UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

FELIPE NASCIMENTO GAZE

TEMPO DE RESIDÊNCIA NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

MONOGRAFIA

VITÓRIA, ABRIL DE 2005.

FELIPE NASCIMENTO GAZE

TEMPO DE RESIDÊNCIA NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

Monografia apresentado junto ao curso de graduação em Oceanografia pela Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de oceanógrafo.

Orientador: Julio Tomás Aquije Chacaltana.

VITÓRIA, ABRIL DE 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

TEMPO DE RESIDÊNCIA NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

FELIPE NASCIMENTO GAZE

Prof. Drº Julio Tomás Aquije Chacaltana
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Drº Daniel Rigo
Examinador – DEA/CT/UFES

Prof. Drº Renato Nascimento Siqueira
Examinador – DEA/CT/UFES

VITÓRIA, ABRIL DE 2005.

AGRADECIMENTOS

Sou grato ao professor Julio, pela orientação sempre acompanhada de boa vontade, carisma e competência.

Agradeço aos professores Daniel e Renato, por aceitarem os convites de compor a banca julgadora.

Ao amigo Gustavo, pela amizade e no auxílio às condições para realizar a monografia, em especial as de contorno.

Por momentos de descontração e amizade, ofereço uma gratidão especial aos amigos Rafael Almeida, Bruno, Philipi, Pablo, Carlos Alexandre, e a amiga Karollyne (Karol).

Pelas breves, mas marcantes e felizes horas de estudos regadas à coca-cola, agradeço a Aline, Rafael Oliveira, Ana Claudia e Mariana.

Aos amigos Wolmyr, Darcy e Lyncoln.

A minha família também tenho o dever de ser eternamente grato, pela força que só ela é capaz de transmitir.

E para não ser injusto, agradeço a todos e a tudo que me acompanham no descobrimento da vida.

Eldorado

Edgar Allan Poe

Gentil, faceiro,
um cavaleiro,
sob sol e sombreado,
seguiu avante,
cantarolante,
em busca do Eldorado.

Mas o andarilho
ficou tão velho,
no âmago assombrado,
por não achar
nenhum lugar
assim como Eldorado.

E, enfim diante
de sombra errante,
parou, quando esgotado
e arguiu-lhe "onde,
sombra, se esconde
a terra de Eldorado?"

"Sobre as montanhas
da lua e entranhas
do Vale Mal-Assombrado,
vá com coragem,"
disse a miragem,
"se procuras o Eldorado".

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa representando a região entorno da Baía de Vitória e a Baía do Espírito Santo. Regiões em verde representam áreas cobertas por vegetações de mangue. 26

Figura 2. Mapa batimétrico da região da Baía do Espírito Santo. Origem dos dados: GEARH (2002). ... 27

Figura 3. Localização dos pontos de cálculo das variáveis na malha computacional. Falconer (1976). ... 30

Figura 4. Malha computacional 50 x 50 m abrangendo a região de estudo (água representada pela cor azul e terra pela cor preta). Os números em vermelho indicam as cinco condições de contorno abertas. Os pontos seguidos pelas letras A, B e C são locais utilizados para verificar o comportamento da maré dentro do domínio computacional. 33

Figura 5. Região da Baía do Espírito Santo com os números arábicos representando os vinte pontos onde foram lançado soluto. Os círculos vermelhos seguidos por algarismos romanos na saída paralela à Baía indicam os cinco pontos de controle. 36

Figura 6. Gráfico de oscilação da maré referente aos pontos A, B e C. 39

Figura 7. Situação de máximas correntes de vazante. 40

Figura 8. Situação de estofa de baixa-mar. 41

Figura 9. Situação de máximas correntes de enchente. 42

Figura 10. Situação de estofa de preamar. 43

Figura 11. Curvas de Passagem referentes ao ponto 2 de lançamento de soluto. 44

Figura 12. Curvas de Passagem referentes ao ponto 4 de lançamento de soluto. 44

Figura 13. Curvas de Passagem referentes ao ponto 7 de lançamento de soluto. 45

Figura 14. Curvas de Passagem referentes ao ponto 9 de lançamento de soluto. 45

Figura 15. Curvas de Passagem referentes ao ponto 12 de lançamento de soluto. 46

Figura 16. Curvas de Passagem referentes ao ponto 14 de lançamento de soluto. 46

Figura 17. Curvas de Passagem referentes ao ponto 16 de lançamento de soluto. 47

Figura 18. Curvas de Passagem referentes ao ponto 18 de lançamento de soluto. 47

Figura 19. Mapa de Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo. 50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **8**

2. OBJETIVOS **11**

2.1. OBJETIVO GERAL 11
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 11

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **12**

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS **15**

4.1. ESCALAS DE TEMPO 15
4.1.1. Tempo de descarga (flushing time) *15*
4.1.2. Tempo de residência estuarino *15*
4.1.3. Tempo de residência de pulso *16*
4.1.4. Idade *16*
4.1.5. Tempo de residência *16*
4.1.6. Tempo de trânsito *17*
4.2. FORMAS DE MENSURAR O TEMPO DE DESCARGA 17
4.2.1. Método de Fração de Água Doce *17*
4.2.2. Método do Prisma de Maré *18*
4.2.3. Método do Prisma de Maré Modificado *18*
4.3. EULER VS. LAGRANGE 19
4.4. MARÉS EM ZONAS COSTEIRAS 22
4.4.1. Conceito de Maré *22*
4.4.2. Importância Das Marés Em Zonas Costeiras *22*
4.4.3. Teoria das Marés em Zonas Costeiras *23*
4.4.4. Aspectos Não-Lineares da Propagação das Marés *25*

5. METODOLOGIA **26**

5.1. ÁREA DE ESTUDO 26
5.2. O MODELO DIVAST 27
5.3. IMPLEMENTAÇÃO DO DIVAST NA REGIÃO 31
5.3.1. Digitalização da Carta Náutica *31*
5.3.2. Aquisição de Dados Batimétricos *31*
5.3.3. Levantamento de Dados Oceanográficos *31*
5.3.4. Malha Computacional e Condições de Contorno Abertas *31*
5.4. PROCESSAMENTO DO DIVAST 34
5.4.1. Módulo Hidrodinâmico *34*
5.4.2. Módulo de Qualidade de Água e Curvas de Passagem *35*
5.4.3. Outras Considerações do Modelo *38*

6. RESULTADOS **39**

6.1. RESULTADOS CONCERNENTES AO MÓDULO HIDRODINÂMICO DO DIVAST 39
6.2. RESULTADOS CONCERNENTES AO MÓDULO DE QUALIDADE DE ÁGUA DO DIVAST 44
6.2.1. Curvas de Passagem de Soluto *44*
6.2.2. Tabelas com os Tempos de Residência e Concentração Média de Soluto no Tempo *48*
6.2.3. Mapa de Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo *50*

7. DISCUSSÃO **51**

7.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO NO INTERIOR DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL 51
7.2. ANÁLISE DOS DADOS REFERENTES AO MÓDULO DE QUALIDADE DE ÁGUA DO DIVAST 50
7.2.1. Curvas de Passagem de Soluto *50*
7.2.2. Distribuição do Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo *51*

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES **53**

9. REFERÊNCIAS **54**

RESUMO

O trabalho visou estudar o tempo de residência da região pertencente à Baía do Espírito Santo através do modelo computacional DIVAST (*Depth Integrated Velocities and Solute Transport*) utilizando o método euleriano de curvas de passagem de soluto. Uma malha computacional com células de 50 x 50 m, com cinco condições de contorno abertas, sendo que em duas dessas condições foram introduzidas um método de relaxamento (camada esponja), foi construída e implementada na região. Modelou-se o lançamento de soluto em vintes pontos selecionados e distribuídos no interior da área de estudo, sendo os mesmos monitorados por cinco pontos de controle (registro do movimento do soluto no tempo) postos na saída da Baía. Foram necessários vinte processamentos do modelo DIVAST (um processamento para cada ponto de lançamento de soluto). O soluto utilizado na modelagem computacional foi o sal, que funciona como um poluente conservativo, sendo lançado instantaneamente e a uma concentração de 500 ppm (partes por mil). A condição hidrodinâmica da região mostrou-se coerente e estável, indicando que as condições de contorno foram corretamente implementadas e bem adaptadas à área modelada. Em relação aos tempos de residência, as curvas de passagem indicaram que a Baía do Espírito Santo apresenta um tempo de residência relativamente elevado (10 a 21,5 dias), com duas áreas em especial bem críticas: a nordeste da Baía e a região sombreada pela Ilha do Frade. Os dados também indicaram que existe uma tendência do soluto deixar a região pelo seu lado mais a oeste, supondo que os fluxos provenientes do Canal da Passagem e do Canal de Acesso ao Porto de Vitória são os maiores responsáveis pela expulsão do soluto.

1. INTRODUÇÃO

As regiões costeiras são de suma importância para a humanidade, tanto do ponto de vista ecológico e cultural quanto do ponto de vista econômico. “Cerca de 60% da população mundial vive em um raio de até 60 km da orla litorânea e estima-se que essa proporção aumente para 75%, em 2025” (AGENDA 21, 1992).

Essas zonas, além de serem importantes para a navegação, podem abranger importantes ecossistemas, tais como mangues, estuários e recifes de corais, que são vitais para o desenvolvimento de outras atividades, como a pesca, aqüicultura e até mesmo o turismo.

Por conta das áreas costeiras serem alvos das extensivas atividades antrópicas, seus ecossistemas estão, como conseqüência, constantemente sujeitos a degradações ambientais provenientes, por exemplo, de lançamentos de efluentes industriais e domésticos, além de vazamentos de óleos de embarcações. Consoante Moberg & Rönnbäck (2002), “a pressão em ecossistemas costeiros pelo crescimento das populações, novas tecnologias e mudanças nos modos de vida é particularmente evidente em todo o trópico”. Sendo bom salientar que problemas com as áreas costeiras não são de exclusividade das regiões tropicais, e sim em todo o globo.

Quando esses impactos são maiores do que a capacidade de auto-recuperação do ambiente, comprometem seriamente a fauna e flora local, prejudicando direta e indiretamente as atividades desenvolvidas na região.

Tendo em vista a situação de degradação ambiental presenciada em várias regiões de zonas costeiras brasileiras e mundiais, é cada vez maior a preocupação para com a manutenção, preservação e recuperação desses ecossistemas, bem como para implantações de políticas e ações que possam proporcionar um desenvolvimento sustentável das regiões costeiras. Segundo Kjerfve et al (2002), “os estudos pioneiros para a proteção dos estuários e regiões costeiras foram iniciados, em 1870, quando pesquisadores escandinavos realizaram trabalhos científicos em fiordes”. Onde já atentavam para a necessidade de implementação de estudos em impactos ambientais.

Semelhante a considerável parte das cidades litorâneas brasileiras e mundiais, o município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, também sofre graves prejuízos ambientais causados pela intensa ocupação urbana, a qual é muitas vezes feita de forma desordenada.Trata-se de uma cidade de grande destaque econômico no cenário estadual e nacional, comportando portos importantes como o Porto de Tubarão e o Porto de Vitória, responsáveis por ampla parte do escoamento dos produtos comerciais da região; abriga indústrias siderúrgicas de grande porte como a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST); além disso, ante as reservas de petróleo que foram encontradas nas águas do Espírito Santo, existe uma expectativa de um fortalecimento do cenário econômico da cidade de Vitória.

Toda essa infra-estrutura comportada pela cidade de Vitória pode gerar subprodutos que ao alcançarem suas águas podem provocar impactos ambientais, como lançamentos de efluentes industriais e domésticos. Por conta disso, esse estudo pretende fornecer uma estimativa sobre o tempo de residência das águas na Baía do Espírito Santo, região costeira pertencente ao município Vitória na qual fazem parte praias importantes como a Praia de Camburi e Curva da Jurema, sendo esta última agredida por lançamento de esgoto *in natura*; o Porto de Tubarão; além de estar associada ao complexo estuarino do Canal de Acesso ao Porto de Vitória e ao Canal da Passagem.

A escala temporal denominada tempo de residência é um dos parâmetros que se tem mostrado de grande eficiência ao ser utilizado para quantificar a qualidade ambiental de corpos d'água, não somente os costeiros, como baías e estuários, mas também os rios e lagoas. Esse parâmetro tem como o objetivo determinar o tempo de duração de uma parcela d'água em algum sistema, sendo, por conta disso, de grande valia em termos ambientais. Regiões com maiores tempos de residência tendem a serem mais impactadas, por terem baixas renovações de água, a lançamentos de poluentes do que regiões com menores tempos de residência. Além disso, tempo de residência fornece uma estimativa em relação à capacidade de florações algais de um dado ecossistema, pois ele indica se as microalgas terão no ambiente um tempo de permanência suficiente para seu desenvolvimento. Ou seja, ambientes com

menores tempos de residência terão menores possibilidades de ocorrerem florações quando se comparado com os ambientes com tempos de residência mais elevados. Segundo Braunschweig (2001), tempo de residência é também importante quando se trata de processos de transporte de sedimentos. O fluxo da coluna d'água para o sedimento de materiais particulados e substâncias adsorvidas a este, depende da velocidade vertical da partícula, profundidade da água e tempo de residência. Sendo isso válido principalmente para frações finas de sedimentos, as quais possuem menores velocidades de decantação.

Esse estudo foi totalmente realizado através de modelagem computacional, onde o modelo utilizado foi o DIVAST (*Depth Integrated Velocites and Solutes Transport*). Propondo, por intermédio deste, uma quantificação do tempo de residência da Baía do Espírito Santo em relação a sua saída para o mar aberto por meio do método euleriano de curvas de passagem de soluto. Sendo o sal o soluto empregado na modelagem computacional.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esse estudo busca um maior aprofundamento em relação à variabilidade espacial sobre o tempo de residência em corpos de água rasa costeiros.

2.2. Objetivo Específico

Quantificar o tempo de residência da região pertencente à Baía do Espírito Santo por meio do modelo computacional DIVAST utilizando o método euleriano de curvas de passagem de soluto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em estudos de mecânica dos fluidos, costuma-se escolher entre dois referencias espaciais distintos: o referencial de Euler (euleriano), onde o escoamento do fluxo e as partículas por ele transportadas são descritos em função de uma posição fixa; e o referencial de Lagrange (lagrangeano), onde o referencial acompanha o fluxo, traçando a história de partículas individuais do fluido.

Os métodos de medições de tempo de residência podem ser divididos nesses dois grandes grupos: aqueles que adotam o referencial euleriano; e os que adotam o referencial lagrangeano. Nesse contexto, encontra-se a modelagem numérica, uma útil ferramenta que tem sido empregada com sucesso para mensurar parâmetros físicos dos ambientes aquáticos, em especial o tempo de residência.

Um dos primeiros modelos utilizados para medições de tempo de residência, e ainda os mais comumente encontrados, diz respeito àqueles que tomam o referencial de Euler. Um dos pioneiros é o notório *box model*, um modelo unidimensional, onde o corpo d'água é segmentado em "compartimentos" (*box*). O *box model* foi primeiramente desenvolvido por Ketchum (1951 *apud* Helder & Ruardij, 1982), nesse modelo, os limites dos segmentos eram definidos de acordo com a entrada da maré no estuário, e a troca de água entre um segmento e seus vizinhos é determinada pela razão do volume de água doce introduzida em um ciclo de maré pelo prisma de maré. Posteriormente esse modelo foi modificado em trabalhos realizados por pesquisadores como Stommel (1953 *apud* Helder & Ruardij, 1982), Zimmerman (1976 *apud* Zimmerman, 1988) e Helder & Ruardij (1982). Embora o *box model* seja um modelo antigo, é possível presenciar sua aplicação em estudos recentes, Sheldon & Alber (2003), fizeram uso do *box model* para simular o movimento de poluentes conservativos dissolvidos e quantificar seus tempos de residência no estuário do rio Altamaha através de lançamentos de traçadores nos compartimentos do modelo.

A aplicação do *box model* na Baía do Espírito Santo aparenta não ser vantajosa, pois esse modelo, por ser unidimensional, é mais bem adaptado a regiões estreitas e com baixa heterogeneidade lateral; o *box model* não leva em consideração os movimentos laterais do fluxo. Em contrapartida, ao desenvolver um trabalho, por exemplo, no Canal da Passagem ou no Canal de acesso ao Porto de Vitória, o *box model* terá chances de ter sucesso em seus resultados. Mas mesmo em relação a esses locais deve-se ter prudência, o Canal da Passagem apresenta uma grande quantidade de manguezais, os quais modificam consideravelmente a hidrodinâmica, e o Canal de acesso ao Porto de Vitória, por ter uma largura considerável, pode oferecer heterogeneidade horizontal significante, podendo tirar do *Box Model* sua eficiência diante de tais regiões.

