

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS

DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

GUSTAVO SOUZA CRUZ MENEZES

MODELAGEM DE CORRENTES RESIDUAIS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

Monografia

Vitória, Março de 2005.

GUSTAVO SOUZA CRUZ MENEZES

MODELAGEM DE CORRENTES RESIDUAIS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

Monografia apresentada ao curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de **Oceanógrafo.**

Prof. orientador: Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana.

Vitória, Março de 2005.



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

MODELAGEM DE CORRENTES RESIDUAIS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO

GUSTAVO SOUZA CRUZ MENEZES

Prof. Dr^o. Julio Tomás Aquije Chacaltana Orientador – DEA/CT/UFES

> Prof. Dr^o. Arno M. Oliveira Examinador - DEA/CT/UFES

> Prof. Dr^o Daniel Rigo Examinador – DEA/CT/UFES

Vitória, Março de 2005.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Julio Tomás Aquije Chacaltana por me ajudar e orientar na pesquisa, sempre mostrando total amizade e paciência.

Ao amigo Felipe Nascimento Gaze, por me acompanhar sempre, em todos os momentos de glórias e derrotas.

Aos amigos da Oceanografia pela amizade e pelas alegrias nos últimos quatro anos, e pelos que hão de se seguir; em especial ao Bruno, Pablo e Rafael Almeida.

Aos meus pais, por sempre me apoiar e ajudar em todos os momentos da minha vida. E aos meus cinco irmãos, que mesmo não estando todos ao meu lado, foram sempre fundamentais na minha vida.

Aos meus avós pelo apoio, carinho e abrigo nestes quatro anos.

E por fim aos Srsº Valdecir e Plínio.

Pequena Fábula

- Ah – disse o camundongo -, a cada dia o mundo se torna mais estreito. No início ele era tão amplo que eu tinha medo, continuei correndo e fiquei feliz por finalmente avistar, à esquerda e à direita, muros ao longe, mas esses longos muros correm tão rápido um na direção do outro que já estou no último quarto e ali, no canto, está parada a armadilha para dentro da qual eu vou correndo.

- Você apenas precisava alterar a direção da corrida - disse o gato, e devorou-o.

Franz Kafka

Lista de Figuras:

Figura 1: Esquema da grade computacional	23
Figura 5: Isolinhas de elevação para o caso "benchmark"	32
Figura 6: Isolinhas de elevação referente ao caso da total reflexão	32
Figura 8: Contornos abertos os quais foram implementadas diferentes condições d	е
contorno, sobre a malha de 25 m.	34
Figura 9: Detalhe do contorno aberto 2, identificando a região do canal.	35
Figura 10: Magnitude de velocidade no canal da Passagem.	37
Figura 11: Magnitude de velocidade no canal do Porto de Vitória.	38
Figura 12: Elevação da superfície livre	39
Figura 13: Perfil temporal das elevações.	40
Figura 14: Estofa de preamar	41
Figura 15: Estofa de baixa-mar.	42
Figura 16: Máximas velocidades de vazante	43
Figura 17: Máximas velocidades de enchente.	44
Figura 18: Magnitude de corrente na máxima enchente; as regiões de intensificaçã	0
são apontadas pelas setas	45
Figura 19: Mapa de correntes residuais.	46
Figura 20: Magnitude de velocidades residuais.	47

SUMÁRIO

RE	ESUMO	8
1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4	CONCEITOS BÁSICOS	17
5	METODOLOGIA	19
	 5.1 ÁREA DE ESTUDO	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
6	RESULTADOS	37
	 6.1 GRÁFICOS DE VELOCIDADE E ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE 6.2 MAPAS DE VELOCIDADE DE CORRENTE INSTANTÂNEAS 6.3 CORRENTES RESIDUAIS 	
7	DISCUSSÃO	48
8	CONCLUSÕES	50
9	REFERÊNCIAS	52

RESUMO

A Baía do Espírito Santo está associada ao sistema estuarino do Rio Santa Maria da Vitória, o qual deságua nesta pela baía de Vitória e pelo canal da Passagem. Através da hidrodinâmica criada por estes dois canais, a grande metrópole despeja grandes quantidades de efluentes domésticos neste sistema estuarino. O presente estudo objetiva fazer o estudo das correntes residuais eulerianas na Baía do Espírito Santo, que possibilitam a sua utilização direta ou indireta na identificação, análise, e gestão de inúmeros processos, seja de ordem econômica, biológica, física ou química. Estas correntes representam a média temporal (no período) do principal forçante das velocidades instantâneas. Neste estudo, será utilizado o modelo computacional DIVAST (Depth Integrated Velocity And Solute Transport). Este modelo é integrado na vertical e, portanto, aplica-se para as regiões em que o fluxo é predominantemente horizontal com boa mistura vertical, como na baía do Espírito Santo. Para a realização da modelagem, se utilizou de uma malha de 25x25m, e foi também realizado um estudo sobre as possíveis condições de contorno abertas a serem aplicadas no modelo; dentre as quais as escolhidas para a região foi a de Flather (condição de radiação modificada) no contorno de alto mar. e a de relaxamento nos canais. Os resultados mostram qualitativamente que a simulação é razoável, representando bem os padrões esperados de circulação. Quanto às correntes residuais, os resultados mostram feições conspícuas de fluxos de maré em baías, como a presença de vórtices associados a feições costeiras e a jatos.

1 INTRODUÇÃO

As áreas costeiras, que abrangem desde a Plataforma Continental até os sistemas estuarinos, passando por baías, enseadas, deltas e outras formações geomorfológicas, são de importância indiscutível, tanto para a Humanidade quanto para os ecossistemas em si. As áreas costeiras tropicais são um dos mais ricos repositórios da biodiversidade marinha e produzem um número de recursos naturais e serviços ao ecossistema que são vitais à sobrevivência humana e ao bem-estar (MOBERG et al, 2003). Estas áreas são utilizadas pelos organismos marinhos como habitat, e nestes ambientes desempenham papéis fundamentais no seu funcionamento, agindo como um dos componentes estruturais dos mesmos. O Homem se insere então como parte deste sistema ecológico, utilizando-se dos serviços ou produtos fornecidos por outros organismos de forma direta ou indireta. Além dos serviços fornecidos pelo ambiente na forma de "organismo" (com capacidade de regeneração na forma de resiliência), estas áreas costeiras fornecem serviços ao Homem pela sua conformação geomorfológica e física, permitindo a criação de grandes cidades; a instalação de complexos sistemas portuários escoando a produção agroindustrial; facilitando o despejo dos efluentes destas cidades que se dispersam no corpo marinho; e mesmo propiciando a exploração de áreas com potencial turístico, como balneários ou parques marinhos.

A baía do Espírito Santo incorpora todas estas características; ela está associada ao sistema estuarino do Rio Santa Maria da Vitória, o qual deságua nesta pela baía de Vitória e pelo canal da Passagem. Através da hidrodinâmica criada por estes dois canais, a grande metrópole despeja grandes quantidades de efluentes domésticos neste sistema estuarino, causando impactos ambientais comprovados (BARROSO & DIAS, 1997), através da dispersão de grandes quantidades de nutrientes, matéria orgânica e patógenos, aumentando com isso a produtividade primária e secundária e implicando risco à saúde humana.

A área também está constantemente sujeita a derrames de poluentes do tipo hidrocarbonetos, decorrente do intenso fluxo de embarcações associadas aos

portos de Tubarão (na porção leste da baía), e de Vitória (na Baía de Vitória, próxima à região); derramamentos que tendem a aumentar com o crescimento das atividades portuárias e da indústria do petróleo. Estes derrames potenciais carecem sempre de planos de contingência que levem em consideração o transporte a longo termo (associado às correntes residuais) das manchas, identificando áreas de risco em potencial.

