



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

MARCELA APARECIDA SOPRANI

**ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DAS
ONDAS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO POR
MEIO DO MODELO REFDIF**

**VITÓRIA
2010**

MARCELA APARECIDA SOPRANI

**ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DAS
ONDAS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO POR
MEIO DO MODELO REFDIF**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Oceanografia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana.

**VITÓRIA
2010**

ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DAS ONDAS NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO POR MEIO DO MODELO REFDIF

por

MARCELA APARECIDA SOPRANI

Submetido como requisito parcial para a obtenção do grau de

Oceanógrafo

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Julho de 2010

© Marcela Aparecida Soprani

Por meio deste, o autor confere ao Colegiado do Curso de Oceanografia e ao Departamento de Oceanografia e Ecologia da UFES permissão para reproduzir e distribuir cópias totais deste documento de monografia para fins não comerciais.

Assinatura do autor.....
 Curso de graduação em Oceanografia
 Universidade Federal do Espírito Santo
 12 de julho de 2010

Certificado por
 Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana
 Orientador – DEA/CT/UFES

Certificado por.....
 Dr. Daniel Rigo
 Examinador Interno - DEA/CT/UFES

Certificado por
 Dr. Alexandre Braga Coli
 Examinador Externo - CEPEMAR

Aceito por
 Gilberto Fonseca Barroso
 Coordenador do Curso de Oceanografia
 DOC/ CCHN/ UFES

MARCELA APARECIDA SOPRANI

**ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES DAS ONDAS NA
BAÍA DO ESPÍRITO SANTO POR MEIO DO MODELO
REFDIF**

COMISSÃO EXAMINADORA

Julio Tomás Aquije Chacaltana
Orientador – DEA/ CT/ UFES

Daniel Rigo
Examinador interno – DEA/ CT/ UFES

Alexandre Braga Coli
Examinador externo – CEPEMAR

VITÓRIA
2010

Aos meus queridos pais...

"Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo, só depende de nossa vontade e perseverança."

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo...

À minha família e ao Alessandro, pelo carinho, apoio e por estarem sempre presentes.

Ao professor Julio Tomás Aquije Chacaltana, por sua orientação, paciência e seus valiosos ensinamentos.

Aos colegas de turma, pelos bons momentos... em especial, às amigas Priscila Spala, Priscila Guaitolini e Rosana Andrade.

Aos colegas do LABESUL, principalmente ao Fábio Pavan, pela ajuda com o modelo.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

As ondas são as principais e mais constantes fontes de energia mecânica que interagem com os ambientes costeiros. Parte da energia da atmosfera é transferida para o oceano na forma de ondas, influenciando de forma direta a hidrodinâmica local, o transporte de sedimentos e a morfologia da costa. Portanto, o conhecimento da distribuição de ondas em uma região é fundamental para a implantação de qualquer obra costeira como portos, *piers* e quebra-mares. Ao se propagarem de regiões profundas para águas mais rasas, as ondas sofrem transformações importantes que se tornam mais pronunciadas antes de alcançarem a linha de costa, podendo ser observados os fenômenos de refração, difração, reflexão, empinamento, quebra e ruptura de ondas. Com a finalidade de compreender a dinâmica das ondas quando estas se aproximam da linha de costa, tais transformações foram estudadas neste trabalho por meio do modelo de ondas REFDIF. O REFDIF foi aplicado a problemas clássicos da literatura e ao estudo das transformações das ondas provenientes de SE (com 1 m de altura e período de 10s) no interior da Baía do Espírito Santo. Os resultados obtidos com o modelo comparam bem com os detalhados na literatura.

Palavras-chave: REFDIF, Modelagem, Ondas, Refração e Difração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do fenômeno de refração de ondas	16
Figura 2: Representação do fenômeno de difração de ondas	17
Figura 3: Localização da Baía do Espírito Santo	27
Figura 4: Mapa batimétrico da Baía do Espírito Santo	28
Figura 5: Geometria da ilha artificial	35
Figura 6: Localização dos pontos para simulação de altura de onda	35
Figura 7: Representação da geometria da ilha no programa	35
Figura 8: Mapa de contorno batimétrico da região da ilha artificial	36
Figura 9: Mapa de contorno batimétrico da região do baixio	36
Figura 10: Mapa de contorno batimétrico da região estudada	37
Figura 11: Baía do Espírito Santo com destaque para a região de abrangência da malha computacional	39
Figura 12: Representação da direção de incidência das ondas	40
Figura 13: Contornos de alturas de onda próximos à ilha artificial	41
Figura 14: Ondas se propagando sobre um baixio submerso	42
Figura 15: Ondas interagindo com uma corrente de retorno	42
Figura 16a: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES	44
Figura 16b: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES	45
Figura 16c: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES	45

Figura 17: Distribuição espacial das alturas de ondas para o setor 1 da Baía do ES	46
Figura 18: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 2	47
Figura 19: Alturas de onda obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 3	49
Figura 20: Alturas de onda obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 4	50
Figura 21: Representação das direções de propagação de ondas na Baía do ES	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	ONDAS	15
3.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE MODELAGEM	18
3.3	ALGUNS MODELOS COMPUTACIONAIS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS	20
3.3.1	REFDIF	22
3.3.3.1	Equação da declividade suave	24
3.3.3.2	Aplicações do modelo REFDIF	26
4	ÁREA DE ESTUDO	27
4.1	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	28
4.2	CLIMA	29
4.3	REGIME DE VENTOS	29
4.4	ONDAS	29
4.5	MARÉ	30
5	MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1	ESTRUTURA DO MODELO REFDIF	31
5.1.1	Programa principal	32
5.1.2	Dados de entrada do modelo	32
5.1.3	Dados de saída do modelo	33
5.1.4	Limitações do modelo REFDIF	33

5.2	VERIFICAÇÃO DO MODELO REFDIF	34
5.2.1	Ondas ao redor de uma ilha artificial não submersa.....	34
5.2.2	Ondas sobre um baixio submerso.....	36
5.2.3	Ondas interagindo com uma corrente de retorno.....	37
5.3	IMPLEMENTAÇÃO DO REFDIF À BAÍA DO ESPÍRITO SANTO.....	38
5.2.1	Batimetria.....	38
5.2.2	Geração da grade computacional.....	38
5.2.3	Variáveis de entrada e opções de cálculo.....	39
5.2.3.1	Condições de contorno	40
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6.1	VERIFICAÇÃO DO MODELO REFDIF	41
6.2	APLICAÇÃO À BAÍA DO ESPÍRITO SANTO	44
6.2.1	Setor 1.....	46
6.2.2	Setor 2.....	47
6.2.3	Setor 3.....	48
6.2.4	Setor 4.....	50
6.2.5	Direção de propagação das ondas	50
7	CONCLUSÕES	52
8	REFERÊNCIAS	53
	ANEXOS	58
	ANEXO A – ESTRUTURA DO MODELO REFDIF	58
	ANEXO B – ARQUIVOS DE DADOS DE ENTRADA <i>INDAT.DAT</i>	64

1- INTRODUÇÃO

As ondas representam uma das principais fontes de energia que governam as praias (BROWN,1999), sendo responsáveis por processos erosivos e de transporte e deposição de sedimentos que implicam em modificações morfológicas na linha de costa.

Ao se moverem de regiões mais profundas em direção às zonas costeiras, as ondas sofrem transformações importantes que se tornam mais pronunciadas antes de alcançarem a linha de costa. Barletta (2006) enquadra estas transformações em dois grupos: o primeiro engloba fenômenos conservativos como empinamento, refração, difração, reflexão e efeitos não-lineares, que não alteram o conteúdo de energia das ondas; o segundo é o dos fenômenos não-conservativos que implicam em perdas e/ou ganhos de energia pelas ondas, como o ganho de energia pelo vento e as perdas pela arrebentação e efeitos de fricção pelo fundo. A importância relativa de cada um desses processos depende das condições locais específicas, como à variação batimétrica, o ângulo de incidência das ondas e a irregularidade geomorfológica da região costeira. A interação das ondas com a plataforma continental, via de regra, põe em destaque a refração; já para águas mais rasas, a difração, o empinamento e a arrebentação ganham importância maior.

O fenômeno de refração é o responsável pelo alinhamento das cristas das ondas, que tendem a ser paralelas à linha de costa, independente da direção de aproximação das ondas nas águas mais profundas. Dessa forma, afetada pela topografia de fundo, a onda muda a direção de propagação e tende a se tornar paralela à direção das isóbatas (linhas de mesma profundidade) à medida que se aproxima da costa e perde velocidade (SUGUIO, 1992).

A difração, por sua vez, ocorre quando a onda atinge um obstáculo, como um pontal rochoso, ou um *pier*, promovendo o espalhamento radial de sua crista (SOARES; CHACALTANA, 2003); ou seja, é a propriedade que a onda possui de contornar um obstáculo ao ser parcialmente interrompida por ele.

Conforme Davis (1985), a redução da velocidade de propagação da onda e o decréscimo no seu comprimento, devido à diminuição da profundidade, provocam

um aumento na energia potencial da onda, expresso fisicamente pelo crescimento de sua altura, caracterizando o processo conhecido como empinamento.

Com o aumento do empinamento, a velocidade orbital excede a velocidade da onda, levando à sua quebra. A quebra da onda causa a dissipação da energia e a redistribuição sobre a forma de turbulência e calor. Dependendo do tipo de quebra, uma grande turbulência é gerada, causando a suspensão de sedimentos, que posteriormente, podem vir a ser transportados por correntes e depositados ao longo da costa (DAVIS, 1985).

Com a finalidade de compreender as transformações das ondas quando estas se aproximam da linha de costa, é estudada neste trabalho a combinação dos fenômenos físicos de refração e difração, além do empinamento e dissipação de energia das ondas por meio do modelo computacional de propagação de ondas REFDIF. O ambiente costeiro escolhido para a aplicação do modelo é à Baía do Espírito Santo, um dos principais ambientes costeiros do município de Vitória, importante por abrigar atividades como indústria, navegação, turismo, comércio e pesca.

O REFDIF foi desenvolvido por Kirby e Dalrymple em 1983. Este modelo trata da propagação de ondas regulares ou irregulares em zonas de profundidade variável, baseado na aproximação parabólica da equação de declive suave; leva em consideração os efeitos da refração, difração (desde que seja na direção transversal à propagação), dissipação de energia por atrito de fundo e rebentação e contempla a presença de correntes e a dispersão por amplitude. Por conta das aproximações numéricas empregadas no modelo, o fenômeno da reflexão pode não ser reproduzido corretamente. O modelo pode ser aplicado a grandes áreas costeiras, desde que as áreas envolvidas no estudo não excedam a dezena de quilômetros (ZÓZIMO, 2005).

O conhecimento dos padrões de propagação das ondas pode auxiliar em uma melhor otimização da aplicação dos recursos por parte dos órgãos gestores envolvidos na solução de inúmeros problemas costeiros como erosão, dragagem de canais, definição de alinhamento e posicionamento de *piers*, escolha da localização de portos e praias artificiais, dentre muitos outros.

2- OBJETIVOS

2.1- Objetivo Geral

- Compreender o efeito combinado da refração-difração de ondas monocromáticas na Baía do Espírito Santo quando estas interagem com obstáculos, como baixios e quebra-mares.