Um outro modelo que adota o referencial euleriano é o chamado DIVAST (*Depth Integrated Velocites and Solute Transport*). Esse modelo é bi-dimensional integrado na vertical e adota, como método para resolver as equações matemáticas, o Método Numérico das Diferenças Finitas, abrangendo toda a área de estudo com uma malha composta de células quadradas. Por meio do DIVAST, Finegan & Hartnett (2002) mensuraram o tempo de residência em um embaiamento semifechado utilizando o método do coeficiente de troca 'E'. Onde o coeficiente 'E' é calculado pelo valor do volume e posição do jato de água entrando na maré vazante, o volume do fluxo de água na maré vazante, e o volume comum a ambos os fluxos.

Kim et al (2003), realizaram um trabalho de quantificação do tempo de residência no estuário do rio Acushnet, o qual foi dividido em duas partes: estudos de campo; e estudos através de modelagem computacional. O estudo de campo consistiu em lançar corante no corpo d'água numa taxa de 21 mg/s em um período de cinco dias e realizar um monitoramento da distribuição da mancha provocada pelo corante. O estudo através da modelagem computacional utilizou-se do método euleriano de simulação de lançamento de corante na água, fazendo-se uso do modelo BFMASS (*Boundary Fitted Pollutant Transport*), um modelo tri-dimensional componente do modelo WQMAP (*Water Quality Analysis and Mapping Package*), que soluciona as equações matemáticas através do Método Numérica das Diferenças Finitas, e

possui células da malha computacional que se amoldam às linhas de costa da região. Além disso, através de métodos computacionais, quantificou-se a escala de tempo denominada tempo de descarga (*flushing time*) (ver seção 4.1.1.) de duas formas distintas: pelo método do prisma de maré modificado; e por meio do método de fração de água doce (ver seção 4.2.1.).

Os modelos que utilizam o Método Lagrangeano de Trajetória de Partículas (MLTP), são aqueles, segundo Dimou (1993), "em que a massa é transportada como partículas discretas". Ou seja, como partículas individuais. Cosoante Wilbur (2000), "Modelos de trajetória de partícula simulam dois movimentos distintos: advectivo e randômico (ou turbulento). Movimento advectivo corresponde a uma solução hidrodinâmica determinística. O movimento randômico ou turbulento representa o comportamento difusivo e dispersivo. Em complexos estuarinos e rios, esse movimento turbulento é causado principalmente por cisalhamento do fluxo e geralmente representado por uma distribuição Gaussiana". Normalmente, usam-se, nos modelos que utilizam o MLTP, um módulo que simula a difusividade do fluido, como por exemplo, o "caminho aleatório" (*random walk*).

Modelos que utilizam o MLTP são normalmente bi ou tri-dimensional. Weitbrecht et al (2002), por exemplo, utilizaram, além de experimentos laboratoriais, um modelo bi-dimensional com o MLTP implantado para determinar a influência de zonas estagnadas na hidrodinâmica de rios naturais, quantificando parâmetros como o tempo de residência.

Wolk (2003) utilizou o MLTP implementado no modelo GETM (*General Estuarine Transport Model*) para avaliar o tempo de residência da Bacia de Langeoog. O GETM corresponde a um modelo de turbulência baroclínico tri-dimensional que utiliza o método de discretização espacial das Diferenças Finitas. Nesse estudo, o domínio é modelado inicialmente com um certo número de partículas que representam o volume de água da Bacia no tempo zero $(t_0 = 0)$. Cada célula da malha contém um número de partículas determinado de acordo com seu volume. O tempo de residência de cada célula representa, então, o tempo em que suas partículas abandonam o domínio da malha computacional.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Escalas de Tempo

É comum, nas literaturas, encontrar diversas escalas temporais utilizadas em estudos hidrodinâmicos. Muitas delas, embora com denominações distintas, representam um mesmo conceito. Com o intuito de evitar entendimentos errôneos, esse tópico tem como objetivo ilustrar algumas dessas principais escalas: tempo de descarga; tempo de residência estuarino; tempo de residência de pulso; idade; tempo de residência; e tempo de trânsito. O presente trabalho baseia-se na definição apresentada na secção 4.1.5. (tempo de residência).

4.1.1. Tempo de descarga (*flushing time)*

É considerada uma escala global que descreve as características gerais de troca de um corpo d'água sem a identificação dos processos físicos básicos, assim como a importância relativa de tais processos ou sua distribuição espacial. Geyer et al. (2000) define tempo de descarga como “a razão de massa de um escalar em um reservatório pela taxa de renovação do escalar”. Tempo de descarga pode ser mensurado como o volume de água em um sistema definido (V) dividido pela taxa de fluxo volumétrico (vazão) (Q) através do sistema: $T_f = V / Q$.

Baseado em Fischer et al. (1979), em um estado conservativo, para quantidades associadas com a água, temos que tempo de descarga pode ser definido alternativamente como: $T_f = M / F$; onde M é a massa do escalar no domínio de interesse e F o fluxo do escalar através do domínio. Aplicação destas definições requer estimativa tanto do volume do sistema (ou sua massa contida) e taxa de troca através do sistema (fluxo de volume ou de massa).

4.1.2. Tempo de residência estuarino

Segundo Miller e McPherson (1991), “tempo de residência estuarino é o tempo para remover uma fração especificada de partículas inicialmente distribuídas uniformemente em todo o estuário”.

4.1.3. Tempo de residência de pulso

É definido, conforme Miller e McPherson (1991), “como o tempo para remover uma fração específica de partículas introduzida dentro de uma sub-região do estuário, geralmente a mais a montante”.

4.1.4. Idade

Diferentemente ao tempo de descarga, idade é exclusiva para cada parcela d'água que entra no domínio do sistema. Zimmerman (1988) define idade como "o tempo que uma parcela d'água tem despendido desde sua entrada no estuário através de uma das bordas". A idade de uma parcela d’água representa a sua “história” no sistema. Essa escala de tempo depende do ponto de partida da parcela analisada, por exemplo, se tal parcela é de água salgada ou doce. Inerente a escala de tempo da idade é o reconhecimento da heterogeneidade espacial: partículas de diferentes localizações dentro do sistema apresentam idades igualmente distintas. Segundo Kratzer & Biagtam (1997), “ao considerar um pulso de tinta liberado em um rio sem influências da maré, de estado aproximadamente constante, e unidimensional, o pulso de tinta viaja rio abaixo, a tintura é observada em diferentes estações com diferentes tempos”. Conseqüentemente, a idade da massa de tinta medida em uma localização a jusante será maior do que uma massa de tinta medida em uma estação mais a montante. Em adição, dispersão é o ponto de partida para o espalhamento. Deste modo, em um dado lugar, alguma massa chega ter uma maior idade, comparada à idade média, durante a chegada de outra massa tendo uma menor idade do que a idade média. No exemplo de Kratzer & Biagtam (1997), toda a massa da tintura entra no sistema ao mesmo tempo. Em sistemas reais, massa pode entrar continuamente; por conseguinte, uma parcela em uma localização específica pode conter massa com uma distribuição da idade.

4.1.5. Tempo de residência

É o intervalo de tempo médio depois que todas parcelas constituintes de uma dada massa tem abandonado o sistema, por exemplo, um estuário ou uma baía. Dronkers e Zimmerman (1982), definiram tempo de residência como "o tempo alcançado para alguma parcela de água, por exemplo, deixar a lagoa através de sua saída com o mar". Em processos de misturas dinamicamente

passivos o tempo de residência independe da origem das parcelas de água (água salgada ou doce). Segundo Zimmerman (1988), "no simples exemplo de um estuário com uma saída individual para o mar, e.g., $x = 0$, e uma posição individual da descarga de água doce, e.g., $x = L$, cada posição na bacia é caracterizada por três escalas de tempo locais: o tempo de residência, $t_r(x)$, a idade local da água do mar, $t_a(x,0)$, e a idade local da água doce, $t_a(x, L)$."

Tempo de Residência funciona como um complemento da idade. Enquanto a idade é o tempo requerido para uma parcela viajar de uma borda para uma localização específica dentro do corpo d'água (história); tempo de residência é quanto uma parcela, partindo de uma localização específica dentro do corpo d'água, permanecerá no domínio até a sua saída para o mar (futuro).

4.1.6. Tempo de trânsito

É definido, consoante Takeoka (1984), "como o intervalo de tempo transcorrido entre a chegada da parcela na baía e o momento de sua saída". Sendo entendido como o somatório das escalas de tempo correspondentes a idade e o tempo de residência: $t_t = t_a + t_r$.

4.2. Formas de Mensurar o Tempo de descarga

O tempo de descarga pode ser calculado de várias formas distintas, esse tópico visa comentar sobre algumas dessas formas:

4.2.1. Método de Fração de Água Doce

Segundo Dyer (1997), a concentração média de água doce de algum segmento de um corpo d'água é:

$$f = \frac{S_s - S_n}{S_s} \tag{4.1}$$

onde S_s representa a salinidade da água do mar e S_n a salinidade média do segmento de um estuário ou baía. O volume total de água doce V_f é encontrado pela multiplicação da concentração de fração de água doce f pelo volume do segmento. Assim, o tempo de descarga pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$T_f = \frac{fV}{R} \tag{4.2}$$

Esse método assume que a mistura na baía é completa (mistura completamente turbulenta).

4.2.2. Método do Prisma de Maré

Esse método aplica-se melhor a baías e estuários com baixa a nenhuma estratificação salina vertical. Ele assume que todo o volume de água salgada introduzido no corpo d'água pela maré enchente é totalmente misturado com o volume de água doce existente no local, e que todo esse volume misturado deixa a baía durante a maré vazante. Esse método tem como base a fórmula:

$$T_f = \frac{TV}{(V_s + V_d)} \tag{4.3}$$

onde T é o período da maré; V é o volume da baía ou da parte analisada; V_s o volume de água salgada; e V_d o volume de água doce. Os volumes combinados $V_s + V_d$ representam a diferença entre a preamar e a baixamar, denominado de "prisma de maré".

Segundo Dyer (1997), "o tempo de descarga calculado desse modo fornece valores consideravelmente mais baixos do que os cálculos através de outros métodos". O tempo calculado é de certa forma subestimado, pois na realidade dificilmente encontram-se regiões estuarinas e costeiras que se comportam conforme as suposições impostas pelo método. Segundo Kjerfve et al (2002), "a água doce não se mistura completamente com a do mar durante a maré enchente ou o ciclo completo de maré; a região costeira não se comporta como um sumidouro perfeito e uma parcela de água que sai da zona estuarina pode retornar para o estuário no ciclo seguinte da maré".

4.2.3. Método do Prisma de Maré Modificado

Ketchum (1951 *apud* Dyer, 1997; Kim et al, 2003; e Kjerfve et al, 2002) "modificou o método do prisma de maré pela divisão do estuário dentro de segmentos, onde os comprimentos de cada segmento são determinados pela excursão de uma partícula de água durante um ciclo de maré, mais apropriado

do que uma divisão arbitrária. A segmentação assume que na maré enchente o volume da maré baixa de um segmento desloca completamente a água do próximo segmento a montante, fazendo com que o volume da maré baixa do segmento a jusante torne o volume da maré alta do segmento a montante". Outra suposição do método é a ocorrência de mistura completa dentro do volume de cada segmento.

Segundo Kim et al (2003), o método do prisma de maré requer quatro etapas:

1 – Segmentar o estuário conforme a primeira suposição descrita acima. A segmento mais interno do estuário terá um prisma de maré igual ao volume do fluxo do rio.

$$P_0 = R \tag{4.4}$$

onde P_0 representa o prisma de maré do segmento mais interno; e R a descarga do rio em um ciclo de maré. O volume da maré baixa nessa secção (V_0) é o volume da água entre marés P_0 (definido como sendo igual a R). O limite a jusante do próximo segmento (em direção ao mar) é estabelecido tal que seu volume da maré baixa (V_1) é definido por:

$$V_1 = P_0 + V_0 \tag{4.5}$$

P_1, analogamente, representa o volume entre marés que, na maré alta, reside sobre V_1. Segmentos sucessivos são definidos de maneiras idênticas a esse segmento, de tal modo que:

$$V_i = P_{i-1} + V_{i-1} \tag{4.6}$$

Conseqüentemente, cada segmento contem, na maré alta, o volume de água contido em sua secção vizinha a jusante na maré baixa.

2 – Calcular a razão de troca (r_i) por:

$$r_i = \frac{P_i}{P_i + V_i} \tag{4.7}$$

onde a razão de troca (r_i) para um segmento é a medida de uma porção de água associada com esse segmento que é combinada com os segmentos adjacentes durante cada ciclo de maré.

3 – Cálculo do tempo de descarga do segmento através a equação:

$$T_i = \frac{1}{r_i} \tag{4.8}$$

onde T_i é o tempo de descarga do segmento medido nos ciclos de marés.

4 – Calcular o tempo de descarga total através da soma dos tempo de descarga individuais de cada segmento:

$$T_f = \sum_{i=1}^{n} T_i \tag{4.9}$$

onde T_f é o tempo de descarga total; e n o número de segmentos.

4.3. Euler Vs. Lagrange

Fisicamente, a diferença entre um tratamento euleriano e um lagrangeano diz respeito aos referenciais espaciais adotados. Segundo Cheng (1988), "uma aproximação euleriana trata todas as variáveis dependentes como funções do tempo e de coordenadas fixadas, enquanto um tratamento lagrangeano considera as variáveis dependentes como funções do tempo e de suas posições iniciais. Para não se perder alguma informação pertinente em um tratamento lagrangeano, é necessário prescrever a trajetória da massa na qual as variáveis dependentes estão associadas".

As equações de conservação em escoamentos de fluidos podem ser derivadas em relação a um volume de controle infinitesimal. Onde se torna possível calcular a taxa de mudança temporal de um parâmetro C nesse volume de controle da seguinte maneira:

$$\frac{DC}{Dt} = taxa\ temporal\ de\ mudança\ de\ C\ seguindo - se\ a\ mesma\ massa\ d'água\ (lagrangeano)$$

A expressa acima refere-se ao referencial lagrangeano, o qual utiliza a notação da derivada total para C (qualquer variável dependente).

Assumindo que o fluxo varia em coordenadas eulerianas fixas, o parâmetro C pode ser representado por $C(x, y, z, t)$, sendo (x, y, z) as coordenadas Cartesianas e t o tempo. Uma mudança em C devido a pequenas mudanças espaciais $d\bar{x} = (dx, dy, dz)$ e no tempo dt pode ser escrita como:

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} \qquad \text{ou}$$

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C \qquad (4.10)$$

onde o termo do lado esquerdo da equação refere-se à taxa temporal de mudança lagrangeana; e os termos do lado direito a taxa total de mudança euleriana, sendo que o primeiro é a taxa temporal de mudança local, e os três termos restantes a taxa convectiva de mudança. (u, v, w) são as componentes da velocidade.

Consoante Wolk (2003), a equação de advecção-difusão pode ser escrita de duas formas, a euleriana:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}C) = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v' \frac{\partial C}{\partial z}\right), \qquad (4.11)$$

e a forma lagrangeana:

$$\frac{DC}{Dt} + C\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial}{\partial x}\left(A_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v' \frac{\partial C}{\partial z}\right) \qquad (4.12)$$

onde assumiu-se fluido compressível, sendo A_x *e* A_y os coeficientes de difusividade turbulenta horizontal, e v' o coeficiente de difusividade turbulenta vertical.

Segundo Cheng (1988), “o contraste das práticas eulerianas e lagrangeanas são também usadas em observações de campo. Medições *in situ* de corrente, temperatura, salinidade, parâmetros de qualidade de água, etc. são típicos exemplos de mensurações eulerianas. Lançamentos de corantes e a subseqüente trajetória da mancha do corante pelo monitoramento dos movimentos do centro de massa da mancha e pelo monitoramento da taxa de

espalhamento do corante com respeito a seu centro de massa, ou o lançamento de bóias e derivadores são típicos exemplos de mensurações lagrangeanas".

