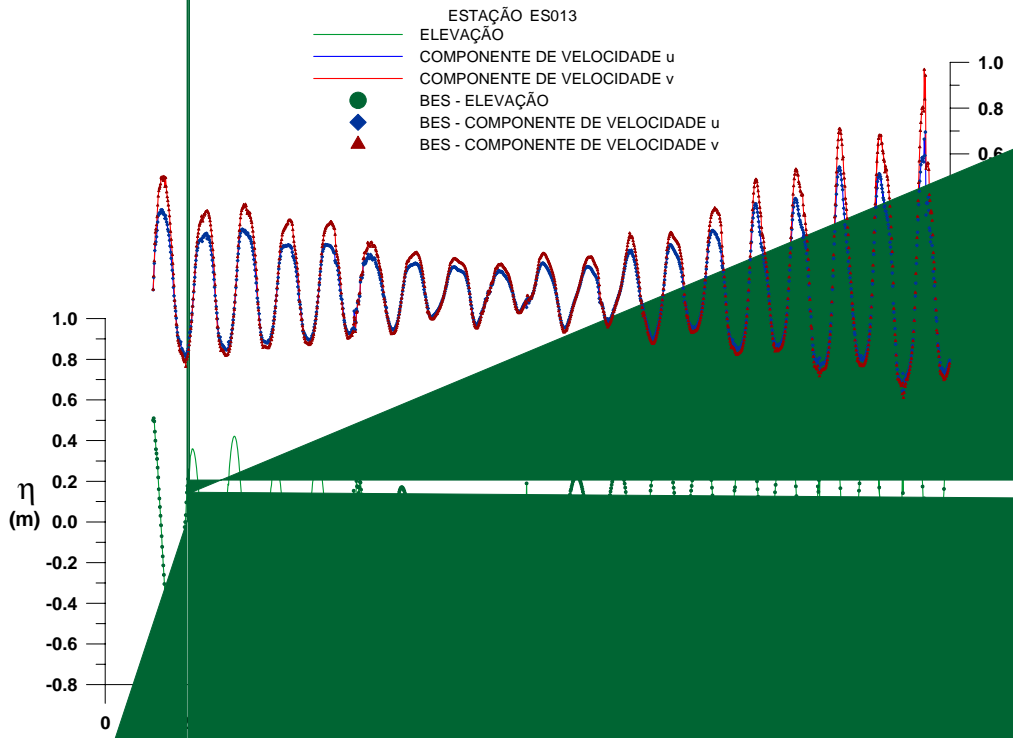
(b)



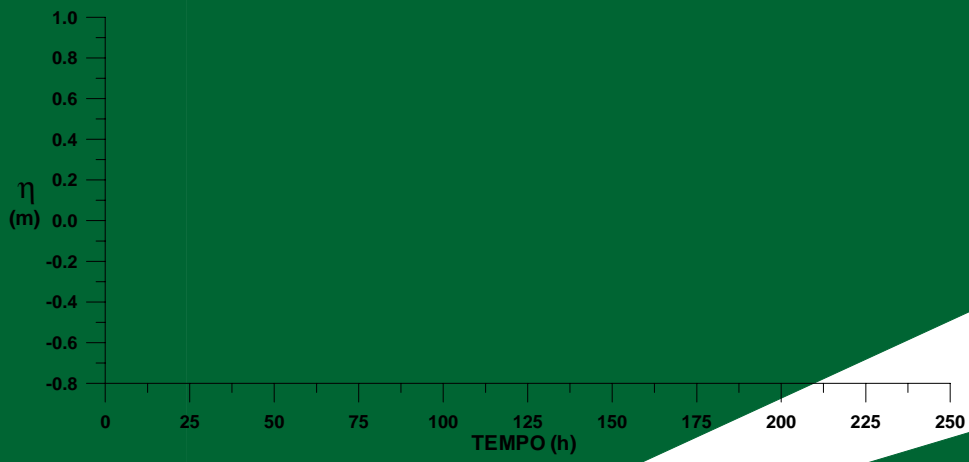
(a)



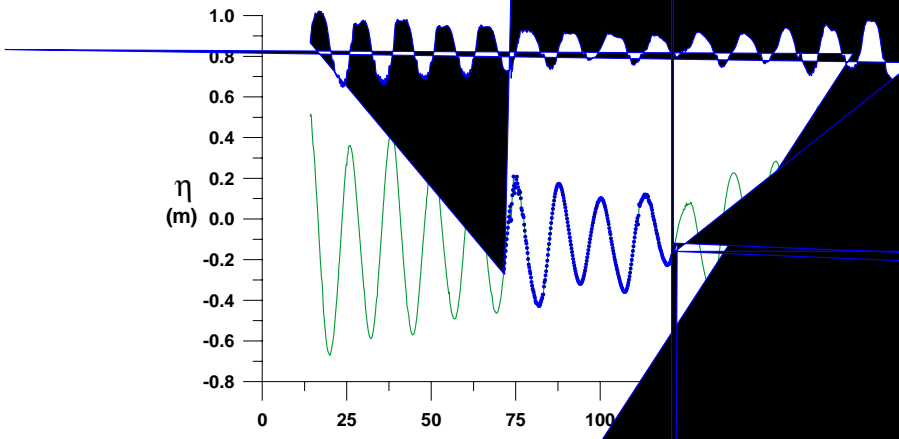
(a)



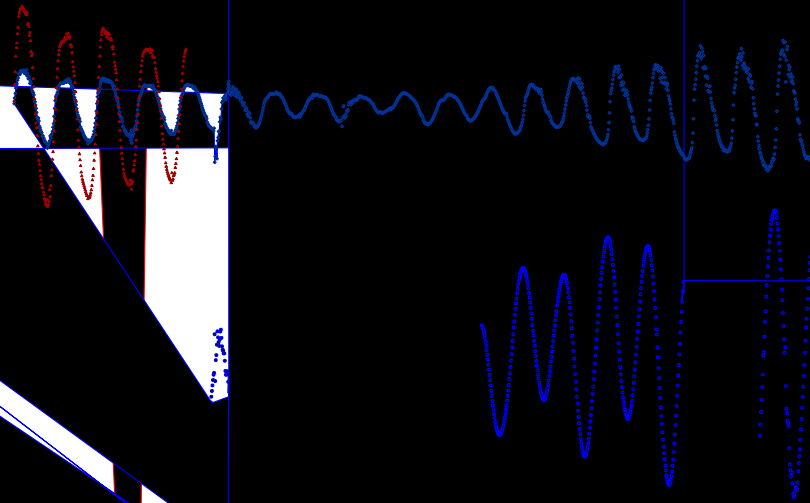
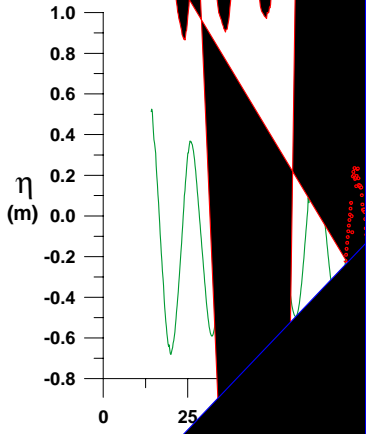
(b)



(a)

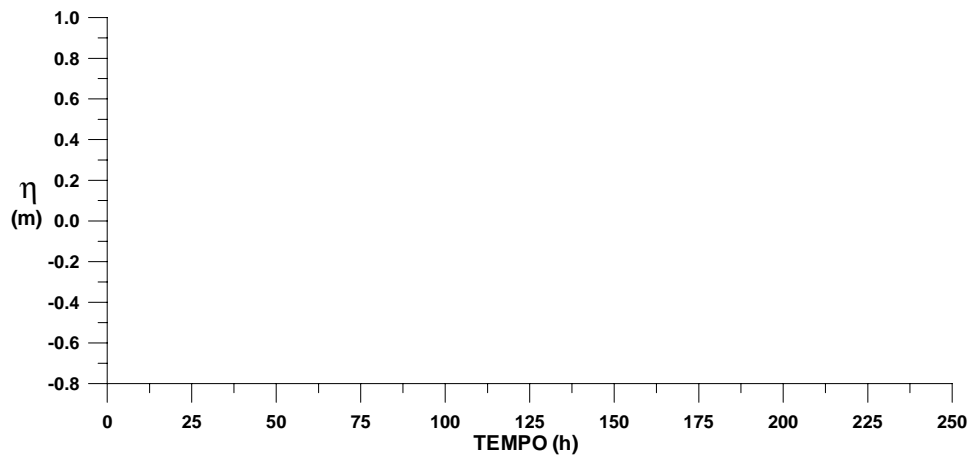


(a)





(a)

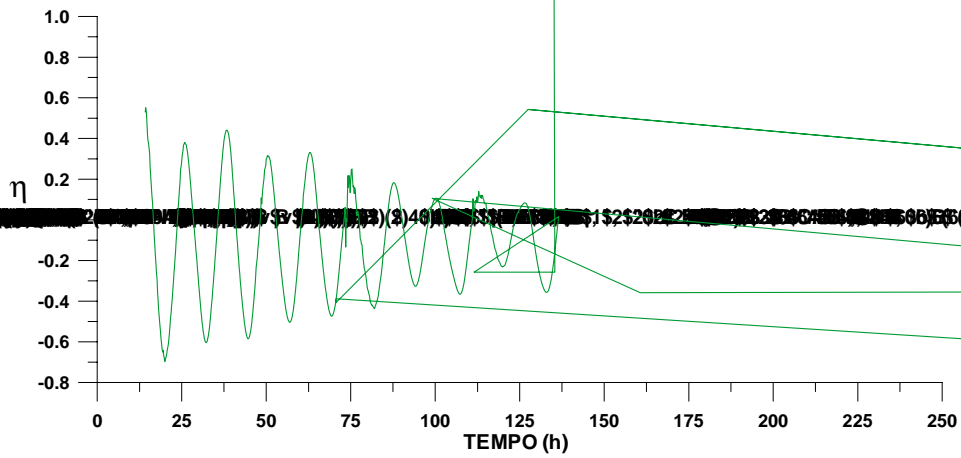


(a)