2.2- Objetivos específicos

- Aplicar o modelo REFDIF a três problemas clássicos da literatura;
- Aplicar o modelo REFDIF à Baía do Espírito Santo para o caso de ondas provenientes de SE com 1 metro de altura e período de 10 segundos.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Ondas

As ondas podem ser definidas como manifestações de forças que agem em um fluido e tendem a deformá-lo através da ação da gravidade e da tensão superficial (DEAN; DALRYMPLE, 1998). Pond e Pickard (1989) as classificam em diferentes tipos:

- Ondas de vento, *swell* e *ripples*: formadas por meio da ação do vento na superfície da água;
- *Tsunamis*: causadas por distúrbios sísmicos ou por deslizamentos de sedimentos submarinos devido a instabilidades gravitacionais;
- Marés: geradas por forças periódicas, como as interações das forças gravitacionais com o Sol e a Lua;
- Ondas internas: originadas por variações verticais de massa específica, resultado de correntes cisalhantes e distúrbios da superfície;
- Ondas de *Rossby*: ondas de larga escala e longo período, também conhecidas como planetárias. Podem ser geradas por variações temporais na tensão do vento e instabilidades baroclínicas e barotrópicas;
- Ondas giroscópicas gravitacionais: possuem período suficientemente longo, o que torna o efeito de *Coriolis* importante. Podem ser causadas por alterações na pressão atmosférica e na força do vento.

Neste trabalho é focado o estudo das transformações das ondas geradas pelo vento no interior da Baía do Espírito Santo. Este tipo de ondulação representa, por exemplo, o principal fator no movimento de navios atracados, causando também maiores esforços nas amarras, defensas e estruturas do cais.

Ao se propagarem para águas mais rasas, as ondas começam a “sentir o fundo”, o que se reflete em uma série de modificações em seu comportamento, as quais são governadas pela profundidade relativa (relação entre a profundidade da lâmina d’água e o comprimento de onda) (DEAN; DALRYMPLE, 1998). Em regiões de baixas profundidades relativas, as ondas sofrem diferentes fenômenos físicos, dentre os quais podem ser citados: refração, difração, reflexão, empinamento e quebra de ondas.

A refração das ondas ocorre devido às mudanças na velocidade de sua propagação, causadas pela variação de profundidade de fundo. A porção da onda que viaja em águas mais profundas move-se mais rapidamente que a parte da onda que viaja em águas menos profundas, o que resulta no curvamento das cristas das ondas, “buscando” o alinhamento com os contornos do fundo (GOLDSMITH, 1976 *apud* SILVA; BITTENCOURT; DOMINGUEZ, 2007). A refração (Figura 01) pode causar a concentração ou espalhamento da energia da onda ao longo da costa. Isto pode ser observado pela convergência ou divergência dos raios de onda, que são linhas perpendiculares às cristas e que viajam no sentido do avanço da onda (KOMAR, 2000).

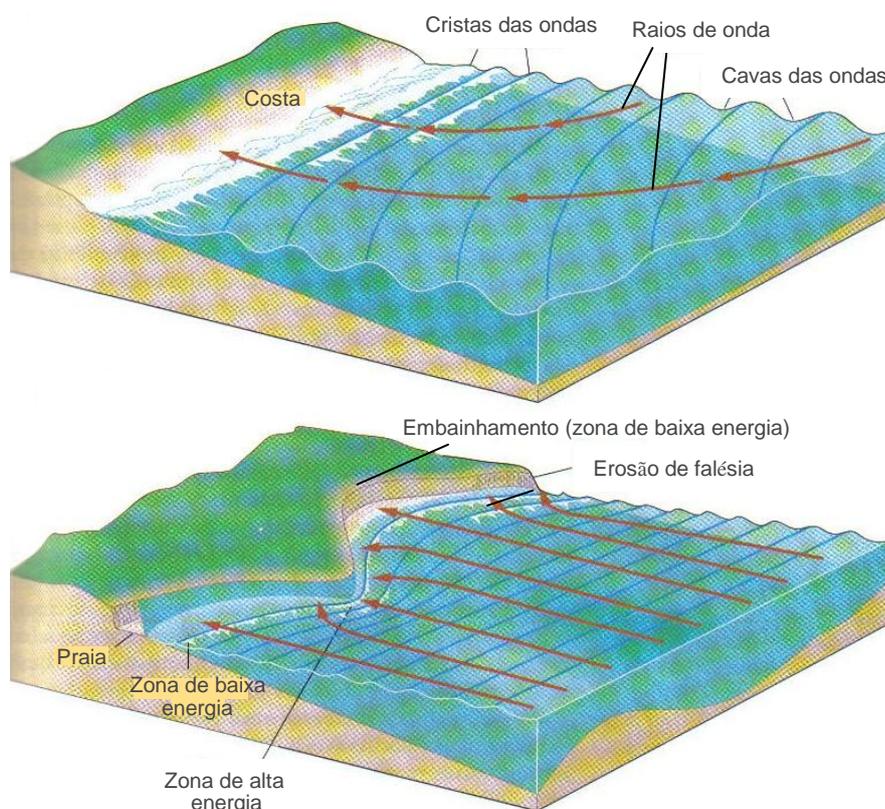


Figura 01: Representação do fenômeno de refração de ondas.

Fonte: Modificado de Segar (1998).

A difração (Figura 02), por sua vez, consiste no fenômeno de transmissão lateral de energia de uma onda, ao longo de sua crista. Este fenômeno se manifesta quando há propagação de ondas em um setor restrito, ou quando um trem de ondas é interceptado por um obstáculo, como um quebra-mar ou uma ilha (SUGUIO, 1992).

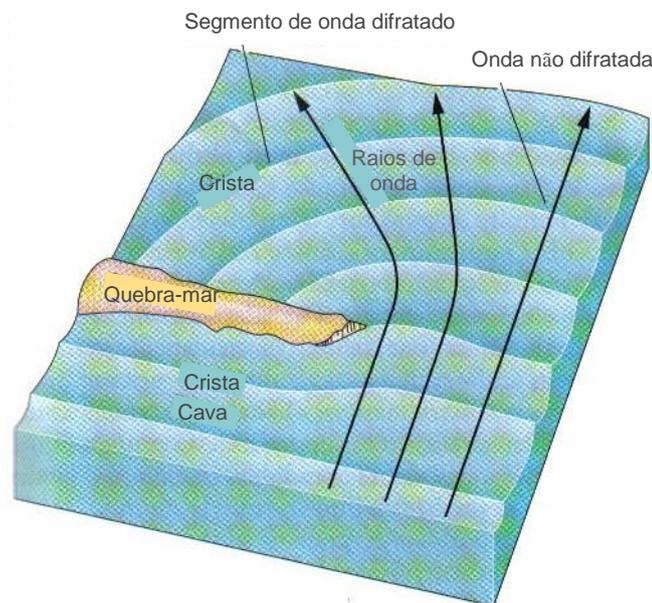


Figura 02: Representação do fenômeno de difração de ondas.
Fonte: Modificado de Segar (1998).

Quando as ondas superficiais colidem em obstáculos refletivos (que não absorvem a energia das ondas) com um ângulo de incidência qualquer, estas são refletidas com ângulo igual ao de incidência. A reflexão no mar é vista, por exemplo, quando as ondas se chocam contra um costão rochoso (MEIRELLES; VIOLANTE-CARVALHO, 2007).

Segundo a teoria de ondas, a redução da velocidade da onda e o decréscimo no seu comprimento, devido à diminuição da profundidade, provocam um aumento na energia potencial de onda, expresso fisicamente pelo aumento de sua altura, caracterizando o processo conhecido como empinamento ou *shoaling* (DAVIS, 1985).

A quebra da onda está associada a uma grande dissipação de energia e ocorre quando a diminuição da profundidade afeta a geometria da onda, que se torna mais

empinada (aumento da esbeltez), até o ponto em se torna instável e arrebenta. Isso ocorre quando a profundidade da água é aproximadamente igual à altura da onda (MUEHE, 2001).

As ondas podem quebrar basicamente de 4 modos, dependendo da declividade da praia, da altura e do comprimento da onda (GALVIN, 1968, *apud* HOEFEL, 1998):

- Deslizante (*spilling*): é caracterizada pela espuma e pela turbulência na crista da onda. Usualmente este modo se inicia a alguma distância da praia e é característico de linha de costa com inclinação suave, por isso, a energia da onda é dissipada gradualmente.
- Mergulhante (*plunging*): é a forma clássica muito apreciada pelos surfistas. As cristas se enrolam, espiralam e mergulham com uma força considerável, dissipando sua energia em uma pequena área e, por isso, pode ter grande efeito erosivo. Este tipo de arrebentação ocorre em praias de declividade moderada e usualmente estão associadas com longos *swells* gerados em tempestades distantes.
- Frontal ou colapsante (*collapsing*): similar às mergulhantes, exceto pelo fato de que as ondas são menos inclinadas e ao invés das cristas se espiralarem, a face frontal colapsa. Este tipo ocorre em praias de declividade moderada a alta e sobre condições de ventos moderados. Representam a transição entre os tipos mergulhante e ascendente.
- Ascendente (*surging*): encontradas em praias bastantes íngremes; são formadas tipicamente por ondas pequenas e longas, por isso, as faces frontais e as cristas resistem sem quebrar enquanto a onda desliza sobre a face da praia.

3.2- Considerações sobre Modelagem

As medições de parâmetros meteo-oceanográficos são, em geral, escassos (devido ao alto custo de levantamento), e, no entanto, imprescindíveis a estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento costeiro. Os dados que usualmente se obtêm

de variáveis ambientais, são séries temporais de valores medidos em uns poucos pontos distribuídos na área de interesse. Portanto, dados medidos de fato representam apenas uma pequena fração, o que torna fundamental o uso de ferramentas confiáveis que permitam que tais dados sejam interpolados e extrapolados, tanto no espaço quanto no tempo.

Neste contexto, a aplicação de modelos é de fundamental importância, uma vez que permitem a interpolação e extrapolação (espacial e temporal) das informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos, para toda a área de interesse.

Os modelos validados, aqueles que foram aferidos com dados de campo e analisados por especialistas, podem ser grandes aliados do gerenciamento de sistemas ambientais por permitirem (ROSMAN, 2006):

Em análises de diagnóstico:

- A otimização de custos de monitoramento e medição integrando informações espacialmente dispersas, geralmente obtidas em estações pontuais de medição;
- Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições: somente através de modelos tem-se efetivamente um modo consistente de interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento amplo da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais;
- Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.

E em análises de prognóstico:

- Prever situações simulando cenários para estudos e projetos;
- Indispensável ao licenciamento ambiental por realizar mapeamento de áreas de risco, determinação de destinos prováveis de contaminantes, etc;

- Fundamental aos planos de emergência, e definição de estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de contaminantes, por exemplo;
- Fundamental na elaboração de Planos de Mitigação;
- Prever evolução de eventos em tempo real.