Maiores detalhes em relação aos referenciais eulerianos e lagrangeanos em Cheng (1988) e Wolk (2003).

4.4. Marés em Zonas Costeiras

4.4.1. Conceito de Maré

Segundo Pond & Pickard (1989), "a maré é o nome dado à subida e descida alternada do nível do mar com um período médio de 12,4 h (24,8 h em alguns locais)". As marés de período igual a 12,4 h são as chamadas marés semidiurnas, aquelas nas quais o período é de 24,8 h são as marés diurnas. "As marés são conseqüência da ação simultânea das forças gravitacionais da Lua e do Sol" (Pond & Pickard, 1989).

São consideradas como ondas longas de águas rasas, visto que seu comprimento de onda é da ordem de centenas de quilômetros e a profundidade média dos oceanos é de aproximadamente 4 a 5 Km. Segundo Dean & Dalrymple (1991), quando a relação abaixo é satisfeita:

$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$, com h representando a profundidade e λ o comprimento da onda,

temos uma onda de água rasa. Portanto, a maré em qualquer zona do oceano, comporta-se como uma onda de água rasa, tendo um padrão bastante peculiar quando entra na região da plataforma continental, como será visto nos tópicos abaixo.

Maiores detalhes sobre a teoria de ondas e marés em Dean & Dalrymple (1991).

4.4.2. Importância Das Marés Em Zonas Costeiras

"A subida e descida do nível da água pela maré e as associadas correntes oscilatórias de enchente e vazante são os aspectos mais óbvios dos movimentos da água em muitas regiões costeiras e estuários" (Uncles, 1988). Segundo Fischer (1979), "os ambientes costeiros são regiões onde efeitos de maré e correntes sobrepõem-se a efeitos de rios, fazendo com que processos

de escoamento assumam características bastante complexas". Além da importância hidrodinâmica, as marés são fundamentais a respeito da ecologia e qualidade de água de um ambiente. As tensões no leito provocado pelas marés determinam quais comunidades bentônicas habitarão a região além de selecionarem os sedimentos. Essa tensão também provoca turbulência vertical, afetando os perfis verticais de temperatura, salinidade e outros solutos. E os movimentos oscilatórios das marés podem agir tanto em sentido de auxiliar na expulsão de poluentes da zona costeira; quanto o inverso, ou seja, proporcionando que o poluente se conserve por mais tempo no local.

Kreeke (1988), atenta para a importância das marés em relação ao tempo de residência de regiões estuarinas: "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 pelo outra metade do ciclo (vazante). Esse movimento tem uma séria implicação no tempo de residência de poluentes dispostos em estuários e na deposição dos sedimentos, já que esses constituintes podem retornar com a maré enchente".

4.4.3. Teoria das Marés em Zonas Costeiras

Consoante Uncles (1988), as equações com a média na profundidade descrevendo elevações de marés e velocidades podem ser escritas da seguinte forma:

Equação da Continuidade: $\partial_t \zeta = -\nabla \cdot (H\mathbf{v})$ (4.13)

Equação do Momentum:

$$\partial_t \mathbf{v} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} - g\nabla\zeta - \mathbf{f}x\mathbf{v} - D\mathbf{v}|\mathbf{v}|/H - \frac{1}{2}gH\nabla \ln \rho + N\nabla^2 \mathbf{v} \quad (4.14)$$

onde os efeitos meteorológicos são desprezados, ζ é a elevação da superfície, $\mathbf{v}$ o vetor velocidade, H a profundidade total da coluna d'água $(h+\zeta)$, ρ é a densidade da água do mar, $\mathbf{f}$ o vetor Coriolis, g é a aceleração devido à gravidade, D é o parâmetro de fricção, e N representa o coeficiente de viscosidade turbulenta. Além, $\nabla = (\partial_x, \partial_y, 0)$, $\mathbf{v} = (u, v, 0)$ e $\mathbf{f} = (0, 0, \mathrm{f})$,

sendo que $\mathrm{f} = 2\Omega \sin\phi$ e indica o parâmetro de Coriolis (com ϕ representando a latitude e Ω a velocidade de rotação angular da Terra).

Entretanto, algumas suposições, quando levadas em consideração, simplificam as equações acima. Assumindo pequenas oscilações da superfície e profundidade uniforme $(\zeta << h,\ \ h = constante)$, velocidade transversal igual a zero, e desprezando os efeitos devido a fricção, aceleração de Coriolis, gradientes de densidade, e advecção, as equações reduzem para:

Continuidade: $\partial_t \zeta = -h\partial_x u$ (4.15)

Momentum: $\partial_t u = -g\partial_x \zeta$ (4.16)

Em uma baía de dimensões retangulares, cujo limite superior $(x = 0)$ é fechado $(u = 0)$, e o limite inferior $(x = \ell)$ é forçado por uma maré oceânica $[\zeta(x = \ell) = \zeta_t \cos\omega t]$, a solução torna-se:

$$\zeta = \zeta_t (\cos kx / \cos k\ell)\ \cos\omega t\,; \tag{4.17}$$

$$u = \zeta_t c(\sin kx / \cos k\ell)\ \cos(\omega t - \pi / 2) / h \tag{4.18}$$

onde $k = 2\pi / \lambda$, $\omega = 2\pi / T$, e $c = \sqrt{gh}$, sendo que k representa o número de onda; λ o comprimento da onda; T o período da onda; e c a velocidade de fase $(c = \lambda / T)$.

Em baías menores que $\lambda / 4$, desconsiderando o efeito da fricção, a elevação e a descida da água pelas marés alta e baixa respectivamente, ocorrem simultaneamente em toda a extensão da baía e coincide com o instante em que a direção das correntes se invertem. Nesse caso, as elevações e correntes estão 90 º fora de fase.

No caso de baías com maiores extensões, há linhas nodais $(\zeta = 0)$ e as ondas de maré ressoam quando os comprimentos da baía são tais que:

$$l = (2n - 1)\lambda / 4, \qquad n = 1, 2, 3, ... \tag{4.19}$$

Em grandes regiões e em estudos de longo tempo, ou ainda dependendo da precisão desejada frente à realidade, a influência da força de Coriolis é importante e deve ser incorporada ao estudo, permitindo balancear as inclinações transversais à superfície:

$$\partial_t \zeta = -h\partial_x u, \quad \partial_t u = -g\partial_x \zeta, \quad \mathrm{f}u = -g\partial_y \zeta \tag{4.20}$$

4.4.4. Aspectos Não-Lineares da Propagação das Marés

Segundo Uncles (1988), "as elevações e correntes no estuário não são ondas senoidais perfeitas, mas exibem distorção ou assimetria entre as correntes e elevações das enchentes e vazantes". Isso ocorre devido ao surgimento de marés adicionais (*overtides*), que são os harmônicos de marés maiores do que o harmônico da a maré principal. "Normalmente para a maré M_2, a primeira maré adicional é a M_4 (duas vezes a freqüência de M_2) é a causa mais importante da assimetria" (Uncles, 1988). Onde M_2 representa a componente da maré lunar semidiurna (geralmente a mais importante componente da maré e de período igual a 12,4 h), e M_4 é o resultado da geração não-linear local e da propagação da componente M_2 a partir da plataforma continental (região de baixa profundidade).

Outro efeito dinâmico observado quando se introduz a não linearidade na teoria das marés, é a chamada "Deriva de Stokes". Na teoria linear, pelo fato da maré ser uma onda senoidal perfeita, uma partícula de água sempre volta para o mesmo local de origem ao final de um ciclo de maré. Entretanto, quando se leva em consideração a não-linearidade das marés, é observado, ao final de um ciclo de maré, um pequeno desvio espacial de uma dada partícula de água em relação a sua posição inicial, conhecia como Deriva de Stokes.

Maiores detalhes em relação à dinâmica das marés em zonas costeiras em Uncles (1988).

5. METODOLOGIA

5.1. Área de Estudo

O estuário da ilha de Vitória é composto pela Baía do Espírito Santo, o Canal da Passagem e a Baía de Vitória (Figura 1). O movimento das águas deste complexo sistema estuarino é governado pela Maré, tendo como principal componente a M_2 (componente lunar semidiurna de período igual a 12,4 h). A região de estudo é a Baía do Espírito Santo, que tem uma extensão típica de 5Km e alturas de marés de 40cm a 160 cm respectivamente na quadratura e sizígia, como observado no trabalho realizado na região por Rocha (2000).

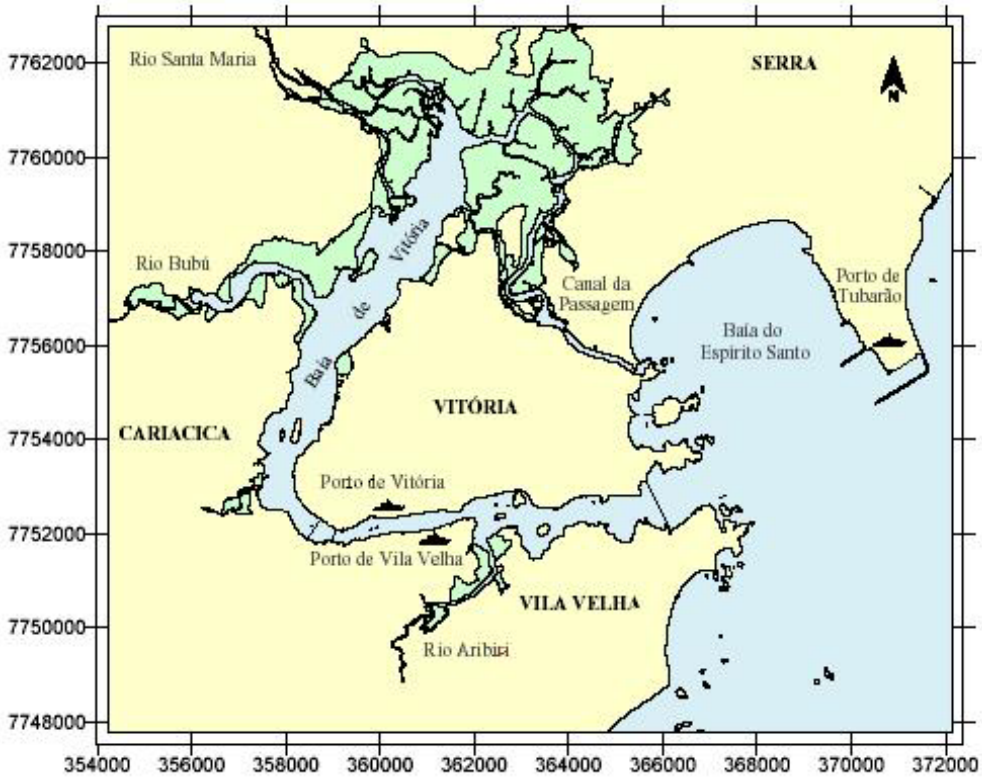

Figura 1. Mapa representando a região entorno da Baía de Vitória e a Baía do Espírito Santo. Regiões em verde representam áreas cobertas por vegetações de mangue (DHN, 2002).

Em relação a batimetria da região (Figura 2), Albino et al (2001) aponta que "a Baía do Espírito Santo apresenta moderada a baixa declividade, diminuindo a medida em que se aproxima da linha de costa, sendo que as cotas batimétricas

da Praia de Camburi longitudinalmente rumo a Ponta de Tubarão decrescem".

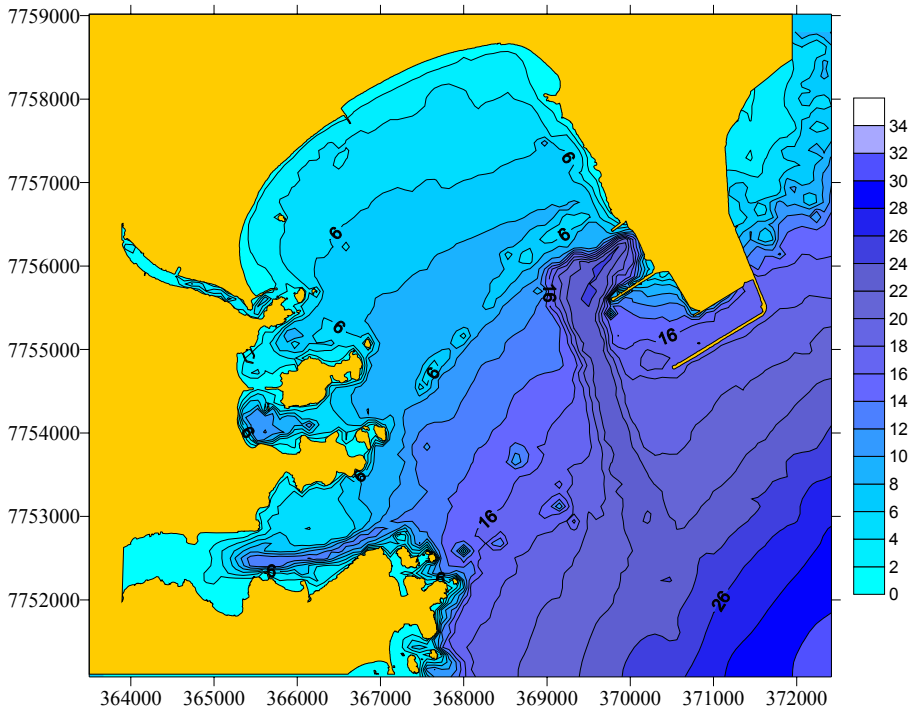

Figura 2. Mapa batimétrico da região da Baía do Espírito Santo. Origem dos dados: GEARH (2002).

5.2. O Modelo DIVAST

O DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*) foi desenvolvido pelo britânico Falconer (1976). Tal modelo é do tipo bidimensional horizontal integrado na vertical – 2DH, descrito em linguagem FORTRAN 77. Essa modelagem numérica baseia-se nos princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento.

Segundo Falconer (1976), "o modelo DIVAST é um modelo bi-dimensional. Tais modelos são válidos quando:

- o escoamento é predominantemente horizontal com grande mistura vertical;

- ou quando as variações verticais no escoamento são insignificantes".

Essas condições podem ser encontradas em estuários não estratificados e em áreas costeiras com profundidades pequenas comparadas ao domínio horizontal do modelo.

Considerando que o complexo estuarino da Ilha de Vitória é considerado raso e do tipo fracamente estratificado a verticalmente misturado, o modelo DIVAST pode ser aplicado com confiabilidade.

Como é salientado por Castro (2001), "as Equações da Continuidade, do Momentum e do Transporte de Solutos podem ser integradas na vertical fazendo-se uso das hipóteses de onda longa e de pressão hidrostática, reduzindo, assim, a dimensionalidade do problema". Além disso, utiliza-se a hipótese do comprimento de mistura de Prandtl, que trata de explicar as tensões turbulentas. Sendo que essa hipótese requer um pequeno esforço computacional.

Segundo Falconer (1976), as equações que são utilizadas pelo DIVAST, já integradas na vertical são escritas da seguinte maneira:

<u>Equação da Continuidade:</u> $$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = q_m \qquad (5.1)$$

onde η é a elevação da superfície da água; UH e VH são as vazões por unidade de largura $\left(m^3 / s / m\right)$ nas respectivas direções x e y.

<u>Equações da Conservação do Momentum:</u>

Na Direção x:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \beta p U}{\partial x} + \frac{\partial \beta p V}{\partial y} = fq - gH\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$
$$- \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left[2\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial y} \right] \qquad (5.2)$$

Na Direção y:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \beta q U}{\partial x} + \frac{\partial \beta q V}{\partial y} = -fp - gH\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$
$$- \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left[\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right] \qquad (5.3)$$

onde temos que $p(=UH)$ e $q(=VH)$; β é um fator de correção do momentum para um perfil vertical de velocidade não-uniforme; f é o parâmetro de Coriolis; g é a aceleração gravitacional; H a profundidade total da água; ρ_a a massa específica do ar; ρ a massa específica do fluido; C o coeficiente de rugosidade de Chezy; C_w coeficiente adimensional de resistência ar/fluido; ε significa a viscosidade turbulenta média na profundidade; e W_x, W_y as componentes de velocidade do vento na superfície em relação às direções x e y respectivamente.

