Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

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



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



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

"Aplicação de um Modelo Lagrangiano de Trajetória de Partículas para Modelagem da Dispersão em Águas Rasas e Simulação da Dispersão no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES".

Daniel Izoton Santiago

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana Orientador - DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Maxsuel Marcos Rocha Pereira Co-Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira Examinador Interno – DEA/CT/UFES

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

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Sérvio 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)

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 Experimento68
5.5.2 2.º Experimento
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 74
6.1 Validação do Modelo Hidrodinâmico74
6.2 Hidrodinâmcia no canal de acesso ao Porto de Vitória
6.3 Simulações do Transporte de Traçadores no Canal de Acesso ao
Porto de Vitória 110
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 124
8. REFERÊNCIAS
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 Vitória1	10

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Representação	dos limites	da malha	computacional	(retângulo	vermelho)	na
região de estud	0					.52

- Figura 5.4 Distribuição das partículas ao fim da simulação do 1° experimento.......69
- 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 6.2 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

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 6.8 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 6.15 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

- 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 6.22 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	6.25	 Campo 	de	velocidades	para	0	instante	de	tempo	36,5	hs.	de	simulação) –
		enchent	e										1	02

- 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 6.40 – Instante inicial de lançamento das partículas. (a) 1.º experimento	mento. (b) 2.º
Figura 6.41 – Instante t=10 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	113
Figura 6.42 – Instante t=20 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	114
Figura 6.43 – Instante t=30 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	114
Figura 6.44 – Instante t=40 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	114
Figura 6.45 – Instante t=50 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	115
Figura 6.46 – Instante t=60 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	115
Figura 6.47 – Instante t=70 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.9 (b) 2.º experimento	^o experimento. 115
Figura 6.48 – Instante t=80 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	116
Figura 6.49 – Instante t=90 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	116
Figura 6.50 – Instante t=100 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.9	^o experimento.
(b) 2.º experimento	116
Figura 6.51 – Instante t=110 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	
Figura 6.52 – Instante t=120 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.	^o experimento.
(b) 2.º experimento	
Figura 6.53 – Instante t=130 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.	^o experimento.
(b) 2.º experimento	
Figura 6.54 – Instante t=140 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	
Figura 6.55 – Instante t=150 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1.6	^o experimento.
(b) 2.º experimento	

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 experimen	ito 119

- Figura 6.58 Instante t=90 minutos após o lançamento do 2.º experimento...... 119

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

q

- Componentes da velocidade média na vertical nas direções $x \in y$,
- V 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 nãouniforme
- *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
- \mathcal{E} 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*_{*i*} 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*_{*i*} Constante adimensional de dispersão longitudinal
- *k*_{*i*} 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 demostraram 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 acess 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

As regiões costeiras são bastante relevantes no que diz respeito à ocupação e desenvolvimento de atividades antrópicas. Cerca de 60% da população mundial vive em um raio de até 60 quilômetros da orla litorânea e estima-se que esta proporção aumente para 75% em 2025 (AGENDA 21, 1992; IUCN, 1992). Nessas áreas se desenvolvem atividades econômicas de grande importância como a pesca, a aqüicultura, o transporte e comércio marítimos, e o turismo, privilegiado pela diversidade paisagística. Tais cenários abrigam uma miríade de hábitats biologicamente produtivos, como os estuários e manguezais. Esses ambientes devem ser conservados para a manutenção da diversidade biológica e a sustentabilidade das atividades antrópicas.

O adensamento demográfico nas zonas costeiras, aliado à falta de planejamento urbano, gera graves problemas ambientais, que representam uma ameaça aos ecossistemas naturais e vêm afetando a sociedade. A maioria das grandes cidades litorâneas brasileiras encontram-se em estado crítico com relação à degradação da qualidade de suas águas, devido ao lançamento de efluentes sem tratamento adequado, muitas vezes em níveis superiores ao da capacidade dispersiva e de autodepuração desses corpos d'água. Outros impactos relevantes sobre as águas, particularmente em regiões portuárias, são a ocorrência de acidentes com derrames de óleo de embarcações e mudanças na hidrodinâmica e nos processos de transporte de solutos e sedimentos resultantes de intervenções antrópicas que alteram a geometria do corpo d'água, como aterros ou dragagens. Nesse contexto, urge a necessidade de programas de gestão ambiental que contemplem o gerenciamento integrado da qualidade dos recursos hídricos costeiros e auxiliem na resolução desses problemas.

Nessa conjuntura, Vitória é uma típica cidade brasileira que passa por esses desafios e se destaca nacionalmente quanto a sua infra-estrutura e atividade portuária, de grande importância para a economia do Estado do Espírito Santo, e que vêm sendo expandidas com os recentes descobrimentos de jazidas de petróleo no estado. A operação e desenvolvimento das atividades do Porto de Vitória englobam o Cais de Vitória, situado em Vitória, e os Cais de Paul e Capuaba, situados no município de Vila Velha. No canal que dá acesso a esses portos, o trânsito de embarcações é intenso e foi incrementado com a instalação de terminais de combustíveis líquidos próximo a foz do Rio Aribiri (ANEXO B), após as descobertas de petróleo no litoral capixaba. Planos de prevenção e de contingência a derramamentos de óleo também demonstram uma preocupação com a região. As águas na região do canal de acesso ao Porto de Vitória servem ainda a usos diversos, com destaque para esportes náuticos (ANEXO C), como o remo, e para o turismo, devido ao seu reconhecido valor paisagístico. No entanto, ocorre disposição de esgotos domésticos em diversos locais ao longo do canal, contribuindo para a contaminação e degradação de suas águas.

No canal de acesso ao Porto de Vitória ocorre a múltipla interação de processos físicos, em virtude do movimento das águas, o que resulta em um mecanismo de grande complexidade. A circulação das águas tem profunda influência no ciclo de vida dos organismos marinhos, na distribuição de nutrientes, no transporte e dispersão do plâncton, sedimentos e poluentes (esgotos, óleo, metais pesados). Portanto, além de representar especial interesse à navegação, o conhecimento dos padrões de escoamento do sistema hídrico é fundamental para a gestão da região.

No gerenciamento de corpos d'água, modelos computacionais assumem papel indispensável como ferramentas que, integrando e extrapolando informações de modo consistente a partir das medições, podem descrever de forma satisfatória a hidrodinâmica e processos de dispersão de constituintes, minimizando e otimizando as redes de monitoramento, que têm custos elevados. Além disso, esses modelos têm sido empregados em análises de prognóstico para estudos ou projetos, por exemplo, a simulação de cenários de acidentes com derramamento de contaminantes, permitindo a definição de estratégias de ação; ou a simulação de alterações na geometria do sistema hídrico por obras como aterros ou dragagens, para conhecer as implicações na hidrodinâmica. Isso tem possibilitado a otimização da aplicação de recursos por órgãos gestores na solução dos problemas. Diversos trabalhos foram desenvolvidos na aplicação de modelagem hidrodinâmica das águas costeiras de Vitória-ES (ROCHA, 2000; CASTRO, 2001; BARROS, 2002; CONCEIÇÃO, 2003; MACIEL; 2004; RIGO, 2004), usando-se o modelo DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*). Recentemente, Rigo (2004) implantou e calibrou esse modelo para a região em torno da Ilha de Vitória, considerando a influência das áreas de manguezal no escoamento e contribuiu para o entendimento da hidrodinâmica na região estuarina. Mas, com exceção do estudo experimental do processo de dispersão de traçadores realizado por Conceição (2003), pouco ainda foi explorado acerca da hidrodinâmica e processos dispersivos em maior detalhamento na região do canal de acesso ao Porto de Vitória, particularmente.

Na realização desse estudo, utilizou-se o modelo hidrodinâmico DIVAST e um Modelo Lagrangiano de Partículas de Deslocamento Aleatório (MLPDA), para o estudo do transporte de solutos em águas costeiras e estuarinas. O MLPDA foi escolhido principalmente devido às várias vantagens da abordagem lagrangiana em relação à abordagem euleriana, dentre elas, a conservação da massa que é implícita no esquema computacional, tendo como principal benefício a inexistência de difusão numérica (HEEMINK, 1995). Ademais, o MLPDA não possui grade numérica, o que facilita o estudo do transporte de constituintes a pequena, média e grande escala. Uma motivação do presente trabalho são as possibilidades diversas que a aplicação dessa ferramenta pode proporcionar futuramente, tal como estudos dispersivos de sedimentos, contaminantes, derrames de óleo, larvas planctônicas, entre outros (DIMOU, 1989; RIDGE, 2002; WOLK, 2003; WILLIANS, 2006).

Nesse contexto, com o interesse de obter um melhor entendimento da hidrodinâmica e das características dispersivas no canal de acesso ao Porto de Vitória, foram definidos os objetivos do presente trabalho que se apresentam na seção seguinte.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo lagrangiano de trajetória de partículas para o estudo da dispersão em corpos d'água visando seu uso no entendimento da hidrodinâmica e de processos de transporte de sedimentos e contaminantes em águas costeiras.

Assim, propõem-se os seguintes objetivos específicos deste trabalho.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a hidrodinâmica do canal do acesso ao Porto de Vitória usando o modelo hidrodinâmico DIVAST;
- Implantar o modelo lagrangiano de partículas de deslocamento aleatório (MLPDA) no modelo hidrodinâmico DIVAST para a modelagem da dispersão em águas rasas;
- Avaliar as características dispersivas na região do canal de acesso ao Porto de Vitória.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS

2. Fundamentos

Neste capítulo serão apresentadas as características hidrodinâmicas relevantes em águas costeiras e estuarinas (seção 2.1). Seguidamente são abordados os fundamentos dos mecanismos relacionados às características de mistura em águas costeiras e estuarinas (seção 2.2).

2.1 Hidrodinâmica Costeira e Estuarina

2.1.1 Marés e Correntes de Maré

As marés são ondas longas geradas no oceano pela ação conjunta das forças gravitacionais, principalmente do sistema Sol-Lua-Terra. Sobre a plataforma continental a onda de maré interage principalmente com o fundo e nos ambientes costeiros os efeitos de maré se intensificam. Enquanto a velocidade da onda de maré diminui quando a onda se propaga para águas mais rasas devido à fricção com o fundo, a sua altura aumenta. Desse modo, em regiões costeiras a amplitude de maré é maior que no oceano. Assim, a onda de maré é a força motriz principal que governa os padrões de circulação dos ambientes costeiros e estuarinos (MIRANDA et al., 2002).

As marés têm um rol importante na circulação costeira porque a onda de maré induz gradientes horizontais de pressão provenientes da inclinação da superfície livre da água, devido às diferenças de elevação entre a crista e o cavado da onda longa, resultando em forças de pressão que impulsionam o movimento das águas. O deslocamento horizontal da massa de água é chamado de corrente de maré, que necessariamente tem a mesma periodicidade que a onda de maré.

Na propagação da onda de maré para águas mais rasas, os efeitos de fricção do fundo são maiores no cavado da onda que na crista, devido à diferença de profundidade. Como a velocidade de propagação da onda de maré é dependente da profundidade da água, propagando-se mais lentamente em águas de menor profundidade, a distância percorrida pela crista da onda em um dado intervalo de

tempo excede aquela percorrida pelo cavado da onda. Isso resulta numa distorção da forma da onda que vai sendo intensificada pela interação da onda de maré com a geometria de fundo da região costeira. A entrada para uma baía, os estreitamentos e os canais são exemplos que, usualmente, ocasionam assimetrias comumente observadas nos registros de elevações de maré. As correntes de maré são mais intensas em águas costeiras do que em águas oceânicas, visto que são originadas do gradiente de pressão entre a crista e o cavado da onda, diretamente relacionado à altura da maré (TRENHAILE, 1997).

2.1.2 Circulação Estuarina e em Canais de Maré

Dentre os fatores que ocasionam a distorção da onda de maré em estuários estão a existência de extensas planícies de maré. Essas áreas formam uma zona alagável entre-marés, que pode armazenar um grande volume de água comparado ao volume do canal principal. A propagação da maré é mais lenta na região entre-marés, pois o atrito nessas áreas é maior, resultando em velocidades mais baixas. Próximo à baixamar, a maré se propaga predominantemente nos canais principais, os mais profundos, onde o atrito é menor. Isto pode resultar em um tempo de maré enchente mais longo que o tempo de maré vazante e, conseqüentemente, velocidades maiores durante as vazantes, resultando em uma dominância de vazante (EISMA, 1998). A existência de vegetação de mangue associada a planícies de maré em estuários é um outro fator que aumenta a resistência ao escoamento, exercendo importante influência no formato da maré. A intensidade desse efeito está relacionada à variação entre o volume de água presente nos canais principais e o volume de água armazenado nas planícies de maré, sendo, portanto, maior nas situações de maré de sizígia, onde a área alagada é maior (WOLANSKI et al., 1980; MAZDA et al., 1995; FALCONER et al., 2001; BLANTON et al., 2001; RIGO, 2004).