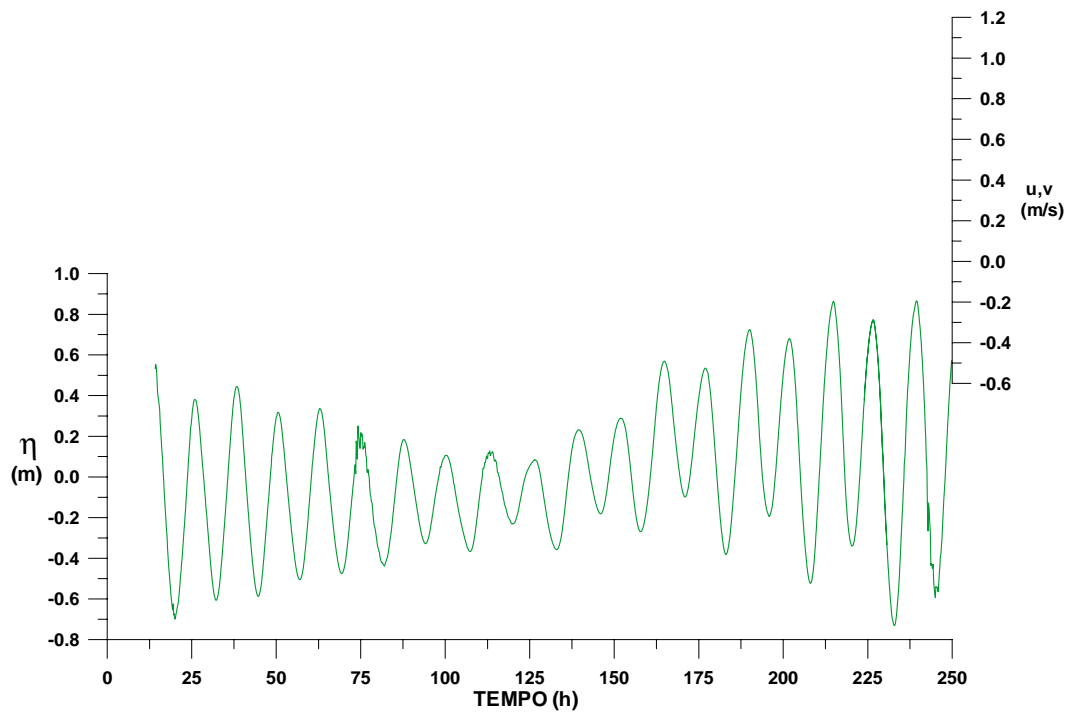
- ESTAÇÃO ES023
- ELEVAÇÃO
- COMPONENTE DE VELOCIDADE u
- COMPONENTE DE VELOCIDADE v
- BES - ELEVAÇÃO
- BES - COMPONENTE DE VELOCIDADE u
- BES - COMPONENTE DE VELOCIDADE v

(m)

(b)



(a)



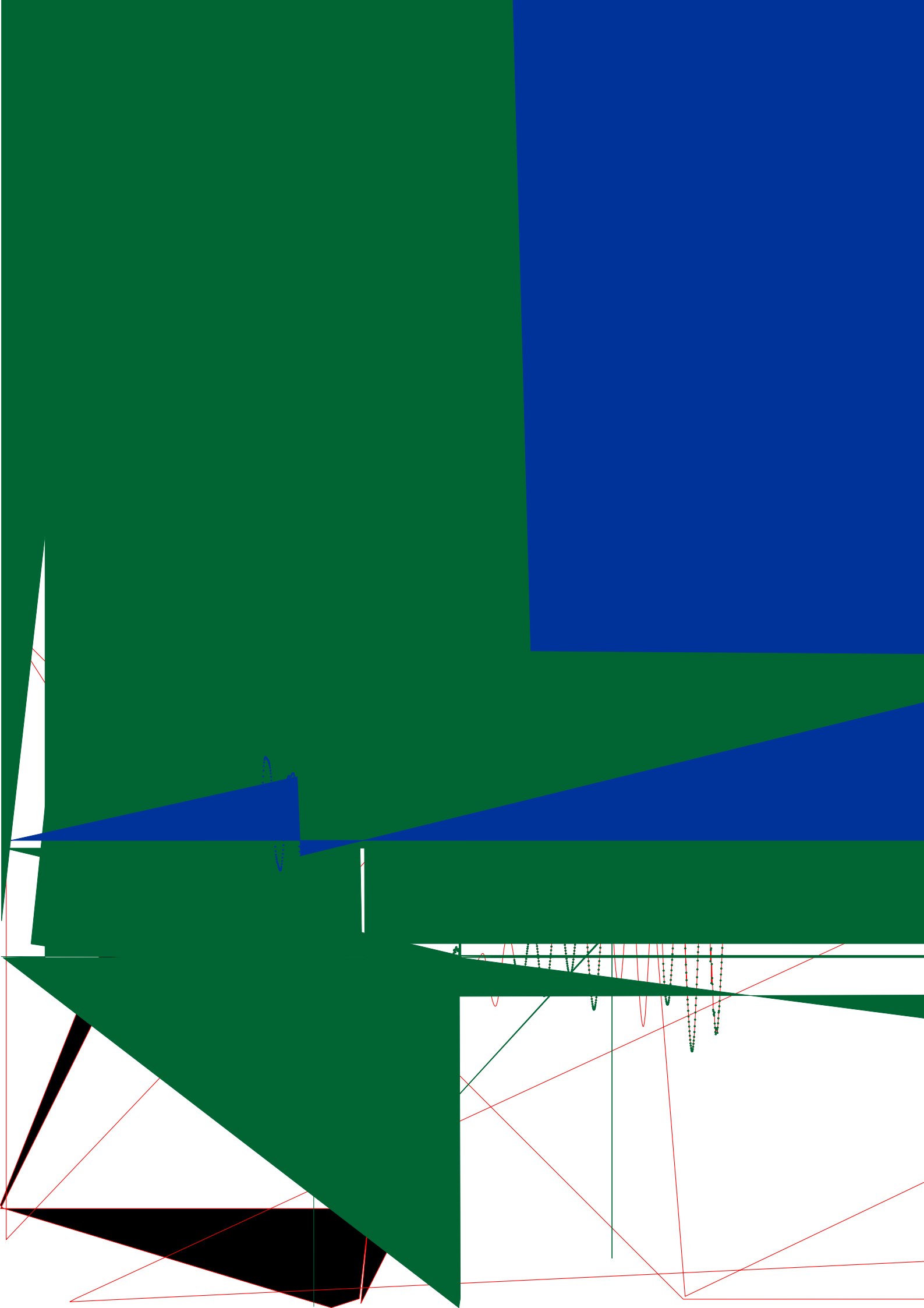


Tabela 6-1 - Comparação entre erros encontrados e indicados na literatura.

Elevações	1,7%	5%
Velocidades	9,6%	20%
Direções	$\pm 20^\circ$ (ou $\pm 13^\circ$ para velocidades acima de 10 cm/s)	$\pm 20^\circ$