<u>Equação de Conservação de Soluto:</u>

$$\frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{\partial HUS}{\partial x} + \frac{\partial HVS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left[D_{xx}H\frac{\partial S}{\partial x} + D_{xy}H\frac{\partial S}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[D_{yx}H\frac{\partial S}{\partial x} + D_{yy}H\frac{\partial S}{\partial y}\right] + \Phi_s \tag{5.4}$$

onde S é a concentração de soluto na profundidade média (unidade/volume); $D_{xx}; D_{xy}; D_{yx}; D_{yy}$ os coeficientes de dispersão-difusão da profundidade média nas direções x e y respectivamente (m^2/s); Φ_s função que representa fontes, termos de decaimento ou decréscimo do soluto.

As equações matemáticas são pelo DIVAST resolvidas adotando-se o Método Numérico de Diferenças Finitas. Neste método usa-se uma malha retangular com células quadradas. É possível também a adoção de malhas irregulares, mais isso demandaria um esforço computacional extra e, conseqüentemente, e perda da simplicidade do método.

Segundo Martin & Mc Cutcheon (1999), “no método numérico de diferenças finitas, as Equações Diferenciais Parciais (EDP’s) são substituídas por Equações em Diferenças Finitas (EDF’s) através de sua expansão em Séries de Taylor truncadas. Quanto mais termos tiver a série, mais precisa será a estimativa. Além disso, a análise do erro de truncamento, da consistência e da estabilidade, definirá se a solução numérica obtida terá uma boa aproximação. O erro de truncamento (ET) é definido como a diferença entre a solução da

equação diferencial parcial e a solução da equação em diferenças finitas. A consistência refere-se à aproximação do sistema contínuo em um sistema discreto. Um método numérico será consistente se a diferença entre a equação diferencial parcial e equação em diferenças finitas desaparecer quando a malha for refinada, isto é, $\lim_{\Delta x \to 0}(EDP - EDF) = \lim_{\Delta x \to 0}(ET = 0)$, onde Δx é o comprimento da célula da malha".

"O tipo particular de esquema, de diferenças finitas, utilizado no DIVAST é baseado no *Alternating Direction Implicit Method* (método implícito da direção alternada), ou ADI, técnica que envolve a subdivisão de cada passo de tempo em dois meio passos 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, enquanto que as outras variáveis são representadas explicitamente. Similarmente, para o segundo meio passo de tempo, a elevação da água η e a componente V da velocidade são solucionadas implicitamente na direção y, com as outras variáveis sendo representadas explicitamente. Com as condições de contorno incluídas, as equações em diferenças finitas resultantes para cada passo de tempo são solucionadas usando-se o método de eliminação de Gauss e substituição anterior (ou algoritmo de Thomas)". (Falconer, 1976).

No DIVAST, a elevação, e a concentração de soluto são avaliados no centro da célula da malha computacional; e a velocidade no centro dos lados da célula, nas direções x e y; e as profundidades são especificadas no centro de cada lado da célula. Conforme a Figura 3 abaixo:

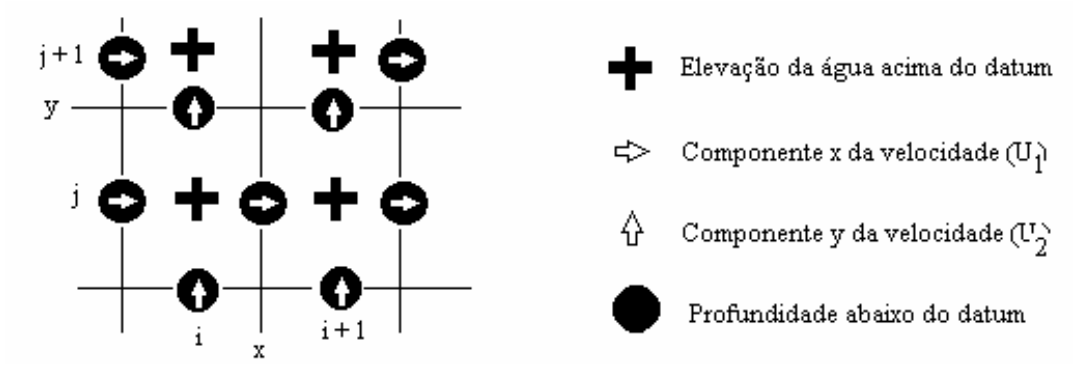

Figura 3. Localização dos pontos de cálculo das variáveis na malha computacional. Falconer (1976).

5.3. Implementação do DIVAST na Região

5.3.1. Digitalização da Carta Náutica

Para se representar uma região em estudos computacionais, há uma necessidade de realizar uma digitalização da carta pertencente à região de interesse. O presente estudo não se ocupou dessa etapa, tendo em vista que a região pertencente à Baía do Espírito Santo já se encontrava digitalizada através da carta náutica da Marinha do Brasil número 1401 (DHN, 2002).

5.3.2. Aquisição de Dados Batimétricos

Os dados batimétricos que serão utilizados pelo modelo DIVAST como uma condição de contorno de fundo, foram baseados em estudo desenvolvido por Rigo (2002) em parceria com o Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos (GEARH), como pode ser observado na Figura 2.

5.3.3. Levantamento de Dados Oceanográficos

A grande importância desse levantamento foi na determinação de quais seriam os valores adequados (elevação de maré e velocidade) a serem lançados nas condições de contorno abertas da malha computacional (ver seção 5.3.4.).

Esses dados estão disponíveis em trabalhos de campo realizados através do uso de correntógrafos em certas regiões da Baía em conjunto com o GEARH: a exemplo do estudo sobre a hidrodinâmica e o transporte de solutos na Baía do Espírito Santo (Rocha, 2000); e do estudo conduzido por Rigo (2004), o qual fez uma modelagem computacional usando o DIVAST abrangendo toda a região estuarina da cidade de Vitória.

5.3.4. Malha Computacional e Condições de Contorno Abertas

A malha computacional adotada pelo estudo apresenta um espaçamento das células de 50 x 50 m (Figura 4), sendo o eixo x composto por 176 células e o eixo y composto por 152 células.

Segundo Martin & Mc Cutcheon (1999), “muitos modelos aplicados a regiões costeiras têm apresentado resultados não-satisfatórios em função da utilização de inadequadas condições de contorno. Modelos numéricos de hidrodinâmica são mais sensíveis à escolha das condições de contorno do que a definição de outros parâmetros, tais como coeficientes de rugosidade e de viscosidade”.

Ao longo dos contornos abertos de modelos hidrodinâmicos aplicados em regiões costeiras, duas condições são utilizadas: elevação de maré e/ou velocidade (fluxo). Martin & Mc Cutcheon (1999), atentam que "estudos têm demonstrado que a correta escolha entre condições de fluxo e elevação de maré em contornos abertos tem se mostrado determinante no sucesso da calibração de modelos hidrodinâmicos. Adotando como condição de contorno a elevação da maré, esta deve estar bem alinhada com a onda de maré que atinge a região a ser modelada. Além disso, alguns autores recomendam que as condições de contorno contendo elevação de maré estejam longe de regiões com fortes variações de relevo submarino. No caso da adoção de fluxo como condição de contorno em canais estreitos, a orientação da malha também pode causar problemas, se elas não estiverem perpendiculares ao fluxo principal".

Atentando-se então para a importância da correta escolha e implementação de uma condição de contorno em modelos hidrodinâmicos de águas rasas, cinco condições de contorno abertas necessitaram serem satisfeitas para o presente trabalho (Figura 4).

Seguindo a Figura 4, na condição de contorno aberta representada pelo número 1, a condição escolhida foi uma de elevação de maré. Considerou-se, para a elevação, apenas o harmônico M_2 da maré (lunar semidiurna), de período igual a 12,4 h e amplitude de 70 cm, o que, como pode ser observado em Rocha (2000), é uma elevação típica de uma situação de sizígia.

Nas condições de contorno de números 2 e 3 (Figura 4), adotou-se contornos fechados, ou seja, não existe fluxo nem saindo nem entrando por esses contornos. Essa adoção é justificada pela falta de dados reais referentes a fluxos normais a esses contornos para servirem de parâmetros. Além de que, o objetivo principal é focado na simulação da onda de maré entrando na Baía do Espírito Santo.

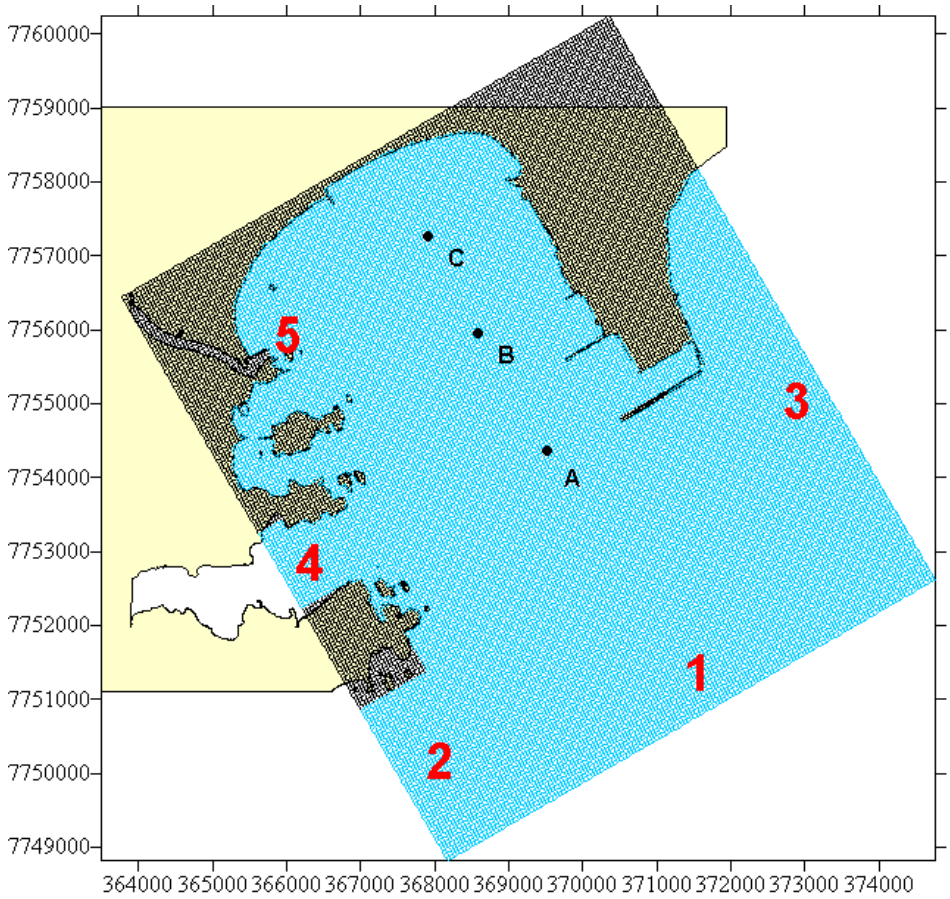

Figura 4. Malha computacional 50 x 50 m abrangendo a região de estudo (água representada pela cor azul e terra pela cor preta). Os números em vermelho indicam as cinco condições de contorno abertas. Os pontos seguidos pelas letras A, B e C são locais utilizados para verificar o comportamento da maré dentro do domínio computacional.

Para as condições de contorno abertas de números 4 e 5 (representando respectivamente o canal de acesso ao Porto de Vitória e o Canal da Passagem), foi implementado o que chamamos “camada esponja”, afim de simular o fluxo e “amortecer” as ondas que entram, visando diminuir a reflexão da onda de maré dentro do domínio computacional. Para o canal do Porto de Vitória lançou-se um valor de velocidade igual a 0,5 m/s e para o Canal da Passagem, esse valor de fluxo foi de 0,7 m/s, sendo ambos os valores baseados em resultados de campanhas de campo utilizando correntógrafos realizadas por Rocha (2000).

A camada esponja consiste de um método de relaxamento que, segundo Palma & Matano (1998), “são métodos que visam à restauração da solução numérica próxima ao contorno aberto para alcançar um estado de referência minimizando perturbações indesejáveis”. Por sua vez, a camada esponja, consoante Palma & Matano (1998), “restaura as variáveis prognosticadas para um estado de referência dentro de regiões especificadas”.

Esse método de relaxamento amortiza a solução do domínio em uma faixa próxima ao contorno a valores especificados (valores externos conhecidos ou zero), através da especificação de um coeficiente que varia ao longo da faixa escolhida, de 1 (contorno) a 0 (limite interno da camada):

$$\begin{aligned} &\phi = (1-\alpha) * \phi_{(in,j)} + \alpha * \phi_{ext}, \; onde \\ &\alpha = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\pi \frac{in}{x(i,j)}\right)\right) \\ &in = 1 \ldots \mathrm{M}, \; sendo \; \mathrm{M} \; o \; número \; de \; células \; utilizadas \end{aligned} \tag{5.6}$$

sendo ϕ a variável prognosticada e α o coeficiente variando de 1 a 0.

No caso de sua implementação nos dois contornos abertos supracitados, a espessura escolhida da camada esponja para ambos foi de 7 células.

5.4. Processamento do DIVAST

A modelagem realizada por esse trabalho foi a partida a frio, onde assumiu-se inicialmente velocidade nula ao longo do domínio computacional, concentração de soluto nula em toda a malha, e a elevação a partir do seu nível máximo (preamar).

5.4.1. Módulo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico é fundamental na análise do comportamento físico no interior do domínio computacional, a exemplo dos pontos seguidos das letras A, B e C (Figura 4) que foram utilizados para averiguar o comportamento da maré dentro do domínio. Conseqüentemente, esse módulo torna-se útil na verificação do desempenho das condições de contornos abertas implementadas (Ver seção 5.3.4.), uma vez que elas influenciam consideravelmente o domínio computacional sendo assim possível constatar se

as condições de contorno foram corretamente implementadas e se foram adequadas à região.

Além disso, esse módulo fornece uma idéia global do padrão hidrodinâmico da região de estudo, auxiliando no entendimento dos resultados encontrados.

5.4.2. Módulo de Qualidade de Água e Curvas de Passagem

A seguinte etapa refere-se à mensuração efetiva do tempo de residência da região da Baía do Espírito Santo. O método adotado foi o *método euleriano de curvas de passagem de soluto*, que utilizou o módulo de qualidade de água do modelo DIVAST. Curva de passagem de soluto pode ser entendida como o registro, no tempo, da concentração de um dado soluto. No caso específico, o soluto empregado na modelagem computacional foi o sal, que tem um comportamento semelhante a um poluente conservativo, ou seja, sua concentração decai apenas por processos hidrodinâmicos como diluição, dispersão e advecção, e nunca por processos de natureza bioquímica.

Vinte pontos distribuídos ao longo da Baía do Espírito Santo foram selecionados para efetuar o lançamento instantâneo do soluto (Figura 5), sendo a concentração, do mesmo, medida por cinco pontos de controle situados na saída à Baía ordenados de forma paralela à praia de Camburi (Figura 5). Através de curvas de passagens de soluto, mediu-se então os tempos de residência (em relação à saída da Baía) correspondentes aos vinte pontos pré-selecionados. Nota-se, através da Figura 5, que os cinco pontos de controle não estão postos no limite da malha computacional, mas um pouco acima deste. Esse “excesso” de malha foi adotado para que os pontos de controle registrem satisfatoriamente o movimento de vaivém do soluto provocado pela oscilação da maré, e, o que é mais importante, para que não haja uma subestimação dos tempos de residência, pois uma vez que o soluto abandona o domínio da malha computacional, o mesmo não mais retorna.