Devido ao caráter periódico da maré, o escoamento em um canal de maré ou estuário é fundamentalmente oscilatório, ou seja, apresenta inversões periódicas e sistemáticas de sentido não havendo, assim, a possibilidade do escoamento ser permanente. Portanto, é possível encontrar as correntes as mais variadas, inclusive com sentidos inversos, para um mesmo valor (instantâneo) do nível d'água num canal de maré, sendo o escoamento obrigatoriamente transiente (MELO, 1997).

As correntes em estuários e canais estreitos fluem predominantemente numa única direção, no sentido do continente por metade do ciclo de maré (enchente) e no sentido inverso pela outra metade do ciclo (vazante). Esse movimento tem uma séria implicação no tempo de residência de poluentes dispostos em estuários e na deposição de sedimentos, já que esses constituintes podem retornar ao ponto de origem ou a montante da disposição (KJERVE, 1988). Raramente os fluxos de corrente de maré inversos possuem a mesma velocidade escalar, porque o pico de velocidades de enchente e vazante tende a ser desigual devido à interação de constituintes harmônicas de maré de diferentes períodos e fatores intrínsecos a geometria do corpo d'água (definida pela batimetria e linha de costa). Nos estuários as correntes de marés sobrepõem-se a efeitos de rios, podendo resultar processos de escoamento com características bastante complexas (MIRANDA et al., 2002).

2.2 Transporte de Solutos em Águas Costeiras

Em um corpo d'água em escoamento, o movimento do fluido e sua interação com a configuração geométrica, resultam em um conjunto de processos de natureza física que são responsáveis pelo transporte de constituintes no corpo d'água. A seguir são apresentados os conceitos básicos de cada processo, segundo Fischer (1979) apud Teixeira (2004):

- <u>advecção</u>: transporte de um constituinte pela corrente líquida;
- <u>convecção</u>: transporte vertical de um constituinte causado pela existência de gradientes verticais de densidade;
- <u>difusão molecular</u>: espalhamento do constituinte pelo movimento aleatório molecular das partículas no fluido;

- <u>difusão turbulenta</u>: espalhamento do constituinte pelo movimento aleatório turbulento das partículas do fluido. Os movimentos turbulentos são muito mais importantes que movimentos moleculares na dispersão de uma substância;
- <u>advecção diferenciada</u>: refere-se ao transporte de partículas de fluido num campo de escoamento com significativos gradientes de velocidade, ou seja se verificam deslocamentos relativos significativos entre camadas adjacentes;
- <u>dispersão</u>: espalhamento de constituintes devido a ação conjunta da difusão (molecular e turbulenta) e da advecção diferenciada;
- <u>mistura</u>: espalhamento do constituinte no corpo d'água receptor, resultante de uma ação global envolvendo qualquer processo que cause este espalhamento.

A Lei de Fick da difusão molecular estabelece uma relação entre fluxo de massa e gradiente de concentração de forma que o fluxo de massa de um soluto, que é a massa de soluto que cruza uma área por unidade de tempo em uma direção, é proporcional ao gradiente da concentração do soluto naquela direção. O transporte de massa por difusão molecular é um processo que ocorre da região de maior concentração para a região de menor concentração. Analogias à Lei de Fick podem ser realizadas para o fenômeno da turbulência (RODI, 1993). A taxa de transporte de massa pela turbulência pode ser quantificada por coeficientes de difusão turbulenta, usando equações análogas à equação da difusão molecular (FISCHER, 1979; SMITH, 1982; GUYMER & WEST, 1992; VALLINO & HOPKINSON, 1998).

A dispersão em escoamentos turbulentos é muito mais complexa que em escoamentos laminares. As características de escoamentos turbulentos incluem aleatoriedade, rápida difusividade, altos níveis de flutuação de vorticidade e dissipação da energia cinética (SHIROLKAR et. al, 1996). A dispersão pode ser entendida como o processo de diluição associado ao espalhamento e distorção de uma pluma de soluto em um escoamento não-uniforme pelo efeito das velocidades cisalhantes e devido à ação conjunta dos processos físicos de difusão (molecular e turbulenta), que induzem o espalhamento das partículas de uma substância. E a advecção representa o transporte de um constituinte pela corrente líquida. Por isso é

fundamental conhecer previamente a dinâmica do escoamento do corpo d'água para se estudar o transporte de uma substância.

Em águas costeiras e estuarinas a maré é a principal fonte de energia que governa o escoamento. Transições rápidas do escoamento (saltos hidráulicos) em função da velocidade e profundidade são relativamente raras em estuários ou águas costeiras porque as correntes e profundidades geralmente não favorecem a sua formação. Na ausência de tais transições, a turbulência é dependente principalmente da fricção nos contornos (LEWIS, 1997). Dependendo das características do estuário, a ação do vento, vazões de aporte fluvial e efeitos de estratificação podem exercer papel importante no escoamento e processos de misturamento. O efeito de Coriolis pode ser importante na consideração do misturamento em baías. A turbulência, os efeitos da topografia, o empuxo, as marés e as interações não-lineares podem tornar mais complicada a descrição quantitativa da hidrodinâmica e transporte de solutos em estuários (ALLEN et al. 1985).

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Modelagem Hidrodinâmica Computacional

A modelagem computacional da hidrodinâmica emprega na sua formação as equações baseadas nos princípios físicos de conservação da massa (continuidade) e de conservação da quantidade de movimento (2.ª Lei do movimento de Newton). Segundo Lewis (1997), na simulação de processos de escoamento e transporte de constituintes em corpos d'água costeiros e estuarinos, o ideal seria a utilização de modelos tridimensionais. A alternativa mais usual na simulação de processos de escoamento e transporte de constituintes em regiões costeiras é a redução do modelo tridimensional para um modelo bidimensional, por exemplo, baseado na integração das equações tridimensionais de Navier-Stokes na profundidade da coluna d'água (vertical). Essa simplificação empregando-se modelos integrados na vertical é aceitável, segundo Falconer (1976), quando os fluxos de quantidade de movimento são predominantemente horizontais e existe pouca ou nenhuma estratificação no corpo d'água a ser estudado.

As equações matemáticas para a modelagem de corpos d'água são geralmente complexas e não possuem solução analítica, sendo sua solução realizada via método numérico. A idéia básica dos métodos numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema físico contínuo a um problema discreto, que pode ser resolvido pelo computador. Os métodos numéricos são métodos aproximados para solução de equações diferenciais parciais. Os métodos numéricos mais usuais em engenharia são os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos (ROSMAN, 1989).

As equações matemáticas precisam de condições de contorno para encontrar uma única solução. Condições de contorno usadas em modelos hidrodinâmicos aplicados a modelagem de corpos d'água incluem a especificação de velocidade nula, ao longo de fronteiras de terra, e condições de elevação de maré ou fluxo (velocidades ou vazão) ao longo de fronteiras abertas. A escolha adequada de condições de fluxo e elevação de maré em fronteiras abertas tem se mostrado determinante no sucesso da calibração de modelos hidrodinâmicos. Segundo Stelling (1986) apud Maciel (2004), a acurácia da propagação da velocidade da onda de maré é influenciada por muitos parâmetros, como o contorno numérico, o passo de tempo, o comprimento da malha, a batimetria, a geometria, a fricção do fundo, a viscosidade, entre outros.

Para se verificar a qualidade da representação do problema físico em um modelo, devem ser confrontadas as observações feitas em campo, na região estudada, com os resultados obtidos pelo modelo. Para efeito de calibração de um modelo hidrodinâmico, têm sido considerados aceitáveis na literatura, erros médios de estimação de até 5% para elevações de maré, de até 20% para o módulo das velocidades (CAWLEY & HARNETT, 1992, apud CASTRO, 2001) e uma diferença em torno de ±20° para as direções da velocidade (ODD & MURPHY, 1992, apud CASTRO, 2001).

3.1.1 Estudos de modelagem hidrodinâmica em canais e estuários

A variabilidade lateral dos escoamentos em uma seção pode induzir erros nos cálculos de velocidade e de transporte de contaminante com margem estatística significante. Um teste da validade estatística dos fluxos calculados (transporte e velocidades estimadas) a partir da análise de séries de dados de medições detalhadas de velocidade e de material particulado em suspensão total, em um estuário fracamente estratificado com pouca complexidade no campo de velocidades, mostrou que erros de ±7% são comuns na estimativa individual de fluxos instantâneos na seção transversal, com erros prováveis de 7-10% na estimativa do transporte total de água na enchente e vazante. Erros relativos no transporte de escalares não podem ser menores que o do transporte de água, mesmo na distribuição de escalares em seções transversais de estuários verticalmente bem misturados (BOON, 1978, apud JAY, 1997).

A utilização de um modelo numérico para um trecho do Rio Missouri, permitiu observar que o coeficiente de dispersão longitudinal foi quase 10 vezes menor do que seria no caso de um canal longitudinal uniforme. Isso porque quando se considera o canal longitudinal uniforme, o cisalhamento na corrente é bem menos intenso que o cisalhamento da corrente em cada transecto individual do rio. Portanto o processo de dispersão longitudinal é enfraquecido pelas alterações e sinuosidades do canal (FISCHER, 1969 apud SMITH, 1982).

Mazda et al. (1995) utilizaram um modelo integrado na vertical para investigar a assimetria de maré causada pela vegetação de manguezal em um canal de maré hipotético. Os autores apontam que o arrastro provocado pela vegetação de manguezal é o principal mecanismo no controle da elevação do nível d'água e das velocidades na região estudada.

Furukawa et al. (1997) modelaram as correntes de mare em um estuário na Austrália considerando as áreas de manguezal e observaram a ocorrência de diferentes padrões de escoamento, como jatos, vórtices e zonas de estagnação.

Melo et al. (1997), investigaram numericamente o padrão de escoamento governado pela onda de maré na baía de Florianópolis, usando um modelo hidrodinâmico integrado na vertical. Os resultados do modelo indicaram que há um padrão de onda de maré estacionária da componente M_2 (componente de maré lunar semidiurna) dentro da baía com um antinodal situado no meio da baía sul. Essa característica resulta na formação de uma zona de convergência barotrópica no local.

Araújo et al. (2000) realizaram estudos no estuário do rio Massagana, próximo ao Porto de Suape, no Estado de Pernambuco, utilizando um modelo hidrodinâmico integrado na vertical e conseguiram representação satisfatória da hidrodinâmica do estuário nas condições típicas de maré de sizígia.

Sankaranarayanan et al. (2003) aplicaram à Baía de São Francisco (EUA) o modelo hidrodinâmico integrado na vertical, BFHYDRO. As condições de contorno nas fronteiras abertas consistiam de elevações e fluxo nas descargas fluviais. Os resultados da comparação entre os dados de elevação medidos e simulados para 5 estações foram considerados satisfatórios, com um erro médio para elevações e correntes menor que 7% e 9%, respectivamente. Também foram bem reproduzidas
pelo modelo as assimetrias diurnas e semidiurnas dos registros de maré e das correntes.

Kumar et al. (2005) utilizaram o modelo POM no estudo da circulação tridimensional no Estreito de Cingapura e descreveram os padrões de circulação, que observaram ser fortemente influenciados pelas marés e pela batimetria.

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

Em escoamentos naturais (turbulentos), deve-se recorrer a soluções numéricas das equações de transporte de solutos. O estudo do escoamento dos fluidos é realizado por uma das seguintes abordagens clássicas na forma de descrever o movimento dos fluidos em termos de suas variáveis de estado: o referencial de Euler e o referencial de Lagrange. Na técnica de descrição euleriana as variáveis que caracterizam o estado do fluido são monitoradas simultaneamente em pontos fixos distintos no espaço, e na descrição lagrangiana, acompanha-se uma parcela do fluido (representada por partículas) medindo-se as suas variáveis de estado ao longo de sua trajetória.

Na abordagem euleriana, é escolhido um domínio físico espacial fixo que é representado por um conjunto de pontos discretos, constituindo uma malha. Com isso, soluciona-se a equação de transporte nos pontos da malha, resolvendo o conjunto de equações algébricas que resultam da discretização das equações diferenciais parciais governantes, que contém variáveis desconhecidas, por exemplo, a concentração, em um número de locais fixos. A transformação das equações diferenciais originais para o sistema de equações algébricas geralmente é feita por meio dos métodos numéricos de diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos.

Na maioria dos estudos em águas costeiras encontrados na literatura, a modelagem do transporte de poluentes ou sedimentos é feita do ponto de vista euleriano. Para resolver a equação da advecção-difusão numericamente, esses modelos descrevem matematicamente os processos de poluentes, permitindo o cálculo da concentração do poluente sobre o espaço definido. Há, entretanto, uma variedade de problemas associados com essa aproximação, mais notavelmente o fato de que a malha fixa euleriana em geral não se alinha com os fluxos de corrente. Isso conduz a dificuldades na determinação dos termos requeridos do tensor de dispersão (WILLIANS, 2005).