Almeida *et. al.* (1999) destaca que a modelagem pode ser traduzida de diferentes modos:

- Modelagem conceitual: concepção do fenômeno observado, conhecendo suas causas e efeitos e as interações dos agentes intervenientes na sua ocorrência;
- Modelagem matemática: traduções do modelo conceitual escrita em linguagem matemática. Os modelos matemáticos são diferentes arranjos, incluindo um número maior ou menor de causas e efeitos, e de agentes intervenientes em diferentes formas. Para tanto há regras e princípios formais a serem seguidos;
- Modelagem numérica: são traduções dos modelos matemáticos adaptados a diferentes métodos de cálculo;
- Modelagem computacional: tradução de um modelo numérico em linguagem computacional que possa ser compilada e executada em um computador.

3.3- Alguns modelos computacionais de propagação de ondas

Existem hoje diversos modelos capazes de descrever de forma satisfatória a hidrodinâmica em regiões costeiras por permitirem determinadas previsões como alturas significativas de ondas, períodos e direções de propagação. Tais características do clima de ondas são fundamentais na definição de estratégias de gerenciamento de corpos d'água costeiros, estudos de impactos ambientais, bem como na otimização das redes de monitoramento ambiental, que possuem custos elevados, mas que geram informações essenciais para um melhor entendimento dos sistemas de interesse.

Em seguida são descritos alguns modelos computacionais para previsão de propagação de ondas, dentre eles, o modelo REFDIF, utilizado neste estudo.

O SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), desenvolvido por Ris *et al.* (1997), é um modelo numérico de terceira geração, desenvolvido para estimar as condições das ondas em média escala, como em regiões costeiras, lagoas e estuários. O SWAN é capaz de representar todos os processos relevantes de geração, dissipação e propagação de ondas, além de poder utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por outros modelos (PAES-LEME, 2008).

No SWAN, as ondas são computadas através da evolução do espectro de densidade de ação no plano bidimensional, representada pela Equação do Balanço da Ação Espectral. Até pouco tempo atrás, este modelo não representava o cálculo da difração, tornando as simulações em regiões próximas a obstáculos ou portos menos precisas; recentemente, uma aproximação para o cálculo da difração foi implementada, porém poucos trabalhos publicados até o momento abordam esta questão (PAES-LEME, 2008).

Ris *et al.* (1997) destaca os processos de propagação da onda que são representados no SWAN:

- Propagação através do espaço geográfico;
- Refração devido a variações do fundo e das correntes;
- Empinamento devido a variações do fundo e das correntes;
- Bloqueio, reflexão ou transmissão através de obstáculos;
- Bloqueio e reflexão por oposição de correntes.

E os processos para geração e dissipação de energia das ondas:

- Geração de ondas pelo vento;
- Dissipação tipo *whitecapping*;
- Dissipação devido à fricção com o fundo;

- Dissipação devido à quebra de ondas induzida pela profundidade;
- Interações não-lineares (triplas e quádruplas).

O modelo FUNWAVE, desenvolvido por Wei e Kirby (1995), baseia-se nas equações do tipo *Boussinesq*, que fornecem uma base geral para o estudo da propagação de ondas em duas dimensões horizontais. Estas equações podem modelar as equações de águas rasas para a propagação de ondas lineares não-dispersivas, mas também vem sendo continuamente estendido pela adição de termos que incluem os efeitos não-lineares e de dispersão. Atualmente, novos métodos aplicados às equações do tipo *Boussinesq* também tornam possível a simulação de trens de ondas irregulares viajando de águas profundas para águas rasas (KIRBY *et al.*, 1998).

3.3.1- REFDIF

Nesta seção o modelo computacional REFDIF será sumariamente apresentado e discutido conforme Kirby e Dalrymple (1994).

A propagação de ondas na água em locais que apresentam fundo irregular e ao redor de ilhas envolve muitos processos como a refração, a difração, a reflexão, o empinamento (*shoaling*) e a dissipação de energia.

Até alguns anos, a análise da refração de ondas na água geralmente necessitava do uso de raios, uma técnica que não inclui a difração, por isso é considerada inexata; além disso, devido a complexidades na topografia de fundo, os diagramas de ondas apresentam muitos raios que se cruzam, levando a dificuldades de interpretação. Mais recentemente foram desenvolvidos modelos de refração de diferenças finitas, que têm a vantagem de prover alturas e direções de onda em grade, no lugar dos raios irregularmente espaçados.

A difração de ondas na água ao redor de estruturas simples, como um quebra-mar próximo à praia, pode ser obtida de forma analítica para uma profundidade de água constante. Nesta solução, não só é dada a altura da onda transmitida além da estrutura, como também o espalhamento ou a reflexão da onda.

Para incorporar os efeitos da difração, a prática tem sido geralmente suspender a refração em áreas onde difração é dominante e considerar somente a difração, usando a solução analítica para fundo plano. Nos locais onde a difração não é dominante, é retomada a refração. Isto consiste em uma técnica inexata, mas que permite a inclusão da difração de modo aproximado.

Modelos combinados de refração/difração incluem ambos os efeitos explicitamente, enquanto permitem a modelagem de ondas em regiões onde o fundo é irregular e a difração é importante. Os modelos desenvolvidos em forma parabólica não prevêm corretamente os fenômenos de reflexão das ondas.

Estes modelos combinados são usados exclusivamente para o cálculo de altura e direção de ondas em áreas nas quais um ou ambos os efeitos estão presentes. No entanto, alguns modelos também permitem a determinação da quantidade de energia da onda.

De modo geral, o problema da propagação de ondas na água em locais que apresentam batimetria irregular em direções arbitrárias é um problema tridimensional e envolve uma complicada condição de contorno não-linear. Existem poucas soluções para o problema tridimensional e estas são feitas apenas para fundos planos. Em uma dimensão horizontal, surgiram na década de 70, os modelos combinados aperfeiçoados por Chu e Mei (*apud* Kirby e Dalrymple, 1994) e Djordjevic e Redekopp (*apud* Kirby e Dalrymple, 1994), que simulam o comportamento das ondas de Stokes sobre batimetrias que variam suavemente. Para simplificar o problema em três dimensões, Berkhoff (*apud* Kirby e Dalrymple, 1994), notou que as propriedades importantes das ondas progressivas lineares podiam ser simuladas por um modelo de integração vertical.

O modelo REFDF (desenvolvido por Kirby e Dalrymple, 1983a) é um modelo não-linear que combina a refração e a difração de ondas. Este modelo é baseado na expansão de Stokes, que inclui a correção de 3ª ordem para a velocidade de fase de onda, estando portanto, restrito a situações onde as ondas de Stokes são válidas. Sua aplicação em situações práticas envolve o uso de uma aproximação parabólica, que restringe o modelo para os casos em que a direção de propagação de onda não ultrapasse aproximadamente $\pm 70^\circ$ da direção assumida pela onda.

Barletta (2006) considera que os modelos REFDIF representaram um avanço em relação aos modelos de refração simples pela inclusão dos efeitos difrativos em conjunto com a refração.

O REFDIF é tipicamente usado com trens de ondas monocromáticas propagando-se em uma determinada direção. No modelo, a dissipação de energia ocorre de várias maneiras dependendo da situação em que é modelada; um termo de perda de energia permite tratar as perdas de fricção com o fundo originadas pela rugosidade, porosidade ou viscosidade (como a lama) do fundo, filmes de superfície, e a quebra de onda. A maioria dos fundos a serem modelados são porosos e, por isso, a dissipação de energia no fundo deve ser considerada.

A quebra de onda no modelo tem sido testada com dados de laboratório para várias declividades de fundo diferentes e foi prognosticada corretamente a altura da onda na zona de surf, sendo que também pode representar as ondas fora desta zona, uma vez que a quebra de onda está sempre ativo no modelo.

A condição inicial é muito importante no modelo parabólico. Assim, é adotada na primeira linha uma profundidade constante, onde a onda incidente é definida. Esta onda é posteriormente propagada pelo modelo ao longo de todo o domínio.

Tal como a solução de qualquer equação diferencial num domínio, as condições de fronteira são muito importantes. No REFDIF1 existem dois tipos de condição fronteira: aberta, que permite a saída de ondas do domínio de cálculo e simula a entrada de ondas paralelas à da fronteira de entrada; e fechada (condição de reflexão).

3.3.3.1- Equação da declividade suave

O modelo REFDIF é baseado na equação de Berkhoff, conhecida como equação da declividade suave (*mild slope equation*), que é solucionada pelo método das diferenças finitas, utilizando um esquema iterativo implícito linha-a-linha no sentido de propagação. Esta equação é escrita em termos do deslocamento da superfície, $\eta(x, y)$, sendo definida (em termos do operador gradiente horizontal) como:

$$\nabla_h \cdot (CC_G \nabla_h \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (1)$$

onde

$C = \sqrt{(g/k) \tanh kh}$, celeridade da onda (expressa pela equação de *Airy*);

$C_g = C\{1 + 2kh / \sinh 2kh\} / 2$, velocidade de grupo.

onde a profundidade da água no local é $h(x, y)$ e g é a aceleração da gravidade. O número de onda local, $k(x, y)$ está relacionado à frequência angular das ondas, σ , e a profundidade da água h pela relação da dispersão linear,

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

O modelo da equação (1) é uma aproximação; porém, é muito exato em locais moderadamente extensos e águas rasas.

Booij (*apud* Kirby e Dalrymple, 1994), usando uma aproximação lagrangeana, desenvolveu um tipo de equação da declividade suave que considera a influência da corrente. Este é um modelo “fraco de correntes” no qual é assumido que as correntes são pequenas. Uma correção não-linear e a habilidade de considerar fortes correntes foram incluídas por Kirby e Dalrymple (1983b) e o resultado para ondas que interagem com correntes foi obtido.

Posteriormente, para a equação linear da declividade suave, Radder (*apud* Kirby e Dalrymple, 1994) desenvolveu um modelo parabólico que apresentou várias vantagens sobre a forma elíptica apresentada por Berkhoff (o modelo inicialmente apresentava características elípticas). Assim, as condições de fronteira “*downwave*” (a jusante) não necessitam de condições de contorno.

Kirby (1983), usando a aproximação de Lagrange e Kirby e Dalrymple (1994), com uma técnica de escalas múltipla, desenvolveram o antecessor do modelo REFDF 1, fazendo uma ligação entre o modelo de difração não-linear e a equação linear da declividade suave. Este modelo pode ser escrito de várias maneiras dependendo da aplicação. A forma hiperbólica, para aplicações dependentes do tempo, e a forma

elíptica, para problemas de estado estacionário, requerem o uso de condições de contorno em todos os lados de domínio do modelo. Esta é uma dificuldade, uma vez que a onda refletida em um limite geralmente não é conhecida a priori. Porém, estes modelos têm a vantagem de que não há nenhuma restrição na direção da onda.

Kirby (1986a) reformulou novamente o modelo para ângulos maiores com aproximação parabólica, o que tem permitido o estudo de ondas com maiores ângulos de incidência em relação ao eixo x . A equação foi estendida para incluir uma aproximação mais acurada de mínimos e máximos (Kirby, 1986b) para versões mais atuais do REFDIF1.

3.3.3.2- Aplicações do modelo REFDIF

O modelo REFDIF tem sido aplicado com sucesso em várias áreas costeiras mundiais, como observado no trabalho desenvolvido por Isebe *et al.* (2005) ao longo de uma costa arenosa de inclinação suave no golfo de Aigues-Mortes, mar Mediterrâneo, França. Neste trabalho, os resultados obtidos com o modelo mostraram-se bastante coerentes com os de outros estudos já realizados para esta região, bem como com as medições realizadas em campo.