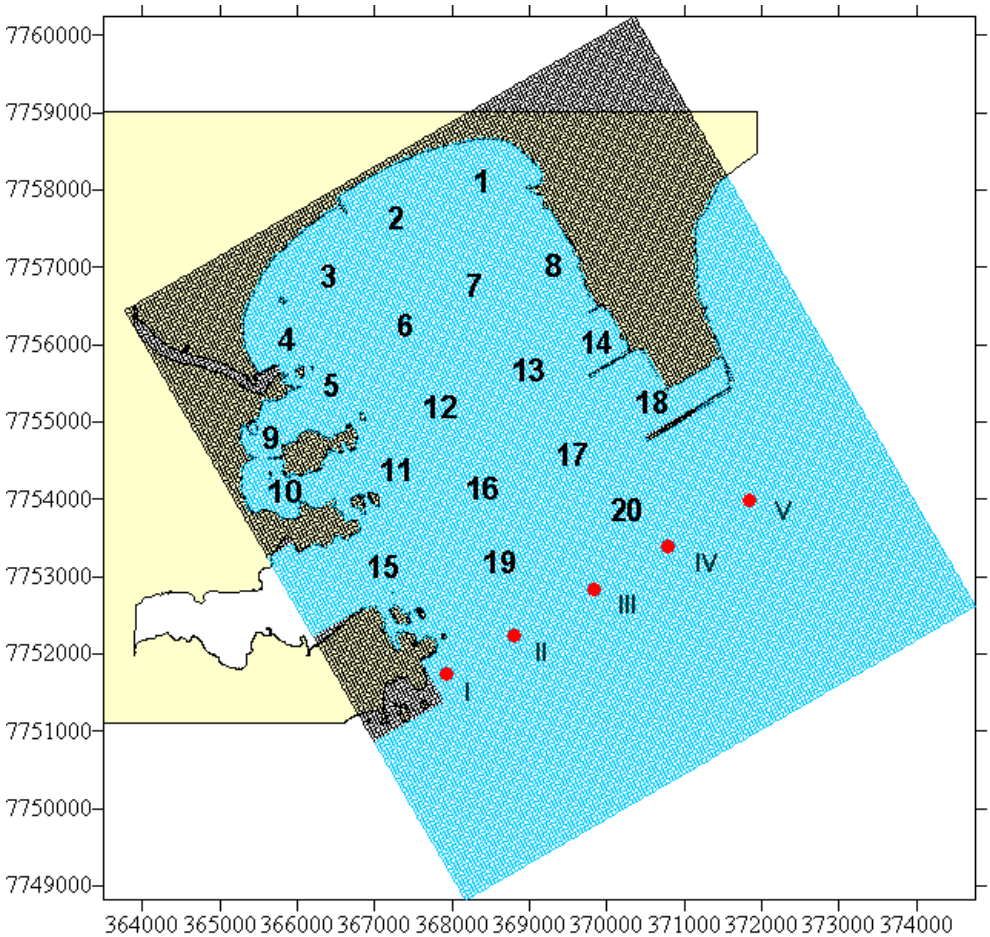

Figura 5. Região da Baía do Espírito Santo com os números arábicos representando os vinte pontos onde foi lançado soluto. Os círculos vermelhos seguidos por algarismos romanos na saída paralela à Baía indicam os cinco pontos de controle.

Para o processamento completo do modelo DIVAST foram necessários vinte processamentos, representando as vinte regiões escolhidas que receberam o soluto. Isso porquê, se fosse feito apenas um processamento, as salinidades das distintas regiões iriam se misturar entre si de modo que ficasse impossível verificar, por meio das curvas de passagem, de onde provinham as concentrações salinas.

Para cada modelagem, adotou-se um tempo de processamento de 992 h, o que corresponde a exatos 80 ciclos de maré (12,4 h cada ciclo) ou aproximadamente 42 dias. Para esse tempo de processamento, o computador despendia de um tempo de trabalho médio de 14 h. Há de salientar que o lançamento do soluto (sal) foi instantâneo e o mesmo não foi lançado no início da modelagem, mas após um tempo de 20 h, isso porquê o modelo despende

de algumas horas para que sua condição hidrodinâmica se estabilize, evitando, desse modo, erros grosseiros no momento do processamento dos dados e possíveis interpretações errôneas.

Para cada um dos vinte pontos selecionados, cinco células da malha computacional (que representaram cada ponto) receberam uma concentração salina de 500 ppm (partes por mil). Esse alto valor de concentração de soluto se faz necessário porquê o soluto é altamente diluído dentro do domínio computacional correspondente ao interior da Baía do Espírito Santo. Deste modo, se a concentração salina fosse baixa, o soluto poderia ser diluído a ponto de não conseguir ser registrado pelos pontos de controle.

Para que cada uma das cinco células correspondentes a seu ponto de lançamento recebesse essa concentração salina de 500 ppm, foi necessário empregar a seguinte fórmula:

$$S = \frac{H_{oat} . Q_{out} \left(S_{out} - \frac{S_n}{2} \right)}{H_c} \tag{5.7}$$

onde S é a salinidade desejada, no caso, $S = 500$;

Q_{out} é a vazão na qual o soluto é injetado, no caso, $Q_{out} = 1m/s$;

S_n é a salinidade inicial da região, no caso, $S_n = 0$;

H_c é a profundidade específica de cada quadrante;

$H_{oat} = \frac{dt}{\Delta x^2}$, onde dt é o passo de tempo, que no caso de uma malha de 50 x 50 m $dt = 2s$, e Δx é o espaçamento da malha ($\Delta x = 50m$);

e finalmente, S_{out} é a salinidade específica que deve ser lançada no quadrante baseada nos parâmetros descritos acima.

O tempo de residência nesse trabalho foi, deste modo, definido como o tempo necessário para que o centro de gravidade da curva de passagem do soluto alcance os pontos de controle, seguindo a fórmula:

$$tg = \frac{\int C\, t\, dt}{\int C\, dt} \tag{5.8}$$

onde tg é tempo de residência, C a concentração do soluto e t o tempo transcorrido referente a cada valor de concentração.

5.4.3. Outras Considerações do Modelo

Não foi considerado o efeito devido ao vento atuante na região, pois além de sua magnitude ser pequena quando comparada com a força das marés, é um parâmetro de medição complicada. Além disso, a rugosidade do leito foi assumida como sendo constante em todo o domínio e de valor igual a 0,01 m.

6. RESULTADOS

6.1. Resultados Concernentes ao Módulo Hidrodinâmico do DIVAST

No gráfico abaixo (Figura 6), são apresentados as elevações de maré equivalentes aos pontos representados pelas letras A, B e C da Figura 4.

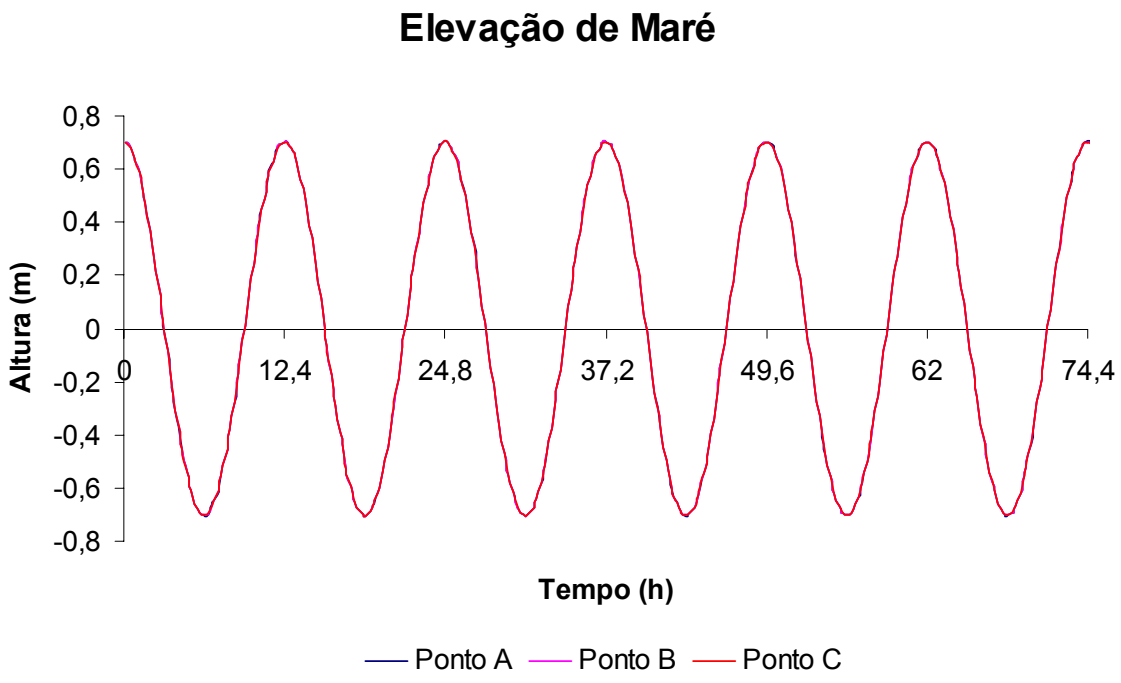

Figura 6. Gráfico de oscilação da maré referente aos pontos A, B e C.

As Figuras a seguir (7 a 10) ilustram o padrão hidrodinâmico da Baía do Espírito Santo em quatro situações distintas de maré.

Na figura 7 é mostrada uma situação de máximas correntes de vazante. Na figura 8 uma situação de estofa de baixa-mar. Na figura 9 uma situação de máximas correntes de enchente, e na figura 10 uma situação de estofa de preamar.

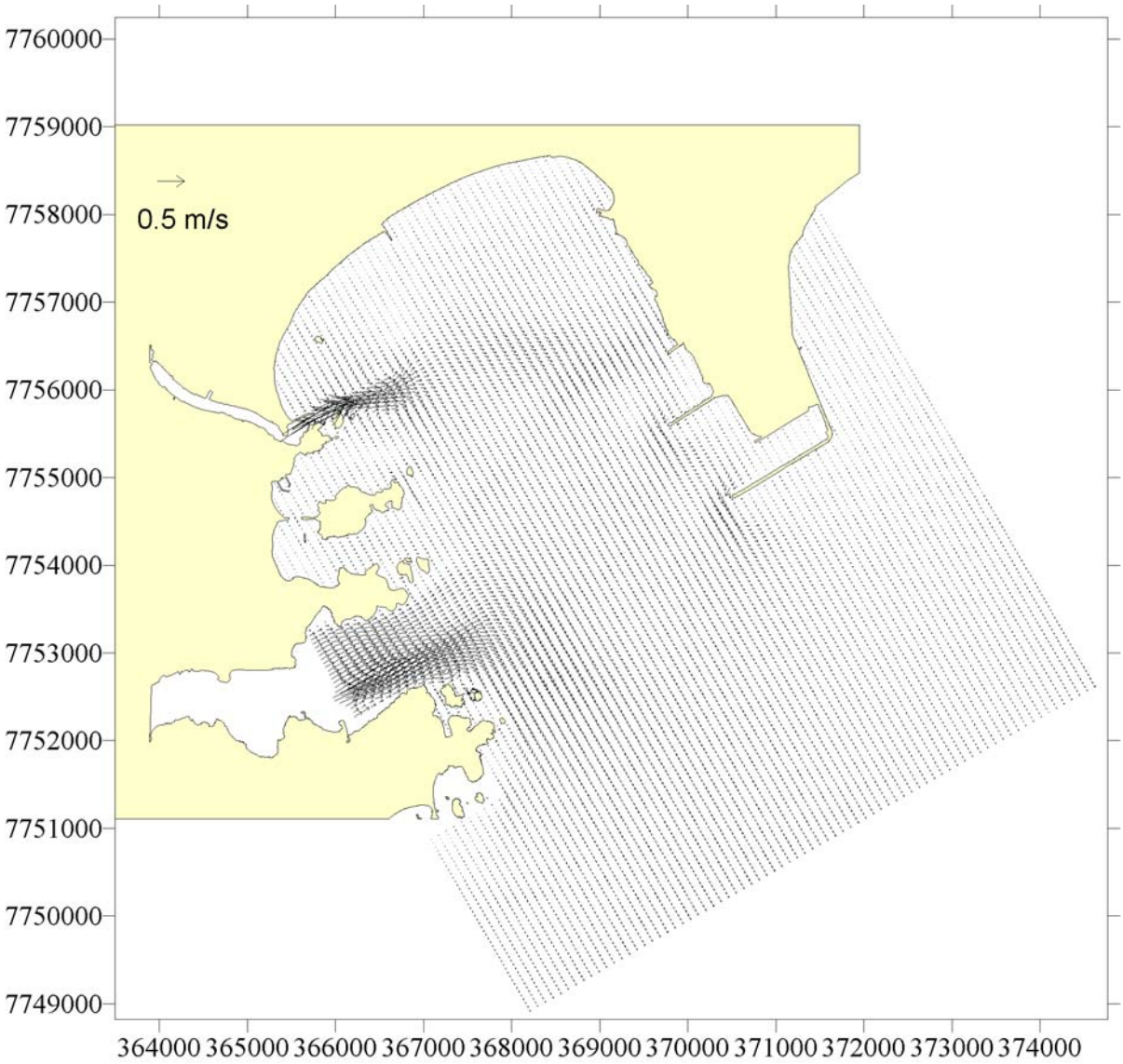

Figura 7. Situação de máximas correntes de vazante.

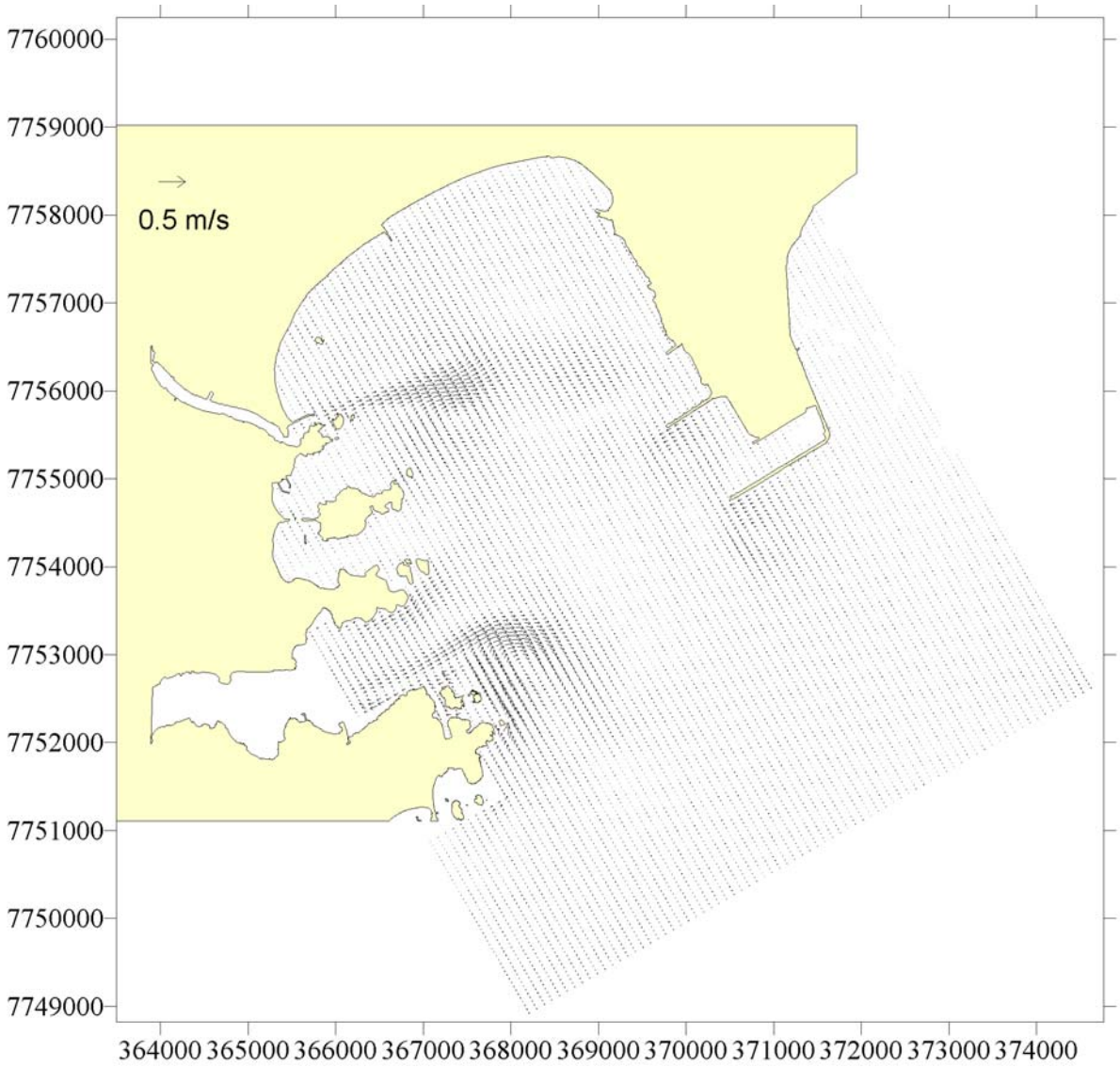

Figura 8. Situação de estofa de baixa-mar.