Outro processo associado ao transporte hidrodinâmico que ocorre na Baía é o dos organismos planctônicos, os quais podem ter seus ciclos migratórios controlados pelas correntes residuais, mais especificamente, como um mecanismo de retenção larval (ELLIEN et al, 2000); influenciando os ciclos de vida de espécies importantes economicamente (como os crustáceos), ou de importante papel no ecossistema, funcionando como espécies chave, como o decápoda *Ucides chordatus*, o qual funciona como reciclador da matéria orgânica. A influência exata da maré na comunidade ictioplanctônica do sistema estuarino da ilha de Vitória ainda não está determinada, uma vez que estuários com múltiplas entradas perfazem complexos padrões espacial, temporal e da estrutura da comunidade (JOYEUX et al, 2004).

Estes processos com caráter dispersivo (carreamento de efluentes , poluentes e organismos) têm sua influência expressa em uma escala temporal da ordem de vários ciclos de maré, sendo transportados pela advecção (convecção) e pela difusão realizada pela hidrodinâmica atuante na região. E esta hidrodinâmica a longo termo, ou seja, em uma grande escala de tempo, é expressa pelas correntes residuais. Estas correntes representam a circulação média da hidrodinâmica de uma área, ou seja, as velocidades resultantes após uma média temporal no período equivalente à ação do processo físico. Em uma área costeira, como a Baía do Espírito Santo este período equivale ao do principal harmônico da maré, uma vez que esta é o principal forçante.

Neste contexto se insere o presente estudo das correntes residuais eulerianas na Baía do Espírito Santo, possibilitando a utilização direta ou indireta na identificação, análise, e gestão de inúmeros processos, seja de ordem econômica, biológica, física ou química. Para tal, a utilização de uma modelagem numérica permite o conhecimento de processos físicos em fluidos reais que variam desde estuários a bacias oceânicas, simplesmente através de princípios físicos expressos na forma de leis (como a conservação da massa e do momentum). Estas leis, postas na forma de equações diferenciais parciais (EDP), possuem portanto o potencial de simular a Hidrodinâmica através da sua solução. Tal solução em áreas reais, com grandes dimensões e complexidades espaciais, é realizada através dos métodos numéricos como o de Diferenças Finitas, Volumes Finitos e Elementos Finitos; estes métodos transformam a EDP em uma relação algébrica, de modo que possa ser resolvida em dimensões espaciais e temporais definidas. O potencial computacional no auxílio da resolução dos problemas é o que permite nos dias de hoje a franca utilização destas metodologias de modelagem numérica.

Tal modelagem numérica, ou computacional (uma vez que a solução numérica é realizada com o auxílio de computadores), mostra-se, portanto, muito vantajosa devido ao relativamente baixo volume de dados de campo necessários para simular os sistemas reais; e vem sida empregada cada vez mais, principalmente na área da Oceanografia Física, desde o surgimento dos computadores, sendo hoje uma das principais e fundamentais ferramentas de pesquisa dos processos Oceanográficos.

O estudo das correntes residuais, através da modelagem numérica, é realizado desde a década de 70, quando se empregavam hipóteses simplificadora, para tratar os termos não lineares. Mas, com o aumento da capacidade computacional, as equações puderam ser tratadas em sua forma não linear, abrindo campo para a pesquisa das correntes residuais em sistemas bastante complexos, como estuários e baias. A partir das décadas de 80 e principalmente 90, o estudo da circulação residual têm sido realizado principalmente com técnicas Lagrangeanas acopladas aos modelos eulerianos, como será explicado ulteriormente. Mas trabalhos sobre correntes residuais eulerianas, como o aqui apresentado, ainda são bastante pertinentes na associação dos processos dispersivos a longo termo.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é quantificar as correntes residuais eulerianas na baía do Espírito Santo com o uso do modelo computacional DIVAST.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar a hidrodinâmica instantânea induzida pela maré na baía do Espírito Santo;
- Estudar diferentes implementações de condições de contorno abertas no modelo DIVAST.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das correntes residuais sempre esteve relacionado com os estudos dos processos de transporte a longo termo, variando desde processos com escalas horárias (dispersão de uma descarga de um poluente), de alguns meses (florações fitoplanctônicas) a até anos (dinâmica dos sedimentos) (CUGIER e LE HIR, 2002). As primeiras tentativas de se computar tal circulação residual utilizando-se de modelos computacionais deram se no final da década de 70 e início da de 80, guando, através de modelos simplificados (para mais detalhes ver TEE, 1986), as correntes residuais eram calculadas nos seguintes ambientes: estuários estreitos, em que se desconsideravam as variações laterais, utilizando modelos bidimensionais; ou em áreas de plataforma onde simulavam os padrões de circulação média sobre grandes bancos, em que, como hipótese simplificadora, considerava-se uma uniformidade das variáveis dependentes ao longo das isóbatas; e mesmo modelos bidimensionais integrados na vertical para investigar as correntes residuais em áreas que variam desde estreitos a ilhas. Mas, a grande maioria destes trabalhos pioneiros baseava-se em modelos cujas equações físicas da conservação da massa e da quantidade de movimento eram linearizadas. Tal aproximação, chamada de método indireto, aplicava-se apenas em áreas em que os termos dos forçantes não-lineares eram pequenos se comparados com os termos dominantes (geralmente quando as velocidades residuais eram pequenas se comparadas às oscilatórias da maré). Tal aproximação, criada para contornar o problema da dificuldade de se realizar os cálculos com as baixas capacidades computacionais da época, foi promissoramente empregada muitas vezes. Com a grande evolução computacional vivenciada nos anos 80 e principalmente 90, as equações físicas podiam ser tratadas em suas formas não-lineares, sem necessidade de aproximações ulteriores; a partir daí as correntes residuais puderam ser calculadas de forma relativamente simples, na chamada aproximação direta, através da média pontual das velocidades oscilatórias de maré, em um tempo equivalente (ou da ordem) ao período do maior harmônico modelado.

O estudo das correntes residuais divide-se em duas linhas, sendo o referencial

utilizado no cálculo o ponto dicotômico. O primeiro referencial, chamado de Euleriano, faz com que nas equações que simulem o movimento dos fluidos (ou qualquer constituinte associado) as variáveis dependentes estejam em função do tempo e de pontos fixos no espaço; este é o utilizado pela grande maioria dos modelos computacionais por permitir que o domínio contínuo seja discretizado nestes pontos e nestes possa avaliar a evolução do fluxo. O mesmo princípio é valido nas amostragens de campo, em que a grande maioria dos dados são coletados à partir de posições fixas, em aparelhos ancorados no fundo, em bóias eulerianas ou em estruturas, como correntógrafos, marégrafos, perfiladores acústicos (e.g. ADCP) devido a facilidade logística de localizá-los e coletá-los. O referencial de Lagrange também é utilizado para simular a dinâmica de uma massa d'água (ou escalar), mas este coloca as variáveis dependentes em função de sua posição inicial, e do tempo, seguindo assim a trajetória descrita pela mesma (ou partícula ou mesmo um constituinte). Portanto, as correntes residuais calculadas pelo referencial de Euler representam o fluxo resultante em um ponto após um tempo da ordem do maior período de maré (seja o ponto em que se fixa o correntógrafo ou um ponto da malha computacional); e a lagrangeana descreve a trajetória resultante do movimento de uma massa d'água após um ciclo de maré. Mas, nos ambientes naturais, a hidrodinâmica das parcelas de água é lagrangeana por natureza, pois estas experimentam variações das suas velocidades de fluxo de acordo com a sua posição, ou seja, sua trajetória está intrinsecamente ligada ao campo de velocidades do ambiente, e não à velocidade de um ponto. Portanto, as correntes residuais eulerianas em muitos casos deixam de ter representatividade frente ao transporte de qualquer escalar (substância ou propriedade da massa d'água), ilustrando apenas uma média matemática das correntes de maré (IMASATO, 1983 apud CHENG et al, 1993). Diante de tal dicotomia, aproximações da representação lagrangeana a partir de resultados eulerianos (logisticamente mais fáceis de serem coletados) foram tentadas, sendo que a primeira foi dada por Longuett-Higgins (1969) citado em H. WEI et al (2004). Esta, alcançada através de um método analítico, expressa a corrente residual lagrangeana como a soma da residual euleriana e da deriva de Stokes. A deriva de Stokes seria um termo gerado pelo gradiente espacial no campo de

velocidades do ambiente. Tal aproximação proposta por Longuett-Higgins (chamada muitas vezes de velocidade de transporte de massa) ainda é bastante utilizada mesmo em áreas costeiras e estuarinas (e.g. WEI et al, 2004).