6.2 HIDRODINÂMICA NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE VITÓRIA

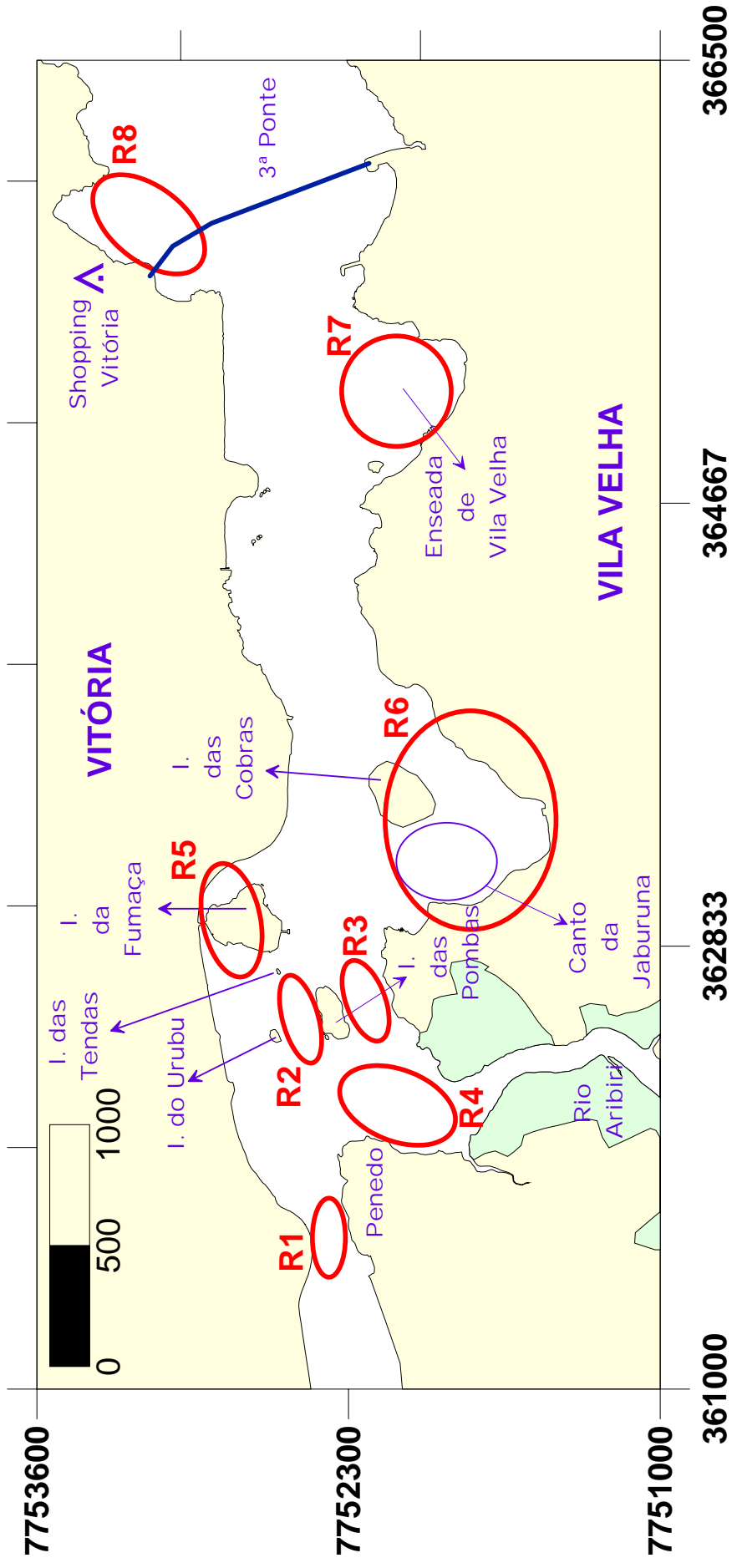


Figura 6-18 - Identificação das regiões R1 a R8 no canal de acesso ao Porto de Vitória.

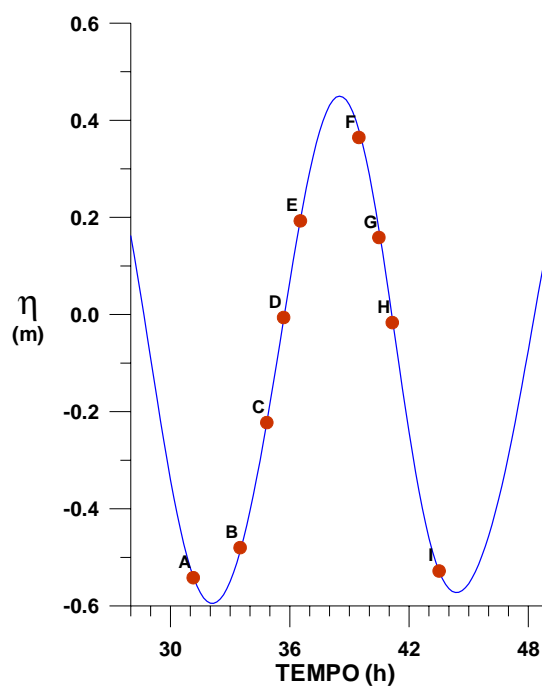


Figura 6-19 - Intervalo da maré próximo à de quadratura usado para apresentação dos campos de velocidade. As letras indicam os instantes da maré, em horas, em que o campo de escoamento é apresentado. A=31,5; B=33,5; C=34,8; D=35,6; E=36,5; F=39,5; G=40,5; H=41,5; I=43,5.

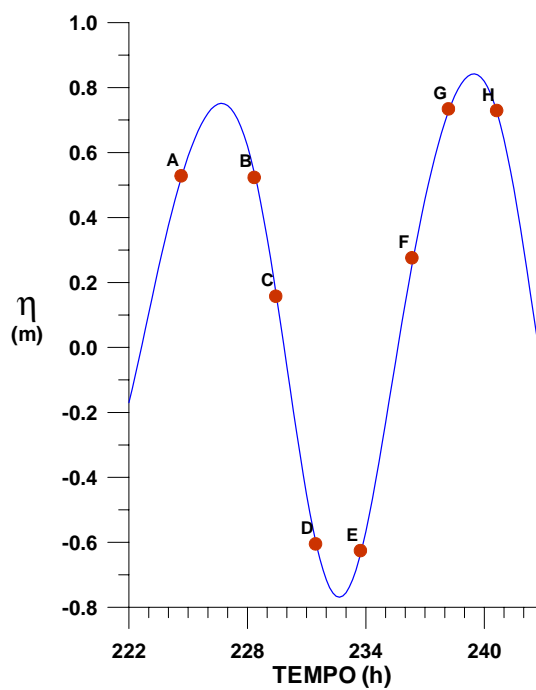


Figura 6-20 - Intervalo da maré próximo da sizígia usado para apresentação dos campos de velocidade

a)

a)







a)

a)





6.3 SIMULAÇÕES DO TRANSPORTE DE TRAÇADORES NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE VITÓRIA

Tabela 6-2 - Simulações com o MLPDA no canal de Acesso ao Porto de Vitória.

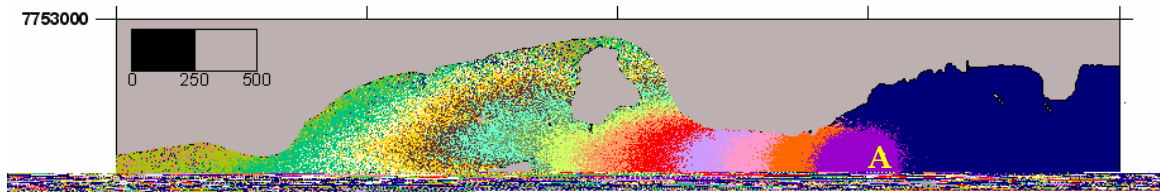


Figura 6-38 - Nuvens de partículas em instantes após o lançamento para o 1.º experimento, em maré enchente próximo à quadratura.

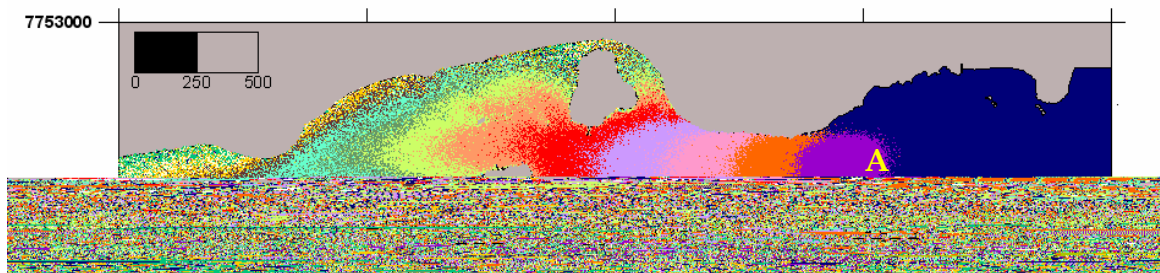


Figura 6-39 - Nuvens de partículas em instantes após o lançamento para o 2.º experimento, em maré enchente próximo à sizígia.

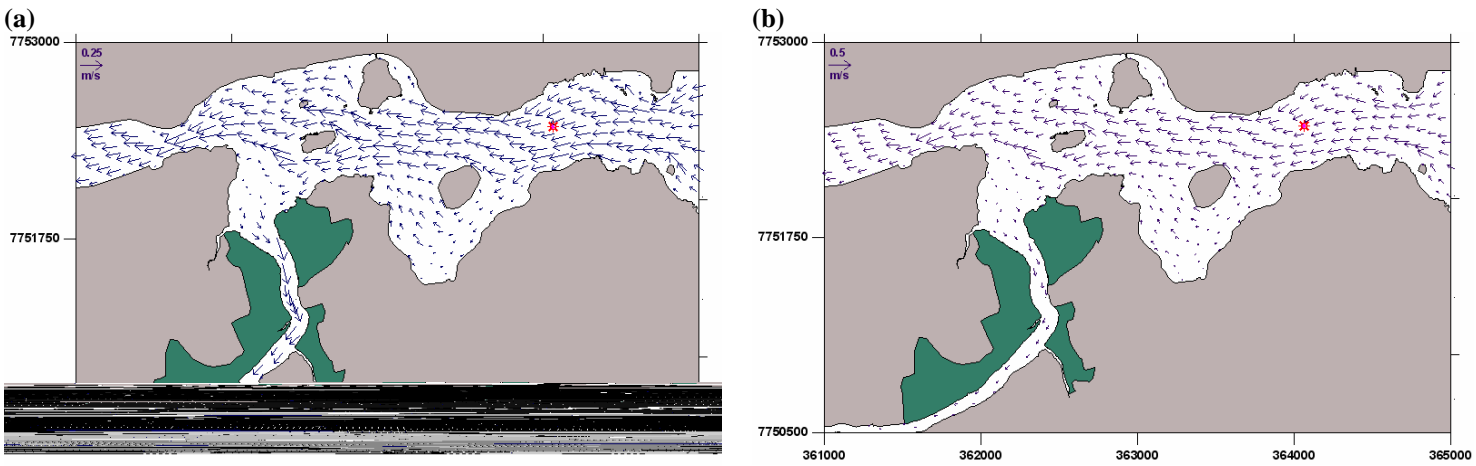


Figura 6-40 - Instante inicial de lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