Quando domina a difusão, técnicas numéricas eulerianas, cuja natureza leva à suavização dos resultados computacionais, podem ser utilizadas para solucionar o problema. Porém, se os processos de difusão forem muito dependentes da escala espacial, esses modelos podem apresentar problemas numéricos, devido às modeladas serem uniformemente propriedades distribuídas em células computacionais. Com isso, pode ocorrer difusão artificial, que tende a suavizar gradientes espaciais. Quando a advecção é o processo de transporte dominante, essas técnicas podem introduzir diversas oscilações, resultando na superestimação, subestimação ou valores negativos na proximidade de altos gradientes de concentração (RIDGE, 2002).

Na abordagem lagrangiana, cada elemento que compõe o escoamento é identificado em função da sua posição no instante inicial e, a evolução temporal e espacial da concentração do poluente é obtida por meio da determinação da trajetória de cada elemento de fluído que compõe o escoamento. Assim, a trajetória das partículas é simulada em um escoamento, de modo que as partículas são consideradas individualmente, sendo advectadas e espalhadas.

Pode-se estimar a trajetória de partículas utilizando o modelo lagrangiano estocástico. Este tipo de modelo também é conhecido por diferentes nomes: Langevin, cadeia de Markov, Monte Carlo, deslocamento aleatório, caminho aleatório, que são nomes genéricos que podem ser aplicados a ambos modelos, os modelos lagrangianos de partículas de deslocamento aleatório, e os baseados na solução da equação de Langevin (RODEAN, 1996). Neste trabalho serão considerados somente os modelos lagrangianos de partículas de deslocamento aleatório (MLPDA).

Os modelos lagrangianos apresentam diversas vantagens sobre os modelos eulerianos, entre elas pode-se destacar (PEREIRA, 2004):

- 1. simplicidade computacional;
- 2. não necessitam de grade numérica;
- apresentam igual capacidade de estimar a difusão próxima (*near field*) e afastada (*far field*) da fonte;
- 4. são capazes de estimar o fluxo turbulento no sentido do gradiente;
- necessitam somente de informações das propriedades estatísticas do escoamento;
- são capazes de lidar com emissões do tipo instantânea, contínua e variável, emitidas de fontes do tipo pontual, linha e área.

A maior limitação dos modelos lagrangianos está relacionada às dificuldades em representar as reações químicas em termos de distribuição de partículas. Entretanto, recentemente alguns modelos lagrangianos já estão simulando reações químicas (CRONE, 1997). Ademais, esse fator não afetará os resultados deste trabalho, pois se pretende considerar somente os casos de poluente inerte e passivo.

Tanto nos modelos eulerianos, quanto nos modelos lagrangianos, a ordem de grandeza da difusão turbulenta é maior que a ordem de grandeza da difusão molecular, portanto, a difusão molecular é geralmente negligenciada em escoamentos turbulentos de pequena, média e grande escala. Embora os modelos eulerianos e lagrangianos ainda representem corretamente o mesmo processo físico, devendo apresentar o mesmo resultado, suas soluções numéricas podem apresentar algumas diferenças significativas ocasionadas por diversos fatores (WILLIANS, 2005), como: esquema numérico, diferentes passos de tempo e resolução espacial.

O modelo de transporte de solutos deve levar em conta a advecção no campo de escoamento determinado pelas equações do movimento e também a difusão que ocorre em escalas menores (sub-grade) que aquela usada na discretização do modelo hidrodinâmico. Então, para qualquer que seja a abordagem escolhida, o conhecimento do efeito da turbulência no comportamento do escoamento médio é fundamental, já que está diretamente relacionado aos processos que intervém na dispersão, sendo sua predição um primeiro passo a ser considerado para a modelagem deste processo (BERLEMONT, 1999).

3.2.1 Estudos de modelagem de transporte de solutos

A abordagem de trajetória de partículas teve seu início com estudos desenvolvidos por Taylor em 1921, no estudo da difusão a partir de uma fonte contínua de contaminantes. Essa idéia de representar o movimento da partícula em um campo de velocidade turbulenta por um processo de deslocamento aleatório remonta ainda ao estudo de Albert Einstein sobre movimento Browniano. Com computadores modernos, a velocidade computacional torna-se menos limitante e ultimamente modeladores podem simplesmente estar preocupados com a escolha da técnica que melhor simula a natureza. Com o passar do tempo, a evolução da capacidade de processamento dos computadores permitiu a simulação de grandes quantidades de partículas, possibilitando assim, a aplicabilidade dessa teoria.

Com a correta utilização da teoria de equações diferenciais estocásticas, é possível derivar para qualquer modelo de deslocamento aleatório a equação correspondente e exatamente consistente com a equação de advecção-difusão. O correto procedimento de derivação da equação diferencial estocástica é baseado na interpretação da equação de advecção-difusão como uma equação de Fokker-Planck equivalente (Heemink, 1995), que descreve a evolução da função de distribuição de probabilidade de uma equação diferencial estocástica. A versatilidade das equações de Fokker-Planck permite o desenvolvimento de uma série de variantes e suas soluções são utilizadas em processos de transporte de vários modelos em diferentes campos de estudos ambientais e hidrológicos (Su, 2004). Este método vem sendo

cada vez mais utilizado na atualidade para a análise de dispersão de contaminantes em corpos d'água superficiais. Na prática tem mostrado muito bons resultados e uma grande versatilidade com referência a análise simultânea de múltiplas fontes de poluição.

Hunter (1987) comparou a acurácia da técnica convencional com a aproximação Lagrangiana, limitada pelo custo computacional equivalente e concluiu que a aproximação da trajetória de partículas é preferível em casos de dimensões maiores, relativamente poucas partículas e quando a pluma de partículas não ocupa todo o domínio computacional.

Dimou (1989) desenvolveu um modelo de deslocamento aleatório para simular o transporte em estuários bem misturados e aplicou na predição do transporte de larvas.

Heemink (1990) desenvolveu um modelo de deslocamento aleatório, apresentando a consistência de seus resultados com as simulações de experimentos numéricos simples. O autor usou uma metodologia para estimar os erros estatísticos introduzidos pelo uso de um número finito de partículas por meio da comparação entre os resultados dos experimentos numéricos e os resultados obtidos usando uma distribuição de Poisson, da probabilidade de uma determinada quantidade de partículas estar situada dentro de uma área limitada no domínio modelado. O modelo foi aplicado na predição da dispersão de um poluente no estuário Eastern Scheldt.

Visser (1997) apresenta simulações numéricas para ilustrar erros de implementações de deslocamento aleatório incorretas na literatura e discute técnicas para simular a distribuição vertical das partículas em uma coluna d'água turbulenta.

Ridge (2002) desenvolveu um modelo de transporte lagrangiano tridimensional baseado na técnica de passeio aleatório para simular o transporte de substâncias e deposição de sedimentos em águas costeiras. Ele conclui que a formulação lagrangiana apresenta algumas desvantagens em regimes de escoamento governado por forças de volume, como empuxo, ou processos dependentes de valores de concentração, pois se torna necessária a determinação contínua das concentrações na malha hidrodinâmica para calcular o movimento governado por densidade. O autor introduz a técnica SPH (Smoothed-Particle Hydrodynamics) na obtenção de campos de concentração.

O estudo da distribuição de tempos de residência também pode ser realizado com um modelo de deslocamento aleatório. Essa aplicação foi desenvolvida por Wolk (2003), com um modelo tridimensional na modelagem do transporte no interior da bacia de Wadden Sea.

Passone (2005) testou a acurácia de diferentes esquemas numéricos de deslocamento aleatório para dispersão em águas costeiras, comparando seus resultados com a solução analítica de um problema simplificado.

Kay (1986) modelou a dispersão de contaminantes em escoamentos verticalmente bem misturados e avaliou o efeito das variações batimétricas nas seções de escoamento. Foi observado que os processos de transporte são muito mais efetivos nas áreas mais profundas, associadas a maiores velocidades e difusividades turbulentas. Consequentemente os contaminantes tendem a acumular-se em maiores concentrações nas regiões mais rasas.

Horsington et al. (1995), utilizando um modelo unidimensional, mostrou que para o estuário do Rio Ribble há uma forte dependência dos coeficientes de dispersão com o espaço e tempo.

Estudos conduzidos no transporte de sólidos particulados em suspensão sugerem que o "bombeamento" forçado pela maré domina os efeitos da dispersão. A dispersão de particulados é maior quando a dispersão de sal é menor ou negligenciável devido à ausência de sal ou em condições bem misturadas. Dados de campo no estuário Conwy mostraram que o coeficiente de dispersão associado com o cisalhamento vertical do fluido e o coeficiente de dispersão associado ao cisalhamento transversal do fluido têm uma variação temporal regular e contribuíram significantemente para o fluxo dispersivo total, sendo que os valores médios de vazante foram superiores aos de enchente. Gradientes verticais de velocidade e salinidade se mostraram maiores durante a vazante (WEST et al., 1984; WEST & MANGAT, 1986, apud WEST, 1990).

WEST (1990) conclui que isso ocorre porque a interação do cisalhamento vertical e gradientes de densidade longitudinais conduzem a condições estáveis na vazante (estratificação) e condições instáveis na enchente (mistura). Também encontrou que a assimetria das seções transversais do canal afetam a turbulência gerada com o fundo causando mistura vertical em áreas mais rasas. Já no estuário Tamar, com seções transversais mais simétricas e mais profundas, a turbulência gerada com o fundo tem menor efeito e dominam os efeitos de estabilidade. Efeitos de topografia e da forma do canal reforçam a conclusão de que efeitos da dispersão longitudinal podem apresentar forte dependência espacial. Ainda no estudo do Estuário Tamar, o autor encontrou que o fluxo dispersivo de particulados foi geralmente inferior a 10% do fluxo advectivo e que a dispersão horizontal de solutos é cerca de 10% dos valores máximos do coeficiente de dispersão vertical. Foi observado um maior valor dos coeficientes de dispersão horizontal comparado a outros resultados, associado provavelmente a área entre-marés relativamente grande causando maior cisalhamento transversal. Como tem sido normalmente observado em muitos estuários, a magnitude dos coeficientes de dispersão vertical e horizontal foi fortemente dependente do espaço e do tempo onde a topografia do canal era irregular e variável.

Apesar da importância do cisalhamento vertical para o transporte de particulado, de acordo com o estudo de Zimmerman (1986) apud Swart (1997), para o transporte de solutos o efeito do cisalhamento vertical na dispersão horizontal é muito pequeno, podendo ser negligenciado. Swart (1997), considerando apenas as velocidades médias na profundidade, aplicou um modelo de deslocamento aleatório para estimar os coeficientes de dispersão no estuário Ems, tendo encontrado resultados 3 a 4 vezes superiores aos determinados em observações de campo em trabalhos anteriores. Dependendo da posição do estuário, o coeficiente de dispersão lateral encontrado foi

até 50 vezes menor que o longitudinal. Também se observaram picos de coeficientes relacionados a presença de circulações residuais induzidas pela maré em torno de bancos de areia.

Tseng (2001) realizou uma série de experimentos utilizando derivadores e observou o aumento da mistura e processos de transporte associados a padrões de circulação com instabilidades como esteiras e vorticidades em torno de ilhas.

3.3 Trabalhos anteriores na região de estudo

Donatelli (1998) foi o primeiro a aplicar um modelo hidrodinâmico computacional para a região em torno da Ilha de Vitória, em um estudo preliminar associado ao transporte de um escalar, para estudar a distribuição de salinidade. O conhecimento adquirido através desse trabalho foi interessante em relação ao entendimento global do escoamento na região, porém não adequado para o conhecimento local, nem para a avaliação da qualidade de água, principalmente devido à insuficiência de dados para a calibração na região.

Rocha (2000) empregou o modelo DIVAST na modelagem da hidrodinâmica da Baía do Espírito Santo com o domínio do modelo terminando no início do canal de acesso ao Porto de Vitória. Ele identificou zonas fortemente advectivas e zonas de estagnação na região simulada. Na interface com o canal de acesso ao Porto de Vitória, observou que as águas do canal na vazante se dirigiam para mar aberto e não para o interior da Baía do Espírito Santo.