Outra linha gerada nesta tentativa de alcançar as velocidades médias lagrangeanas surgiu das metodologias de traçadores, utilizadas desde a década de 70 em estudos oceânicos. Esta linha tenta simular o transporte de partículas seguindo suas trajetórias para representar o movimento das massas d'água. Estas metodologias de Trajetória de Partículas têm sido então bastante desenvolvidas até os dias atuais e, portanto, merecem uma melhor descrição de sua filosofia. Nos métodos de Trajetória de Partículas o transporte de uma substância é baseado na equação de Advecção-Difusão. Esta equação simula o transporte de uma substância, ou o movimento de uma massa d'água, por estes dois processos que atuam independentemente: advecção e difusão, de maneira que podem ser calculados de maneira isolada. Esta equação possui uma parte dita determinística (Advecção), em que o transporte se dá pelas forças determinísticas, ou seja, pelas velocidades calculadas no fluxo, e uma outra parte dita turbulenta ou aleatória (Difusão), em que as forças geradoras da turbulência ditam seu movimento. Uma destas primeiras metodologias surgiu do Método Euleriano-Lagrangeano (ELM) (CHENG et al, 1993), que cria uma equação para o transporte lagrangeano a partir da equação com coordenadas fixas nos pontos da grade, com a utilização de uma interpolação da posição final da partícula com os pontos da grade circundante. Esta metodologia é a utilizada nos modelos da "família" TRIM, criados por Cheng e Casulli, e bastante utilizados nos estudos da Hidrodinâmica da Baía de São Francisco.

Geralmente a parte determinística é a computada pelo método de Trajetória de Partículas, podendo ser utilizados métodos tão variados como o ELM (supracitado), ou soluções analíticas da equação de Advecção através de uma interpolação linear (WOLK, 2003), ou um esquema Runge-Kutta (e.g. DIAS et al, 2001). A parte Difusiva tem sido simulada de muita maneiras, sendo que a mais comum é a substituição desta por uma função randômica, de um modelo

estocástico (e.g. Random-Walk), que tenta simular o movimento aleatório das partículas (e.g DIMOU e ADAMS, 1993).

Com a recente expansão dos supercomputadores, as metodologias de Trajetória de Partículas tem sido bastante utilizadas no cálculo das correntes residuais Lagrangeanas, inclusive em trabalhos que as comparam com os resultados de correntes residuais eulerianas (e.g. MONTERO et al., 1999; ZHENG et al., 2003; CUGIER e LE HIR, 2002; CHEN e BEARDSLEY, 2001).

As modelagens de correntes residuais têm sido cada vez mais empregadas como ferramenta auxiliar, ou principal, na identificação de processos físicos, biológicos e geológicos. CHEN (2001) usou uma modelagem das correntes residuais lagrangeanas e eulerianas na identificação de processos de mistura em frentes sobre os Bancos Georges (EUA); LUCAS (1999) se valeu de uma modelagem numérica semelhante para identificar os processos governantes da ocorrência de florações fitoplanctônicas em estuários; HENCH (2003) analisou os processos de troca em entradas de lagunas através das correntes residuais eulerianas e lagrangeanas; P. CUGIER e P. LE HIR (2002) utilizaram as correntes residuais eulerianas e lagrangeanas como ferramenta auxiliar em uma modelagem ecológica aplicada na pluma do rio Sena (França); J. Gómez-Valdés (2003) computou as correntes residuais eulerianas para analisar as interações não-lineares da onda de maré em uma laguna costeira rasa.

4 CONCEITOS BÁSICOS

Em vista de fundamentar os posteriores tópicos e discussões, alguns conceitos básicos devem ser melhor explicitados, principalmente com relação aos processos físicos dominantes em uma área costeira, como a que se deseja simular.

O primeiro conceito a ser tratado refere ao principal forçante na hidrodinâmica da baía do Espírito Santo: a onda de maré. A maré é uma onda longa gravitacional, gerada pelas forças de interação entre os corpos celestes, a Terra e a topografia do fundo dos oceanos. Ela é considerada uma onda longa, pois se propaga em profundidades muito pequenas (da ordem de centenas de metros) se comparadas a seu comprimento (da ordem de centenas de quilômetros); tal comparação é vista na equação de dispersão de uma onda:

$$\sigma^2 = kgTgh(kh)$$
 1

em que σ simboliza a freqüência da onda, *k* o número de onda (relacionado com o comprimento da mesma), *g* a aceleração da gravidade, e *h* é a profundidade da coluna d'água. Esta equação para ondas longas, ou seja, quando a relação *kh* é menor que o valor de $\pi/10$ (o que ocorre na onda de maré em todo o oceano), pode ser simplificada para a seguinte forma:

$$\sigma^2 = gk \qquad \qquad 2$$

mostrando que a velocidade de propagação da onda de maré depende apenas da profundidade da coluna d'água local. Esta verificação é mais facilmente reconhecida em uma versão manipulada da anterior:

$$C = \sqrt{gh}$$
 3

com *C* representando a celeridade da onda.

A onda de maré se propaga nas áreas costeiras a partir do mar aberto, passando pela plataforma continental e com ela interagindo, formando outros sub-harmônicos devido a fatores como a fricção de fundo e por outras

interações não lineares, principalmente com a topografia. Quando a maré alcança as áreas costeiras como estuários, baías, lagunas, e outras formações geomorfológicas costeiras, estas interações não lineares são mais intensas, pois a declividade do fundo varia de forma mais abrupta e irregular, há também variações da seção lateral que implicam difrações e reflexões, e a fricção do fundo é mais marcante devido à baixa profundidade. Estes sub-harmônicos formados por estas interações geram uma assimetria da onda de maré que é caracterizada pela predominância do fluxo de vazante ou de enchente.

Em baías e enseadas, a onda de maré (sendo uma onda longa) pode incitar efeitos como co-oscilações e ressonâncias. Isto ocorre quando a geometria da baía (seu comprimento) possui um período (equivalente ao tempo que uma onda longa demora para atravessá-la) que é múltiplo do período da onda incidente, gerando uma onda estacionária, que oscila em modos dependentes da relação entre o comprimento da baía e o comprimento da onda.

A onda de maré é uma dos principais forçantes em áreas costeiras devido à magnitudes de sua elevação e fluxo serem maiores sobre as áreas rasas costeiras. Controlando com isso o regime hidrodinâmico de muitas regiões, como baías, estuários, enseadas, e mesmo sobre a plataforma continental; e com isso regendo vários processos ecológicos ou geológicos destes importantes ecossistemas.

5 METODOLOGIA

5.1 Área de Estudo

Localizada no município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, a baía do Espírito Santo é um corpo semi-fechado de água, que está associado ao sistema estuarino do rio Santa Maria da Vitória, do qual recebe aporte por dois canais: o Canal da Passagem e o que dá acesso à Baía de Vitória (localizada esta na porção interna do estuário). A Baía está localizada na latitude de 20°S, e sofre a ação de ventos predominantemente do setor Este, com uma significante influência de Nordeste devido à constante presença de centros de alta pressão sobre o Atlântico Sul; durante o inverno a passagem de frentes frias com ventos de Sul decorrem principalmente aos sistemas de baixa pressão (MELO e GONZALES, 1995).

O sistema estuarino como um todo (abarcando os canais e as baías) têm sido alvo de pesquisas com relação à sua Hidrodinâmica desde a década de 90; em um esforço constante por parte dos pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo, resultando em monografias, trabalhos científicos publicados e teses de mestrado (e.g. SANTIAGO, 2004; ROCHA, 2000; CHACALTANA et al, 2004). O presente trabalho é também fruto deste esforço científico continuado, esforço este que têm o intuito de caracterizar a região costeira de Vitória e ao mesmo tempo formar profissionais capacitados que possam conformar uma fundamental massa crítica.