Romeu (2007) usou modelos parabólicos lineares de refração-difração, dentre eles o REFDIF, para a determinação do estado do mar próximo à zona costeira na Ilha de Santa Catarina. Em sua metodologia testou várias grades computacionais com diferentes orientações em relação à costa. Dessa forma, eliminou a restrição do ângulo de incidência das ondas em relação à costa (característica inerente a modelos parabólicos), obtendo cálculos de refração-difração de ondas extremamente rápidos e eficientes.

Na região costeira do litoral central do Rio Grande do Sul, Barletta (2006) realizou testes de diferentes versões de modelos "REFDIF" parabólicos (REFDIF Kirby e REFDIF Melo). Para casos de ondas monocromáticas foram realizados 2 tipos de testes: com rampas planas (onde os resultados numéricos de altura de onda foram comparados com uma solução analítica), e com a calota de Berkhoff (onde resultados numéricos de altura de onda foram comparados com dados obtidos de um experimento de laboratório).

4- ÁREA DE ESTUDO

A Baía do Espírito Santo (Figura 03) constitui um corpo semi-fechado de água, localizado no município de Vitória e está situada entre os paralelos 20° 16' e 20° 19' de latitude sul e entre os meridianos 40° 14' e 40° 18' de longitude oeste; possui a abertura voltada para sudeste (SE), sendo limitada pela Ponta de Tubarão e pela abertura da Baía de Vitória.

A área representa um importante cenário natural para o Estado, com potencial turístico (envolvendo variadas formas de lazer) e econômico, por se tratar da via de acesso aos portos de Tubarão, Capuaba e Vitória, além de contemplar atividades pesqueiras.

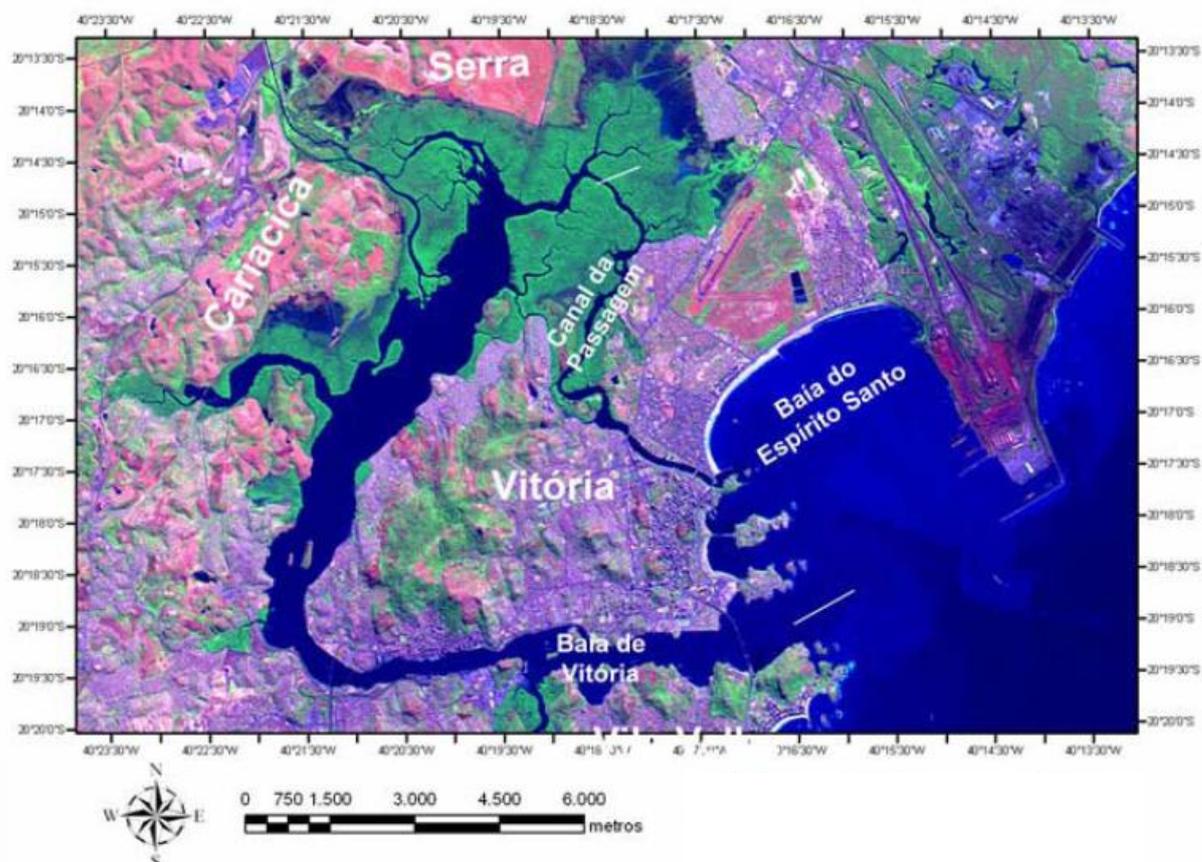


Figura 03: Localização da Baía do Espírito Santo.

Fonte: Google Earth (2009).

4.1- Características Morfológicas

Albino *et al.* (2001) ressalta que a Baía do Espírito Santo possui declividade de moderada a baixa, diminuindo à medida que se aproxima da linha de costa; observa-se ainda um aumento das cotas batimétricas da Praia de Camburi longitudinalmente rumo a Ponta de Tubarão.

Na entrada da baía a profundidade varia em torno de 18 metros em média (Figura 04), porém existe um aprofundamento direcionado ao canal de acesso ao porto de Tubarão, dragado a uma profundidade de aproximadamente 21 metros, para acesso dos navios.

No interior da baía verifica-se a presença de um baixio (localizado quase que no centro da baía e paralelamente a linha de costa) que se apresenta como um fundo rochoso, estreito e paralelo à entrada da baía cujo ponto mais alto está a aproximadamente 1,5 metros abaixo da superfície da água na maré baixa, conforme Fontana (2003). São observadas também algumas ilhas como a do Socó e do Frade.

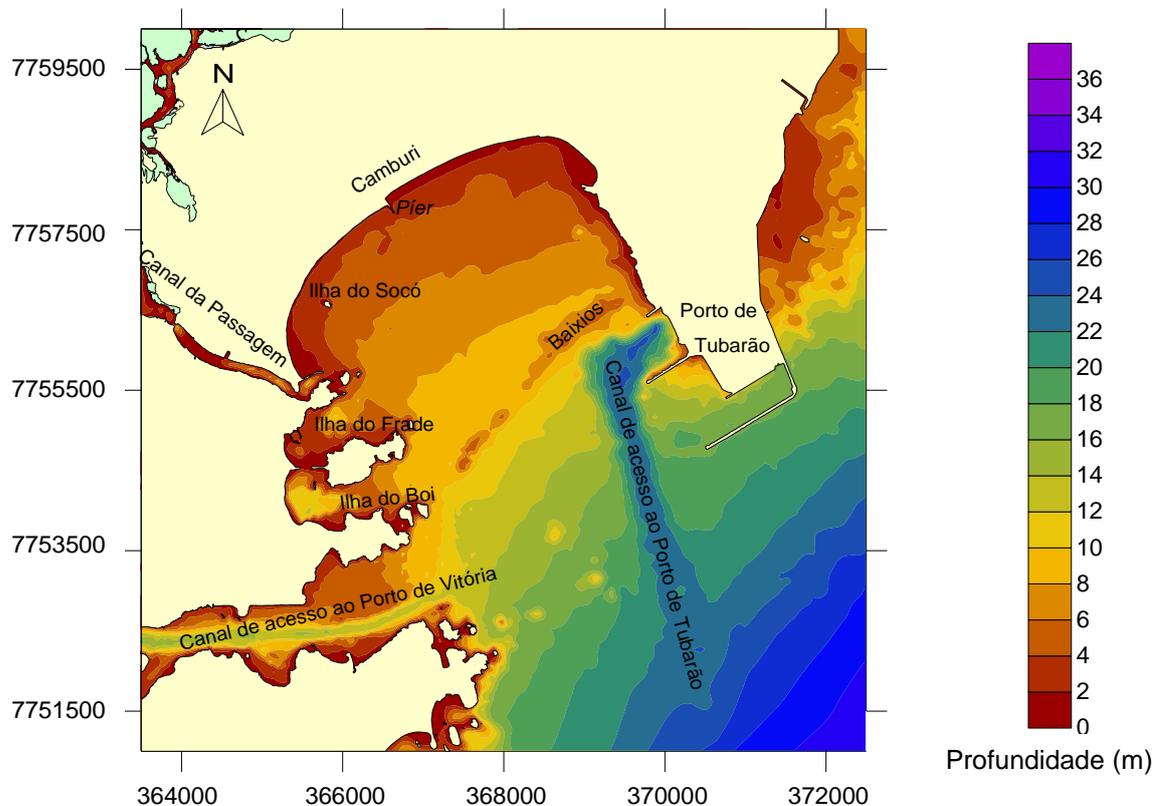


Figura 04: Mapa batimétrico da Baía do Espírito Santo.

Fonte: LABESUL¹.

1- Dados batimétricos disponibilizados pelo Laboratório de Simulação de Escoamentos com Superfície Livre (LABESUL), CT, UFES.

4.2- Clima

O clima é classificado como tropical úmido, caracterizado por chuvas tropicais de verão, com estação seca durante o outono e o inverno. Porém, as duas últimas estações podem registrar precipitações frontais de descargas devido às massas polares. A temperatura média anual fica em torno de 22°C, sendo a média das máximas entre 28°C e 30°C e a das mínimas em cerca de 15°C, que se verificam após a passagem de uma frente fria de origem subpolar (NIMER 1989 *apud* LEÃO 2005).

4.3- Regime de Ventos

Os ventos na região possuem uma velocidade média anual em torno de 1,5 m/s. As maiores freqüências e intensidades observadas são provenientes dos quadrantes NE-ENE e SE, respectivamente. Os primeiros ventos estão associados aos alísios, que são predominantes e sopram durante a maior parte do ano, enquanto que os ventos de SE estão relacionados às frentes frias que chegam periodicamente à costa capixaba (EMCAPA 1981, *apud* Albino 1999).

A influência dos ventos de Nordeste deve-se à constante presença de centros de alta pressão sobre o Atlântico Sul, ao passo que os ventos de Sudeste decorrem principalmente dos sistemas de baixa pressão.

4.4- Ondas

A partir de simulações do padrão de entrada de ondas na Baía do Espírito Santo, Albino *et al.* (2001) observaram que as ondas chegam à Praia de Camburi provenientes de três direções, basicamente: nordeste (NE), leste sudeste (E-SE) e sul-sudeste (S-SE).

As ondas provenientes de NE chegam à costa com alturas variando entre 1,2 e 0,9 m. A partir do porto de Tubarão e na entrada da Baía do Espírito Santo, maiores efeitos de difração e refração das ondas são observados. A ponta de Tubarão

protege o porto das ondas incidentes de NE desenvolvendo uma área com ondas pequenas e, é ainda responsável pela difração das ondas que passam de NE para SE e terminando praticamente incidente de S, dentro da baía, próximo à linha de costa. Margeando a área da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), sob efeito do sombreamento, a zona submersa e a praia apresentam-se mais protegidas da ação de NE (ALBINO *et al.*, 2001).