Barros (2002) aplicou o DIVAST na região em torno da Ilha de Vitória sem considerar a influência do manguezal e com registros de velocidade curtos disponíveis para a calibração. As velocidades durante a enchente foram melhor reproduzidas pelo modelo para a quadratura do que para a sizígia, sugerindo a inclusão dos efeitos do manguezal para o estudo da hidrodinâmica. Conceição (2003) estudou o transporte de traçadores no canal de acesso ao Porto de Vitória por meio de experimentos de campo que simularam derrames hipotéticos de óleo na região. Ele chamou a atenção para a importância de conhecer a forçante do vento na predição do movimento de contaminantes flutuantes na região. Por meio de seu 3.º experimento e simulações numéricas preliminares com o modelo SisBAHIA, concluiu que um derrame acidental de óleo no canal de acesso ao Porto de Vitória poderia atingir o manguezal do Rio Aribiri e contaminar a região, sob condições de vento noroeste com altas velocidades.

Rigo (2004) utilizou o DIVAST na modelagem do sistema estuarino em torno da Ilha de Vitória, considerando a influência no escoamento, dos volumes de água armazenados no manguezal. Observou que o manguezal exerce importante papel na deformação da onda de maré, propiciando a dominância das correntes de vazante. Rigo obteve resultados satisfatórios para a calibração de elevação e correntes de maré inclusive para a estação de Santo Antônio, localizada na região do canal de acesso ao Porto de Vitória, de interesse do presente trabalho.

Em trabalho de monitoramento para caracterização das águas em torno da Ilha de Vitória, em três estações (Caieiras, Santo Antônio e Cinco Pontes) foi observado em 06/10/2001, na maré de quadratura, um gradiente longitudinal de salinidade que variou entre 11 a 14 (UPS) na vazante, também se verificando considerável estratificação vertical nas estações. Nessa época do ano é pequena a vazão dos rios. Já em 08/02/01, na condição de maré de sizígia, o gradiente longitudinal de salinidade entre essas estações foi de 1 a 5 (UPS) na enchente e a estratificação vertical foi pequena, com quase completo misturamento vertical. Em ambos os monitoramentos não se observaram significativas diferenças na distribuição lateral de salinidade, mostrando bom misturamento lateral (RIGO, 2004).

O MODELO DIVAST

CAPÍTULO 4

4. O Modelo DIVAST

O modelo DIVAST (Depth Integrated Velocity and Solute Transport) é utilizado neste trabalho para realizar as simulações numéricas da hidrodinâmica do Canal de acesso ao Porto de Vitória – ES. O DIVAST é um modelo computacional escrito em linguagem Fortran, que foi desenvolvido por Falconer (1976) para o estudo de problemas relacionados à hidrodinâmica e à qualidade de água em corpos d'água rasos bem misturados. O DIVAST se fundamenta nas equações de transporte de Reynolds integradas na vertical e utiliza o método numérico de diferenças finitas para solucionar as equações diferenciais governantes do escoamento. No método de diferenças finitas, a região física e contínua a ser modelada é substituída por um conjunto de pontos discretos em uma malha composta de células quadradas, abrangendo toda a região de estudo.

As Equações diferenciais tridimensionais que representam os princípios físicos da Conservação da Massa e da Quantidade de Movimento são integradas na vertical. O resultado deste procedimento, considerando-se durante a integração as hipóteses de fluido incompressível, de pressão hidrostática, e de onda longa, são equações diferencias bidimensionais conhecidas como equações de águas rasas. Essas equações descrevem a circulação em águas rasas e consideram os efeitos da rotação da terra, as tensões provocadas pelo vento, o atrito com o fundo e as tensões turbulentas de Reynolds. Em seguida são apresentadas estas equações e será descrita a técnica de como estas equações são solucionadas.

4.1 Equações Governantes dos Processos Físicos

As equações usadas para a modelagem hidrodinâmica no modelo DIVAST são apresentadas nesta seção. A modelagem hidrodinâmica deste modelo é baseada nas equações de águas rasas. Resultado de integrar na vertical as equações da conservação da massa e da conservação da quantidade de movimento, levando em consideração as hipóteses de fluido incompressível, pressão hidrostática, e onda longa.

A equação da Conservação da Massa é dada pela expressão:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0.$$
(4.1)

Na Eq. (4.1), o termo *a* representa a taxa de variação da elevação, e os termos *b* e *c* representam respectivamente as variações espaciais das vazões unitárias na direção X e na direção Y.

A equação da Conservação da Quantidade de Movimento na direção X é dada por:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial \beta p U}{\partial x}}_{b} + \underbrace{\frac{\partial \beta p V}{\partial y}}_{b} = \underbrace{fq}_{c} - \underbrace{gH}_{c} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \underbrace{\frac{\rho_{a}}{\rho} C_{w} W_{x} \sqrt{W_{x}^{2} + W_{y}^{2}}}_{e} \\
- \underbrace{\frac{gp \sqrt{p^{2} + q^{2}}}{H^{2} C^{2}}}_{f} + \varepsilon \left[2 \frac{\partial^{2} p}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} p}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2} q}{\partial x \partial y} \right]_{g}$$
(4.2)

Os termos da Equação (4.2) representam os seguintes efeitos: aceleração local (a), aceleração advectiva (b), rotação da Terra (aceleração de Coriolis) (c), gradiente de pressão (d), tensões provocadas pelo vento (e), atrito com o fundo (f) e as tensões turbulentas (g).

E a equação da Conservação da Quantidade de Movimento na direção Y é

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \beta q U}{\partial x} + \frac{\partial \beta q V}{\partial y} = -fp - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left[\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right]$$

$$(4.3)$$

Analogamente, os termos da Equação (4.3) representam os mesmos efeitos que os da Equação (4.2). A descrição das variáveis físicas envolvidas nas Equações (4.1), (4.2), e (4.3) está especificada na Tabela 4.1.

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

p (=UH), q (=VH)	vazões unitárias ou descargas por unidade de largura nas direções X e Y, respectivamente $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1});$									
U,V	componentes da velocidade média na vertical nas direções X e Y respectivamente $(m \cdot s^{-1})$;									
β	fator de correção do momentum para um perfil de velocidade vertical não- uniforme, varia entre 1,016 e 1,20. Foi utilizado o valor 1,016;									
f	parâmetro de Coriolis devido à rotação da Terra; f = 2Ω sen ϕ (Ω = velocidade de rotação angular da Terra e ϕ = ângulo geográfico da latitude; Ω = 7.27x10-5 <i>radianos</i> · s ⁻¹);									
g	aceleração devida a gravidade (= 9.806 $m \cdot s^{-2}$);									
Н	profundidade total da água ($H = h + \eta$);									
η	elevação da superfície da água acima do nível médio da superfície da água em repouso, tomado como referência;									
h	profundidade da água abaixo do nível médio da água;									
ρ_a	massa específica do ar ($\cong 1.292 kg \cdot m^{-3}$);									
ρ	massa específica do fluido ($kg \cdot m^{-3}$). Foi utilizado $\rho = 1026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{3}$;									
С	coeficiente de rugosidade de Chezy ($m^{1/2} \cdot s^{-1}$);									
$C_{_W}$	coeficiente de resistência do ar/fluido;									
3	viscosidade turbulenta média na vertical $(m^2 \cdot s^{-1})$;									
<i>x</i> , <i>y</i>	coordenadas cartesianas (m).									
W _x W _y	componentes da velocidade do vento respectivamente na direção x $(m \cdot s^{-1})$ e na direção y $(m \cdot s^{-1})$ medidas a 10 metros de altitude.									

Os coeficientes de dispersão-difusão ($m^2 \cdot s^{-1}$) são definidos como (Preston apud FALCONER, 1997):

$$D_{xx} = \frac{(k_l p^2 + k_l q^2)\sqrt{g}}{C\sqrt{p^2 + q^2}}$$
(4.4)

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(k_l - k_t) pq\sqrt{g}}{C\sqrt{p^2 + q^2}}$$
(4.5)

$$D_{yy} = \frac{(k_l q^2 + k_t p^2)\sqrt{g}}{C\sqrt{p^2 + q^2}}$$
(4.6)

nos quais k_l e k_t são, respectivamente, a constante adimensional de dispersão longitudinal e a constante adimensional de difusão turbulenta lateral. Devido à ausência de dados de campo de dispersão na região, foram utilizados no DIVAST os valores iniciais típicos $k_l = 13,0e$ $k_r = 1,0$.

As velocidades médias $U \in V \in$ a profundidade H (Tabela 4-1), assim como os coeficientes de dispersão-difusão D_{xx} (Eq. (4.4)) e D_{yy} (Eq. (4.6)) obtidos na modelagem hidrodinâmica com o DIVAST são utilizados na equação de deslocamento aleatório do MLPDA (Capítulo 5) para a modelagem do transporte lagrangiano de solutos, mediante a utilização de métodos numéricos de interpolação dessas propriedades na posição das partículas.

4.2 Solução das Equações Diferenciais

O método numérico das diferenças finitas é usado para solucionar as equações diferenciais parciais que governam o movimento da água, dada pelas Equações (4.1), (4.2), e (4.3). O esquema particular de diferenças finitas usado no modelo DIVAST é o Método Implícito de Direção Alternada conhecido como ADI (Alternating Direction

Implicit). Essa técnica numérica envolve a subdivisão de cada passo de tempo em dois meio passos de tempo, de forma que na aplicação do esquema apenas uma dimensão é tratada implicitamente para cada meio passo de tempo. No primeiro meio passo de tempo, a elevação da água, η, e a componente, U, da velocidade são solucionadas implicitamente na direção X, e no segundo meio passo de tempo, a elevação da água, η, e a componente, V, da velocidade são solucionados implicitamente na direção Y. Incluídas apropriadas condições de contorno, as equações algébricas resultantes para cada meio passo de tempo são solucionadas usando-se o método direto de eliminação de Gauss. A malha usada é do tipo malha deslocada com espaçamentos iguais nas direções X e Y, a célula é quadrada. A variável n (elevação) está localizada no centro dos quadrados e as componentes da velocidade, U e V, são localizadas na metade das faces da célula quadrada, com a componente da velocidade-U ao longo do eixo X-positivo e a componente da velocidade-V ao longo do eixo Y-positivo. Maiores detalhes sobre a discretização das equações da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento, e de transporte de solutos do modelo DIVAST são encontrados em Falconer (1976).

4.3 Implementação do DIVAST na Área de Estudo

A região investigada neste estudo é a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, um trecho do estuário do entorno da Ilha de Vitória que se situa ao sul da mesma. O eixo principal do canal de acesso é orientado no sentido leste-oeste (região delimitada pelo retângulo em vermelho da Figura 4-1). Este canal se encontra entre as coordenadas 40°16′ e 40°22 W e 20°19′ e 20°20′ S e possui aproximadamente 8,5 km de extensão. O canal tem uma largura que varia de 180 metros no estreitamento junto ao Penedo a 1400 metros próximo a terceira ponte; tem uma profundidade média de 7 metros (calculado através de: $H_m = V/A$; onde H_m é a profundidade média do canal, V é o volume em sua extensão ao nível médio de maré, e *A* é a área de superfície do canal), e ao longo de seu eixo longitudinal há um canal dragado periodicamente a 13 metros de profundidade para dar acesso aos navios ao Porto de Vitória. No estreitamento do Penedo e ao norte da Ilha das Pombas (Figura A-1 do anexo A), as profundidades são maiores alcançando 24 m. Na região central está a desembocadura do estuário do Aribiri, um canal regido predominantemente pela maré, sem aporte fluvial significativamente importante para a representação hidrodinâmica local e que possui cerca de 70 hectares de vegetação de mangue. Entretanto, essa área é pequena quando comparada à extensão total de mangue no entorno da Ilha de Vitória, de cerca de 2000 hectares, que correspondem a aproximadamente 50% da área imersa do sistema estuarino do entorno da Ilha de Vitória durante as preamares de sizígia.

A hidrodinâmica da região do canal de acesso ao Porto de Vitória é regida predominantemente pela maré. A maré é semidiurna, sendo a componente harmônica de maré M2 (lunar semidiurna) a principal para a região, com período de 12,4 h e altura de 46,2 cm para o Porto de Vitória. A maré apresenta desigualdades diurnas. Registros de medições de correntes na região da Terceira Ponte (próximo ao ponto A na figura 4-1), em Santo Antônio (próximo ao ponto B da figura 4-1), e na região mais interna da Baía de Vitória mostraram que há uma dominância das correntes de vazante que se intensifica para o interior da baía. Essa dominância está associada à intensificação das velocidades de vazante, devido ao efeito do volume de água armazenado nas planícies de maré ao fim da preamar (RIGO, 2004). No entanto, como apontado por Barros (2002) pode ocorrer redução ou inversão da dominância durante as marés de quadratura. Para os períodos observados por Barros (2002), a maré apresentou alturas máximas de 1,7 metros na maré de sizígia e 0,9 metros na maré de quadratura.