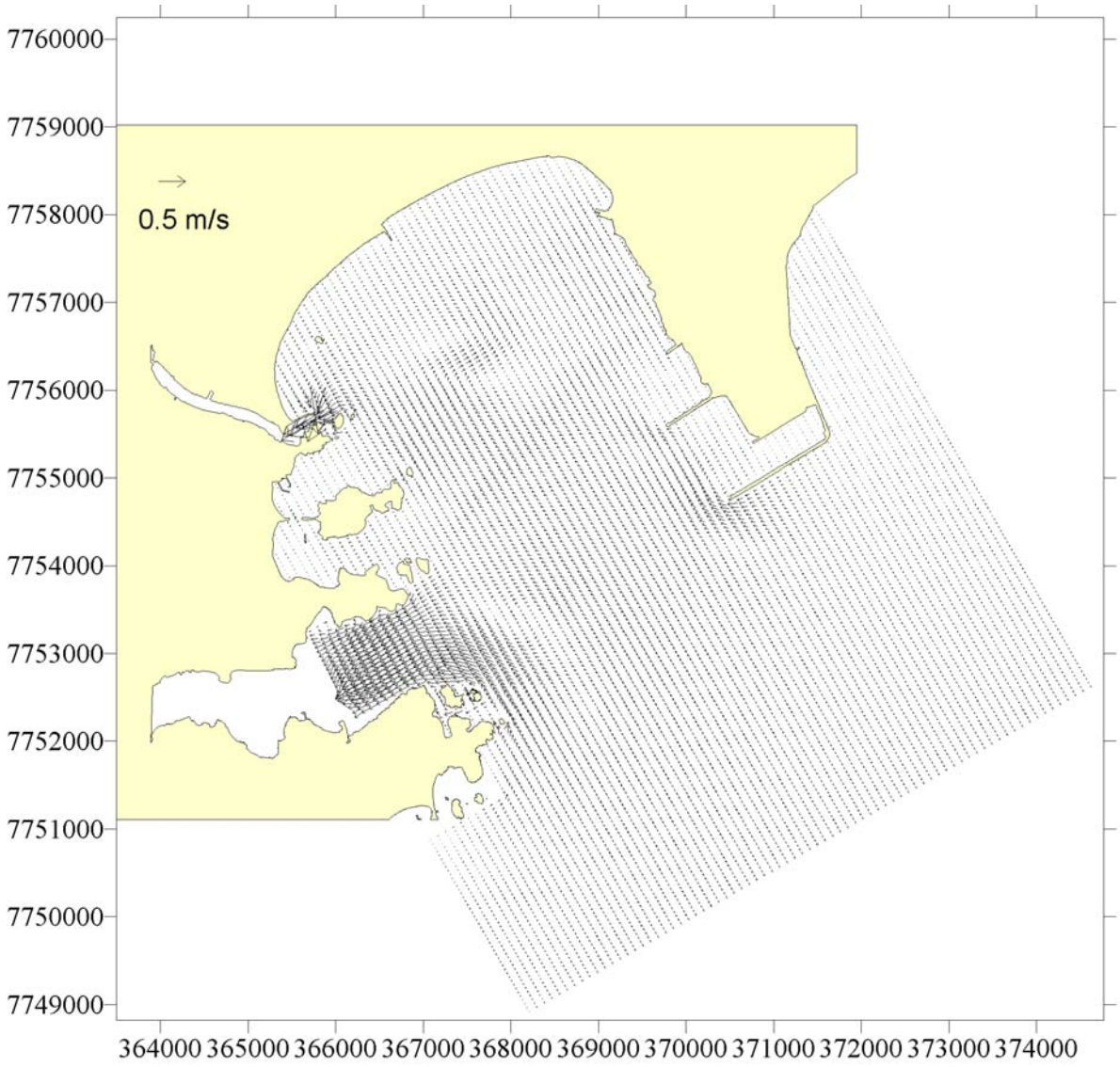

Figura 9. Situação de máximas correntes de enchente.

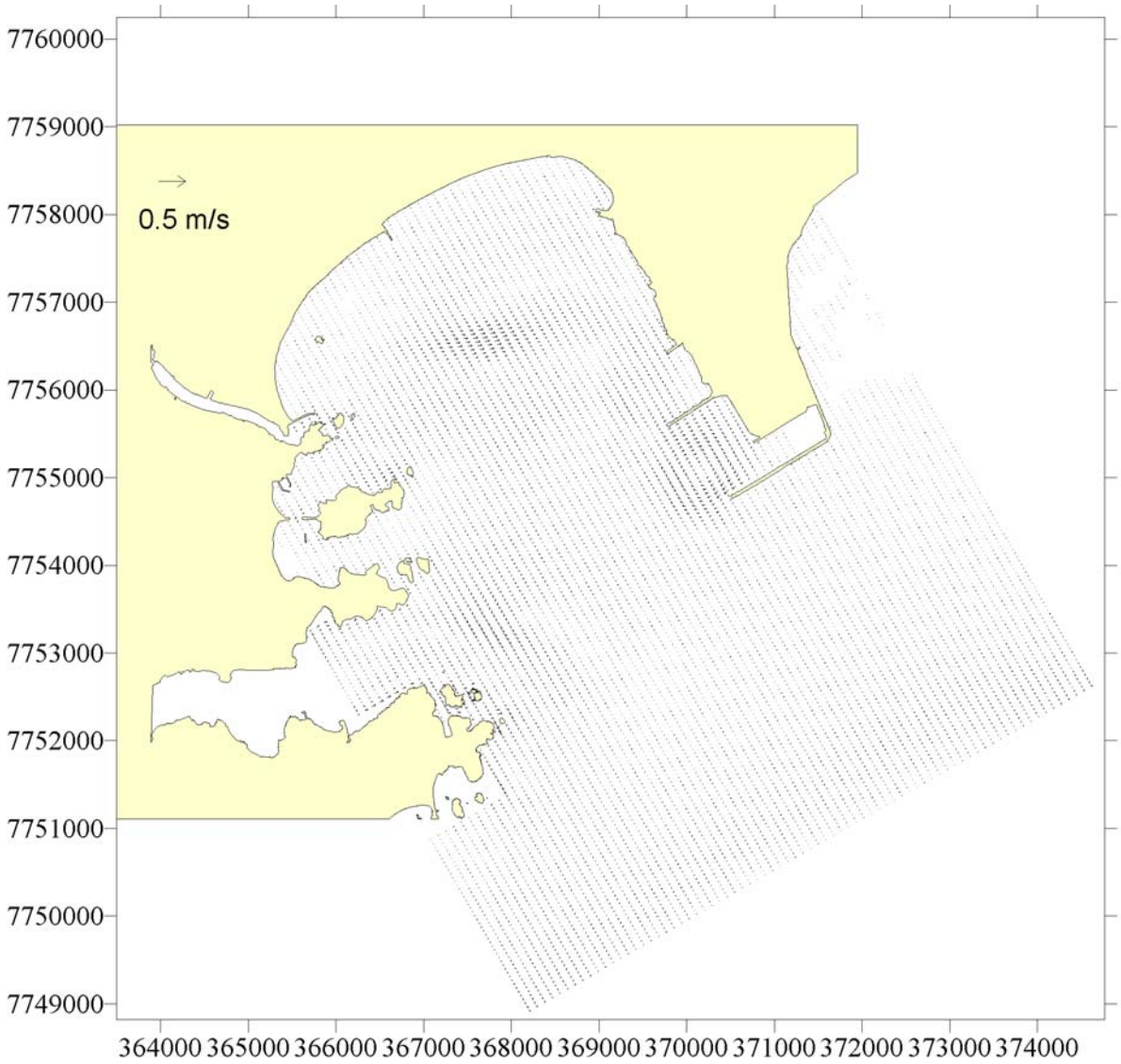

Figura 10. Situação de estofa de preamar.

6.2. Resultados Concernentes ao Módulo de Qualidade de Água do DIVAST

6.2.1. Curvas de Passagem de Soluto

Abaixo (Figuras 11 a 18), seguem oito das vinte curvas de passagem encontradas e analisadas pelo trabalho.

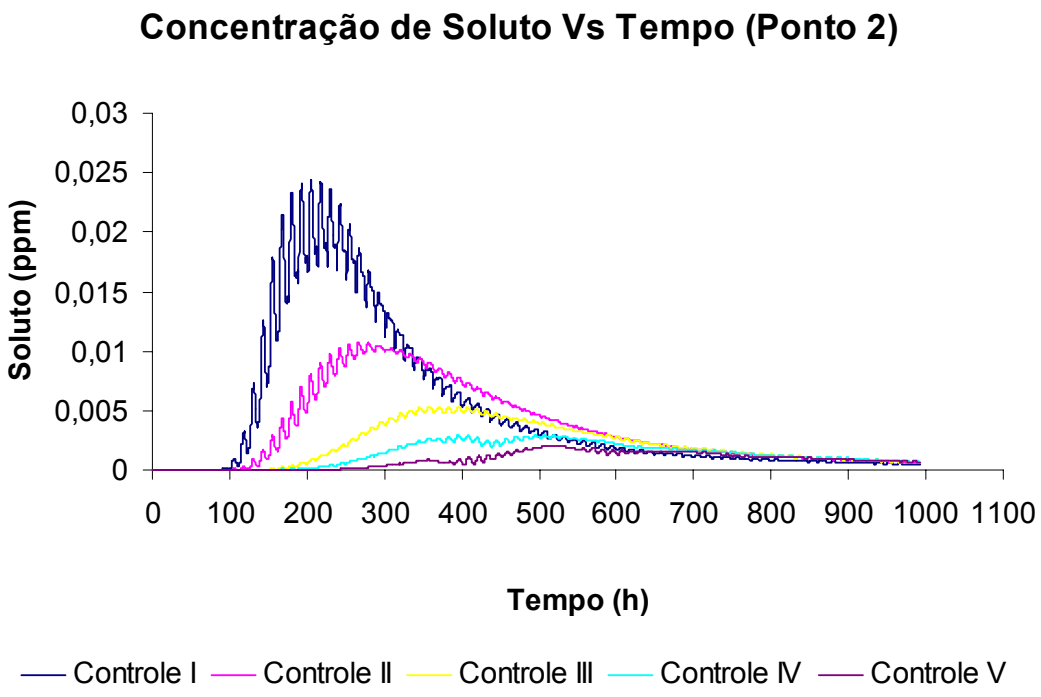

Figura 11. Curvas de Passagem referentes ao ponto 2 de lançamento de soluto.

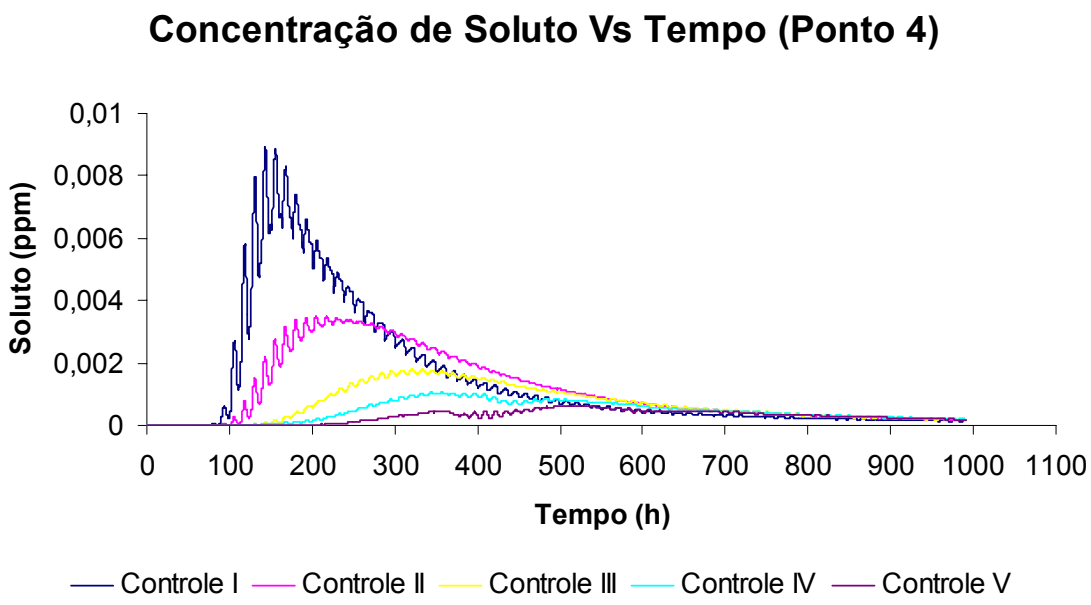

Figura 12. Curvas de Passagem referentes ao ponto 4 de lançamento de soluto.

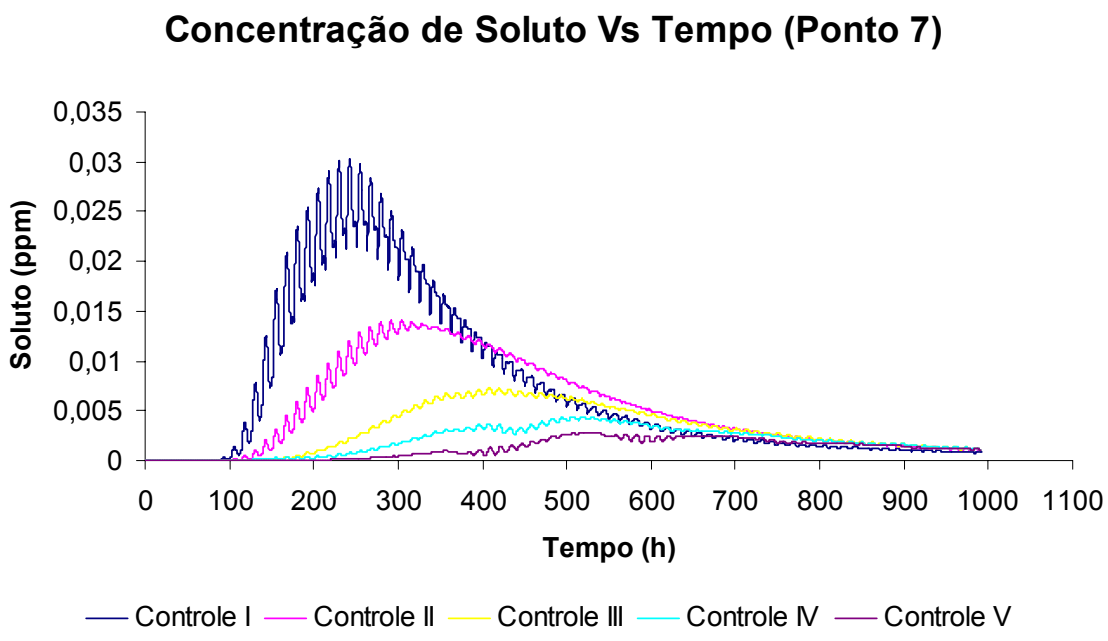

Figura 13. Curvas de Passagem referentes ao ponto 7 de lançamento de soluto.

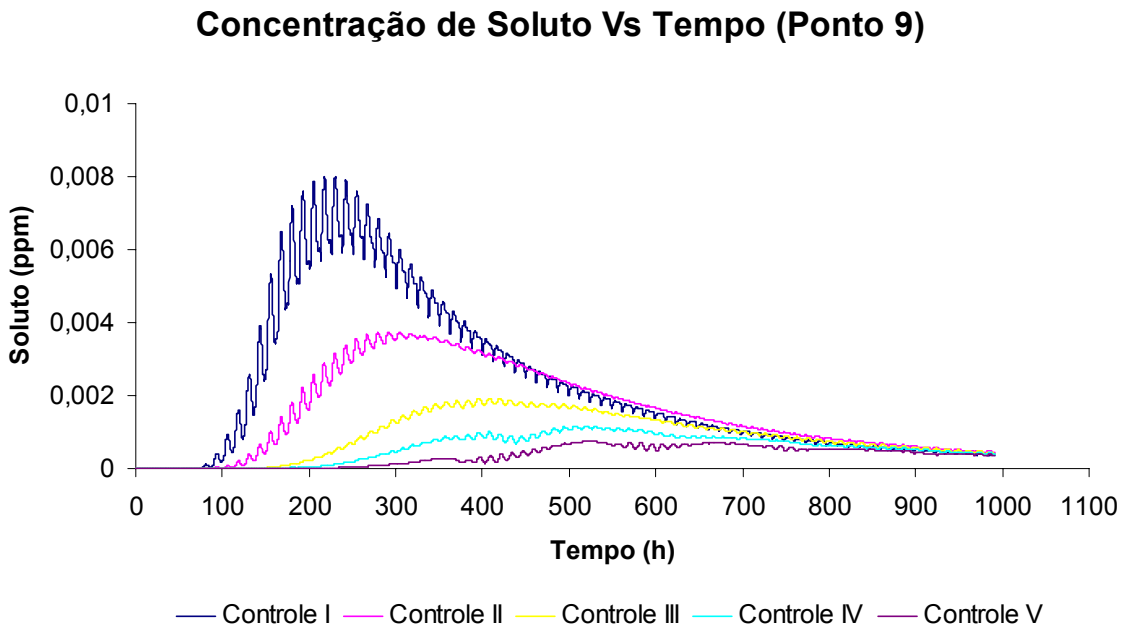

Figura 14. Curvas de Passagem referentes ao ponto 9 de lançamento de soluto.