As ondas provenientes de E-SE são desenvolvidas a partir da passagem de frentes frias e apresentam-se mais altas, atingindo a praia de Camburi com alturas entre 0,4 e 1,0 m, devido a Baía do Espírito Santo ter a entrada voltada para SE (ALBINO *et al.*, 2001).

As ondas de S-SE são desenvolvidas por frentes frias intensas e, desta forma, com altos períodos e alturas.

Melo e Gonzalez (1995), utilizando um modelo baseado na equação de Declividade Suave, mostraram em seu estudo realizado na região que as ondas possuem uma direção média anual aproximadamente de E-SE, com alturas variando entre 0.3m e 2.62m, média anual de 1.0 m e períodos médio da onda entre 6s e 11.5s.

Na baía do Espírito Santo verifica-se ainda a difração e a difração das ondas em torno das ilhas do Frade e Boi e da Ponta de Tubarão e estas alcançam a praia com as alturas entre 0,2 e 0,6 m e com 90° em relação à linha de costa (ALBINO *et al.*, 2001).

4.5- Maré

Em relação à maré, observa-se na região o tipo semidiurna, correspondendo a duas preamares e duas baixamares por dia lunar (24h e 50min) (FONTANA, 2003).

De acordo com o DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação (2004), o litoral capixaba tem a sua amplitude de maré variando entre 1,40 e 1,50m. Estes valores são característicos de regime de micromaré (inferior a 2m).

5- MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho consiste em verificar a implantação do modelo REFDIF por meio de problemas clássicos da literatura e aplicá-lo à Baía do Espírito Santo de modo a avaliar as transformações das ondas no seu interior. No primeiro caso, as simulações reproduzem três problemas fornecidos pelo manual do modelo com o intuito de avaliar os fenômenos de refração e difração das ondas. No segundo caso, é realizada uma aplicação prática do REFDIF à Baía do Espírito Santo.

A seguir será apresentada uma descrição da estrutura do modelo REFDIF com seu programa principal, dados de entrada do modelo, arquivos de saída de dados e limitações do modelo, bem como a metodologia usada para a aplicação à Baía do Espírito Santo. As sub-rotinas de dados do modelo e a definição das variáveis de entrada, por sua vez, serão apresentadas no ANEXO A.

5.1- Estrutura do modelo REFDIF

O modelo REFDIF1 na versão V2.5, desenvolvida por Kirby e Dalrymple (1994), fornece separadamente um programa escrito em linguagem Fortran chamado *datgenv25.f* que gera os arquivos de dados de entrada utilizados no trabalho. São fornecidos também os arquivos e programas descritos abaixo:

- *indat.dat*: arquivo que contém as informações necessárias ao controle das operações do programa e os dados de entrada de ondas: número de divisões da malha, distância entre seus pontos, sub-divisões a considerar, dados de agitação (período, altura de onda, direção), condições do modelo (linear, composto ou Stokes, com ou sem correntes, com ou sem atrito de fundo, camada limite turbulenta ou laminar), outros dados (sistemas de unidades, condições de contorno, etc);
- *indat-create.f*: auxilia o usuário a construir o arquivo *indat.dat*;
- *indat-convert.f*: converte os antigos formatos *indat.dat* no novo formato *namelist indat.dat* (arquivo de entrada);

- *refdat.dat*: é o arquivo de dados da grade de referência, que contém a batimetria em cada ponto da malha. Seus conteúdos consistem nos arranjos de profundidade *dr*, velocidade na direção *x*, *ur*, e velocidade na direção *y*, *vr*, dos pontos da grade de referência. Este arquivo só é acessado uma vez por execução do modelo, e seus conteúdos inteiros são lidos através da subrotina *inref*. Se *icur* = 0, somente os dados de profundidade *dr* precisam ser especificados;
- *param.h*: contém informação relativa à dimensão dos vetores e matrizes utilizados no programa.

O modelo REFDIF é organizado em um programa principal (*refdif1*) e quatorze sub-rotinas de dados (ANEXO A). Também é estruturado em dois níveis: um nível principal que lê e checka os dados de entrada e inicia a operação, e outro nível que executa os cálculos de diferenças finitas atuais.

5.1.1- Programa principal

O *refdif1* é o programa principal que controla as chamadas *inref* e *inwave* para ler os dados, modelar, e executar os cálculos atuais. Nenhum cálculo é executado por esta rotina.

5.1.2- Dados de entrada do modelo

Para a aplicação do modelo REFDIF, são necessários:

- dados de batimetria da zona a modelar;
- condições iniciais de agitação (período, direção e altura de onda);
- nível de maré e dados de correntes (caso estas sejam consideradas);
- características das malha computacional (comprimento da malha em *x* e em *y* e espaçamento entre os nós da malha);
- opções de cálculo do programa.

5.1.3- Dados de saída do modelo

O modelo REFDIF fornece as alturas e as direções de propagação da onda em qualquer zona, incluindo a de rebentação. Seus arquivos de saída de dados são os seguintes:

- *height.dat*: altura de onda em cada ponto da malha;
- *depth.dat*: profundidade de água com correção de maré incluída;
- *angle.dat*: ângulo de direção da onda em graus;
- *sxx.dat*, *sxy.dat*, *syy.dat*: tensões de radiação em cada ponto da malha;
- *bottomu.dat*: magnitude da velocidade no fundo em cada ponto da malha;
- *outdat*: valores da altura de onda e direção em cada ponto da malha;
- *owave.dat*: valor da amplitude complexa na última linha da malha (se *ioutput=2*);
- *surface.dat*: valor da superfície livre em cada ponto da malha;
- *refdif1.log*: “run log” do REFDIF. Informações gerais, dados, erros, etc.

5.1.4- Limitações do modelo REFDIF

Em relação às condições de contorno, o modelo permite a utilização de uma condição de contorno fechada ou aberta. O mesmo apresenta como limitações o fato de não reproduzir corretamente os fenômenos de reflexão de onda; além disso, a difração é considerada apenas ao longo da direção transversal à direção de propagação da onda, não possibilitando uma correta simulação da difração da onda em torno de obstáculos.

Zózimo *et al.* (2005) destaca que, para a aplicação deste modelo deve-se garantir que:

a) o fundo tenha inclinação suave (até 1:3): a derivação matemática das equações no modelo REFDIF assume que as variações no fundo devam ser suaves (ocorram

em longas distâncias quando comparadas ao comprimento de onda). Estudos mostraram que para fundos com declives de até 1:3, o modelo era preciso, e para declividades mais íngremes, ainda prognosticava (ainda que de forma menos precisa) as mudanças dos trens de altura de onda e dos coeficientes de reflexão corretamente;

b) o ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção de propagação principal não ultrapasse os $\pm 60^\circ$: devido à utilização da aproximação parabólica, a direção de propagação da onda é confinada a este setor;

c) o espaçamento da malha terá que ser escolhido de forma a garantir no mínimo cinco pontos de cálculo por comprimento de onda.

5.2- Verificação do modelo REFDIF

De forma a se obter uma maior confiabilidade com o modelo REFDIF foram realizadas algumas verificações do modelo por meio da aplicação problemas clássicos da literatura disponibilizados por Kirby e Dalrymple (1994).

Para inserção dos dados de entrada e opções de cálculo no modelo foram gerados *scripts* (arquivos de entrada chamados *inidat.dat*) presentes no ANEXO B.

5.2.1- Ondas ao redor de uma ilha artificial não submersa

Neste caso foi adotada uma ilha circular, com um raio de base de 400 pés, e uma elevação de crista de 80 pés sobre um assoalho oceânico plano. O raio da ilha até a crista é 160 pés, conduzindo a um declive lateral de 1:3 e a profundidade da água ao redor da ilha é de 60 pés; a geometria da ilha é mostrada na Figura 05.

O conjunto requerido de simulações consiste em alturas de ondas em 12 pontos, como indicado na Figura 06. O espaçamento entre os pontos está em unidades de base de raio $rb=400$ pés. As condições de onda estudadas são dadas por: altura da onda (H) =28 pés; período (T) =10 segundos; e não é considerada a influência de correntes. Os dados de entrada da ilha foram representados como um cone circular com altura de cume de 153,33 pés (Figura 07).

Uma vez que a região física a ser modelada é pequena, foi escolhida uma grade de referência com resolução muito fina (dxr e $dyr=20$ pés), que consiste em aproximadamente 20 pontos por comprimento de onda longe da ilha e comprimento de onda $L=389$ pés. Com o uso de 100x100 posições de memória para a grade de referência, obteve-se um modelo de aproximadamente $5\text{ rb} \times 5\text{ rb}$ em x e y . O centro da ilha foi situado a $x=460$ pés e $y=10$ pés, onde x e y são medidos a partir do canto da grade computacional.

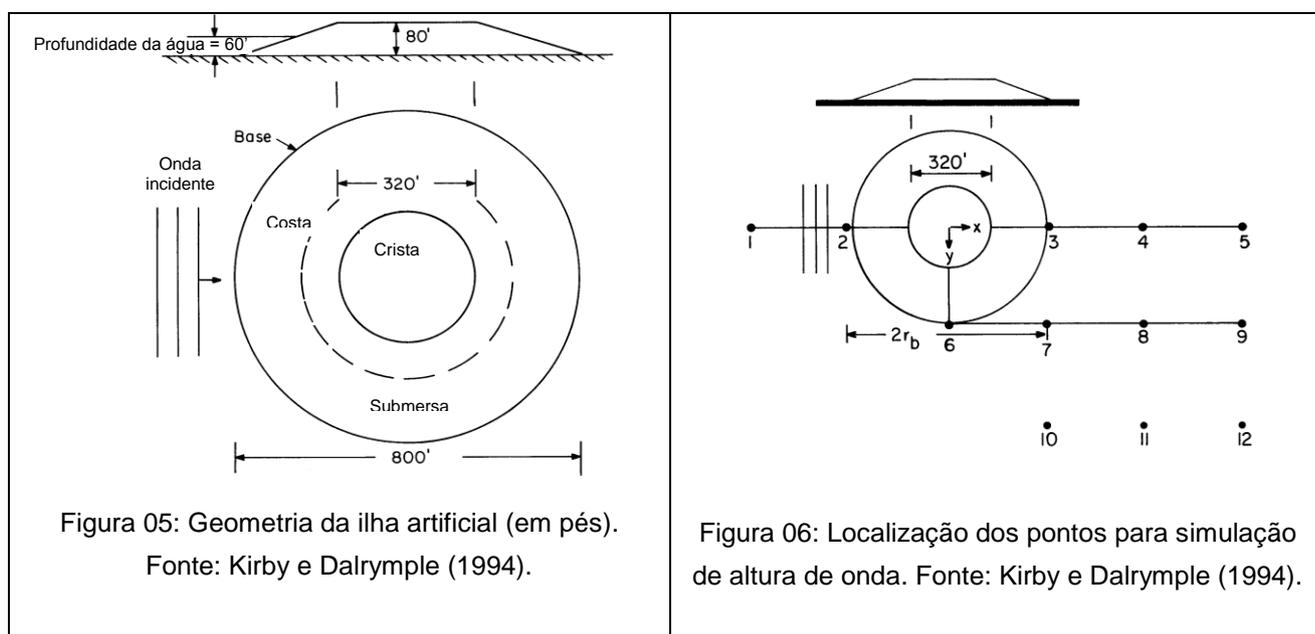


Figura 05: Geometria da ilha artificial (em pés).
Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

Figura 06: Localização dos pontos para simulação de altura de onda. Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

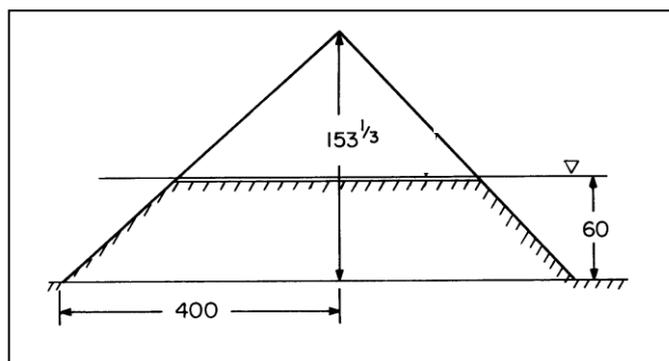


Figura 07: Representação da geometria da ilha no programa (em pés).
Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

A Figura 08 a seguir ilustra a batimetria (em pés) da região da ilha artificial.