Uma malha computacional mais refinada do que aquela usada por Rigo (2004) foi implantada para a região de estudo no intuito de obter um maior detalhamento sobre a hidrodinâmica da região de estudo, como a observação de recirculações ou vórtices de menor escala espacial. Entretanto, o refinamento foi limitado pela demanda de memória e tempo de processamento usado para a simulação. Assim, foi construída uma malha refinada para a região específica a ser estudada, composta por 448x788 células quadradas de 10x10 metros abrangendo o domínio modelado (retângulo

vermelho da Figura 4-1). Também, o espaçamento de 10x10 metros foi escolhido em virtude de possibilitar a representação numérica das pequenas ilhas presentes na região modelada, além de um bom delineamento do contorno das margens do canal. O passo de tempo usado para 432 horas de simulação foi de 1,8 segundos. O tempo real necessário para a simulação de 18 dias de hidrodinâmica com o DIVAST foi de cerca de 30 horas, com a utilização de um processador PENTIUM IV HT., CPU de 3.0 GHz, 512 MB de RAM.

O domínio computacional apresenta duas bordas abertas (domínio físico de água truncado) onde são impostas condições sobre o comportamento da água (condições de contorno) ao longo da simulação. As condições de contorno usadas para simular a hidrodinâmica da região de estudo foram registros de elevações de maré para o contorno leste (ponto A na Figura 4-1) e registros de velocidades para o contorno oeste (ponto B na Figura 4-1). Os registros das condições de contorno para essas fronteiras abertas foram obtidos do modelo utilizado por Rigo (2004), que usou uma de malha de 25x25 m de lado.



Figura 4-1 - Representação dos limites da malha computacional (retângulo vermelho) na região de estudo.

Uma boa representação da batimetria da região modelada é fundamental para a obtenção correta dos campos de velocidade calculados pelo modelo hidrodinâmico na resolução da malha. Para os valores de profundidade na malha utilizou-se a interpolação do banco de dados de batimetria disponibilizados pelo GEARH (2002a) (Figura 4-2), que foi criada usando informações de um amplo levantamento batimétrico realizado na região do canal de acesso ao canal do Porto de Vitória, dados batimétricos digitalizados da carta náutica 1401 da Marinha do Brasil da 8° edição (DHN, 2002), e de folhas de bordo. No ANEXO A encontram-se as figuras da região do canal de acesso ao Porto de Vitória, extraídas da carta náutica 1401.



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.

Outro parâmetro fornecido ao modelo DIVAST é o comprimento da rugosidade equivalente do fundo, utilizado no calculo do coeficiente de Chézy, que representa uma medida da resistência ao escoamento causada pelo atrito com o fundo. Mapas faciológicos, do estudo realizado por Paiva e Albino (2000), e folhas de bordo da marinha, com indicações do material granulométrico de fundo foram usados para obtenção da distribuição espacial da rugosidade equivalente de fundo. Na Figura 4-3 é mostrada a distribuição espacial para a rugosidade equivalente de fundo (k_s) conforme a natureza granulométrica do material de fundo do canal, que varia de argila a areia grossa. Foram utilizados os valores $k_s = 0,03m$ para a região de manguezal do Aribiri com processo de alagamento e secamento e para a região com fundo de areia grossa, $k_s = 0,02m$ para fração de areia média a fina e $k_s = 0,01m$ para fundo de argila.

O efeito do retardamento do movimento da água devido à fricção de fundo é medido pelo coeficiente de Chezy, o qual é obtido indiretamente da rugosidade equivalente de fundo, como segue:

o valor do coeficiente de Chézy (C) é obtido a partir do coeficiente de fricção de Darcy-Weisbach (λ), expresso por

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} , \qquad (4.7)$$

para escoamentos turbulentos e superfície hidraulicamente rugosa, λ é calculado da relação:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 5.75 \log\left(12.27 \frac{H}{k_s}\right),\tag{4.8}$$

onde k_s é a altura da rugosidade equivalente do fundo.



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

Para fins deste estudo, não foram considerados os efeitos dos ventos e descargas dos rios na hidrodinâmica. O efeito dos ventos foi desprezado, pois são variáveis temporalmente e pouco relevantes na indução do escoamento médio quando comparado ao efeito da maré, pois o canal de acesso ao Porto de Vitória apresenta pouca pista para os ventos de nordeste dominantes na região. Estudou-se isoladamente o efeito das correntes de maré na circulação. Descargas fluviais não foram consideradas por serem muito pouco significativas as vazões dos canais que interceptam a região. A influência das planícies de inundação na hidrodinâmica local, que respondem por uma parcela de área no manguezal do Rio Aribiri e funcionam como áreas de alagamento e secagem, foi considerada durante a simulação.

Na verificação da implantação do modelo DIVAST para a região de estudo, foram utilizados dados de velocidade correspondentes a um período de três semanas, entre 26 de agosto e 13 de setembro de 2002 (GEARH, 2002b), abrangendo fases de maré de quadratura e de maré de sizígia. Estes dados foram levantados na estação de Santo Antônio (UTM: 358201.9 ; 7752460.97), por um correntômetro instalado a 10,5 metros de profundidade, 50% da profundidade ao nível médio, no domínio modelado (Figura 4-2). Também foram usados, para a verificação do modelo, registros de elevação e de velocidades de estações de monitoramento distribuídas ao longo do canal. Esses registros foram obtidos do modelo usado por Rigo (2004) e serão apresentados no capítulo 6.

CAPÍTULO 5

O MODELO LAGRANGIANO DE PARTÍCULAS DE DESLOCAMENTO ALEATÓRIO

5. O Modelo Lagrangiano de Partículas de Deslocamento Aleatório

No movimento browniano, as moléculas de um fluido estão em constante movimento e colidindo umas com as outras. A taxa de colisões depende do fluido, do tamanho das partículas e da massa específica e temperatura do fluido (FISCHER et al., 1979). Por analogia, o movimento de partículas pela difusão turbulenta consiste de uma série de passos aleatórios que pode ser estudado estatisticamente. Quando tratada em termos estatísticos, a descrição matemática do problema é baseada em uma distribuição de probabilidade da posição das partículas. Desta forma, cada partícula é tratada independentemente uma da outra, não havendo correlação entre elas. Tal movimento pode ser descrito matemáticamente para o caso bidimensional como (RODEAN, 1994):

$$dx_i = a_i \left(\mathbf{x}, t\right) dt + b_{ij} \left(\mathbf{x}, t\right) dW_j \left(t\right),$$
(5.1)

onde $a_i(\mathbf{x},t)dt$ é o termo determinístico e $b_{ij}(\mathbf{x},t)dW_j(t)$ é o termo estocástico. $dW_i(t) = \xi_i dt$ é um processo incremental de Wiener, onde ξ_i é um ruído branco.

Por analogia ao movimento browniano, o coeficiente $a_i(\mathbf{x},t)$, que agora não está mais relacionado a viscosidade do fluido para o movimento browniano, contém duas informações (RODEAN, 1996): a informação da perda de memória da posição em um tempo anterior e a informação de *drift*, a qual satisfaz a condição de boa mistura (THOMSON, 1987), que é a base do modelo utilizado neste trabalho. O coeficiente $b_{ij}(\mathbf{x},t)$, representa a difusão turbulenta, e não mais a difusão molecular. O produto $b_{ij}(\mathbf{x},t)dW_j(t)$ não representa mais as acelerações irregulares devidas ao bombardemento molecular do movimento browniano, e sim, as acelerações aleatórias devidas às flutuações de pressão ocorridas em tempo de correção curto, da ordem da escala de tempo de Kolmogorov. 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:

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

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 conseqüência, 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):

$$\frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial(UCH)}{\partial x} + \frac{\partial(VCH)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + HD_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)'$$
(5.3)

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:

$$\frac{\partial(CH)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + U \right) CH \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{D_{yx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + V \right) CH \right] + \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} (D_{xx}CH) + \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} (D_{yy}CH) + \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y} (D_{xy}CH) + \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y} (D_{yx}CH) \right]$$
(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:

$$a_{i} = \begin{bmatrix} \frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + U\\ \frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{D_{yx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + V \end{bmatrix};$$
(5.5)
$$P_{E} = P_{L} = P = CH;$$
(5.6)

$$\frac{1}{2}\mathbf{B}\mathbf{B}^{T} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix}.$$
(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

$$\frac{1}{2}\mathbf{B}\mathbf{B}^{T} = \begin{bmatrix} D_{xx} & 0\\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix}.$$
(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

$$a_{i} = \begin{bmatrix} \frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + U \\ \frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + V \end{bmatrix};$$

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:

$$dx = \left[U + \frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial x}(D_{xx}H)\right]dt + \sqrt{2D_{xx}}dW_{x}(t);$$

$$dy = \left[V + \frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial y}(D_{yy}H)\right]dt + \sqrt{2D_{yy}}dW_{y}(t).$$
(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:

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

$$\overline{\Delta W(t)\Delta W(t')} = \overline{\xi(t)\xi(t')}\Delta t^2 = \Delta t.$$
(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 $t = n\Delta t (n = 1, 2...)$,

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

onde δ_{m} 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:

$$\xi_n = K\zeta_n \,, \tag{5.13}$$

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

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

De modo que

$$K = \sqrt{\frac{1}{\Delta t}} \,. \tag{5.15}$$

Portanto,

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

$$x_{n+1} = x_n + \left[U_n + \frac{D_{xx}}{H} \frac{\Delta H}{\Delta x} + \frac{\Delta D_{xx}}{\Delta x} \right] \Delta t + \sqrt{2D_{xx}} \Delta t \zeta_{x_{n+1}};$$

$$y_{n+1} = y_n + \left[V_n + \frac{D_{yy}}{H} \frac{\Delta H}{\Delta y} + \frac{\Delta D_{yy}}{\Delta y} \right] \Delta t + \sqrt{2D_{yy}} \Delta t \zeta_{y_{n+1}}.$$
(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 $\varphi \in \psi$ duas variáveis aleatórias independentes e uniformes distribuídas no intervalo [0,1] e considere as variáveis aleatórias *r* e θ definidas por

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

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

$$\rho_1(r) = \alpha r \exp\left(-\frac{\alpha}{2}r^2\right), \ 0 \le r \le \infty \ e \ \rho_2(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \ 0 \le \theta \le 2\pi \ respectively a mente.$$

Definem-se em seguida as variáveis ζ_x e ζ_y por

$$\zeta_x = r\sin\theta \quad e \quad \zeta_y = r\cos\theta \quad . \tag{5.19}$$

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

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

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

$$\rho_{conj}\left(\zeta_{x},\zeta_{y}\right) = \frac{\alpha}{2\pi} \exp\left[-\frac{\alpha}{2}\left(\zeta_{x}^{2}+\zeta_{y}^{2}\right)\right]$$

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

$$\rho\left(\zeta_{y}\right) = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}{\zeta_{x}}^{2}\right), \qquad (5.20)$$

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

5.3 Condição de fronteira

As condições de fronteias 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 $t_i \le t$ · (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.

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

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

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

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 5-4 - Distribuição das partículas ao fim da simulação do 1.º experimento.



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):

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

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

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

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.
						•			
•	·· · .		•					•	•
				· · ·	•		· · `		•
••		. · ·			••••		<u> </u>		
	••	[· .				.	· · .	••••••	·
••					·				·
· ·	• .	ŀ	·				· .	· · · ·	i.
	÷ . ·	•			••••		· ·		
•	·• ·		1		·		••	••••	•
	* •• •.						:	•.	
÷			· · ·		•••	<u></u>		····	
• • •		· · ·		. **	•	1 :		•••	
• •		· ·			: •	· . ·			• •
	.*		1						
• ••			· .	··		· · ·			
			``				• • •	•• ••	
	· · · ·				· ·	•••		÷ · · ·	· . ·.
·		$\left[\cdot \cdot \cdot \right]$		• •			<u> </u>		•
	• •	. •	•	. • : .		•		•	· :
	• •	• : •	•	•]. ·	. ••		. : <u></u> ^
		· · ·	•••		.:		• • • •		· · · .
·	•	ļ. •	••	•••		:	· · ·	. •	
· · ·		<u></u>			•		•	•	
•		· ·	••		•••	· · ·		•	•.
•.		1 • •	۰. ·	.: .	•		• • •		•

Figura 5-7 – Distribuição das partículas ao fim da simulação do 2.º experimento.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Foram avaliados os resultados de elevação e velocidades de correntes gerados pelo modelo para as estações localizadas ao longo do Canal de Acesso ao Porto de Vitória. Para isso, utilizaram-se dados de velocidade medidos em campo referentes ao período entre 26 de agosto de 2002 a 06 de setembro de 2002, para a estação de Santo Antônio. A precisão do modelo hidrodinâmico foi avaliada pela comparação entre os dados registrados pelo correntógrafo e o resultado numérico, da corrente na estação de Santo Antônio (Figura 6-1). Nas simulações que serão apresentadas, o tempo inicial de simulação t=0 horas, corresponde ao tempo real dos dados experimentais do dia 26/08/2002 às 15:30 horas. O erro percentual médio entre os valores de corrente medidos e simulados foi de 9,59%.