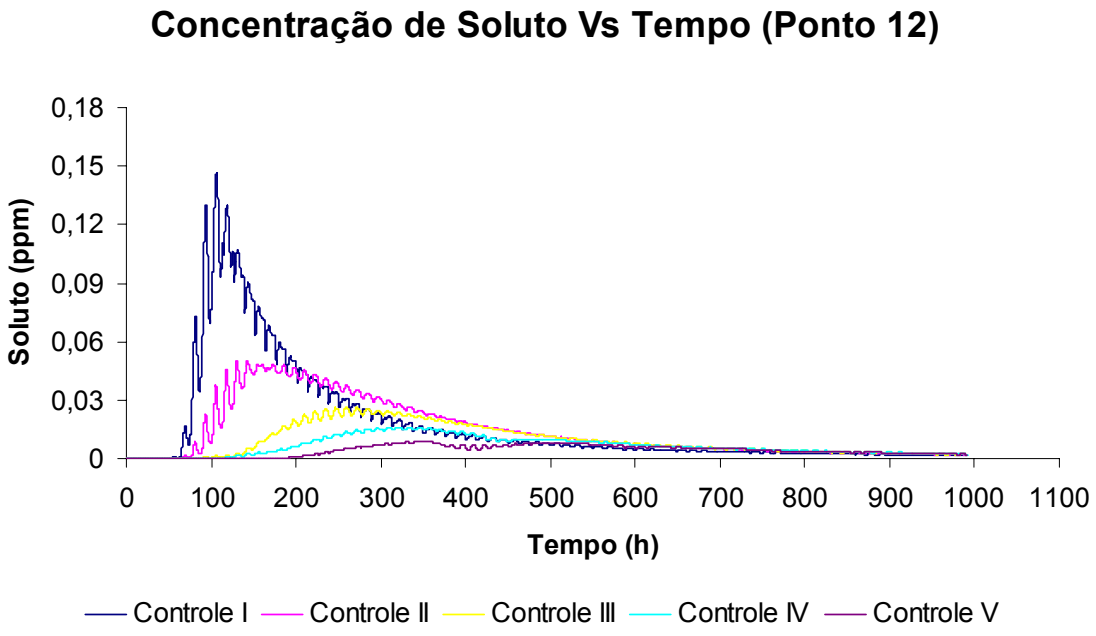

Figura 15. Curvas de Passagem referentes ao ponto 12 de lançamento de soluto.

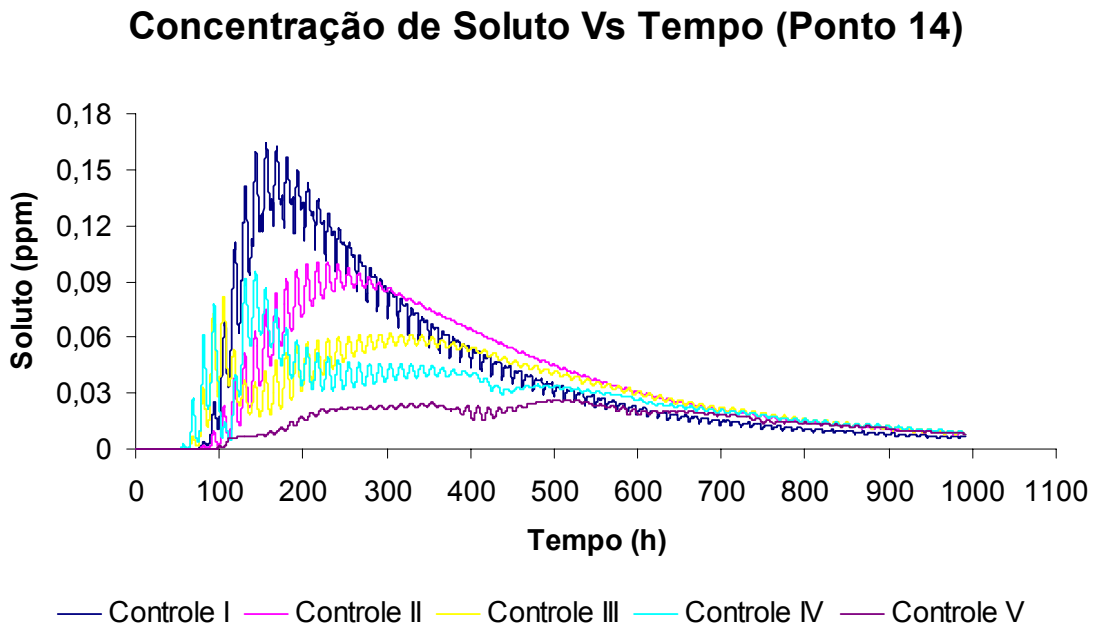

Figura 16. Curvas de Passagem referentes ao ponto 14 de lançamento de soluto.

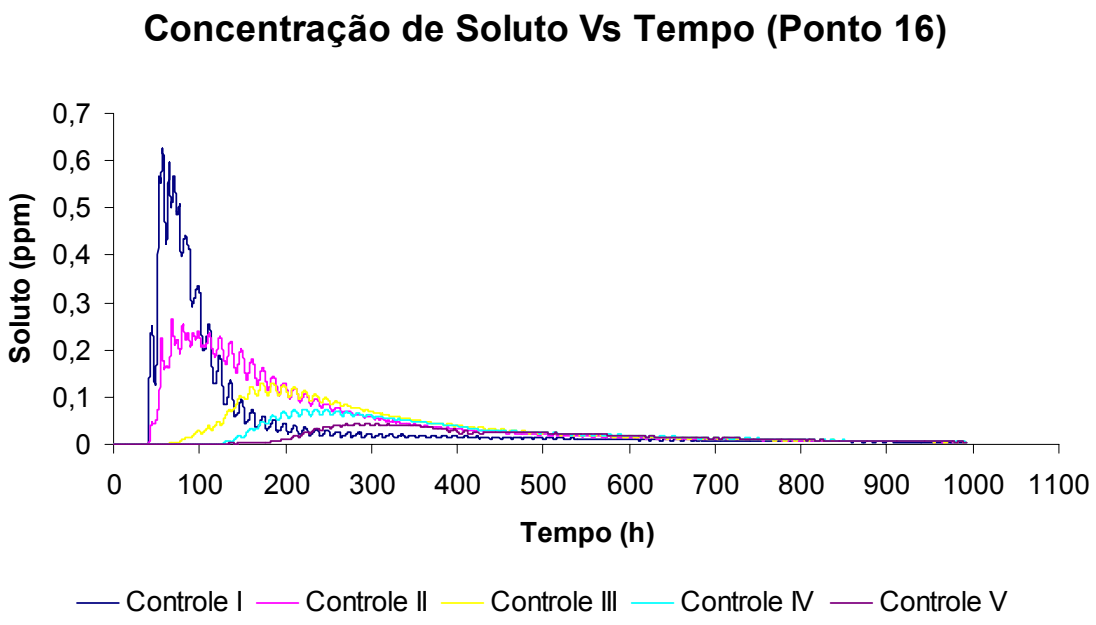

Figura 17. Curvas de Passagem referentes ao ponto 16 de lançamento de soluto.

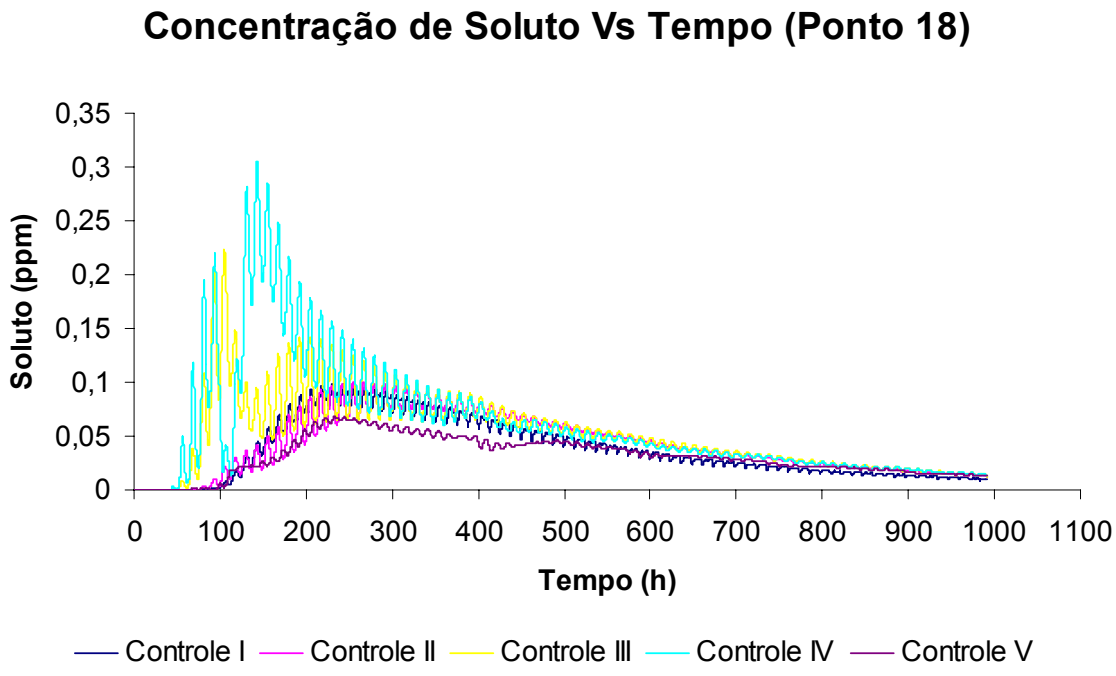

Figura 18. Curvas de Passagem referentes ao ponto 18 de lançamento de soluto.

6.2.2. Tabelas com os Tempos de Residência e Concentração Média de Soluto no Tempo

A Tabela 1 indica os tempos de residência de todos os vinte pontos de lançamento de soluto em relação a cada ponto de controle e o tempo de residência médio dos vinte pontos em relação aos cinco pontos de controle.

Tabela 1. Tempo de residência dos vinte pontos de lançamento de soluto.

	Tempo de Residência (horas)					
Pontos de lançamento	**Controle I**	**Controle II**	**Controle III**	**Controle IV**	**Controle V**	**Tempo médio**
1	357,81	446,64	534,29	614,00	657,00	521,95
2	299,71	391,06	480,79	543,68	614,02	465,85
3	272,25	362,77	452,63	514,10	587,18	437,79
4	264,79	351,15	440,97	500,68	574,37	426,39
5	256,15	345,91	433,50	490,49	563,88	417,99
6	273,22	363,91	451,80	510,91	583,68	436,70
7	329,03	418,48	504,41	561,15	629,47	488,51
8	369,01	456,57	537,82	585,66	652,08	520,23
9	354,32	437,50	520,58	577,55	639,13	505,82
10	368,45	454,77	532,94	585,18	640,83	516,43
11	244,22	335,78	421,92	481,43	549,60	406,59
12	224,50	311,03	398,75	453,38	526,65	382,86
13	287,76	367,79	429,77	442,79	535,35	412,69
14	314,88	384,97	408,59	398,28	503,79	402,10
15	125,79	191,03	292,94	372,32	434,02	283,22
16	155,45	221,56	317,85	387,25	453,40	307,10
17	240,19	286,27	356,05	396,62	487,37	353,30
18	403,67	434,31	373,99	335,58	449,63	399,44
19	180,15	169,06	295,00	377,84	441,45	292,70
20	315,14	310,68	264,91	284,36	415,61	318,14

A Tabela 2 expõe as concentrações médias de soluto no tempo dos vinte pontos de lançamento de soluto em relação a cada um dos cinco pontos de controle. Sendo o tempo considerado como o tempo total da modelagem (992 h) subtraído de 20 h, que é o tempo de modelagem no qual o soluto é instantaneamente lançado.

Tabela 2. Concentrações médias de soluto referente aos vinte pontos de lançamento.

	Concentração Média de Soluto no Tempo (ppm)				
Pontos de lançamento	**Controle I**	**Controle II**	**Controle III**	**Controle IV**	**Controle V**
1	0,02607	0,01856	0,01055	0,00667	0,00415
2	0,02971	0,02160	0,01264	0,00816	0,00514
3	0,02325	0,01728	0,01028	0,00677	0,00427
4	0,00893	0,00690	0,00413	0,00276	0,00173
5	0,06625	0,05086	0,03140	0,02135	0,01352
6	0,05566	0,04182	0,02538	0,01691	0,01068
7	0,04387	0,03184	0,01867	0,01211	0,00756
8	0,04803	0,03448	0,02014	0,01312	0,00805
9	0,01372	0,00960	0,00544	0,00343	0,00214
10	0,04811	0,03181	0,01803	0,01135	0,00707
11	0,06602	0,04933	0,03068	0,02080	0,01344
12	0,10769	0,08756	0,05612	0,03971	0,02547
13	0,22848	0,19393	0,13687	0,11003	0,06534
14	0,25044	0,22754	0,18704	0,16800	0,09508
15	0,05936	0,06330	0,04095	0,02847	0,02027
16	0,26787	0,29571	0,19940	0,14359	0,09912
17	0,37552	0,43298	0,30978	0,23900	0,14518
18	0,23172	0,25722	0,32019	0,37157	0,19202
19	0,31767	0,65286	0,35017	0,23891	0,16717
20	0,28662	0,40509	0,48218	0,40978	0,21544

6.2.3. Mapa de Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo

Baseado nos dados de tempo de residência médio de todos os vinte pontos de lançamento de soluto em relação ao cinco pontos de controle (Tabela 1), foi possível confeccionar um mapa que represente uma visão geral do tempo de residência (dado em dias) da região da Baía do Espírito Santo.

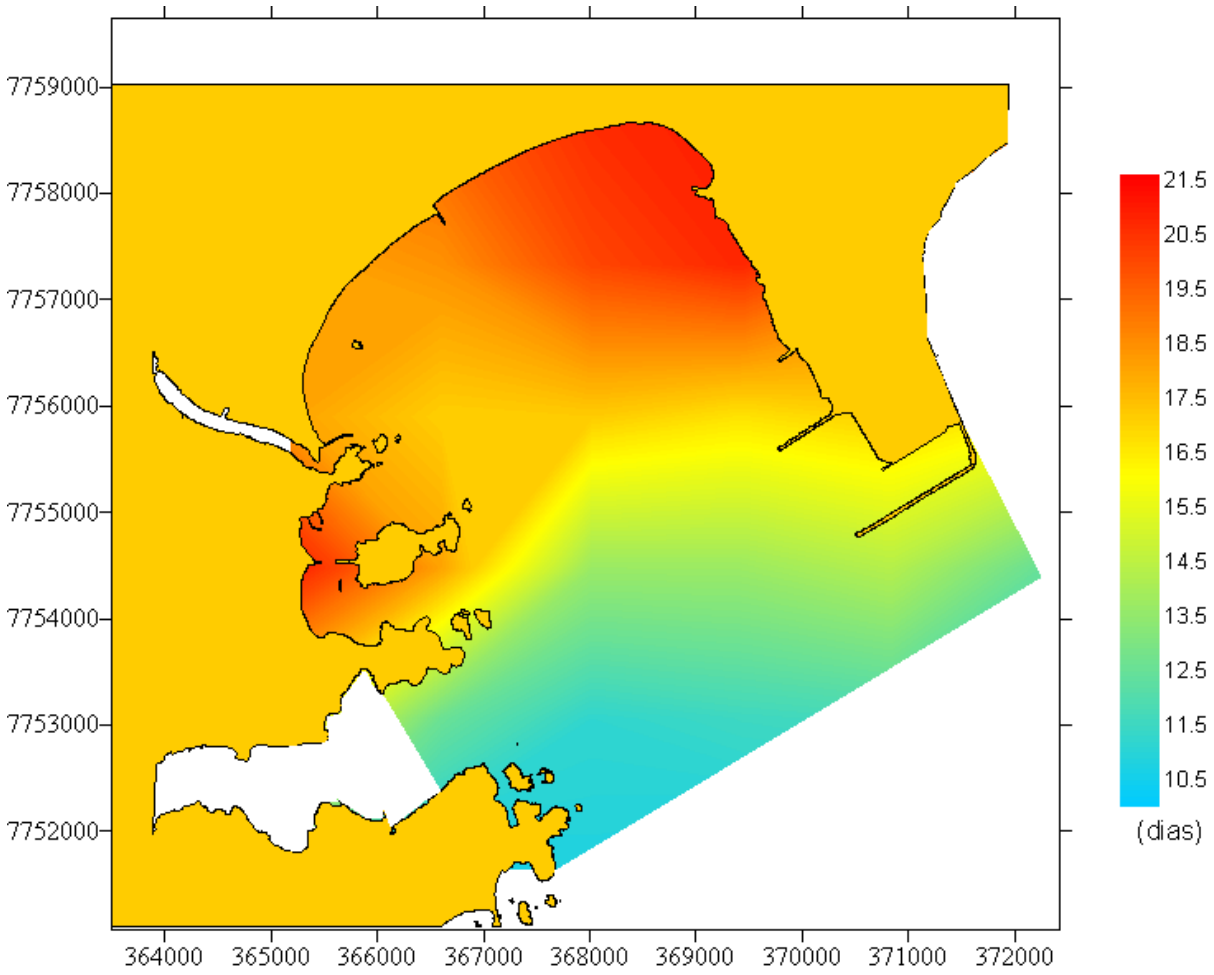

Figura 19. Mapa de Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo.