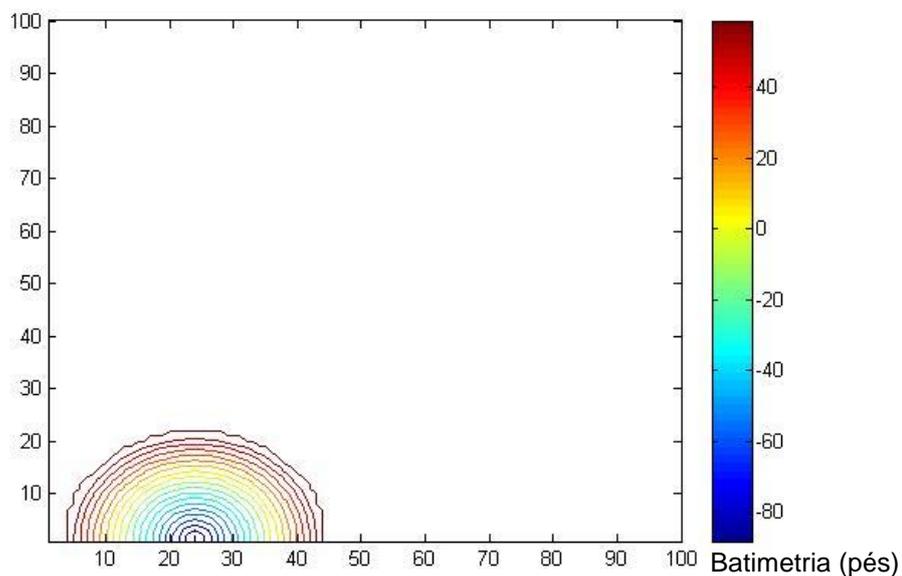


Figura 08: Mapa de contorno batimétrico da região da ilha artificial.

5.2.2- Ondas sobre um baixo submerso

Neste problema é estudada uma onda inicialmente plana se propagando sobre um baixo submerso, elíptico, em repouso sobre uma praia plana. A batimetria (em metros) é mostrada na Figura 09.

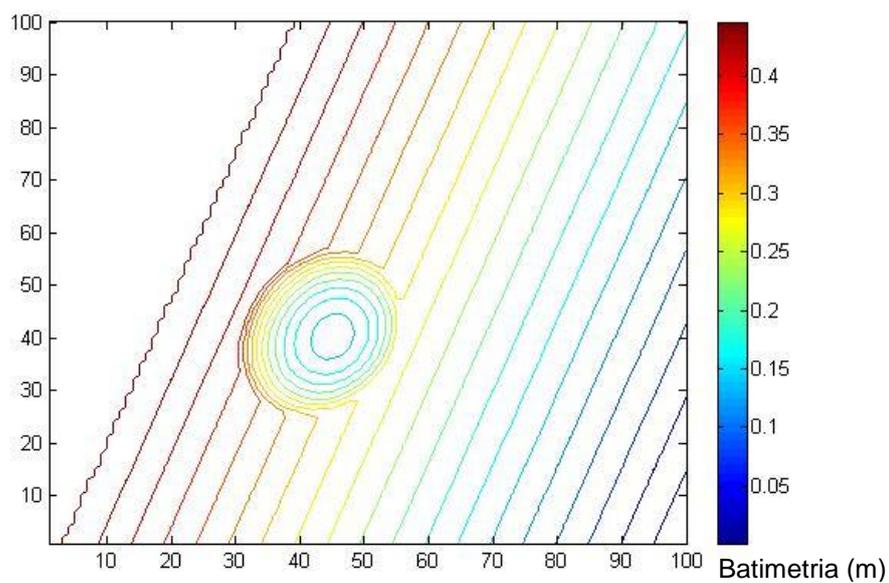


Figura 09: Mapa de contorno batimétrico da região do baixo.

5.2.3- Ondas interagindo com uma corrente de retorno

Esta aplicação ilustra ondas que incidem normalmente em uma praia plana e interagem com uma corrente de retorno constante escoando em direção ao mar (interação onda-corrente).

As condições de entrada do modelo são uma única onda incidente, com amplitude de onda inicial de 0,1 m e período de 8 segundos; denotando uma coordenada x' que aponta no sentido de mar aberto. Foi escolhida uma grade com espaçamento $dxr = 5m$ e $dyr = 5m$ e dimensões de $mr = 100$ e $nr = 100$, o que resulta em uma extensão de 495m de altura e 495m de comprimento. A fila da grade mais próxima à costa está localizada a 5m desta, resultando em uma gama de profundidade de 10 m a 0,1m.

A batimetria é ilustrada pela Figura 10.

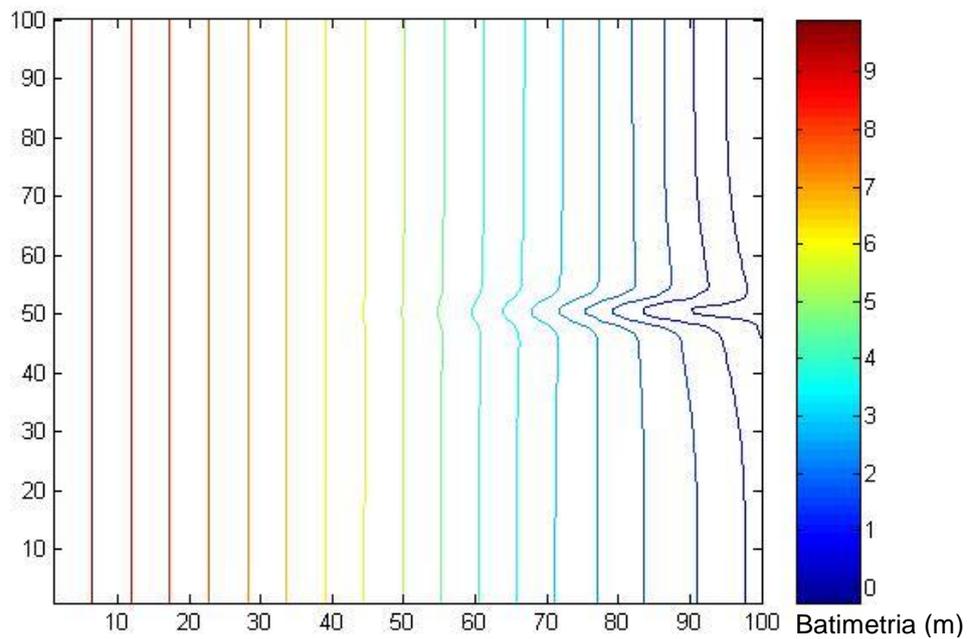
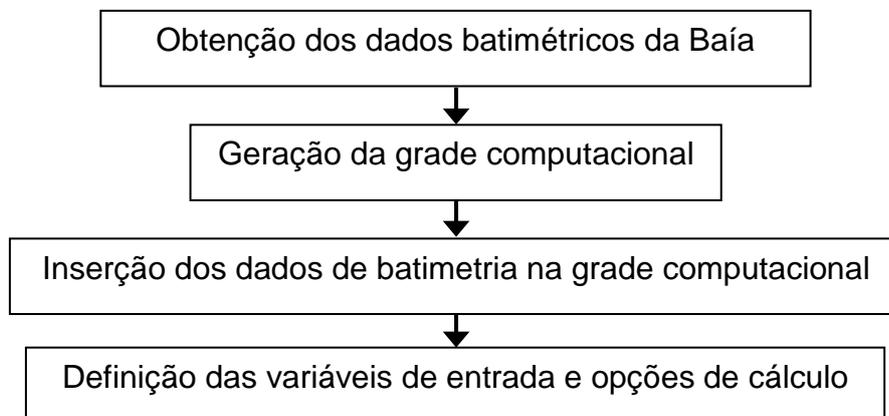


Figura 10: Mapa de contorno batimétrico da região estudada.

5.3- Implementação do REFDIF à Baía do Espírito Santo

A aplicação do modelo REFDIF à Baía do Espírito Santo foi realizada da seguinte forma:



Os itens a seguir descrevem os procedimentos para a realização destes passos.

5.2.1 Batimetria

Os dados batimétricos da Baía do Espírito Santo foram disponibilizados pelo Laboratório de Simulação de escoamentos com Superfície Livre (LABESUL) do DEA/CT da UFES. Tais dados são provenientes da digitalização das folhas de bordo do DHN; da carta náutica nº 1401, escala 1:15000, produzida pela Marinha do Brasil em 1983; e dos dados de campo obtidos através de trabalhos realizados pelo Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos da UFES (GEARH/UFES).

5.2.2- Geração da grade computacional

O domínio computacional consiste em uma malha retangular e uniforme com dimensões de 7975m de comprimento (eixo X) por 8725m de largura (eixo Y), composta por 1596 (em x) por 1746 células (em y), com espaçamento de 5 x 5 m (dx e dy).

Para a definição do espaçamento entre os pontos, algumas malhas foram testadas (5, 10, 12,5, 20 e 25 m) e dentre estas, a que apresentou melhor visualização dos contornos geométricos da região (identificação de ilhas e *píers*) e melhor

representação dos processos físicos (como os fenômenos de difração e refração) foi a malha de 5m. Cabe ressaltar que este espaçamento garante a quantidade mínima de cinco pontos de cálculo por comprimento de onda, requerida pelo modelo.

O eixo X da grade computacional foi rotacionado 30° com relação ao norte (N) no sentido anti-horário, de modo que o eixo Y fique paralelo a direção sudeste e permita a entrada das ondas provenientes deste quadrante (Figura 05). Posteriormente, foi inserido um valor de profundidade a cada ponto da malha.

A seguir é apresentada uma representação do domínio computacional pela Figura 11.