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

Os resultados simulados pelo modelo DIVAST de magnitude das correntes foram satisfatórios e reproduziram as dominâncias de enchente observadas nos registros na proximidade da quadratura (intervalo de 25 a 150 horas, Figura 6-1) e as dominâncias de vazante que ocorrem quando se aproxima da sizígia (intervalo 157 a 300 horas, Figura 6-1), com exceções nesse último intervalo (instantes de vazante 160 e 228 horas, e instantes de enchente 257 e 280 horas, Figura 6-1). De fato, erros de magnitude mais representativos estiveram associados à fase de sizígia, em que picos de correntes de vazante foram subestimados (entre 170-230 horas, Figura 6-1) e picos de enchente foram sobreestimados (entre 260-285 horas, Figura 6-1).

A comparação entre as velocidades medidas e simuladas para a estação de Santo Antônio é apresentada na Figura 6-2 sob duas perspectivas. Na Figura 6-2.a a velocidade é zero no centro e aumenta em direção à circunferência, e na Figura 6-2b. a velocidade é zero na circunferência e aumenta em direção ao centro. O norte verdadeiro é a referência de 0° nas figuras. Observa-se na Figura 6-2a. que o erro médio na direção das velocidades está dentro da faixa de ±20 graus. Observando-se a Figura 6-2b. é mais fácil perceber que o erro na direção da velocidade é maior quando as velocidades diminuem, ou seja, sobretudo durante a virada da maré, quando dominam efeitos turbulentos e há grande variabilidade das direções das correntes. Portanto, quando se calcula o erro médio estimado na direção considerando-se apenas a comparação dos dados cuja diferença é menor que 45° e, assim, desprezando apenas os dados de baixas velocidades (menores que 0,2 m/s, sendo 95% deles menor que 0,1 m/s), encontram-se ainda 80% dos dados originais, com erro médio em uma faixa de ±13°.

Ainda na Figura 6-2b., observam-se valores da enchente plotados nos quadrantes acima da linha da escala da velocidade, e valores da vazante plotados nos quadrantes inferiores a essa linha. As intensidades máximas de enchente e de vazante simuladas tiveram boa concordância com as máximas observadas. E as direções das velocidades de vazante foram em geral melhor reproduzidas que as de enchente.



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.

A localização das 28 estações de monitoramento distribuídas ao longo do canal, nas quais se obtiveram resultados numéricos das velocidades e elevações é apresentada na Figura 6-3. Uma comparação (Figuras 6-4 a 6-17) é apresentada entre os resultados numéricos de magnitude das componentes da velocidade e de elevação obtidos com a grade de espaçamento de malha igual a 10 metros, implantada somente na região do Canal de acesso ao Porto de Vitória, e os resultados obtidos com a grade de espaçamento implantada para toda a região estuarina em torno da Ilha de Vitória, para as 28 estações (Figura 6-3).



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

Os resultados da malha refinada são ainda consistentes com aqueles da calibração com a malha de maior domínio (Figuras 6-4 a 6-17). Diferenças na componente principal da velocidade foram observadas para a estação 1 da Figura 6-3 (Figura 6-4 (a)), próxima à condição de contorno leste, particularmente na velocidade da enchente. As velocidades para as demais estações foram bem reproduzidas com a utilização da condição de contorno de elevação no contorno leste. As elevações foram bem reproduzidas para as estações (Figuras 6-4 a 6-17) mesmo para aquelas próximas à fronteira oeste (ver estação 28 da Figura 6-3, na Figura 6-17 (b)), com a utilização de velocidade na condição de contorno oeste. A utilização de valores de condição de contorno variáveis ponto-a-ponto nas células da malha do DIVAST possibilitou a obtenção de resultados mais precisos, visto que é importante considerar a variabilidade lateral das correntes para evitar a indução de erros (BOON, 1978, apud JAY, 1997).

Oscilações nas componentes da velocidade de vazante são observadas na estação 20 (Figura 6-13 (b)) e nas estações 21 (Figura 6-14 (a)) e 26 (Figura 6-16 (b)) mais expressivamente. Observou-se a associação desse efeito com a localização dessas estações logo após ilhas na região do canal de acesso ao Porto de Vitória (ver localização das estações 20,21 e 26 na Figura 6-3). Entende-se que o obstáculo representado por aquelas ilhas ao escoamento de vazante ocasiona uma esteira resultando nas oscilações de velocidade observadas e intensificando os efeitos da turbulência. O fato de não terem sido observadas oscilações numéricas também nas

estações sujeitas à interferência das ilhas com o escoamento de enchente se deve, provavelmente, à ocorrência de maiores magnitudes de velocidades na vazante, evidenciando aquele efeito quando o escoamento interage com as ilhas. Instabilidades associadas a padrões de circulação como esteiras e vorticidades em torno de ilhas foram também encontrados por Tseng (2001).

Diferenças para uma estação entre magnitudes de correntes máximas de enchente e máximas de vazante atingem cerca de 20% para a fase de quadratura, enquanto na fase de sizígia, podem alcançar até 50% de diferença (Figuras 6-4 a 6-17). A tendência geral para as estações é de dominância de enchente próximo à quadratura e dominância da vazante à medida que se aproxima a sizígia. Interessante, porém que, para a estação 26, a localizada quase imediatamente após uma ilha (Figura 6-3), a dominância é de correntes de enchente durante todo o registro (Figuras 6-16 (b)). Um padrão de dominância de enchente em regiões com pequenas ilhas, onde a seção do fluxo principal era reduzida, foi observado no estudo das correntes de maré geradas unicamente pela componente harmônica de maré M_2 na região do canal de acesso ao Porto de Vitória com o modelo DIVAST, sem considerar as planícies de maré (SANTIAGO & CHACALTANA, 2003).



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.



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.

Os erros médios estimados dos resultados simulados pelo DIVAST em relação aos dados medidos pelo correntógrafo para a estação de Santo Antônio se encontram todos inseridos na faixa indicada como aceitável para calibração na literatura (Tabela 6-1), de modo que o modelo foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as elevações, magnitudes e direções das velocidades na região simulada. As diferenças de fase também foram aceitáveis, representando razoavelmente bem as viradas de maré.

	Erros Médios Obtidos	Erros Aceitáveis (CAWLEY & HARNETT, 1992, ODD & MURPHY, 1992, apud CASTRO, 2001)
Elevações	1,7%	$\leq 5\%$
Velocidades	9,6%	$\leq 20\%$
Direções	$\pm 20^{\circ}$ (ou ±13° para velocidades acima de 10 cm/s)	$\pm 20^{\circ}$

6.2 HIDRODINÂMICA NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE VITÓRIA

Nesta seção o padrão de escoamento é interpretado com as informações dos resultados dos campos de velocidade simulados pelo modelo DIVAST para o domínio modelado ao longo do canal de acesso ao Porto de Vitória. Para facilitar a compreensão, são apresentadas as regiões R1 a R8, onde será dada maior atenção à discussão dos resultados (Figura 6-18).

Os campos de velocidades obtidos correspondem às simulações em situações de marés de enchente e vazante. Na figuras 6-19 e 6-20 são apresentados os ciclos de maré ao longo dos quais se avaliaram os campos de escoamento nos instantes indicados nos círculos em vermelho, sendo respectivamente, um ciclo próximo da quadratura (figuras 6-21 a 6-29) e um ciclo próximo da sizígia (figuras 6-30 a 6-37).

De maneira geral, os padrões de escoamento foram qualitativamente similares nos dois ciclos simulados. Porém, como era esperado, no ciclo próximo da sizígia atingem-se magnitudes maiores que no ciclo próximo da quadratura. As magnitudes das velocidades atingidas na vazante são normalmente superiores às velocidades de enchente, em virtude da dominância de vazante na região, concordando com as observações de Barros (2002). Ao longo da extensão longitudinal do canal principal de escoamento (região dragada, onde as profundidades são de pelo menos 13 metros) se desenvolvem maiores velocidades, mostrando a forte influência que este canal exerce sobre o escoamento da região. É notável a maior advecção no canal dragado, sendo mais marcante nas figuras 6-21, 6-33, 6-35 e 6-36.





Um comportamento que diverge desse padrão foi observado em alguns instantes (Fig. 6-22, 6-26 e 6-27). Nesses instantes, na proximidade do contorno leste, as magnitudes das velocidades apresentadas ao longo da seção transversal do canal são maiores na parte norte da seção, mais perto da margem de Vitória. Essas figuras também indicam que nas primeiras duas horas (referência à Figura 6-19) de vazante ou enchente do ciclo próximo à quadratura, as velocidades ao longo da seção transversal variam menos. Porém cabe ressaltar que este comportamento pode estar relacionado às condições de contorno utilizadas, devendo ser melhor investigado. Tal comportamento também se observou na primeira hora (referência à Figura 6-20) de maré de vazante do ciclo próximo à sizígia (Figura 6-37).

O padrão das velocidades ao longo da região do canal para um mesmo instante de tempo é determinado principalmente pela área de seção do escoamento. As velocidades máximas observadas (Figura 6-32) ocorrem na região de estreitamento da seção entre Morro do Penedo e a Ilha de Vitória (R1), onde atingiram valores da ordem de 0,9 m/s no ciclo próximo à sizígia. Em seguida, encontram-se velocidades altas na região entre Ilha das Tendas, Ilha do Urubu e Ilha das Pombas (R2), da ordem de até 0,8m/s; e na seção entre Ilha das Pombas e margem de Vila Velha (R3), com velocidades da ordem de 0,7m/s. Ainda nessas duas últimas regiões, o escoamento do canal ramifica-se em torno da Ilha das Pombas. As velocidades médias das correntes de maré entre Ilha das Pombas e Ilha do Urubu (R2) foram quase todo o tempo superiores às velocidades entre Ilha das Pombas e a margem de Vila Velha (R3) por cerca de 10 cm/s em média.

A magnitude das velocidades das correntes na região de estudo mostra-se fortemente dependente da geometria do canal, sendo reduzida na proximidade das margens e regiões de batimetria rasa. A resolução de malha utilizada permitiu um bom refinamento da hidrodinâmica e a observação de padrões de pequena escala induzidos pelos contornos da costa. As correntes são, em geral, unidirecionais e alinhadas ao canal principal, à exceção de alguns locais em que os campos de velocidade mostraram a ocorrência de vórtices e recirculações, como em reentrâncias

na costa ou enseadas. Chama a atenção nesse sentido, padrões de circulação observados na Enseada de Vila Velha (R7) e Canto da Jaburuna (R6).

A região do Canto da Jaburuna, região abrigada ao sul da Ilha das Cobras (R6), se apresentou como uma região de fraca circulação. Caracteriza-se como uma região quase estagnada a partir de menos de uma hora para o instante da baixamar (Figuras 6-21, 6-29 e 6-33). Entretanto, próximo à sizígia, pode atingir velocidades da ordem de até 20 cm/s (Figuras 6-31 e 6-35 a 6-37).

Na enseada de Vila Velha (R7) observou-se a ocorrência de vórtices tanto durante a vazante (figuras 6-28 e 6-33) como durante a enchente (figuras 6-25 e 6-35) da maré. Tais vórtices possivelmente desenvolvem-se em virtude da reentrância na costa com batimetria rasa, que ocasiona o cisalhamento das camadas do fluido induzindo movimentos rotacionais. Suas velocidades são geralmente baixas, menores que 10 cm/s e constituem zonas de baixa advecção. A magnitude dos vórtices obedece de maneira geral a uma proporção com a velocidade de escoamento no canal central, dependendo do estágio da maré enchente ou maré vazante, ocorrendo também a inversão do sentido de rotação conforme a maré. Também a pequena enseada na margem de Vitória próximo ao Shopping Vitória (R8) apresentou em alguns instantes (figuras 6-28 e 6-32) vórtices com baixas velocidades, da ordem de 5 cm/s.

A região da desembocadura do Rio Aribiri (R4) também apresentou velocidades baixas. Embora as figuras dos campos de escoamento não mostrem em seu mapa base a estrutura do Terminal Portuário da CPVV que se pode ver na Carta Náutica 1401 (ANEXO A, Figura 1), tal representação está na batimetria utilizada e se observa o seu efeito na indução de velocidades locais mais baixas na região do Terminal Portuário, caracteristicamente nas figuras 6-22 e 6-23, e 6-34 a 6-37. A circulação entre Ilha da Fumaça e Vitória (R5) também apresenta fraca circulação, geralmente com velocidades inferiores a 10 cm/s na quadratura, mas chegando a até 20 cm/s na sizígia. Esse local recebe as águas do canal de drenagem da Avenida Leitão da Silva, contaminadas por esgotos sanitários.