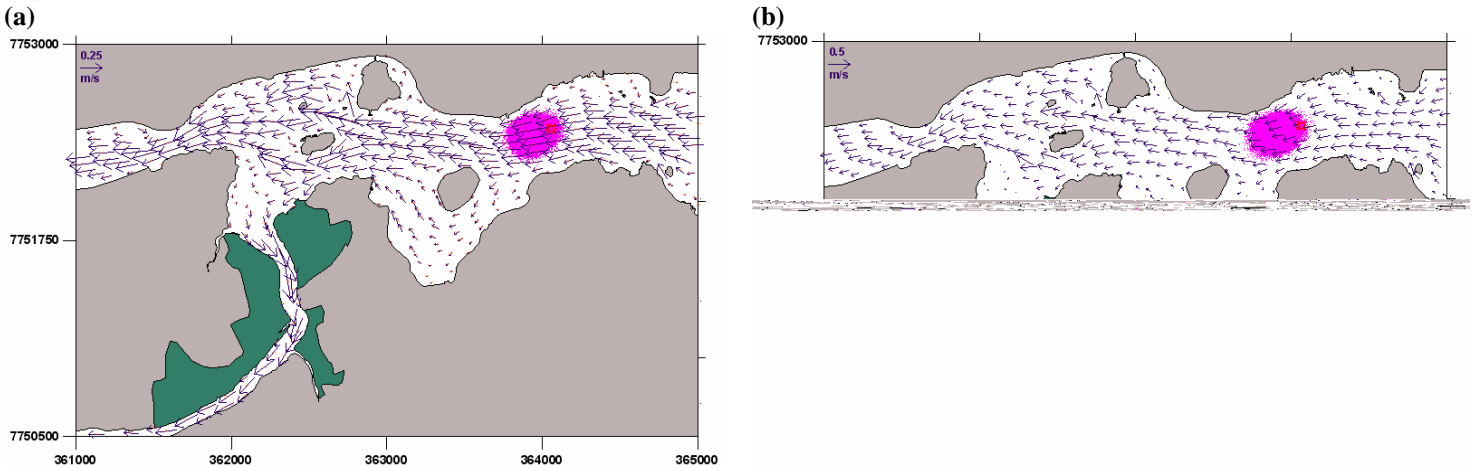


Figura 6-41 - Instante $t=10$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

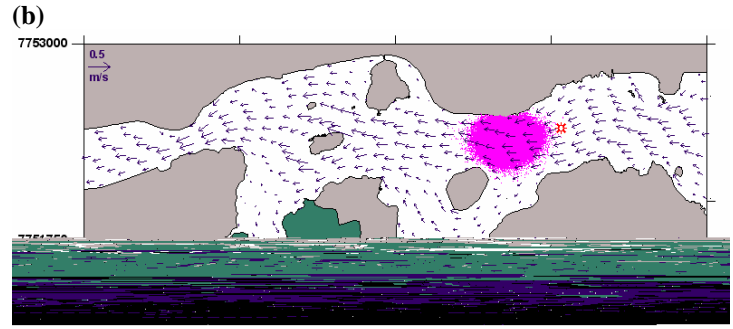
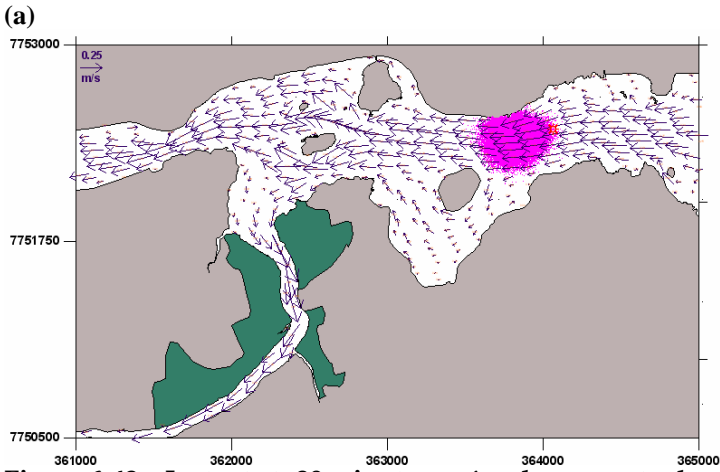
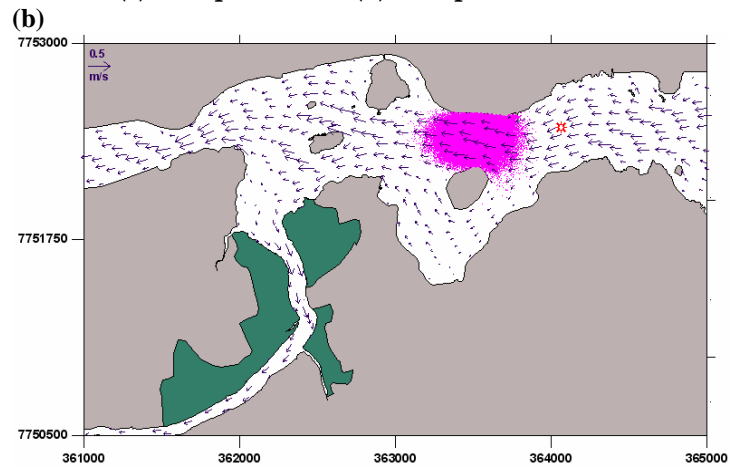
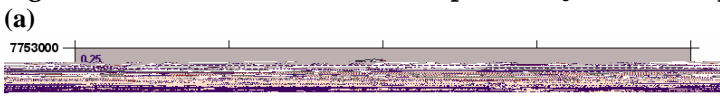


Figura 6-42 - Instante $t=20$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.



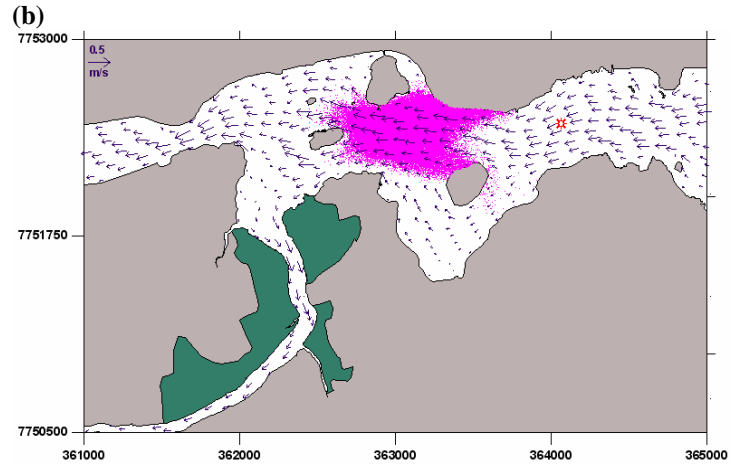
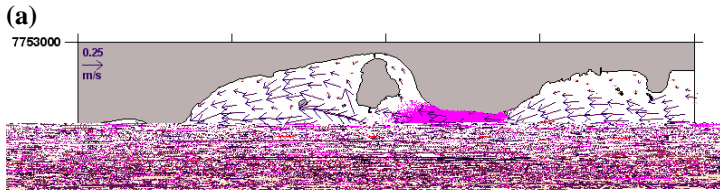


Figura 6-45 - Instante $t=50$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

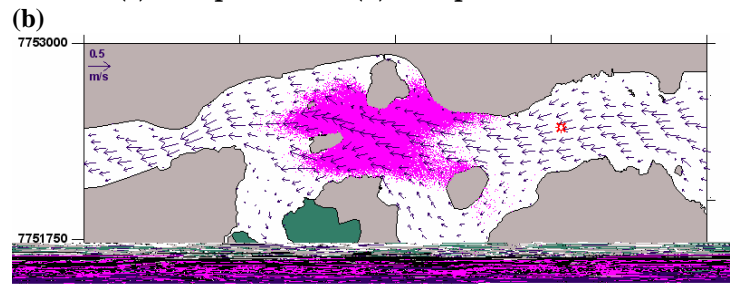
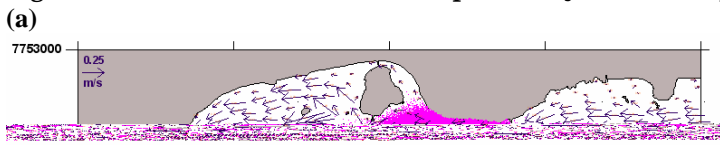


Figura 6-46 - Instante $t=60$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

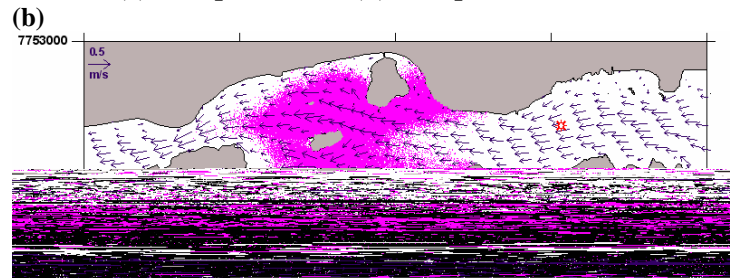
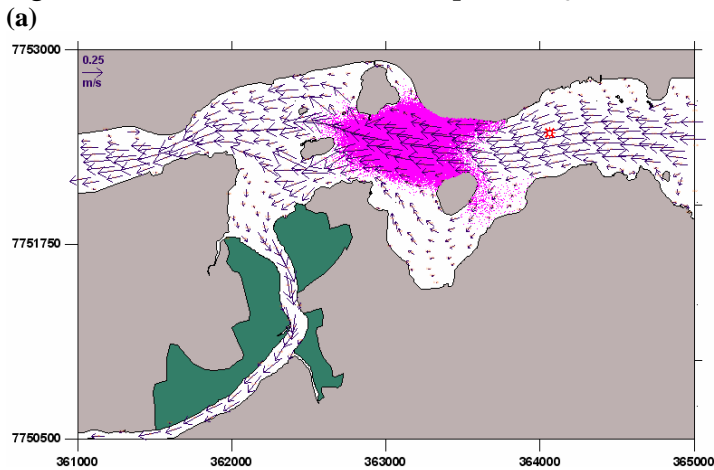