5.2 DIVAST

Neste estudo, será utilizado o modelo computacional DIVAST (Depth Integrated Velocity And Solute Transport), desenvolvido por R. A. Falconer (1976). Este modelo é integrado na vertical e, portanto, aplica-se para as regiões em que o fluxo é predominantemente horizontal com boa mistura vertical, ou onde as variações verticais no fluxo são insignificantes. Estas condições são encontradas em muitos estuários ditos bem-misturados, ou parcialmente misturados, ou em corpos de água rasos, onde não há a presença da estratificação vertical da coluna d'água, como ocorre na baía do Espírito Santo. De fato, na ausência de um modelo hidrodinâmico estuarino tridimensional, as

necessidades de uma pesquisa hidrodinâmica estuarina podem ser alcançadas, a uma larga extensão, por modelos bidimensionais integrados na vertical, (CHENG e CASULLI, 1993)

Como todo modelo numérico, no DIVAST há equações que regem os processos físicos a serem simulados. Nos modelos Hidrodinâmicos, estas equações são representadas pela conservação da massa e da quantidade de movimento. A última é expressa pelas equações de Navier-Stokes, na qual são feitas a aproximação das tensões de Reynolds que são parametrizadas pelos coeficientes de viscosidade turbulenta, a aproximação de onda longa que permite a média vertical das variáveis dependentes, e finalmente a aproximação da pressão hidrostática que reduz o termo do gradiente horizontal de pressão unicamente à pressão hidrostática (considerando assim uma circulação unicamente barotrópica) transformando a equação da conservação do Momentum para:

$$\frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial \beta UUH}{\partial x} + \frac{\partial \beta VUH}{\partial y} = +fVH - gH\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\rho_a}{\rho}C_wC_x\sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \frac{gUH\sqrt{(UH)^2 + (VH)^2}}{H^2C^2} + \varepsilon \left[2\frac{\partial^2 UH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 VH}{\partial x\partial y}\right]$$

л	
-	•

em um eixo cartesiano ortogonal x,

$$\frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial \beta UVH}{\partial x} + \frac{\partial \beta VVH}{\partial y} = -fUH - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho_a}{\rho} C_w C_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} - \frac{gVH\sqrt{(UH)^2 + (VH)^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left[\frac{\partial^2 VH}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 VH}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial x \partial y}\right]$$

em um eixo cartesiano ortogonal y.

5

Nas equações anteriores, V é a velocidade horizontal no eixo y média na vertical, H é a profundidade da coluna d'água mais a elevação acima do nível médio, β é um fator corretor do momentum para um perfil vertical de velocidade não uniforme, f é o parâmetro de coriolis devido à rotação da terra, g é a aceleração da gravidade na terra, η é a elevação da superfície livre acima do nível médio, ρ_a é a massa específica do ar, ρ é a massa específica do fluido (água), C é o coeficiente de rugosidade de Chezy, C_w é o coeficiente de resistência ar/água, ε é o coeficiente de viscosidade turbulenta médio na vertical.

Complementar à primeira, é utilizada a Equação da Conservação da Massa, em que é aplicada a hipótese de incompressibilidade, e é feita a média vertical por desconsiderar as variações da velocidade no eixo vertical:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0$$
 6

Para parametrizar o coeficiente de viscosidade turbulenta mediado na vertical, *ε*, o DIVAST utiliza-se de um modelo de turbulência simplificado, em que o coeficiente é expresso por apenas uma equação algébrica, o chamado Comprimento de Mistura de Prandtl. Tal modelo simula apenas a turbulência gerada pela fricção de fundo, desconsiderando a gerada pelo cisalhamento interno. Tal aproximação é válida para áreas rasas e bem misturadas como ocorre na baía do Espírito Santo. O Comprimento de Mistura de Prandtl possui a vantagem de requerer baixos esforços computacionais, ao contrário de modelos de turbulência mais complexos, como o GOTM (BURCHARD, 2002), ou o Mellor & Yamada (MELLOR, 2004). A equação algébrica utilizada no Comprimento de Mistura de Prandtl é:

$$\varepsilon = C_e \frac{H}{C} \sqrt{g(U^2 + V^2)}$$
⁷

nesta equação C_e representa o coeficiente de viscosidade turbulento, C o coeficiente de rugosidade de Chezy (expresso anteriormente).

A seguir alguns tópicos concernentes ao funcionamento do modelo serão abordados:

5.2.1 Método Numérico

A discretização do domínio contínuo é feita pelo Método das Diferenças Finitas. Tal método trata o domínio contínuo de forma que as variáveis dependentes são consideradas como existindo apenas em pontos discretos. Todas derivadas são aproximadas por diferenças resultantes de uma representação algébrica da equação diferencial parcial (EDP). O esquema de diferenças finitas utilizado no DIVAST é o chamado ADI (Alternating Direction Implicit), tal esquema quebra o passo de tempo em duas partes; em cada meio-passo de tempo a elevação e a componente da velocidade em um eixo (x) são tratadas implicitamente (tratadas em um tempo desconhecido ($n + \frac{1}{2}$), necessitando de soluções simultâneas de várias equações envolvendo tais termos desconhecidos). Todas as outras variáveis neste meio-passo de tempo são computadas explicitamente, ou seja, todas as variáveis estão em um tempo anterior (n) e são conhecidas. O outro meio-passo de tempo é computado com a elevação e a componente da velocidade no outro eixo (y) de forma implícita, e as outras variáveis explicitamente.

A utilização de um método numérico implica em restrições com relação à estabilidade do cálculo, tal estabilidade será uma função do espaçamento da grade e da celeridade da onda que se propaga no problema; tal critério de estabilidade é conhecido como Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$\Delta t \le \frac{\nu \Delta x}{\sqrt{gH}}$$

em que Δt é o passo de tempo a ser utilizado no modelo, Δx o espaçamento da grade, g o módulo da aceleração da gravidade, H a profundidade da coluna d'água, e v é o número de Courant que deve ser menor ou igual a 1.

5.2.2 Grade Computacional

O DIVAST utiliza uma grade computacional dita deslocada, pois nas células os pontos de elevação estão dispostos no centro, enquanto que os valores de profundidade e as componentes da velocidade estão no centro das faces da célula, como é mostrado na figura 1:



Figura 1: Esquema da grade computacional

5.3 Metodologia da Modelagem

O estudo das correntes residuais realizado no presente trabalho utiliza-se de um modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical (2DH). Uma vez que tal modelo é Euleriano, ou seja, discretiza o espaço em pontos discretos onde serão representados o movimento do fluido em questão, as correntes residuais são calculadas através do somatório dos valores das velocidades instantâneas integradas na vertical ($U \in V$) durante um ciclo de maré, e posteriormente divididas por este tempo (tempo representado pelo número de passos de tempo acumulados). Tal como na equação a seguir:

$$\vec{U}_{R} = \frac{1}{T+t_{0}} \int_{t_{0}}^{T+t_{0}} \vec{U} dt$$

em que \vec{U}_R representa a velocidade residual média na vertical, T o período do harmônico a ser modelado (no presente trabalho o M_2 , pois é o mais

importante), t_0 o instante inicial da integração temporal, \vec{U} a velocidade instantânea média na vertical.

Estes valores, portanto, são calculados em cada ponto da grade, fornecendo no final um campo de velocidades residuais (após um pós-tratamento em que é feita a interpolação das velocidades residuais nos eixos x e y).

Mas, antes do cálculo das correntes residuais, o modelo deve ser preparado e adaptado para ser aplicado na região de estudo. Esta preparação compete basicamente à aquisição de dados da área, no caso da baía do Espírito Santo, que possam ser tratados e implementados como condições de contorno e iniciais, para melhor representar o espaço físico, e melhor simular o fluxo real. Estas etapas compreendem a digitalização da área a ser estudada, seguida da criação da grade de acordo com esta área digitalizada, a estipulação da batimetria acoplada a esta grade, e por último um estudo sobre os esquemas de condições de contorno abertas, para a aplicação na baía.

5.3.1 Digitalização do Contorno

Será utilizado no trabalho um contorno fechado que representa a linha de costa da região da Baía do Espírito Santo, este mesmo contorno foi feito através da digitalização da Carta Náutica 1401 da Marinha do Brasil (DHN, 2002). O mesmo é visto na figura 2.