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. 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.



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.



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.



Figura 6-23 - Campo de velocidades para o instante de tempo 34,8 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-24 - Campo de velocidades para o instante de tempo 35,6 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-25 - Campo de velocidades para o instante de tempo 36,5 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-26 - Campo de velocidades para o instante de tempo 39,5 hs. de simulação - vazante.



Figura 6-27 - Campo de velocidades para o instante de tempo 40,5 hs. de simulação - vazante.



Figura 6-28 - Campo de velocidades para o instante de tempo 41,5 hs. de simulação - vazante.



Figura 6-29 - Campo de velocidades para o instante de tempo 43,5 hs. de simulação - vazante.



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.



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.



Figura 6-32 - Campo de velocidades para o instante de tempo 229,5 hs. de simulação - vazante.



Figura 6-33 - Campo de velocidades para o instante de tempo 231,5 hs. de simulação - vazante.


Figura 6-34 - Campo de velocidades para o instante de tempo 233,7 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-35 - Campo de velocidades para o instante de tempo 236,4 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-36 - Campo de velocidades para o instante de tempo 238 hs. de simulação - enchente.



Figura 6-37 - Campo de velocidades para o instante de tempo 240,6 hs. de simulação - vazante.

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

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do MLDPA em três cenários simulados para o processo de dispersão de 150.000 partículas lançadas instantaneamente a partir de pontos mostrados na Tabela 6-2 no Canal de Acesso ao Porto de Vitória. Os lançamentos simulados ocorreram após cerca de uma hora da virada da maré, quando as correntes atingiam cerca de 20 cm/s.

Simulação	Tempo inicial do lançamento em horas (registro da Fig. 6-1)	Ponto de lançamento (coordenadas UTM)
1.º experimento: (enchente próxima à quadratura)	33,3 (cerca de 1 hora após a baixamar)	364057.00 <i>,</i> 7752466.00 A
2.º experimento: (enchente próximo à sizígia)	221,5 (cerca de 1 hora após a baixamar)	364057.00 <i>,</i> 7752466.00 A
3.º experimento: (vazante próximo à quadratura)	39,33 (cerca de 1 hora após a preamar)	360948.00 <i>,</i> 7752277.00 B

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

As Figuras 6-38 e 6-39 mostram uma composição das nuvens de partículas em instantes após o lançamento, para o 1.º e 2.º experimentos, respectivamente. Comparando-se os resultados das Figuras 6-38 e 6-39, observa-se que na condição próximo à sizígia (2.º experimento) há um avanço mais rápido da nuvem, como indicado pela localização da nuvem para um mesmo instante de tempo a partir do lançamento.



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.

Nas Figuras 6-40 a 6-56, quando se observa a progressão da nuvem de partículas ao longo da simulação do 1.º experimento (6-40(a) a 6-56(a)) e ao longo da do 2.º

experimento (6-40(b) a 6-56(b)), percebe-se que o comportamento geral da nuvem ao longo da maré enchente se assemelha nos dois experimentos, com a diferença principal de que para um mesmo instante de tempo a partir do lançamento das partículas, a dispersão é maior no 2º experimento. Também se observa que, ao final da enchente, é maior a incursão da nuvem adentro do Canal de Acesso ao Porto de Vitória e do Rio Aribiri. Isso ocorre porque o 2º experimento é realizado em condição próxima da sizígia, quando são atingidas maiores magnitudes das velocidades. A diferença na dispersão entre esses experimentos é detalhada na comparação do instante t=90 s do 1º e 2º experimentos simulados (Figuras 6-57 e 6-58). Nota-se que a dispersão longitudinal da nuvem é maior, para um mesmo instante de tempo após o lançamento, na condição do 2º experimento próximo da sizígia (Figura 6-39) em relação ao 1º experimento próximo à quadratura (Figura 6-38). A dispersão lateral é também mais expressiva no segundo experimento (Figura 6-58) em relação ao primeiro experimento (Figura 6-57), em virtude do maior cisalhamento na sizígia e intensificação do efeito da difusão turbulenta lateral.

O transporte de massa por advecção no canal principal dragado se destaca, estando intimamente relacionado à dinâmica do escoamento. Observa-se (Figuras 6-57 e 6-58) que a Ilha das Cobras produz uma esteira no sentido do escoamento, que pode aumentar localmente o espalhamento das partículas com a relativa intensificação da advecção diferenciada e mistura, analogamente a observações discutidas por Tseng (2001) no estudo com derivadores realizado em torno de ilhas costeiras em Taiwan. Em ambos os experimentos simulados, houve pouca transferência de partículas para a região do Canto da Jaburuna (R6). Entretanto, nos 30 minutos iniciais após o lançamento, houve maior transporte de partículas para a região a sudoeste da Ilha das Cobras no 1º experimento (Figura 6-38) que no 2º (Figura 6-39). Aparentemente, o transporte por advecção nos momentos iniciais após o lançamento da nuvem, parece ter sido responsável por essa diferença, pois no 2º experimento a nuvem responde mais rápido ao escoamento preferencial ao longo do canal e seu formato se alonga mais brevemente do que no 1.º experimento com advecção mais fraca, em que teria havido tempo para uma maior abertura inicial da nuvem de partículas ocorrer.

As partículas alcançaram a foz do Rio Aribiri e áreas adjacentes ao manguezal mais rápido no segundo experimento, relativamente ao tempo de deslocamento do ponto de lançamento até a foz do Aribiri (R4). No primeiro experimento as partículas atingiram a foz do Aribiri após 150 minutos do lançamento (Figura 6-38) enquanto esse tempo reduziu para 120 minutos no segundo experimento (Figura 6-39). Ocorreu dispersão de partículas nas planícies de maré do Aribiri, vegetadas por mangue, notoriamente no segundo experimento, quando tais regiões foram inundadas com o nível alcançado pela maré ao fim da enchente.





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







Figura 6-43 – Instante t=30 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento. (a)



Figura 6-44 – Instante t=40 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. (a)









 $\begin{array}{c} \hline & & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline \hline & & & \\$



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. (a) (b)



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



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. (a) (b)



Figura 6-55 – Instante t=150 minutos após o lançamento das partículas. (a) 1º experimento. (b) 2º experimento. (a) (b) 7753000 – 0.5



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.

O 3.º experimento é mostrado na Figura 6-59, durante uma vazante próxima da quadratura. Observaram-se nos três experimentos (Figuras 6-38, 6-39 e 6-59) que a taxa de transporte de partículas na seção entre Ilha das Tendas e Ilha das Pombas (R2) foi superior a ocorrente entre Ilha das Pombas e a margem de Vila Velha (R3),

observando-se avanço maior da nuvem na primeira seção do que nesta última, para um mesmo instante de tempo. Observa-se no 3º experimento, que não há influência das águas do canal de acesso ao Porto de Vitória para o Rio Aribiri durante a vazante. O Canto da Jaburuna (R6) e a Enseada de Vila Velha (R7) se apresentam como regiões de baixa advecção e maior tempo de residência de constituintes. No 3.º experimento (Figura 6-59), em t=270 minutos as velocidades eram baixas, pois a vazante estava no final, a cerca de 30 minutos da estofa de baixamar. As oscilações de maré fazem que o escoamento no estuário seja transiente e que o coeficiente de dispersão longitudinal seja afetado pela transitoriedade do escoamento. Simulações realizadas na condição do 3º experimento, com tempo de simulação maior que o tempo da vazante, monstraram que a inversão do escoamento da maré ocorre antes que a nuvem de partículas se espalhe uniformemente ao longo de toda a seção transversal na região do Canto da Jaburuna e Enseada de Vila Velha.



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

Observou-se de modo geral que o transporte foi mais efetivo nas áreas mais profundas associadas a maiores velocidades e difusividades turbulentas, na região retilínea mais profunda do canal, e as partículas tenderiam a se acumular em maior concentração nas enseadas rasas, como o Canto da Jaburuna (R6) e a enseada de Vila Velha (R7), que se identificaram como regiões em que há menor troca de massa fluida com o canal principal e consequentemente maior tempo de residência de constituintes.

A ocorrência de vórtices na região do canal de acesso ao Porto de Vitória é outro fator que pode ter importância representativa para os processos dispersivos e de deposição e transporte de sedimentos para a região. Nessas regiões há uma capacidade limitada de transporte de constituintes para outras regiões adjacentes, favorecendo um maior tempo de residência de constituintes em seu escoamento circulatório. O escoamento é mais lento que nas regiões do escoamento principal ao centro do canal, podendo-se esperar intensidades de turbulência menores em tais regiões. Entretanto, as velocidades observadas indicam que possa haver uma capacidade relativamente alta de misturamento local, favorecendo a homogeneização de concentrações de constituintes associada à vorticidade.

A capacidade de utilizar o MLPDA mesmo para estudar processos de dispersão em pequena escala (*near field*), em tamanho de nuvens menores que a discretização espacial do modelo hidrodinâmico pode ser vista na Figura 6-60. Tal fato demonstra que o MLPDA simula a segmentação da nuvem, processo comumente observado em derramamento de solutos em estuários. Na figura pode-se observar uma partícula sobre o contorno de terra do mapa base, visto que as partículas do MLPDA deslocam-se sobre o domínio da grade computacional de água do modelo DIVAST, a qual não é ajustável perfeitamente aos contornos.



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.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas do desenvolvimento deste trabalho. A partir dos resultados obtidos foi possível avançar no conhecimento dos padrões dispersivos no Canal de Acesso ao Porto de Vitória e obter conclusões importantes em relação à modelagem e gerenciamento da qualidade de suas águas.

Sobre o MLPDA se pode concluir:

✓ A aplicação do Modelo Lagrangiano de Trajetória de Partículas se mostrou uma ferramenta adequada para simulação do transporte de solutos. Inicialmente o MLPDA foi comparado com experimentos numéricos disponíveis na literatura e apresentou resultados coerentes. Em seguida, o modelo foi aplicado para a região do canal do Porto de Vitória, conseguindo simular de forma satisfatória processos dispersivos tanto nas seções mais largas como nas seções mais estritas do canal e permitindo a identificação de zonas mais dispersivas e zonas que favorecem o acúmulo de constituintes. Os resultados indicam que o MLPDA pode ser usado como uma primeira aproximação na estimativa e estudo da concentração de poluentes na região modelada, podendo ser utilizado em estudos de pequena, média e grande escala. O MLPDA pode indicar e auxiliar a tomada de decisões acerca dos processos de dispersão e controle de derramamento de soluto recomendáveis em cada situação com impactos ambientais em potencial.

Sobre as simulações numéricas de hidrodinâmica e de dispersão de traçadores:

✓ O modelo DIVAST representou bem o escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória e se mostrou bastante confiável, tendo em vista que os erros médios estimados pelo modelo para magnitude e direção das velocidades foram inferiores aos recomendados na literatura, encontrando-se boa concordância entre os dados medidos e simulados. A observação dos campos de escoamento simulados pelo DIVAST possibilitou identificar diferentes padrões de escoamento associados a interação do escoamento com a geometria do canal. A hidrodinâmica e a dispersão de traçadores apresentaram comportamento transiente e forte dependência espacial, associada à influência da geometria e batimetria nos padrões de escoamento e geração de turbulência.

✓ As velocidades mais intensas das correntes na região do canal de acesso ao Porto de Vitória se apresentaram ao longo do percurso dragado, atingindo as maiores velocidades ao norte da Ilha das Pombas e no estreitamento do Penedo. Ao norte da Ilha das Pombas a taxa de transporte de massa foi maior que ao sul da mesma. A parcela de fluido que passa ao sul da Ilha das Pombas na maré de enchente pode adentrar o estuário do Rio Aribiri e atingir as planícies de maré vegetadas por mangue, particularmente nas preamares de sizígia. Na maré de vazante não se observou interferência da água do Canal de Acesso ao Porto de Vitória no estuário do Aribiri. Os campos de velocidade simulados pelo modelo indicaram a existência de vórtices na Enseada de Vila Velha e a identificação de zonas de recirculação pouco advectivas como no Canto da Jaburuna e em torno da Ilha da Fumaça. O conhecimento desses padrões de circulação é importante para o planejamento e gerenciamento da qualidade das águas da região.

Deixam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

 Empregar técnicas de traçadores no estudo da dispersão na região do Canal de Acesso ao Porto de Vitória e usar técnicas de modelagem na avaliação da taxa de expansão da nuvem de partículas do modelo de deslocamento aleatório, com o fim de estimar (calibrar) para a região o valor mais adequado das constantes adimensional de dispersão longitudinal (k_l) e constante adimensional de difusão turbulenta lateral (k_t), utilizadas no cálculo dos coeficientes de difusão-dispersão D_{xx} e D_{yy} no modelo DIVAST e utilizados neste trabalho pelo modelo lagrangiano de partículas de deslocamento aleatório.