Figura 6-47 - Instante $t=70$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

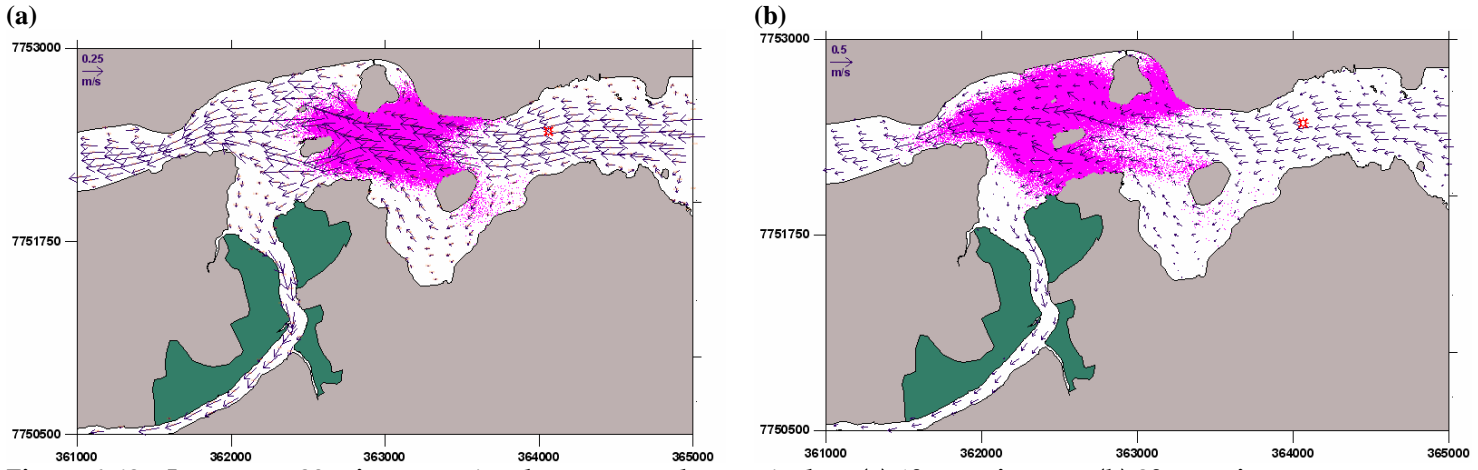


Figura 6-48 - Instante $t=80$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

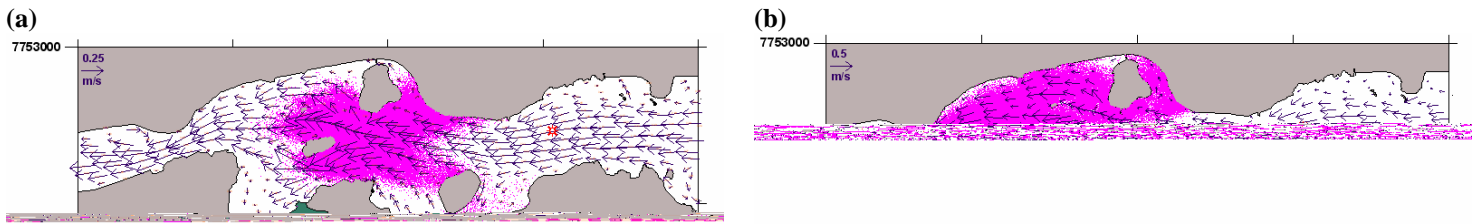


Figura 6-49 - Instante $t=90$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

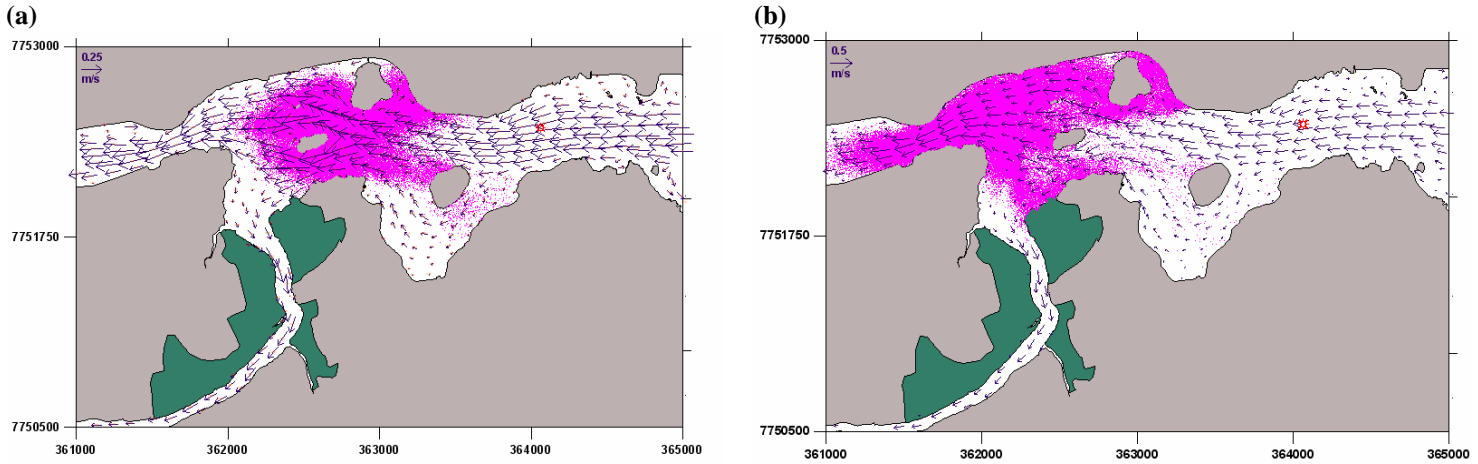


Figura 6-50 - Instante $t=100$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

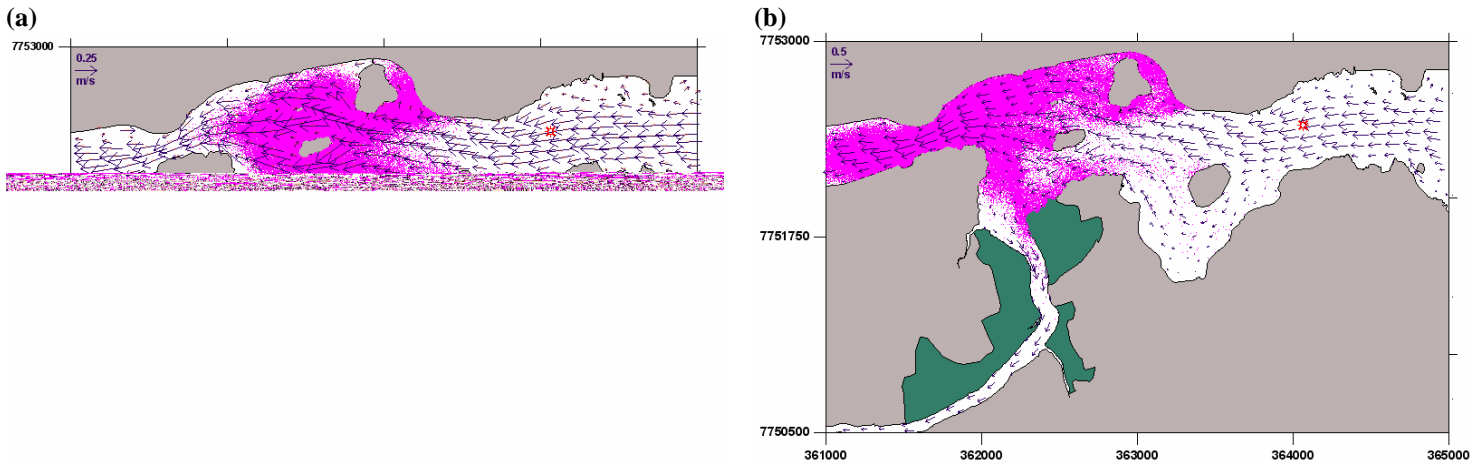


Figura 6-51 - Instante $t=110$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

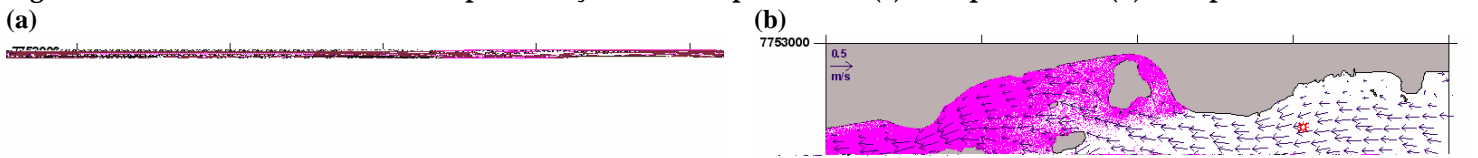


Figura 6-52 - Instante $t=120$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