5.3.2 Dados Batimétricos

O DIVAST, como explicado anteriormente, utiliza como dado de condição de contorno no fundo a profundidade, sendo esta localizada no centro da face da célula. Portanto, para a aplicabilidade na Baía do Espírito Santo, estes dados cedidos pelo GEARH (Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos) de campanhas de campo pretéritas (RIGO, 2002), foram interpolados de acordo com a grade a ser gerada no domínio. Esta batimetria então pode ser vista na figura 2.



364000 365000 366000 367000 368000 369000 370000 371000 372000

Figura 2: Mapa batimétrico da baía do Espírito Santo (GEARH, 2002).

5.4 Malha

Para a representação do domínio real na forma computacional, deve ser criada uma malha numérica. No DIVAST, a malha deve ser regular, ou seja, composta de pontos equidistantes, na forma de quadrados. O espaçamento escolhido foi de 25 m, pois este representa um limite prático decorrente do esforço computacional despendido, uma vez que um maior refinamento aumentaria consideravelmente o tempo de computo na simulação. E também, a base de dados batimétricos da baía do Espírito Santo é esparsa na maior parte (cerca de 50 m a 100 m de um ponto a outro), sendo que um maior refinamento causaria uma sobre-especificação, sem aumentar a acuraria da solução.

5.5 Condições de contorno abertas

Com o intuito de melhorar a implementação do modelo na área de estudo, foi realizado um estudo à parte sobre os tipos de esquemas de condições de contornos abertas.

É sabido que a solução das condições de contorno abertas nas equações de Navier-Stokes é um problema "mal-posto". E também é sabido que o tipo de condição influencia na solução do muito domínio computacional. Particularmente, modelos numéricos como o DIVAST mostram-se mais sensíveis à escolha do tipo de condição de contorno do que outros parâmetros do modelo, como os coeficientes de fricção do fundo, ou a viscosidade turbulenta (CAWLEY e HARNTNETT, 1992). Portanto, muitos trabalhos existem que tentam contornar o problema, propondo esquemas de contorno que não influenciem a solução do domínio, mantendo a característica hiperbólica da solução, e ao mesmo tempo reproduzam propriedades conhecidas neste (seja de dados externos, ou do incitamento de condições artificiais), simulando a interação do domínio com o meio externo não computado. Mas dentre estes trabalhos, pouco consenso tem havido no sentido de escolher o melhor esquema para condições de contorno abertas para as equações de águas rasas. Dentre estes podemos citar Camerlengo e O'Brien (1980), Tang e Grimshaw (1996), Palma e Matano (1998), Nycander e Döös (2003); que fizeram importantes evoluções nesta área.

Uma das principais intenções de uma condição de contorno aberta é evitar, ou mitigar, os efeitos reflectivos do contorno aberto artificial. Neste sentido, um dos primeiros tipos de condição de contorno tentada foi a condição de radiação, baseada na equação de Sommerfeld:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$
 10

em que, ϕ representa a variável prognostica, na qual a condição é passada, e *n* o eixo normal ao contorno, e *C* representa a velocidade da onda em águas rasas: \sqrt{gh} . Esta condição permite a passagem de ondas gravitacionais se propagando em sentido normal ao contorno. Após esta, evoluções foram tentadas no sentido de melhorar a avaliação da velocidade da onda, que na prática pode ser diferente da velocidade da onda em água rasa assumida acima, devido aos efeitos dispersivos, e à possibilidade da incidência oblíqua da onda. Um dos trabalhos pioneiros foi o de Orlansky (1976) (apud PALMA e MATANO, 1998), o qual propôs uma nova representação da condição de radiação, através da avaliação dinâmica da velocidade da onda, com a análise das variáveis prognósticas (componentes das velocidades e elevação) através de diferenças nos pontos interiores, e no passo de tempo anterior:

$$C = \frac{\frac{\partial \phi}{\partial t}}{\frac{\partial \phi}{\partial n}}$$
 11

Este tipo de condição tem sido muito utilizada, e formas evoluídas desta foram criadas, como nos trabalhos de Camerlengo e O'Brien (1980) e Tang e Grimshaw (1996).

Flather (1976) (apud Palma e Matano, 1998), combinando a clássica equação de radiação com uma forma unidimensional da equação da continuidade, propôs um esquema de condição de contorno que não acarretava alterações do nível médio, como ocorre nas de radiação anteriores, as quais quando aplicadas necessitavam de técnicas especiais, como a constrição do volume do domínio, descrita em Marchesiello et al (2001). A equação diferencial do esquema de Flather é:

$$u = \frac{C}{h}\eta$$
 12

em que u é a velocidade normal a ser passada no contorno, e η a elevação computada pelo modelo. A vantagem deste esquema é a simplicidade de aplicação e a conservação do volume natural.

Outro tipo de condição geralmente utilizada, que se mostra extremamente simples em sua configuração, mas que sempre tem mostrado resultados

razoáveis (e.g. Palma e Matano, 1998; Nycander e Döös, 2003) são os métodos de relaxamento, como a camada esponja, que amortizam a solução do domínio em uma faixa próxima à borda a valores especificados (valores externos conhecidos, ou zero). Este esquema funciona através da especificação de um coeficiente que varia ao longo da faixa escolhida, de 1 a 0 (contorno e limite interno da camada). Este tipo de condição minimiza perturbações indesejadas.

5.5.1 Testes

Para a aplicação das condições de contorno no presente estudo, na Baía do Espírito Santo, foram realizados testes com diferentes implementações de cada uma das condições de contorno anteriores, em dois casos teste, e posteriormente na própria região de estudo.

5.5.1.1 Teste Condição Passiva

Para testar a capacidade reflectiva das diferentes condições de contorno, um canal retangular foi utilizado, seguindo o teste de Palma e Matano (1998), mas com um perfil batimétrico constante (uma vez que na região de estudo não há grandes profundidades). O teste consistia na especificação de uma elevação inicial na parte central do canal, na forma de um bulbo; como mostra a figura 3. As especificações do teste estão na tabela 1.



Figura 3: Bacia simulada

Parâmetro	Valor
Comprimento da Bacia	1000 km
Largura da Bacia	500 km
Tamanho da grade	5 km

Tabela 1: parâmetros do domínio teste.

Foram testadas neste exemplo, ao todo, sete implementações, sendo que todas, com exceção de uma de Orlansky modificada por Tang e Grimshaw (1996), funcionaram bem. Permitindo então a propagação da onda incidente sem reflexão. A tabela 2 especifica os tipos de condições utilizadas, e sua forma diferencial. A figura 4 demonstra um exemplo de imagem na qual pode se identificar a capacidade reflectiva da condição de contorno, gerada a partir da saída de uma das condições testadas:



Figura 4: No eixo das abscissas uma secção longitudinal do canal, e no eixo das coordenadas a evolução temporal, no eixo z, a elevação da superfície.

Tabela 2: Tipos de condições de contorno testadas; ϕ é a variável prognostica, η a elevação, u a velocidade normal à borda, e os índices i e j indicam a posição espacial, sendo o ponto do contorno, e $i \pm 1$ um ponto posterior (anterior) ao contorno; Δx é o espaçamento da grade computacional.