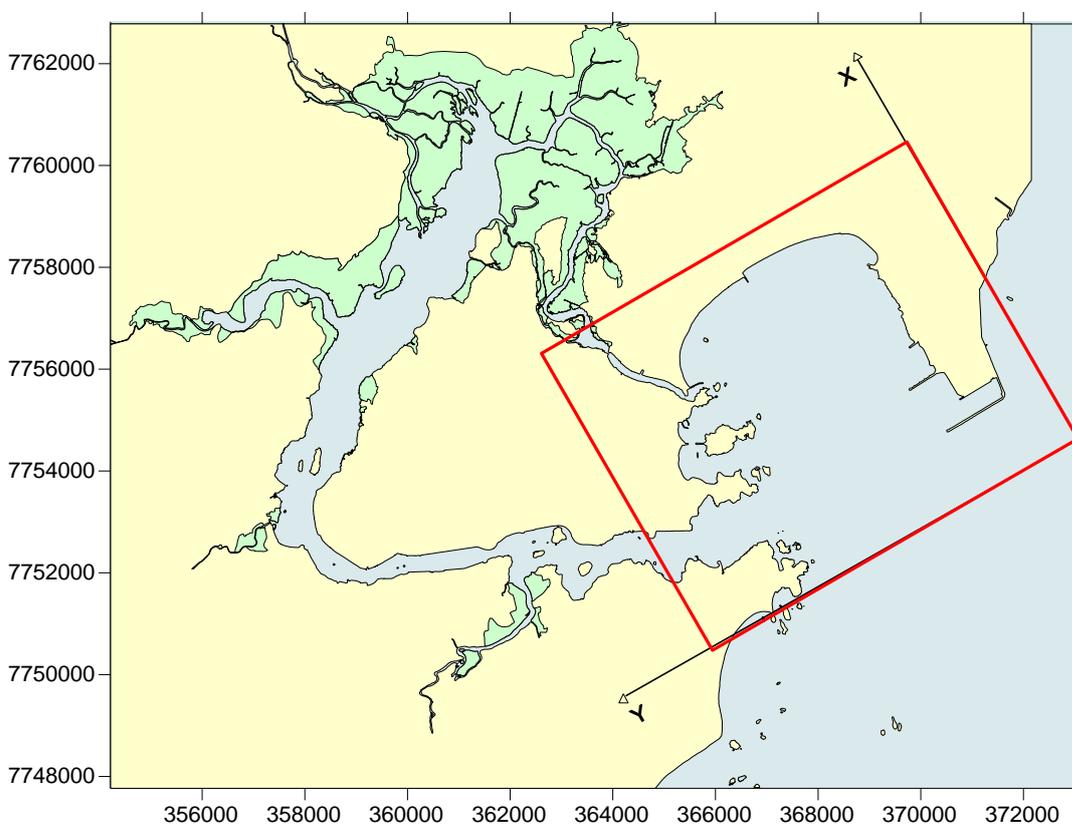


Figura 11: Baía do Espírito Santo com destaque para a região de abrangência da malha computacional.

5.2.3- Variáveis de entrada e opções de cálculo

A partir da revisão bibliográfica realizada na área de estudo, foi adotado um padrão de ondas provenientes de sudeste (SE) (Figura 12), por se tratar do padrão mais impactante às praias devido sua associação à passagem de frentes frias nesta região. O período escolhido foi de 10 segundos e a altura de 1,0 m, uma vez que

ondas com tais características são comuns na Baía do Espírito Santo tanto para as vindas de leste como as de sudeste (SOARES; CHACALTANA, 2003).

O modelo se apresenta no modo estacionário, e para efeitos de estudo serão desconsiderados os efeitos das correntes, das marés e dos ventos.

Uma vez definidos os dados de entrada, o modelo REFDIF foi aplicado à região de estudo. O arquivo de dados de entrada *inidat.dat* para este caso é apresentado no ANEXO B.

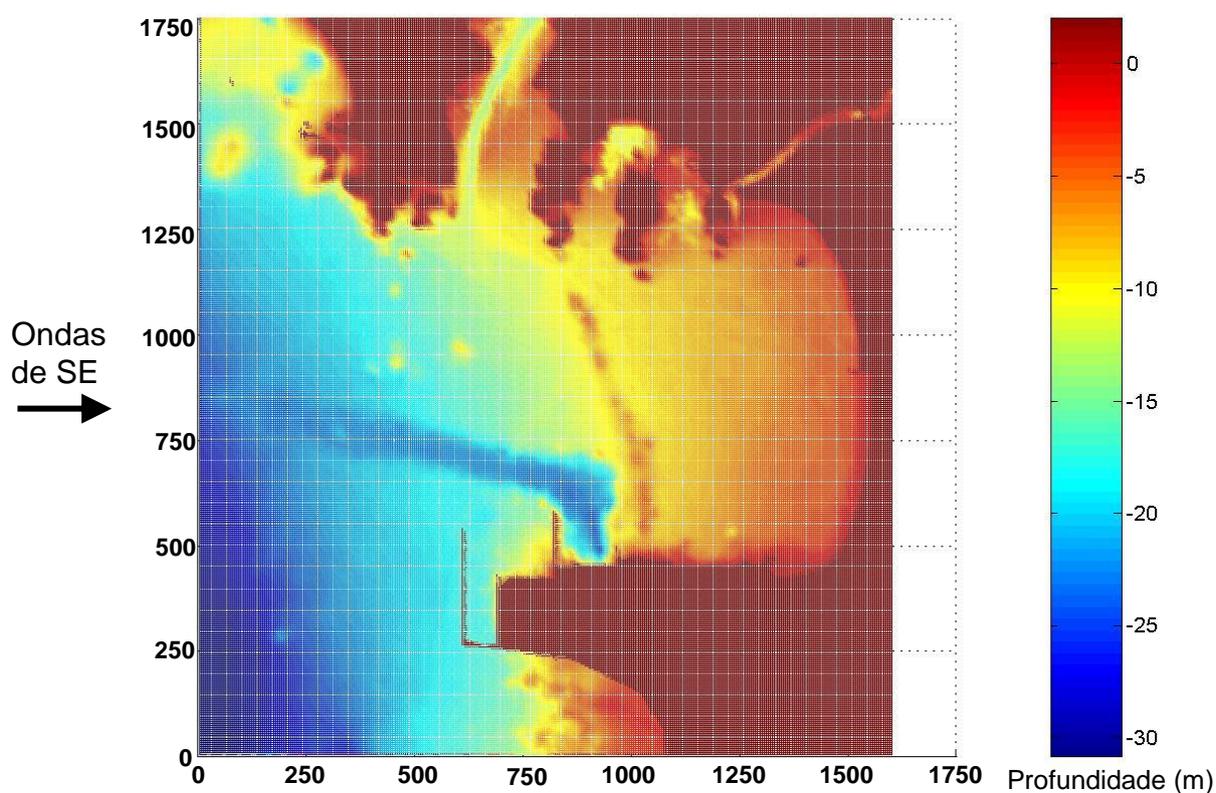


Figura 12: Representação da direção de incidência das ondas adotada neste estudo.

5.2.3.1- Condições de contorno

Neste estudo foram consideradas as perdas de fricção com o fundo e adotada a condição de contorno fechado com o intuito de avaliar as regiões potencialmente afetadas pelo efeito da reflexão.

6- RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1- Verificação do modelo REFDIF

Os gráficos de alturas de ondas para a reprodutividade dos problemas da literatura apresentados a seguir foram feitos com informações armazenadas nos arquivos de dados *depth.dat*, *height.dat* e *surface.dat* (fornecidos pelo manual do modelo REFDIF). Em todos os problemas simulados foram representadas ondas que se propagam da esquerda para a direita, em direção à costa.

A Figura 13 representa as alturas de ondas simuladas pelo REFDIF para a região da ilha artificial.

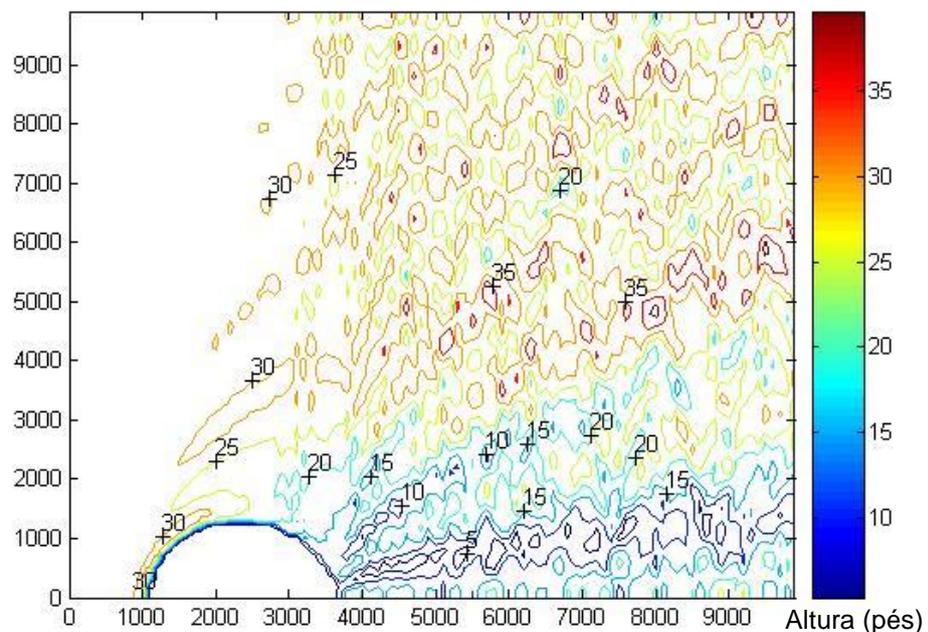


Figura 13: Contornos de alturas de onda próximos à ilha artificial.

A Figura 14 mostra alturas de ondas que se propagam sobre um baixo submerso.

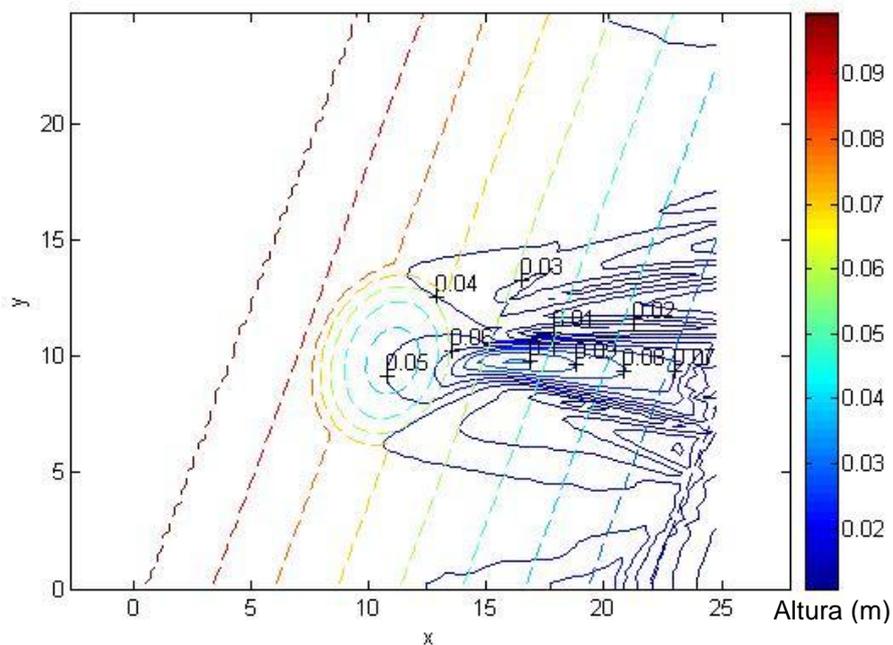


Figura 14: Ondas se propagando sobre um baixo submerso: contornos de altura de onda.