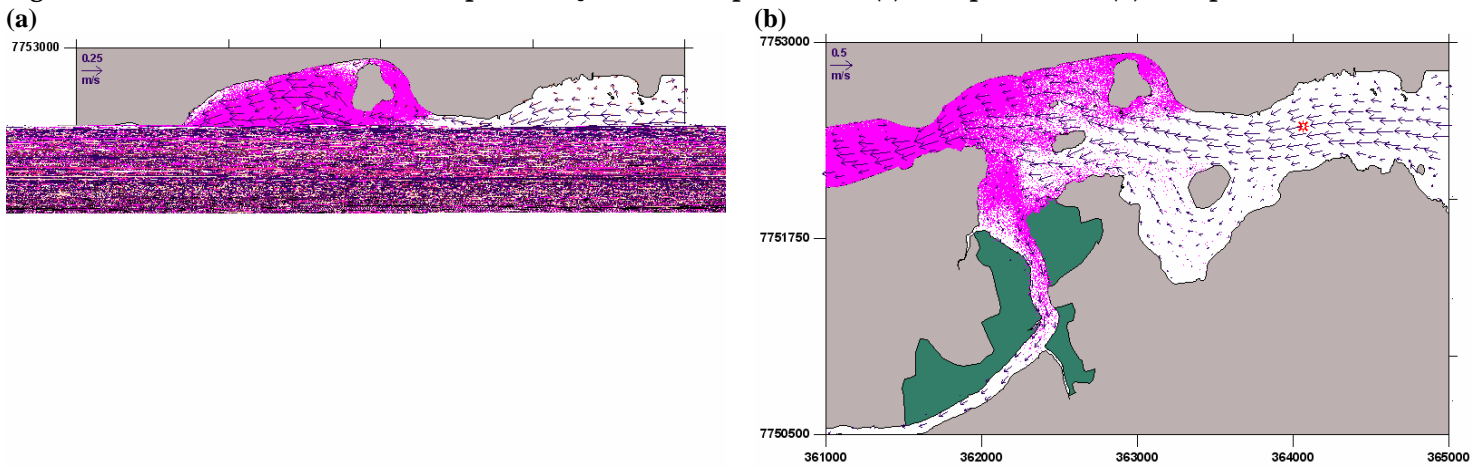


Figura 6-53 - Instante $t=130$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

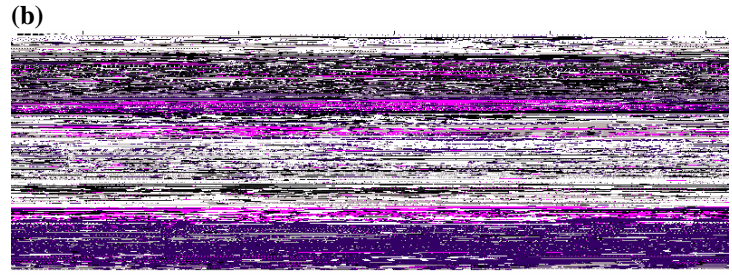
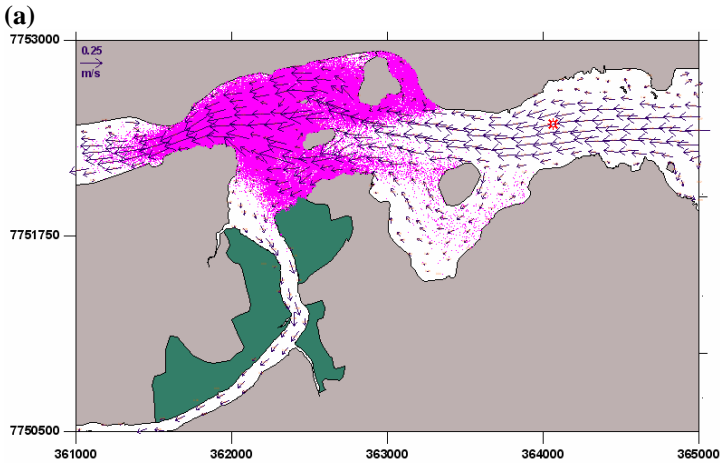


Figura 6-54 - Instante $t=140$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

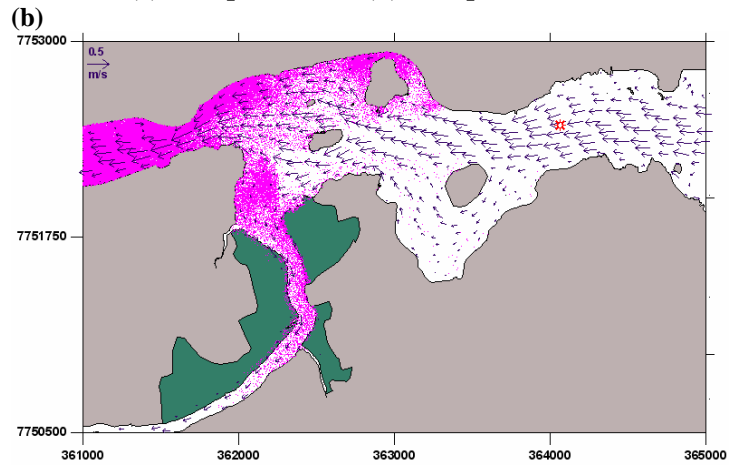
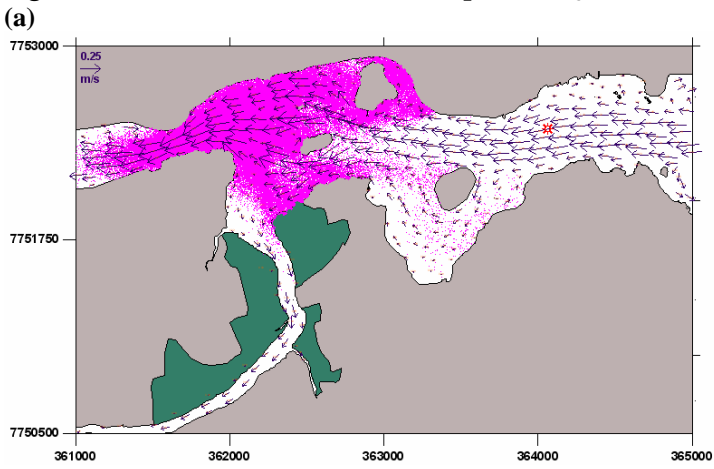


Figura 6-55 - Instante $t=150$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

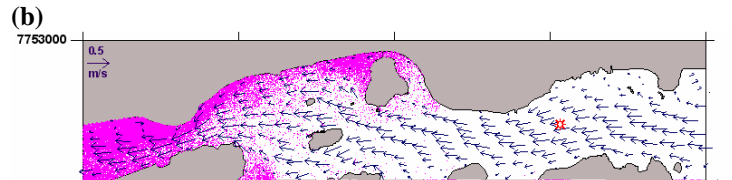


Figura 6-56 - Instante $t=180$ minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento.

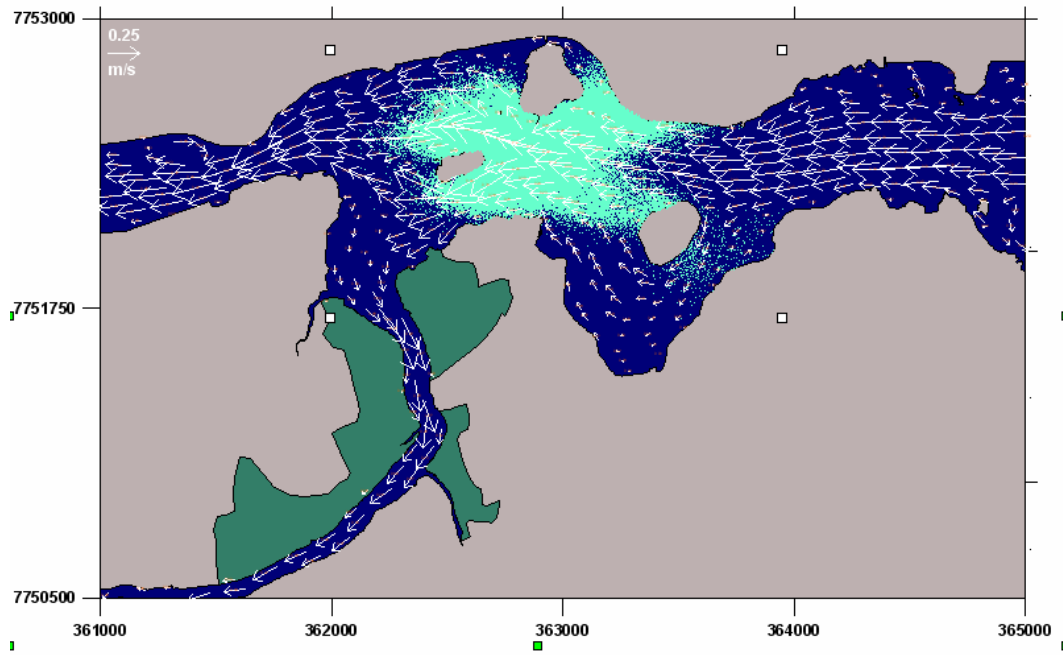


Figura 6-57 - Instante $t=90$ minutos após o lançamento do 1.º experimento.