Condição de Contorno	Equação
	$R = \left(\Delta t * \sqrt{g * h}\right) / \Delta x$
Sommerfeld	$\phi_{(i,j)}^{n+1} = \phi_{(i,j)}^n + R * \left(\phi_{(i,j)}^n - \phi_{(i\pm 1,j)}^n \right)$
	$R = \left(\phi_{(i\pm 1,j)}^{n} - \phi_{(i\pm 1,j)}^{n-1}\right) / \left(\phi_{(i\pm 2,j)}^{n-1} - \phi_{(i\pm 1,j)}^{n-1}\right)$
	R, se 0 < R < 1
	$R = 0, se R \le 0$
	$1, se R \ge 1$
Orlansky	

	$\phi_{(i,j)}^{n+1} = R * \phi_{(i\pm 1,j)}^n + (1-R) * \phi_{(i,j)}^n$
Orlansky (Tang e Grimshaw)	$S = \left(\phi_{(i\pm 1,j)}^{n} - \phi_{(i\pm 2,j)}^{n-1}\right) / \left(\phi_{(i\pm 1,j)}^{n-1} - \phi_{(i\pm 2,j)}^{n}\right)$ $S, se \ 0 < S < I$ $S = -1, se \ S \ge 0$ $0, se \ -1 < S \le 0$ $\phi_{(i,j)}^{n+1} = \phi_{(i\pm 1,j)}^{n} + S * \left(\phi_{(i,j)}^{n} - \phi_{(i\pm 1,j)}^{n+1}\right)$
Flather 1	$u = \frac{C}{h} * \eta$ $C = \sqrt{g * h}$
Flather 2	$\eta = \frac{h}{C} * u$ $C = \sqrt{g * h}$
Relaxamento	$in = 1M, sendo M o número de células utilizadas$ $\alpha = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\pi \frac{in}{x(i, j)}\right)\right)$ $\phi = (1 - \alpha) * \phi_{(in, j)} + \alpha * \phi_{ext}$

5.5.1.2 Teste Condição Ativa

Uma vez que para a aplicação das condições de contorno na Baía do Espírito Santo é necessária a inserção de uma onda de maré incidente, faz-se portanto, necessária a utilização de uma condição de contorno ativa (ou mista). Para tal, realizamos testes utilizando os esquemas das condições supracitadas em uma baía (com as mesmas dimensões do caso anterior, mas com uma entrada fechada). Para balizar os nossos resultados, realizamos dois casos testes preliminares, que atendem às condições de máxima reflexão, e de reflexão inexistente. Estes guiarão as comparações. A máxima reflexão foi gerada imprimindo na abertura da Baía uma elevação correspondente à uma onda de maré M_2 ; esta onda viaja por toda a baía, incidindo no contorno interno, fechado, gerando uma onda refletida que viaja em sentido oposto, até alcançar o contorno aberto (de onde a onda foi gerada); e uma vez que neste caso nenhum esquema especial é utilizado para evitar a reflexão, esta onda reflete novamente no contorno numérico.

Já o caso da não reflexão (figura 5) é gerado com o auxílio de um canal com mesma largura dos casos anteriores, mas com um comprimento maior, equivalendo a 3500 km, e fechado por todos os lados. É então gerada uma onda com período da M_2 no contorno leste, que viaja por todo o canal, incidindo na parte oposta fechada onde reflete. Esta onda refletida viaja de volta ao contorno de origem, mas antes de refletir nesse, esta passa pela linha de comprimento igual a 1000 km, recriando um quadro da oscilação da maré na baía de 1000 km sem reflexão na borda aberta. Este é o nosso exemplo "benchmark".





Figura 5: Isolinhas de elevação para o caso "benchmark".

Figura 6: Isolinhas de elevação referente ao caso da total reflexão.

Dentre as condições de contorno testadas, a que mais se adaptou à forma ativa, e que obteve melhores resultados foi a implementação da condição de Flather; em que a incógnita é o fluxo normal ao contorno, o qual é função da elevação computada no domínio, e a elevação da onda incidente a ser passada no contorno.

A seguinte implementação foi utilizada:

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} * (\eta - \eta_{ext})$$
 13

Sendo que a variável η simboliza aqui a elevação computada pelo modelo e η_{ext} a elevação decorrente da onda de maré a ser simulada. Sendo esta calculada a partir de:

$$\eta_{ext} = A * \cos\left(\frac{2\pi}{T_m} * t - \varphi\right)$$
 14

em que *A* é a amplitude da onda de maré, T_m o período do harmônico (no caso 12.4 h, da M_2); φ o argumento que representa um ângulo de defasagem da onda.

Este esquema permite que haja a geração de uma onda incidente, mas permite também que qualquer onda que reflita de volta, "passe" sem sofrer a reflexão. O que pode se identificar, atenciosamente, na figura 7; em que o padrão é semelhante ao da figura 5 até a isolinha de 200.



5.5.1.3 Baía do Espírito Santo

A aplicação das condições de contorno na baía do Espírito Santo foi realizada

de forma que nos quatro contornos abertos, condições diferentes foram utilizadas, baseando-se nas características esperadas de cada região, e no nível de dados reais disponíveis sobre os contornos abertos. A figura 8 mostra a localização dos contornos utilizados:



Figura 8: Contornos abertos os quais foram implementadas diferentes condições de contorno, sobre a malha de 25 m.

Nos contornos 1 e 2 foram implementadas condições de fluxo normal, a valores conhecidos anteriormente (campanhas de campo, com correntógrafos realizadas pelo Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos (GEARH, 2002)), com o auxílio do Método de Relaxamento, descrito acima, de maneira que o fluxo gradualmente tende ao valor passado no contorno. A espessura da camada de relaxamento escolhida foi de 10 células, como utilizado em Palma e Matano (1998), e Nycander e Döös (2003). Especificamente, no contorno 2,

além do coeficiente que varia de 1 a 0, normal ao contorno, outro coeficiente foi utilizado, variando paralelamente no mesmo, sendo este igual a h(i, j)/h max; ou seja, de maneira que tenha valor 1 na maior profundidade (na região do canal como mostra a figura 9), e nos outros pontos seja a divisão da profundidade do ponto, pela profundidade máxima do perfil longitudinal. Este coeficiente adimensional permite que no canal ocorram as maiores velocidades, da ordem da velocidade medida em campo (0.5 m/s), e no resto da borda varie dependendo da profundidade local. No contorno 4, como a elevação oscila de maneira paralela ao mesmo, a utilização das condições de radiação descritas acima levavam a erros absurdos, gerando intensos fluxos através da contorno. E uma vez que não havia dados reais de fluxos na região, optou-se pela utilização do esquema de relaxamento, com o valor do fluxo externo sendo zero, ou seja, a velocidade normal ao contorno na região da camada de relaxamento era alterada até zero na borda, funcionando como uma camada esponja.



Figura 9: Detalhe do contorno aberto 2, identificando a região do canal.

O contorno aberto 3 foi ajustado de forma que nele adentrasse no domínio computacional a onda de maré (com amplitude de 0.7 m medida em um marégrafo situado no Porto de Tubarão), a qual incitaria os fluxos residuais estudados no presente trabalho. Mas, este contorno é uma região que potencialmente recebe ondas refletidas da parte interna do domínio, as quais podem ficar presas no mesmo, deteriorando a simulação, devido a uma reflexão numérica do contorno. Portanto, nesta foram testadas os esquemas de radiação supracitados no teste das condições ativas. E destes, mais uma vez, o esquema que melhor se adaptou ao caso foi o proposto por Flather (1976) (apud Palma e Matano, 1998) com fluxo (Flather 1 na tabela 2), pois os outros esquemas, ou provocavam reflexão, ou alteravam o nível médio do domínio computacional, ou mesmo eram extremamente instáveis, explodindo nos primeiros passos de tempo.

Em vista da baixa quantidade de dados reais disponíveis com relação a hidrodinâmica próxima aos contornos computacionais, estes esquemas parecem produzir os padrões mais coerentes, apresentando alta estabilidade e baixa reflexão.

6 **RESULTADOS**

Nesta parte serão apresentados os resultados referentes à simulação com a componente M_2 . Sendo estes compostos de mapas de velocidades e gráficos de magnitude de corrente e elevação em pontos específicos. Estes resultados dão suporte ao resultado do mapa de velocidades residuais, ou correntes residuais na Baía do Espírito Santo.

6.1 Gráficos de velocidade e elevação da superfície livre

Uma vez que os únicos dados de velocidade de corrente obtidos de campanhas de campo simultaneamente eram nas saídas dos canais da Passagem e de acesso ao Porto de Vitória, estes são os únicos pontos notórios a pena ressaltar o padrão temporal das velocidades.

Para o canal da Passagem a velocidade medida foi cerca de 0,7 m/s. Bem como as velocidades medidas no modelo, como mostra a figura 10.



Figura 10: Magnitude de velocidade no canal da Passagem.