- ✓ Implementar algoritmos para a modelagem da dispersão de traçadores de massa específica diferente da água, como partículas discretas, considerando efeitos de inércia e do vento na indução do movimento das partículas, a fim de simular o comportamento evolutivo de derrames de óleo e transporte de sedimentos.
- Acoplar o campo de vento de superfície gerado por um modelo meteorológico de mesoescala ou por um modelo de consistência de massa ao MLPDA, para o estudo da trajetória e dispersão de solutos na superfície da água de forma mais precisa, uma vez que o poluente tende a se espalhar na direção dos ventos de superfície.
- ✓ Estudar a distribuição de tempos de residência do fluido e de constituintes no Canal de Acesso ao Porto de Vitória e a influência na qualidade de suas águas.
- ✓ Estudar a dispersão de solutos utilizando diferentes metodologias para cálculo da concentração. A técnica mais comum é a divisão da massa das partículas pelo volume onde elas se encontram. Uma técnica mais avançada é o método de cálculo da concentração *kernel* (Haan, 1999), que não necessita de volumes imaginários como no caso anterior para a contagem do número de partículas. A sua utilização produz uma distribuição de concentrações mais realística, com o menor número de partículas, principalmente em regiões de fronteira complexa, como no caso do canal de acesso ao Porto de Vitória.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS

8. Referências

AGENDA 21. CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE DESENVOLVIMENTO. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/se/agen21/ag21global/consulta.html>. Acesso em 20 jan. 2004.

ALLEN, M. C.; CHATWIN, P. C. Mathematical Models of Dispersion in Rivers and Estuaries. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, v. 17, p.119-149, 1985.

BARROS, G. C. **Identificação dos processos físicos na hidrodinâmica das águas do entorno da ilha de Vitória –** ES. 2002. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

BERLEMONT, A.; GOUESBET, G. Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 25, p. 133-159, 1999.

BLANTON, J. O.; LIN, G; ELSTON, S. A. Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks. **Continental Shelf Research**, v. 22, p.1731–1743, 2002.

BROWN, J.; COLLING A.; PARK D.; PHILLIPS J., ROTHERY D.; WRIGHT J. Waves, Tides and Shallow-water Processes. The Open University, 1989.

CASTRO, M. S. M. **Análise da influência das águas do Canal da Passagem sobre o padrão de escoamento na Baía do Espírito Santo.** 2001. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

CHACALTANA, J.T.A.; RIGO, D.; CURTO, A.M.; PACHECO, C.G. Influência do Manguezal no padrão de escoamento do Sistema Estuarino da Ilha de Vitória. 2003. In: V SEMINÁRIO ESTADUAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE. Vitória. **Anais eletrônicos do V SESMA.** CHEN, M.; KUMAR, K.; LOU, J.; KHOO, B.; MURALI, K. Circulation Modelling in the Strait of Singapore. **Journal of Coastal Research**, v. 21, p.960-972, 2004.

CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Book Co. Singapore, 1959.

CRONE, G. C. Parallel Lagrangian Models for Turbulent Transport and Chemistry. 1997. Tese de Doutorado, Universiteit Utrecht, Países Baixos. 126 p.

CONCEICÃO, C. de A. 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. 2003. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

DHN, 2002, Carta Náutica 1401 (28/09/02), Marinha do Brasil.

DIMOU, K. N. Simulation of Estuary Mixing Using a Two-Dimensional Random Walk Model. 1989. Dissertação. Massachusetts Institute of Technology.

DIMOU, K. N.; ADAMS, E. E. A random-walk, particle tracking model for wellmixed estuaries and coastal waters. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v. 3, p. 99-110, 1993.

DYER, K. R. Estuaries - a physical introduction. Second edition. John Wiley & Sons. 342p. 1997.

EISMA, D., 1988, Intertidal Deposits – River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons, CRC Press.

FALCONER, R.A. Mathematical Modelling of Jet-Foerced Circulation in Reservoirs and Harbours. 1976.Tese. Dept. of Civil Engineering of Imperial College, London.

FALCONER, R. A.; WU, Y.; STRUVE, J. Mathematical modeling of tidal currents in mangrove forests. **Environmental Modelling & Software**. V. 16, p. 19-29, 2001.

FISCHER, H.B; LIST, J. E.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. **Mixing in inland and coastal waters.** Academic Press, New York, 1979.

FURUKAWA, K.; WOLANSKI, E.; MUELLER, H. Currents and Sediment Transport in Mangrove Forests. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v. 44, p. 301-310, 1997.

GEARH, 2002a, **Batimetria da Baía de Vitória e do canal de acesso ao Porto de Vitória**, Relatório, Vitória, Brasil.

GEARH, 2002b, **Monitoramento de Correntes no Entorno da Ilha de Vitória**, Relatório,Vitória, Brasil.

GUYMER, I.; WEST, J. R. Longitudinal dispersion coefficients in estuary. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 5, p. 718-734, 1992.

HAAN, P. On the use of Density Kernels for Concentration Estimations ithin Particle and Puff Dispersion Models. **Atmospheric Environment**. V.33,n.13,p.2007-2021,

HEEMINK, A. W. Stochastic Modelling of Dispersion in Shallow Water. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v.4, p.161-174, 1990.

HEEMINK, A. W. On Random Walk Models with Space Varying Diffusivity. **Journal of Computacional Physics**, v.119, p.388-389, 1995.

HORSINGTON, W. R; WEST, J. R., BURTON, D. J.; RANDLE, K. Modelling Transport Processes in the Ribble Estuary. **Environment International.** v.21, n.2, p.131-141, 1995.

IUCN, PNUMA, WWF - Cuidando do Planeta Terra. Uma estratégia para a Vida. São Paulo: Ed. SMA, 1992.

JAY, D. A.; UNCLES, R. J.; LARGIER, J.; GEYER, W. R.; VALLINO, J.; BOYTON, W. R. A Review of Recent Developments in Estuarine Scalar Flux Estimation. **Estuaries.** V.20, n.2, p.262-280, 1997.

KAY, A. The effect of Cross-Stream Depth Variations upon Contaminant Dispersion in a Vertically Well-Mixed Current. Estuarine, Coastal and Shelf Science. v. 24, p. 177-204, 1987.

KJERVE, B. **Hydrodynamics of Estuaries**. v.1. Estuarine physics. CRC Press Inc. Florida. 1988.

LEWIS, Roy. **Dispersion in Estuaries and Coastal Waters**. 1. Ed. West Sussex: Willy, 1997.

MACIEL, M. A. **Modelagem do Padrão de Escoamento no Canal da Passagem**, **Vitória-ES.** 2004. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

MAZDA, Y., KANAZAWA, N. & WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. **Hydrobiology**. V. 295, p. 51-58, 1995.

MCDOWELL, D.M. & OCONNOR, B.A. **Hydraulic Behaviour of Estuaries**. The MacMillan Press Ltda, 1977.

MELO, E.; MARTINS, R.P.; FRANCO, D. Standing wave tide at Florianópolis Bay (Brazil) and its influence on bay pollution. **Coastal Environment Management and Conservation**. v. 2. p. 143-151, 1997. MIRANDA, L. B; KJERFVE, B.; CASTRO, B. M.;. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 1. ed. São Paulo: Edusp, 2002.

MOYEED, R. A.; GRAHAM, D. I. How many particles for my Lagrangian simulations? **Powder Technology**. V. 125, p. 179-186, 2002.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. **Numerical Recipes**. 2.ed., Cambridge University Press, Cambridge,1992.

OLIVEIRA, A. P. Investigação da Camada Limite Planetária na Região de Iperó. 2003. Tese de Livre-Docência, IAG, Universidade de São Paulo, 226p..

PAIVA, D. S.; ALBINO, J. Estudo sedimentológico do material de fundo do Canal da Passagem e trecho da Baía de Vitória – ES. 1999. Monografia. Curso de Especialização "Lato Sensu" em Ecologia e Recursos Naturais. DERN. Universidade Federal do Espírito Santo.

PEREIRA, M. M. R. Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas. 2004. Tese. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de São Paulo.

PEREIRA, M. M. R. 2006. Comunicação pessoal. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

PETHICK, J. An introduction to coastal geomorphology. Arnold. London. 1984.

RANDU (System/360 Scientific Subroutine Package, Version III, Programmer's Manual. IBM, White Plains, New York, 1968, p. 77.). Disponível em http://crypto.mat.sbg.ac.at/results/karl/server/node4.html. Acessado em 17/03/2006.

RIDGE, M. M. Three-Dimensional Simulation of Polutant Dispersion in Coastal Waters. 2002. Tese. Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona.

RIGO, D., 2001, *Levantamento Topo-Batimétrico dos Manguezais e Canais da Baía de Vitória* – Relatório Final, FACITEC – PMV, Vitória, Brasil.

RIGO. **Modelagem e Monitoramento do Escoamento em Regiões Estuarinas com Manguezais.** 2004. Tese. Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ROCHA, A.B. Estudo da Hidrodinâmica e do Transporte de Solutos na Baía do Espírito Santo através de Modelagem Computacional. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

RODEAN, H. C. Notes on the Langevin Model for Turbulent Diffusion of 'Marked' Particles. USA: National Technical Information Service (NTIS). 122 p., 1994.

RODEAN, H. C. Stochastic Lagrangian Models of Turbulent Diffusion. Boston, USA: Meteorological. **American Meteorological Society**. Monograph n.48, 84 p., 1996.

RODI, W. Turbulence Models and their Application in Hydraulics. A State-ofthe-art review. Rotterdam. **International Association for Hydraulic Research.** Monograph, 104p., 1993.

ROSMAN, P.C.C. **Model Development for the BTS.** Project-report 02. Hydrosch2mhill, COPPE/UFRJ, 1999.

ROSMAN, P.C.C.; WROBEL, L.C.; EIGER,S.J.; TUCCI, C.E.; CIRILLO, J.A.; CABRAL, J.P. **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH 1989, 380 p. SANKARANARAYANAN, S.; MCCAY, D. F. Application of a Two-Dimensional Depth Averaged Hydrodynamic Tidal Model. **Ocean Engineering.** v. 30, p. 1807–1832, 2003.

SANTIAGO, D. I.; CHACALTANA, J. T. A. Correntes geradas pela componente de maré M2 no canal de acesso ao Porto de Vitória. 2003. In: II SEMINÁRIO ESPÍRITO- SANTENSE DE RECURSOS HÌDRICOS. Vitória. Anais do II SERH.

SHIROLKAR, J. S.; COIMBRA C. F. M.; MCQUAY, M. Q. Fundamental Aspects of Modeling Turbulent Particle Dispersion in Dilute Flows. **Progress in Energy and Combustion Science**, v22, p. 363-399, 1996.

SMITH, R. Longitudinal Dispersion Coefficients for varying channels. Journal of Fluid Mechanics, v. 130, p. 299-314, 1983.

SU, N. Generalisation of various hydrological and environmental transport models using the Fokker-Planck equation. Environmental Modelling & Software. V. 19, p. 345-356, 2004.

SWART, H. E.; DE JONGE, V. N.; VOSBEEK, M. Application of the tidal Random Walk Model to Calculate Water Dispersion Coefficients in the Ems Estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 45, p. 123-133, 1997.

TEIXEIRA. E. C. 2004. Notas de aula da Disciplina Dispersão de Poluentes em Corpos D'água. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

THOMSON, D. J. Criteria for the Selection of Stochastic Models of Particle Trajectories in Turbulent Flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 180, p.529–556, 1987.

TOMÉ, T.; OLIVEIRA, M. J. **Dinâmica Estocástica e Irreversibilidade**. Edusp, São Paulo, 2001. TRENHAILE, A.S. Coastal Dynamics and Landforms, Oxford University Press, 1997.

TSENG, R. S. On the Dispersion and Diffusion near Estuaries and Around Islands. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, n. 59, p. 89-100, 2002.

UFFINK, G. **Analysis of Dispersion by the Random Walk Method**. 1990. Tese. Technical University Delft.

VALLINO, J. J.; HOPKINSON, C. S. Estimation of dispersion and characteristic mixing times in Plum Island Sound Estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, n. 46, p. 333-350, 1998.

WEST. J. R.; UNCLES, R. J.; SHIONO, K. Longitudinal Dispersion Processes in the Upper Tamar Estuary. **Estuaries**. V.13, n.2, p.118-124, 1990.

WILLIAMS, B., 2006. Hydrobiological Modelling. 708 p., 2006.

WOLANSKI, E., JONES, M.; BUNT, J. S. 1980 Hydrodynamics of a tidal creekmangrove swamp system Australian. Journal of Marine Freshwater Research. V. 31, p. 431-450.

WOLK, F. Three-dimensional Lagrangian Tracer Modelling in Wadden Sea Areas. 2003. Tese. University Oldenburg.

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.