7. DISCUSSÃO

7.1. Análise do Comportamento Hidrodinâmico no Interior do Domínio Computacional

Através da Figura 6, que contêm um gráfico ilustrando o comportamento da maré dentro do domínio em relação aos três pontos selecionados em seu interior, pode-se verificar que a onda de maré apresentou um comportamento bem idealizado em ambos os três pontos, onde se observa que tanto a cava quanto a crista tiveram uma amplitude de 70 cm em relação ao nível médio (altura igual a zero). Esse comportamento satisfatório da maré implica que a mesma não sofreu reflexão no interior da Baía do Espírito Santo, implicando que as condições de contorno abertas referentes à camada esponja implementada no Canal de Acesso ao Porto de Vitória e Canal da Passagem foram bem escolhidas e corretamente implementadas. Deste modo, é possível afirmar que esse método da camada esponja diminuiu consideravelmente reflexões indesejadas que poderiam advir da condição de contorno de elevação de maré lançada na saída paralela à Baía (Figura 4).

A análise das Figuras 7 a 10, que apresentam o padrão hidrodinâmico da região modelada em quatro diferentes estágios de maré, indicam qualitativamente que a área de estudo apresentou um comportamento hidrodinâmico bem coerente e estável. Esse fato vem a corroborar que a condição implementada para o Canal do Porto de Vitória e o Canal da Passagem apresentou um comportamento bastante adequado. Além disso, esses padrões estáveis de circulação, mostram, de uma forma igualmente qualitativa, que as condições de contorno de números 2 e 3 (Figura 4) que foram postas como fechadas, não influíram negativamente no domínio do interior da Baía distante a esses contornos.

7.2. Análise dos Dados Referentes ao Módulo de Qualidade de Água do DIVAST

7.2.1. Curvas de Passagem de Soluto

Das vinte curvas de passagem de soluto analisadas no estudo (Figura 5), foram escolhidos oito delas referentes a pontos bem distribuídos ao longo da Baía a fim de ilustrar, de uma forma geral, o comportamento do soluto em relação ao tempo ao longo de toda a extensão Baía.

Analisando-se primeiramente os gráficos concernentes aos pontos 2, 4 e 7 (respectivamente Figuras 11, 12 e 13) em conjunto com a Tabela 1 (tempo de residência dos vinte pontos), nota-se que esses pontos apresentaram um elevado tempo de residência (superiores a 420 h), isso pode ser justificado pelo fato de que tais pontos encontram-se consideravelmente distantes da saída da Baía e também por localizarem-se (em especial os pontos 7 e 2) em regiões de hidrodinâmica baixa (Figuras 7 a 10).

O que também é interessante notar em relação a esses três pontos, é o fato de que o ponto 7 é o que apresenta maior tempo de residência, seguido dos pontos 2 e 4. Juntamente com isso, observamos que os pontos de controle que receberam as maiores concentrações de soluto são os de número I e II. Conseqüentemente, percebe-se que os maiores forçantes físicos de expulsão de soluto na Baía do Espírito Santo correspondem aos fluxos provenientes do Canal da Passagem e do Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ambos situados no limite oeste da região.

A curva de passagem pertencente ao ponto 9 teve um dos maiores tempo de residência em todo o estudo (tempo de residência médio de 505,82 h), isto está associado ao grande aprisionamento de água numa região sombreada pela Ilha do Frade, cuja circulação é bastante restrita por tal conformação geométrica da linha de costa. Como pode ser notado nas Figuras 7 a 10, a região apresenta um padrão hidrodinâmico caracterizado por baixos valores de velocidade encontrados até mesmo nos momentos de máxima enchente e máxima vazante da maré. E, a exemplo dos pontos 2, 4, e 7, a maior parte do soluto lançada no ponto 9 ruma em direção aos pontos de controle I e II.

Os pontos 12 e 16, por sua vez, apresentaram valores relativamente menores de tempos de residência por localizarem-se mais próximos à saída da Baía e

em locais sem influências diretas da linha de costa e de qualquer estrutura marinha (píeres, molhes, marinas, terminais marítimos, etc). Por conta disso, a circulação nesses locais é mais intensa, favorecendo a taxa de renovação de água que é feita principalmente próxima aos pontos de controle I e II, onde se observam as maiores concentrações de soluto.

Finalmente, os pontos 14 e 18, embora localizados próximos aos pontos de controle, tiveram tempos de residência elevados (por volta de 400 h). Diferentemente dos pontos 12 e 16, os pontos 14 e 18 sofrem forte influências de estruturas marinhas como as instalações do complexo portuário de Tubarão, as quais funcionam como neutralizadores dos efeitos de forçantes hidrodinâmicos (em especial, a maré), fazendo com que esses locais apresentem baixas taxas de renovações de água.

7.2.2. Distribuição do Tempo de Residência da Baía do Espírito Santo

Como era de se esperar, os maiores tempos de residência em relação à saída paralela à Baía do Espírito Santo foram encontrados em locais mais distantes da mesma e naqueles que são protegidos naturalmente ou artificialmente do padrão de circulação. Entretanto, pode-se dizer que toda a Baía apresenta tempos de residência relativamente elevados (de 10 a 21,5 dias), tendo, em especial, dois locais extremamente críticos: a região a nordeste da Baía e a área abrigada pela Ilha do Frade, como pode ser confirmado pela Tabela 1 e pela Figura 19. A região a nordeste, além de apresentar um padrão hidrodinâmico bem estagnado, pode ter um tempo de residência bem elevado devido ao jato de água que sai do Canal da Passagem, que pode empurrar o soluto para essa região. E a área abrigada pela Ilha do Frade, como mencionado, é um local altamente abrigado, o que confere um padrão de escoamento estagnado e conseqüentemente maiores tempos de residência.

Essa condição fornece informações importantes para o gerenciamento apropriado da Baía principalmente pelo fato de serem regiões produtivas e sujeitas a diversos vetores de pressões antrópicas, tais como despejos de efluentes. Desta maneira, essas áreas apresentam uma maior sensibilidade ambiental, que oferece riscos à biota marinha, aos freqüentadores desses locais, e ocasionam restrições ao uso de seus recursos.

Pela Tabela 1 e curvas de passagem (Figuras 11 a 18), nota-se que os pontos de controle III, IV, e principalmente o V, são os locais nos quais o soluto despendeu de um maior tempo para alcançá-los, acarretando, como conseqüência, em um maior tempo de residência relativo a eles. Esses valores elevados auxiliaram a aumentar consideravelmente os tempos de residência médio das regiões que receberam soluto. Devemos levar em consideração, entretanto, que esses controles apresentaram as menores concentrações médias de soluto (Tabela 2). Isso acarreta que, embora eles tenham contribuído para elevar os tempos de residência da Baía, pouca quantidade de soluto é dirigida em sua direção.

Em contrapartida, os controles I e II foram as que tiveram os menores tempos de residência, todavia, como anteriormente mencionado, são os controles que receberam as maiores concentrações de soluto. Se somarmos isso com a ocorrência dos maiores tempos de residência, de uma maneira geral, dos pontos a leste da Baía em comparação com os pontos correspondentes a oeste, a idéia de que os maiores forçantes de expulsão do soluto no interior da Baía sejam os jatos de água do Canal da Passagem e do Canal do Porto de Vitória pode ser reforçada.

Apesar dessa tendência de encontrar os maiores tempos nas regiões a leste (excetuando os pontos 9 e 10 que apresentam tempos elevados por motivos particulares já explicados), é possível perceber, pela Figura 19, que o padrão de distribuição desses tempos apresenta-se aproximadamente paralelo à boca da Baía, evidenciando que a propagação da maré é o principal forçante físico de circulação e conseqüentemente da configuração espacial dos tempos de residência.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo sofreu por certas carências de dados reais (e.g. dados de correntógrafos e marégrafos) da região no interior da Baía do Espírito Santo que seriam úteis para a ideal calibração e validação do modelo computacional DIVAST.

Entretanto, pode-se dizer que a distribuição espacial dos tempos de residência na região mostrou ser coerente, indicando que a metodologia pôde ser aplicada com confiabilidade. Complementar a isso, essa metodologia é capaz de fornecer, além do tempo de residência, uma estimativa do padrão de transporte de massa da área modelada.

O conhecimento do padrão global do tempo de residência na Baía do Espírito Santo é uma ferramenta de extrema importância que pode ser usada em programas de gerenciamento costeiro, uma vez que ele indica diretamente a escala dos impactos ambientais. Sendo esse conhecimento fundamental para a região estudada, pois a mesma é atingida por lançamento de efluentes (domésticos e industriais) de vários pontos da costa.

Uma recomendação para trabalhos futuros seria estudar o tempo de residência da região aplicando a metodologia conhecida como “trajetória de partículas”, para que a mesma possa ser comparada com a metodologia atual.

Outra recomendação é um estudo de uma área maior que alcance todo o complexo estuarino, pois se trata de um ecossistema de importância ecológica, econômica, social e cultural. Sendo assim, o tempo de residência é fundamental para que se possam mensurar os níveis de impactos ambientais nessas áreas.

9. 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 30 ago. 2004.

ALBINO, J.; OLIVEIRA, R.; MAYA, L. P.; ALENCASTRE, K. **Processos Atuais de Sedimentação Marinha e Praial do Litoral de Vitória, ES**. Relatório nº 1982506/2000 FACITEC & Prefeitura Municipal de Vitória, 2001.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; CHAMBEL, P.; NEVES, R. **A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case**. Portugal, 2001.

CHENG, R. T. **Eulerian and Lagrangian Modeling of Estuarine Hydrodynamics**. *In* B. Kjerfve [ed], Hydrodynamics of Estuaries. V.1. CRC Press. Florida, 1988.

CASTRO, Mônica de Souza Mendes. **Análise da Influência das Águas do Canal da Passagem Sobre o Padrão de Escoamento na Baía do Espírito Santo**. 2001. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

DEAN, R.; DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics Engineers and Scientists**. V. 2. Cornell University, USA: World Scientific, 1991.

DHN, **Carta Náutica 1401**, Marinha do Brasil, 2002.

DIMOU N. K.; ADAMS, E. E. **A Random-Walk Particle Tracking Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Waters.** Estuarine, Coastal and Shelf Science. 1993.

DRONKERS, J., and J. T. F. Zimmerman. **Some principles of mixing in tidal lagoons**. Oceanologia acta. Proceedings of the International Symposium on Coastal Lagoons, Bordeaux, France, 1982.

DYER, K. R. **Estuaries A Physical Introduction**. Second edition. John Wiley & Sons, 1997.

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

FISCHER, H.B. **Mixing in Inland and Coastal Waters**. Academic Press, New York, 1979.

FINEGAN, M.; HARTNETT, M. **A Generalized Method for Characterizing Tidal Flushing in a Semi Enclosed Basin**. Ireland: Hydroinformatics, 2002.

GEYER. W. R., J. T. MORRIS, F. G. PAHL., and D.A. JAY. **Interaction Between Physical Processes and Ecosystem Structure. A Comparative Approach**. *In* J. E. Hobbie [ed.], Estuarine Science: A Synthetic Approach to Research and Practive. Island Press, 2000.

HELDER, W.; RUARDIJ, P. **A One-Dimensional Mixing and Flushing Model of the Ems-Dollard Estuary: Calculation of Time Scales at Different River Discharges**. Netherlands: Netherlands Journal of Sea Research, 1982.

KIM, Hyun-Sook; SWANSON, J. Craig; PATEL, Jiganesh. **Flushing Analysis in the Acushnet River Estuary**. New England: Applied Science Associates (ASA), 2003.

MARTIN, James L.; MC CUTCHEON, Steven C. **Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling**. EUA: Lewis Publishers. 1999.

MILLER, R. L. and B. F. McPHERSON. **Estimating Estuarine Flushing and Residence Times in Charlotte Harbor, Florida, Via Salt Balance and a Box Model**. Limnology and Oceanography, 1991.

KRATZER, C. R., and R. N. BIAGTAN**. Determination of Traveltimes in the Lower San Joaquin River Basin, California, from Dye-tracer Studies During 1994-1995**. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1997.

KJERFVE, Björn; MIRANDA, Luiz Bruner de; CASTRO, Belmiro Mendes. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Edusp, 2002.

KREEKE, J. van de. **Dispersion in Shallow Estuarines**. *In* B. Kjerfve [ed], Hydrodynamics of Estuaries. V.1. CRC Press. Florida, 1988.

MOBERG, Fredrik; RÖNNBÄCK, Patrik. **Ecosystem Services of the Tropical Seascape: Interactions, Substitutions and Restoration**. Elsevier Science Ltd, 2002.

PALMA, Elbio E.; MATANO, Ricardo P. **On the Implementation of Passive Open Boundary Conditions for a General Circulation Model: The Barotropic Mode**. Journal of Geophysical Research, 1998.

POND, S.; PICKARD, G. L. **Introduction Dynamical Oceanography**. 2 ed. Great Britain: Pergamon Press, 1989.

RIGO, D. ***Levantamento Topo-Batimétrico dos Manguezais e Canais da Baía de Vitória – Relatório Final***, FACITEC – PMV, Vitória, Brasil, 2002.

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

ROCHA, Amilcar Barbosa da. **Estudo da Hidrodinâmica e do Transporte de Solutos na Baía do Espírito Santo Através de Modelagem Computacional**. 2000. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

SHELDON, Joan E.; ALBER, Merryl. **Simulating Material Movement Through The Lower Altamaha River Estuary Using a 1-D Box Model**. Georgia, 2003.

TAKEOKA, H.. **Fundamental Concepts of Exchange and Transport Time Scales in a Coastal Sea**. Continental Shelf Research, 1984.

UNCLES, R. J. **Tidal Dynamics of Estuaries**. *In* B. Kjerfve [ed], Hydrodynamics of Estuaries. V.1. CRC Press. Florida, 1988.

WEITBRECHT, Volker; UIJTTEWAAL, Wim; JIRKA, Gerhard H. **2-D Particle Tracking Determine Transport Characteristics in Rivers with Dead Zones**. 2002.

WILBUR, Ryan James. **Validation of Dispersion Using the Particle Tracking Model in the Sacramento-San Joaquin Delta**. Thesis – Civil and Environmental Engineering: University of California, 2000.

WOLK, Frank. **Three-dimensional Lagrangian Tracer Modelling in Wadden Sea Areas**. Diploma Thesis: University Oldenburg, 2003.

ZIMMERMAN, J. T. F. **Estuarine Residence Times**. *In* B. Kjerfve [ed], Hydrodynamics of Estuaries. V.1. CRC Press. Florida, 1988.