Para o canal de acesso ao Porto de Vitória, a velocidade estimada com o correntógrafo foi de 0.5 m/s . Aproximadamente igual à saída do modelo em um ponto próximo (figura 11). Mostrando também uma assimetria local da onda de maré, com uma predominância de vazante.



Figura 11: Magnitude de velocidade no canal do Porto de Vitória.

Com relação à variação temporal da superfície livre, em todo o domínio foram observadas oscilações com amplitude equivalente à estipulada no contorno aberto 3, ou seja, 0,7 m, Como mostra a figura 12.



Figura 12: Elevação da superfície livre em um ponto genérico do domínio.

6.2 Mapas de velocidade de corrente instantâneas

Os mapas de velocidade de corrente instantânea são nesta parte apresentados, em instantes conspícuos da onda de maré, nomeadamente as estofas de preamar e baixa-mar, e os instantes de máxima velocidade de vazante e enchente, quando a elevação atinge o nível médio. Como é mostrado esquematicamente na figura 13, referente à variação da elevação com o tempo. Nesta figura, o ponto 1 representa as máximas velocidades de enchente, o 2 a estofa de preamar, o 3 as máximas velocidades de vazante, no 4 a estofa de baixa-mar, e novamente no 5 as máximas velocidades de enchente.



Figura 13: Perfil temporal das elevações.

A estofa de preamar é ilustrada na figura 14, a de baixa-mar na figura 15; já as máximas de enchente e vazante são representadas nas figuras 16 e 17 respectivamente.



Figura 14: Mapas de Velocidade na Estofa de preamar.



Figura 15: Mapas de Velocidade na Estofa de baixa-mar.



Figura 16: Mapas de Velocidades Máximas de vazante.



Figura 17: Mapas de Velocidades Máximas de enchente.

A partir da visualização da figura 14 (estofa de preamar), pode-se observar a predominância das baixas velocidades em todo o domínio, com um vórtice ciclônico de baixas velocidades na região norte do molhe do Porto de Tubarão. Já na estofa de baixa-mar (figura 15), a situação muda para a ocorrência de fortes fluxos. Sendo estes na região do canal da Ponte da Passagem, em que o jato da vazante ainda mostra sua dominância (bem como o par de vórtices associado à ponta do jato); e na saída do canal de acesso ao Porto de Vitória, em que há um fluxo bastante evidente por sobre o canal dragado, que por sua vez alimenta um grande vórtice na parte sudoeste do domínio. Nesta estofa de baixa-mar, na região do molhe do Porto de Tubarão, o vórtice ocorre na parte sul, sendo agora anticiclônico.

Na figura 16, as máximas velocidades de vazante mostram-se bastante evidentes, com um forte jato gerado na saída do canal da Passagem, e um forte fluxo de vazante também no canal de acesso ao Porto de Vitória, onde pode-se perceber a predominância das maiores velocidades por sobre o canal dragado, assinalando um padrão esperado pela topografia local (gerado pela condição de relaxamento). As máximas velocidades de enchente observadas na figura 17 seguem um padrão similar ao da vazante, com fortes fluxos (no sentido de enchente desta vez) nas regiões de ambos canais.

Nas figuras de máximas de enchente e vazante percebe-se, na ponta do molhe e do píer de Tubarão, uma intensificação do fluxo, gerada pelo cisalhamento com o contorno físico da corrente de enchente ou vazante. O mesmo padrão de intensificação do fluxo foi também observado por sobre os altos topográficos, principalmente na região da barreira de corais que atravessa a Baía do Espírito Santo. Tais padrões são melhores observados na figura 18, de máximas velocidades de enchente, com escala cromática.



Figura 18: Magnitude de corrente na máxima enchente; as regiões de intensificação são apontadas pelas setas.

Há regiões caracteristicamente estagnadas, com baixos fluxos em todos os estados da maré; umas das mais evidentes são as regiões próximas às ilhas do Boi e do Frade em que, devido à sua característica parcialmente fechada, não existem grandes fluxos circulatórios.

6.3 Correntes Residuais

As correntes residuais geradas pelo modelo (figura 19) confirmam o padrão observado nos campos de velocidade instantânea, com uma predominância das velocidades de vazante, sendo esta mais evidente nos jatos gerados em ambos canais. Há também a ocorrência de vórtices associados aos jatos e à presença de feições morfológicas da costa (molhes e ilhas), indicando possíveis diferentes fontes geradoras.



Figura 19: Mapa de correntes residuais.

Na porção norte da saída do Canal da Passagem, próximo à praia de Camburi, há uma correnteza residual na direção do jato; bem como em sua porção inferior (associada esta ao grande vórtice ciclônico).

A região do canal de acesso ao Porto de Vitória possui um fluxo bastante irregular, ainda que haja um claro jato para a Baía sobre o canal dragado, mostrando-se bastante dependente da profundidade. Esse fluxo irregular tornase caótico na região das ilhas à sudoeste do domínio.

Quanto à magnitude das correntes residuais, estas mostram-se uma ordem de grandeza inferiores às velocidades instantâneas, como se espera em correntes residuais induzidas pela maré. Na figura 20, as magnitudes de velocidade residual são mostradas na forma cromática.



Figura 20: Magnitude de velocidades residuais.

7 DISCUSSÃO

A modelagem de regiões como a Baía do Espírito Santo demanda sempre muito esforço por parte do modelador, devido primariamente pela conformação complexa, com a presença de canais estuarinos, os quais possuem regiões de manguezal, que influenciam na circulação (CHACALTANA et al, 2004) além de uma complexa topografia de fundo. Este fato acentua-se quando há a falta de dados reais, na forma de séries temporais de elevação e fluxo, que possibilitem os fundamentais passos de calibração e validação das simulações numéricas.

Mediante tais dificuldades, o estudo das correntes residuais deve antes de tudo passar pelo estudo da hidrodinâmica local, instantânea. Pois esta, obviamente, refletirá no padrão residual. E uma vez que o forçante escolhido para o estudo das velocidades residuais é a onda de maré, o comportamento temporal e a propagação espacial desta onda são os parâmetros que definirão o sucesso da simulação.

Diante disto, as magnitudes de velocidade encontradas na saída dos canais da Passagem e de acesso ao porto de Vitória nas simulações (figuras 1 e 2) que aproximam-se das aferições reais com correntógrafos, ratificam a simulação numérica. O mesmo princípio vale para as elevações encontradas no modelo, que correspondem ao valor encontrado com o auxílio do marégrafo do Porto de Tubarão. Outro fator positivo encontrado é a suavidade dos mapas de velocidade, ou seja, a ausência de fluxos anormais ou sem significados físicos por sobre o domínio. Tal suavidade é decorrente também da implementação dos esquemas de condições de contorno, de radiação e relaxamento, que evitam a reflexão de ondas no contorno numérico aberto.

A partir da visualização dos mapas de velocidades instantâneas, pode-se observar que o Canal da Passagem gera um forte jato na vazante, que influencia fortemente a circulação da baía do Espírito Santo, sendo esta bastante sensível aos valores de velocidade do jato; alterando-se visivelmente frente às oscilações deste.

Na região do canal de acesso ao Porto de Vitória, há uma dependência das velocidades com a profundidade, devido ao esquema de condição de contorno implementado. Este resultado representa uma solução lógica (esperada para tal topografia), mas não necessariamente real, sendo, portanto, necessárias maiores informações reais do padrão hidrodinâmico do local para confirmá-la.

Os vórtices observados nas estofas de enchente e vazante e mais claramente nas correntes residuais - associados aos píeres e ao molhe do Porto de Tubarão - são gerados pelo cisalhamento da massa d'água quando os fluxos oscilatórios encontram estas feições da costa. Este cisalhamento gera então vorticidade relativa na ponta da estrutura (observada pelo aumento das velocidades nesta região), que é advectada para a região posterior à mesma, alimentando o vórtice.

Na análise das correntes residuais, a feição do jato no canal da Passagem mostra-se mais evidente, corroborando a predominância nesta região das velocidades de vazante, juntamente com o vórtice ciclônico no fim do jato. Este vórtice é gerado pela advecção da vorticidade gerada na saída do canal para o interior da baía. Este é o mesmo mecanismo de geração do vórtice residual na parte sudoeste do domínio, na saída do canal de acesso ao Porto de Vitória.