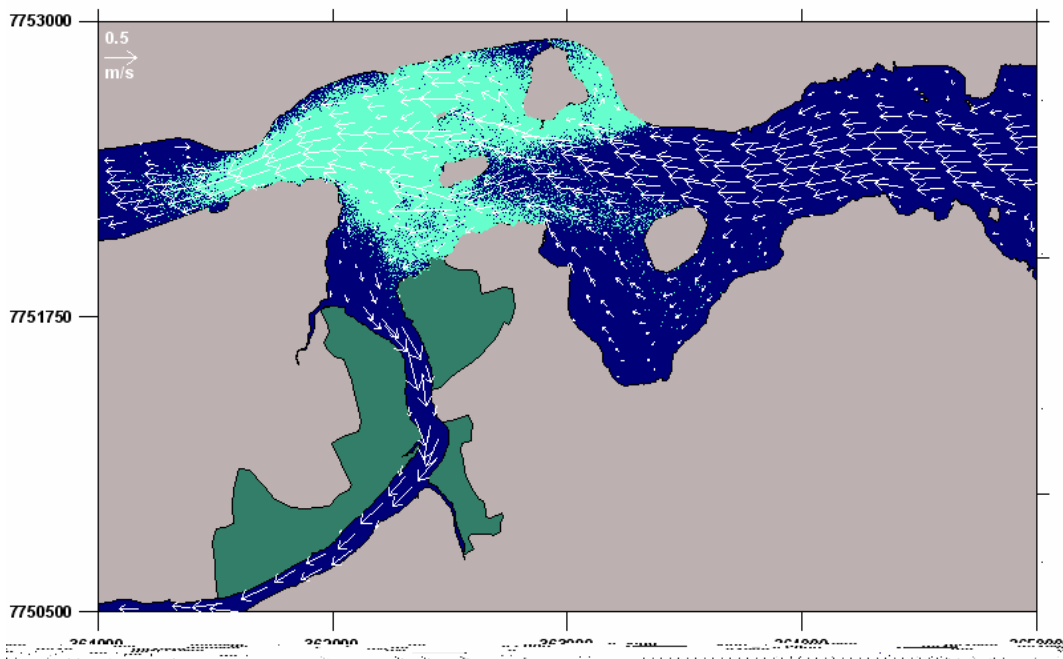
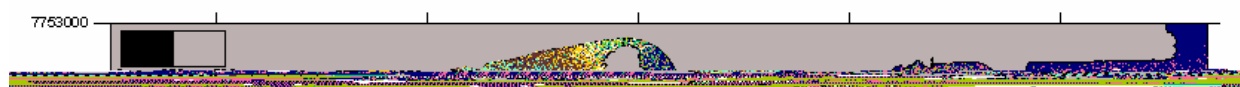


Figura 6-58 - Instante $t=90$ minutos após o lançamento do 2.º experimento.



B

Figura 6-59 - Comportamento da nuvem de partículas no 3.º experimento, em maré vazante próximo à quadratura.

near field

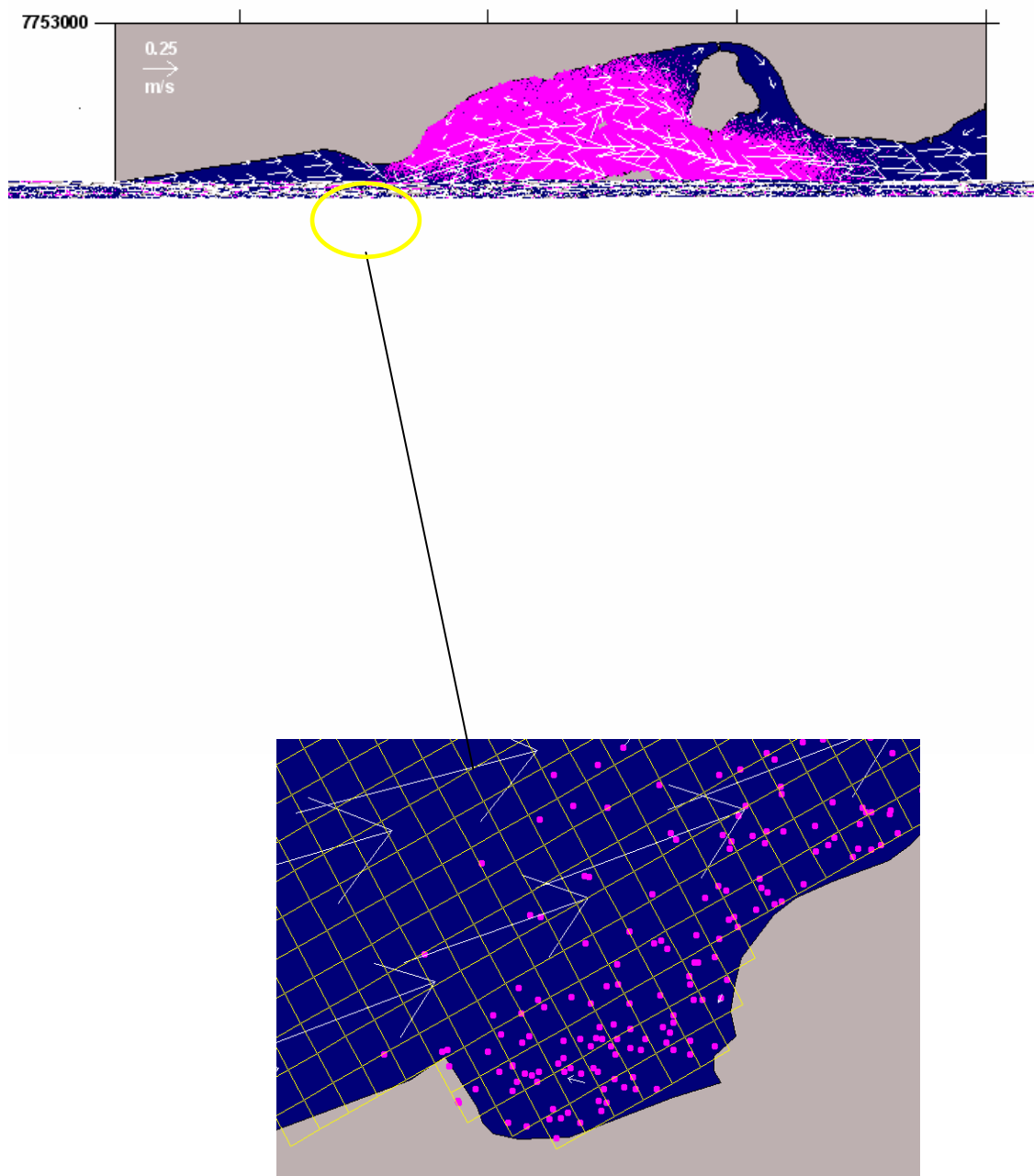


Figura 6-60 - Detalhe da simulação do 3.º experimento, no instante $t=110$ m após o lançamento. Observa-se que as partículas permaneceram confinadas dentro da grade do DIVAST, que representa a porção de água.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

✓

✓

✓

✓

k_l

k_t

D_{xx} D_{yy}

✓

✓

✓

✓

kernel

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS

8. Referências

Annual Reviews of Fluid Mechanics,

Identificação dos processos físicos na hidrodinâmica das águas do entorno da ilha de Vitória .

Progress in

Energy and Combustion Science

Continental Shelf Research

Waves, Tides and Shallow-water Processes

Análise da influência das águas do Canal da Passagem sobre o padrão de escoamento na Baía do Espírito Santo.

Anais eletrônicos do V SESMA.

Journal of Coastal Research

Open-Channel Hydraulics

Parallel Lagrangian Models for Turbulent Transport and Chemistry

Estudo do movimento de manchas de óleo a partir de pontos do canal de acesso ao porto de Vitória e estimativa de aporte ao manguezal do Rio Aribiri na Baía de Vitória - ES

Carta Náutica 1401

Simulation of Estuary Mixing Using a Two-Dimensional Random Walk Model

Estuarine, Coastal and Shelf Science

Estuaries -

Intertidal Deposits - River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons

**Mathematical Modelling of Jet-Forced Circulation in
Reservoirs and Harbours**

Environmental Modelling & Software

Mixing in inland and coastal waters.

Estuarine, Coastal and Shelf Science

**Batimetria da Baía de Vitória e do canal de acesso ao Porto de
Vitória**

Monitoramento de Correntes no Entorno da Ilha de Vitória

Journal of Hydraulic Engineering

Atmospheric Environment

Stochastic Hydrology and Hydraulics

Journal of Computational Physics

Environment International.

Cuidando do Planeta Terra. Uma estratégia para a

Vida

Estuaries.

Estuarine, Coastal and Shelf

Science

Hydrodynamics of Estuaries

Dispersion in Estuaries and Coastal Waters

**Modelagem do Padrão de Escoamento no Canal da Passagem,
Vitória-ES.**

Hydrobiology

Hydraulic Behaviour of Estuaries

Coastal Environment

Management and Conservation

Física de Estuários

Powder Technology

Numerical Recipes

Investigação da Camada Limite Planetária na Região de Iperó

Estudo sedimentológico do material de fundo do Canal da Passagem e trecho da Baía de Vitória - ES

Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas.

An introduction to coastal geomorphology

**Three-Dimensional Simulation of Pollutant Dispersion in
Coastal Waters**

*Levantamento Topo-Batimétrico dos Manguezais e Canais da
Baía de Vitória*

**Modelagem e Monitoramento do Escoamento em Regiões Estuarinas
com Manguezais.** .

**Estudo da Hidrodinâmica e do Transporte de Solutos na Baía
do Espírito Santo através de Modelagem Computacional.**

**Notes on the Langevin Model for Turbulent Diffusion of
'Marked' Particles**

American Meteorological Society

International Association for Hydraulic Research.

Model Development for the BTS.

Métodos Numéricos em Recursos Hídricos

Engineering.

Ocean

and Combustion Science

Progress in Energy

of Fluid Mechanics

Journal

Software

Environmental Modelling &

Estuarine, Coastal and Shelf Science

Journal of Fluid Mechanics

Dinâmica Estocástica e Irreversibilidade

Coastal Dynamics and Landforms

Estuarine, Coastal and Shelf Science

Analysis of Dispersion by the Random Walk Method

Science

Estuarine, Coastal and Shelf

Estuaries

Hydrobiological Modelling

Journal of Marine Freshwater Research.

V.