A área com baixas correntes residuais na porção norte e sul da ilha do Frade mostra-se bastante estagnada, implicando em sérias conseqüências para a balneabilidade, uma vez que nestes locais há despejo de efluentes domésticos associados às águas pluviais que, segundo o escoamento residual, tendem a permanecer muito tempo no local, tendo, portanto, um grande tempo de residência.

8 CONCLUSÕES

Com relação à modelagem hidrodinâmica, o trabalho conseguiu simular satisfatoriamente a hidrodinâmica local induzida pela onda de maré M_2 . As correntes residuais simuladas apresentaram feições características reportadas em outros estudos, como os vórtices residuais associados a jatos de canais (e.g. FUJIWARA, et al 1994) e a feições da costa (e.g. TEE, 1986).

Mas devido à grande variação espacial das correntes residuais, e à complexa topografia do fundo e da costa, estes padrões dificilmente possuem alguma relação com o transporte de massas d'água ou outras substâncias (poluentes, sedimentos ou mesmo plâncton). Uma vez que a presente modelagem é euleriana em sua base, e o transporte de massas é lagrangeano. Tal diferença é mais evidente quando se contrapõem as correntes residuais eulerianas e lagrangeanas, que são bastante diferentes em valor, principalmente em áreas costeiras. Esta questão primeiramente levantada por Longuett-Higgins, tem sido levada em consideração recentemente em muitos trabalhos (e.g. WEI et al, 2004), que tentam quantificar as correntes residuais por ambos pontos de vista, e mostram que esta diferença pode ser bastante importante.

Com relação à representatividade real da simulação, estes resultados devem ser considerados com grande ressalva, uma vez que houve a simulação de apenas um componente harmônico da maré, dentre os vários harmônicos que atuam na região. E há também a falta de dados de campo que possam permitir a calibração do modelo de maneira mais eficaz e por fim uma possível validação da simulação.

Já o estudo das condições de contorno abertas realizado paralelamente ao escopo principal do trabalho mostrou-se eficaz, dando à modelagem estabilidade, suavidade próxima aos contornos, e evitando reflexões espúrias que contaminem a modelagem. Mas também este estudo pode ser grandemente melhorado com o auxílio de uma maior base de dados de campo.

Para trabalhos futuros, há de se sugerir, além de campanhas de campo que sustentem os trabalhos, um estudo sobre o mecanismo de geração dos

vórtices residuais, incluindo na simulação mais harmônicos, para que se possa identificar possíveis alterações em maiores escalas de tempo.

As correntes residuais são importantes ferramentas para o gerenciamento costeiro, pois controlam processos de transporte em grandes escalas temporais. Podendo se associá-las desde à distribuição do plâncton, ao transporte de poluentes (e.g. efluentes, contaminantes, hidrocarbonetos). Mas para tal, a melhor metodologia seria a das correntes residuais lagrangeanas. Por isso recomenda-se, para futuros trabalhos, que se realize este estudo. Mas englobando então uma maior área costeira juntamente com a parte do estuário, para que se possam abranger processos importantes em escalas regionais; uma vez que os processos ecológicos e os relacionados aos impactos do despejo de poluentes atuam nesta escala.

9 REFERÊNCIAS

BARROSO, G., F; DIAS, Jr., C. **AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA ÁGUA DO CANAL DA PASSAGEM / MANGUEZAL DO LAMEIRÃO, VITÓRIA (ES).** Anais do Seminário Regional de Ecologia, 1997.

BURCHARD, H. APPLIED TURBULENCE MODELLING IN MARINE WATERS. Ed. Springer, 2002.

CAMERLENGO, L., A.; O'BRIEN, J., J. **Open Boundary Conditions in Rotating Fluids.** Journal of Computational Physics. 1980.

CAWLEY, A., M.; HARTNETT, M. Sensitivity od a 2-dimensional hydrodynamic model to boundary conditions. Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters. Ed. R. A. Falconer. Ashgate. 1992.

CHACALTANA, J., T., A. et al. INFLUÊNCIA DO MANGUEZAL NO PADRÃO DE ESCOAMENTO DO SISTEMA ESTUARINO DA ILHA DE VITÓRIA - ES. 2004.

CHEN, C.; BEARDSLEY, B.Cross-Frontal Water Exchanges on Georges Bank: Modeling Exploration of the US GLOBEC/Georges Bank Program Phase III Study. Journal of Oceanography, 2001.

CHENG, R., T.; CASULLI, V. et al. Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1993.

CUGIER, P.; LE HIR, P. Development of a 3D Hydrodynamic Model for Coastal Ecosystem Modelling. Application to thePlume of the Seine River (France). Estuarine, Coastal and Shelf Science, Elsevier Science, 2002.

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

DIAS, J., M., et al. Lagrangian Transport of Particles in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. Phys. Chem. Earth (B). Vol. 26, No. 9, 2001.

DIMOU, N., K.; ADAMS, E., E. A Random-Walk, Particle Tracking Model for

Well-Mixed Estuaries and Coastal Waters. Estuaries, Coastal and Shelf Science, 1993.

ELLIEN, C. et al. The influence of variability in larval dispersal on the dynamics of a marine metapopulation in the eastern Channel. Oceanologica Acta, 2000.

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

FUJIWARA, T., et al. Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation ina a tidal estuary. Continental Shelf Research. 1994.

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

GÓMEZ-VALDÉS, J. et al. **Overtides, compound tides, and tidal-residual current in Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur, Mexico.** Geofísica Internacional, 2003.

HENCH, J., L., et al. **Transient Tidal Circulation and Momentum Balances at a Shallow Inlet.** American Meteorological Society, 2003.

JOYEX, J., C. et al. The flood-tide ichthyoplanktonic community at the entrance into a Brazilian tropical estuary. JOURNAL OF PLANKTON RESEARCH, 2004.

LUCAS, L., V., et al. Processes governing phytoplankton blooms in estuaries. 11: The role of horizontal transport. MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 1999.

MARCHESIELLO, P. et al. Open Boundary COniditons for long-term integration of regional ocanic models. Ocean Modelling, 2001.

MELLOR, G. User Guide for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICL OCEAN MODEL. 2004.

MELO, E.;GONZALES, J. de A. **COASTAL EROSION AT CAMBURI BEACH** (VITÓRIA, BRAZIL) AND ITS POSSIBLE RELATION TO PORT WORKS. Proceedings of the 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries –COPEDEC IV, pp. 397-411, Rio de Janeiro, Brazil, 1995.

MOBERG, F., et al. Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration. Ocean & Coastal Management, 2003.

MONTERO, P., et al. On residual circulation of the Ria of Vigo, using a 3-D baroclinic model. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 1999.

NYCANDER, J.; DÖÖS, K. **Open Boundary Conditions for Barotropic Waves.** Journal of Geophysical Research. 2003.

PALMA, D., E.; MATANO, R., P.On the implementation of passive boundary conditions for a general circulation model: the barotropic mode. Journal of Geophysical Research. 1998.

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

ROCHA, A., B., 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.

SANTIAGO, I., D. Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES. Monografia. Vitória, 2004.

TANG, Y.; GRIMSHAW, R. Radiation Boundary Conditions in Barotropic Coastal Ocean Numeric Models. Journal of Computational Physics.1996.

TEE, K., T. **Modeling of Tidally induced Residual Currents.** Hydrodynamics of estuaries, ed. Björn Kjerfve. CRC Press, 1986.

WEI, H., et al. Tidal-induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea. Journal of Marine Systems, 2004.

WOLK, F. Three-dimensional Lagrangian Tracer Modelling in Wadden Sea Areas. Diploma thesis, 2003.

ZHENG, L.; CHEN, C.; LIU, H. A Modeling Study of the Satilla River Estuary, Georgia. I:Flooding-Drying Process and Water Exchange over the Salt Marsh-Estuary-Shelf Complex. Estuaries Vol. 26, 2003.