Three-dimensional Lagrangian Tracer Modelling in Wadden Sea

Areas

ANEXOS

ANEXO A

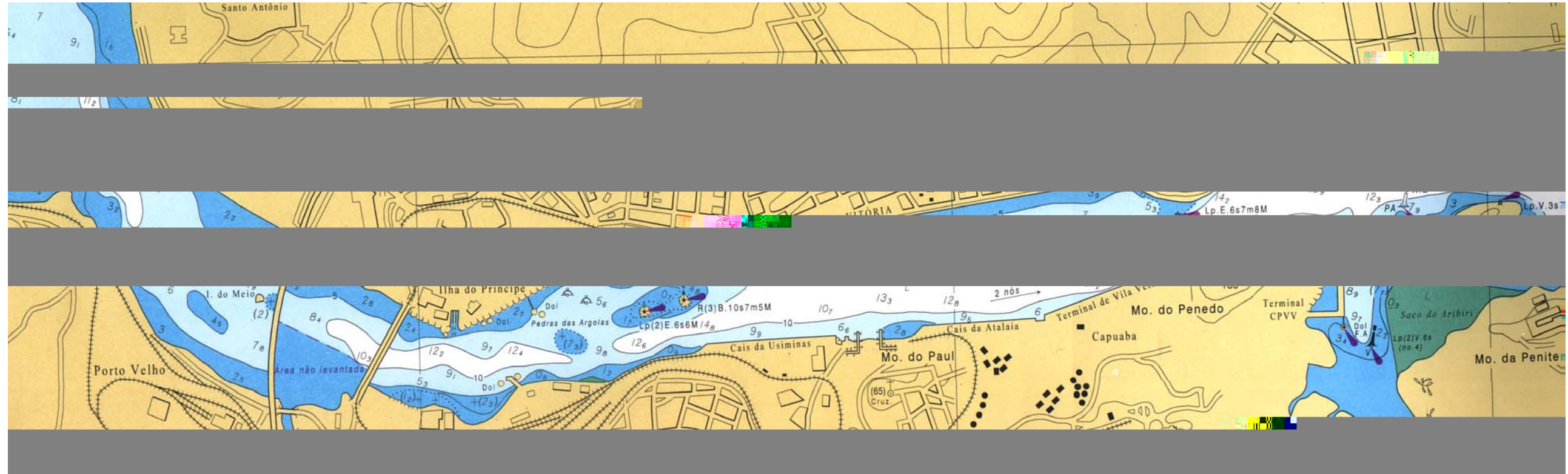


Figura A1 - Recorte da Carta Náutica 1401 (DHN, 2002) abrangendo a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, desde Santo Antônio até a Ilha das Pombas.

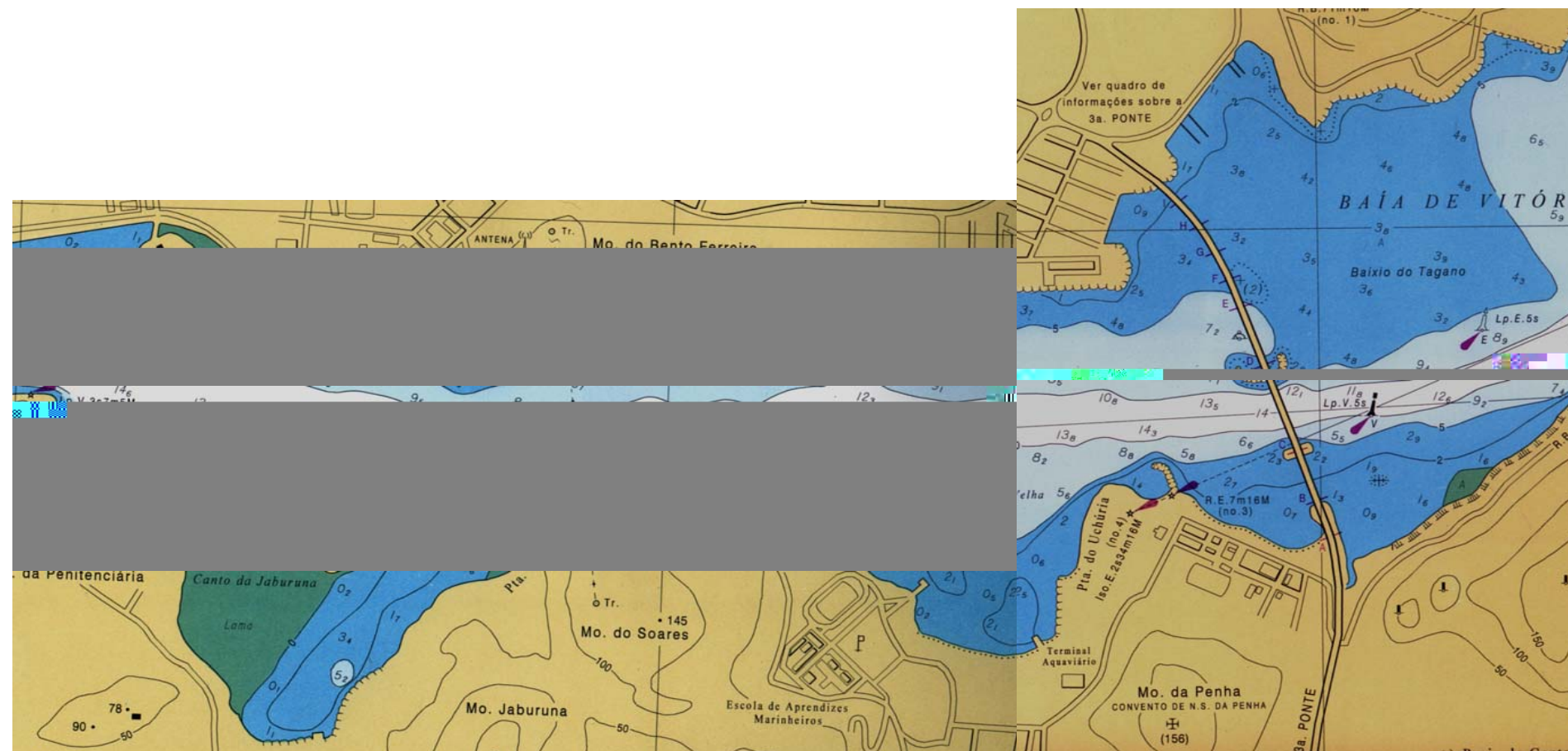


Figura A2 - Recorte da Carta Náutica 1401 (DHN, 2002) abrangendo a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, da Ilha das Pombas até 3ª Ponte.

ANEXO B

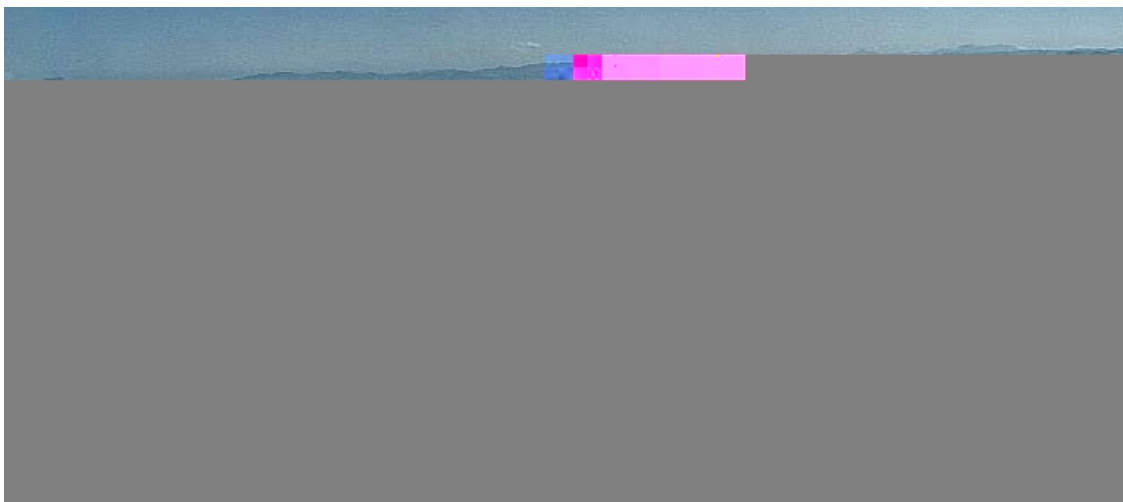


Figura B1 - Foto da entrada do canal de acesso ao Porto de Vitória a partir da Baía do Espírito Santo (tirada no sentido leste para oeste). Fonte: GEARH.



Figura B2 - Foto do canal de acesso ao Porto de Vitória (tirada de oeste para leste). Fonte:GEARH.



Figura B3 - Foto do canal de acesso ao Porto de Vitória com destaque para o manguezal da foz do Rio Aribiri (à esquerda) e o maciço do Penedo (ao centro) onde ocorre um estreitamento do canal. Fonte:GEARH.

ANEXO C



Figura C1 - Foto do canal de acesso ao Porto de Vitória: contorno da Ilha de Vitória em caiaques durante a realização do 1º passeio ecológico *Volta da Vitória*, evento anual voltado para o estímulo da consciência ambiental e exploração do turismo ecológico ao redor da Ilha. Promovido pela ONG Alma do Rio, contou com cerca de 150 participantes em sua 1ª edição, em abril de 2007. Foto: Maria Fernanda.

Figura C2 - Foto do canal de acesso ao Porto de Vitória: contorno da Ilha de Vitória em caiaques durante a realização do 1º passeio ecológico *Volta da Vitória*, evento anual voltado para o estímulo da consciência ambiental e exploração do turismo ecológico ao redor da Ilha. Promovido pela ONG Alma do Rio, contou com cerca de 150 participantes em sua 1ª edição, em abril de 2007. Foto: Maria Fernanda.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)