A Figura 15 ilustra as alturas de ondas em interação com uma corrente de retorno.

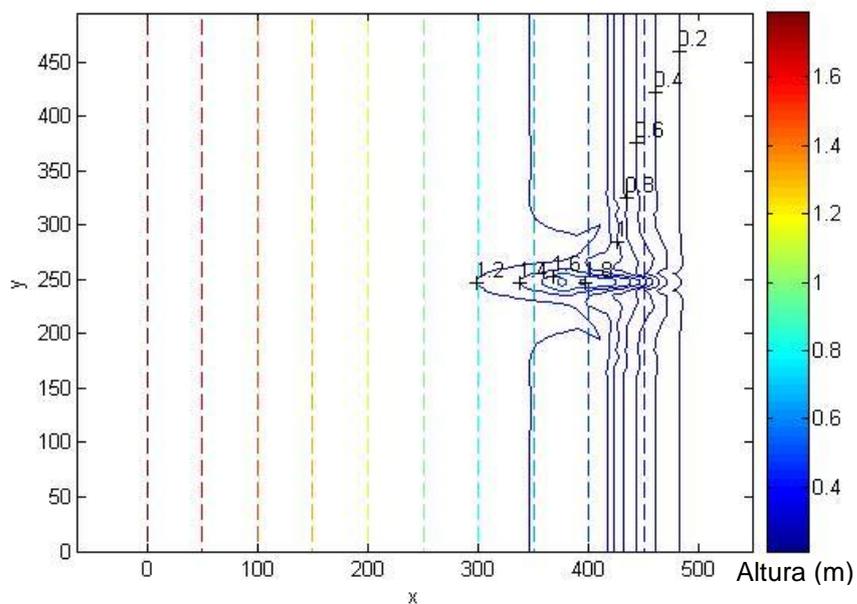


Figura 15: Ondas interagindo com uma corrente de retorno: contornos de altura de onda.

Ao observar as figuras, nota-se que menores alturas de onda são observadas sobre as regiões mais profundas, uma vez que quando a onda passa por estas regiões, sua velocidade e seu comprimento aumentam, ao passo que sua altura diminui. O oposto ocorre em áreas onde a profundidade se torna mais reduzida, como nas proximidades da linha de costa ou onde há protuberâncias no fundo; nestes casos, a redução da velocidade da onda e o decréscimo no seu comprimento, devido à diminuição da profundidade, provocam um aumento na energia potencial de onda, expresso fisicamente pela elevação de sua altura (DAVIS, 1985).

No primeiro caso foram simuladas ondas que se propagam ao redor de uma ilha artificial, cuja parte emersa está representada por cotas negativas (ver Figura 08). Neste caso, pode-se perceber o fenômeno de difração (Figura 13), que consiste na transmissão lateral de energia de uma onda, ao longo de sua crista (SUGUIO, 1992). Este fenômeno se manifesta quando um trem de ondas é interceptado por um obstáculo, como é o caso da ilha nesta aplicação; pode-se notar uma região de sombreamento na parte posterior a ilha, caracterizada por menores alturas de onda. Verifica-se ainda a característica do modelo de não calcular corretamente ondas refletidas, por isso as alturas das ondas simuladas nos pontos 1 e 2 (Figuras 06 e 13) são idênticas. Dessa forma, podem ser realizados cálculos de maneira arbitrária próximos à extremidade principal da base da ilha e a região da desta acima da linha da água também não é tratada explicitamente nas computações.

Ao observar o segundo problema, no qual há uma onda inicialmente plana se propagando sobre um baixio submerso, pode-se perceber que na região sobre a formação do baixio ocorre acentuada diminuição da profundidade (Figura 09), gerando uma redução na velocidade e um conseqüente aumento local da altura da onda, como ilustra a Figura 14. Neste caso, é possível visualizar o efeito de refração, caracterizado pela mudança acentuada na direção da onda, tendendo a se tornar paralela à direção das isóbatas (linhas de mesma profundidade), independente da direção de aproximação das ondas nas águas mais profundas.

Na terceira aplicação, por sua vez, são representadas ondas interagindo com uma corrente de retorno. Os gráficos de altura de onda (Figura 15) mostram o empinamento e a posterior quebra de uma onda plana que chega a praia sem distorção até que esta comece a interagir com a corrente de retorno. Esta corrente

de retorno é responsável por gerar uma elevação no fundo (Figura 10) causando uma concentração de energia na qual se observam as maiores alturas de onda; gera ainda descontinuidades nas cristas das ondas. Os efeitos de correntes e de mudança de profundidade agindo juntos podem ser visualizados nos resultados dos esquemas traçados.

6.2- Aplicação à Baía do Espírito Santo

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o modelo REFDIF para a distribuição espacial das alturas de onda no interior da Baía do Espírito Santo.

As Figuras 16a, 16b e 16c a seguir representam, em diferentes perspectivas, as simulações de alturas de ondas realizadas pelo modelo na região de estudo.

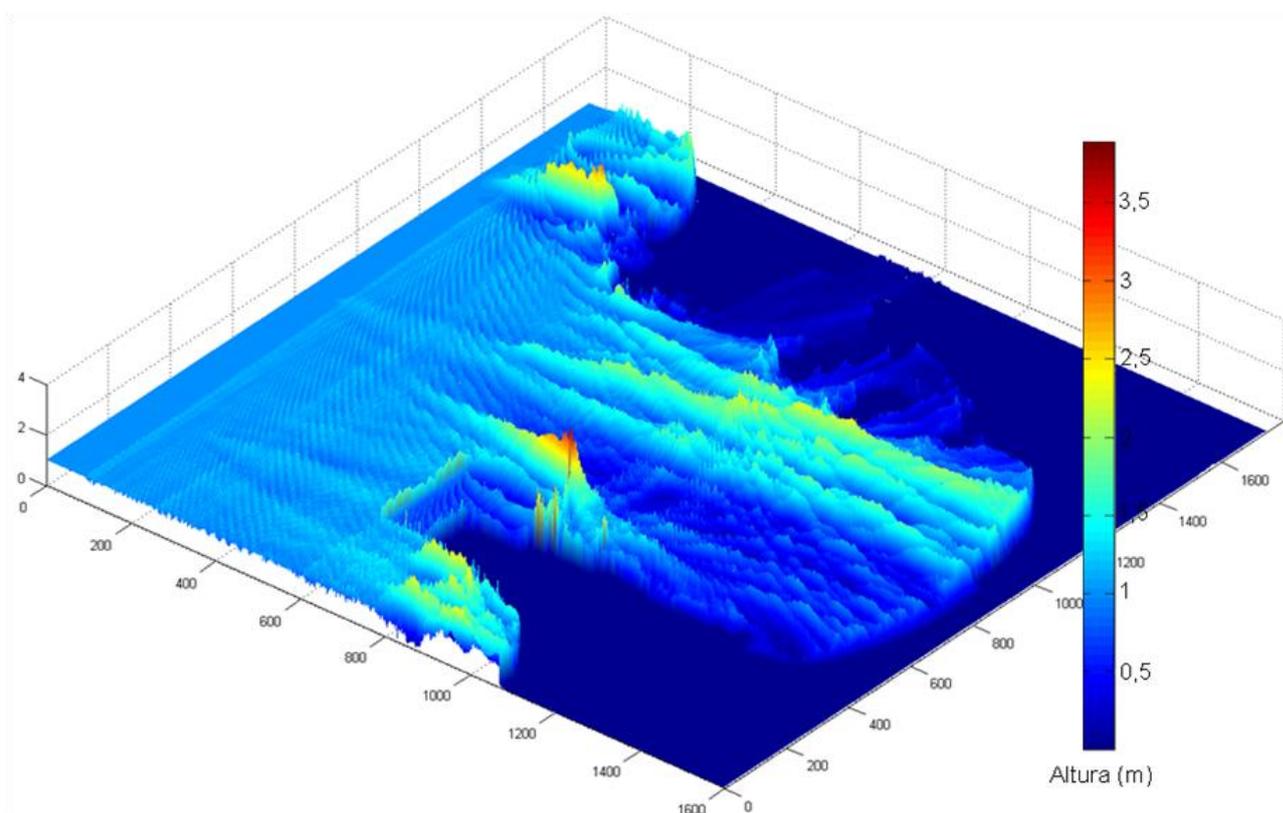


Figura 16a: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES.

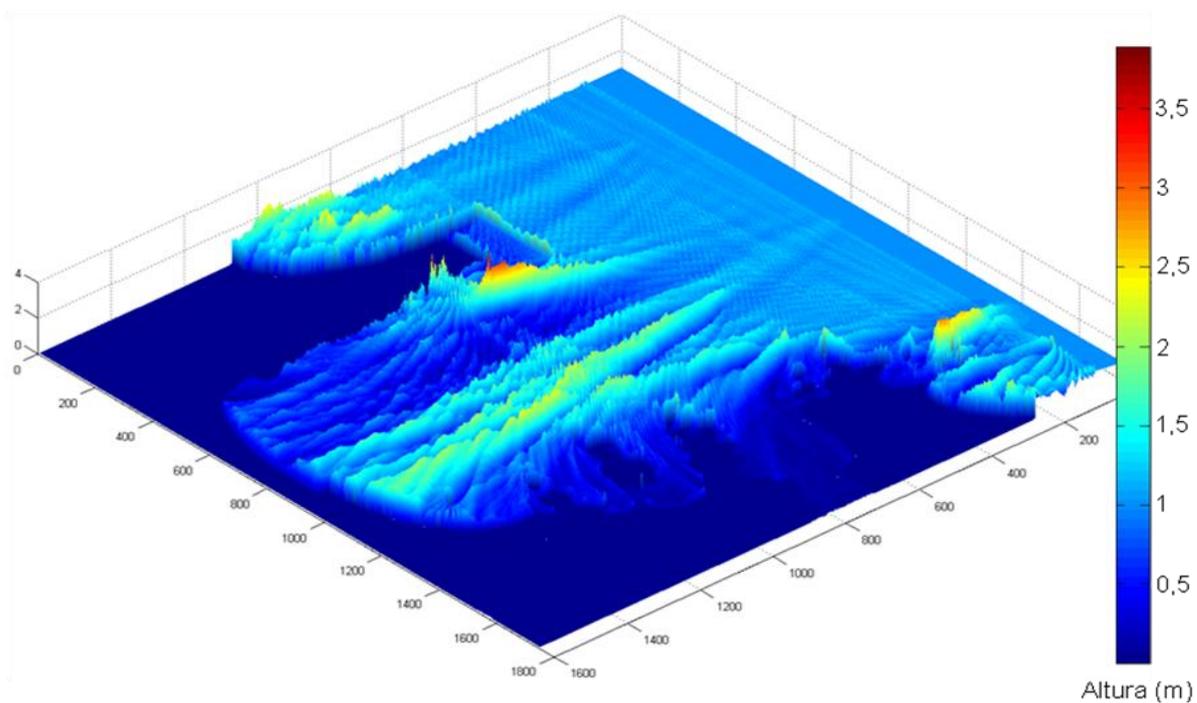


Figura 16b: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES.

Para uma melhor discussão dos resultados, a Figura 16c a seguir foi dividida em 4 setores.

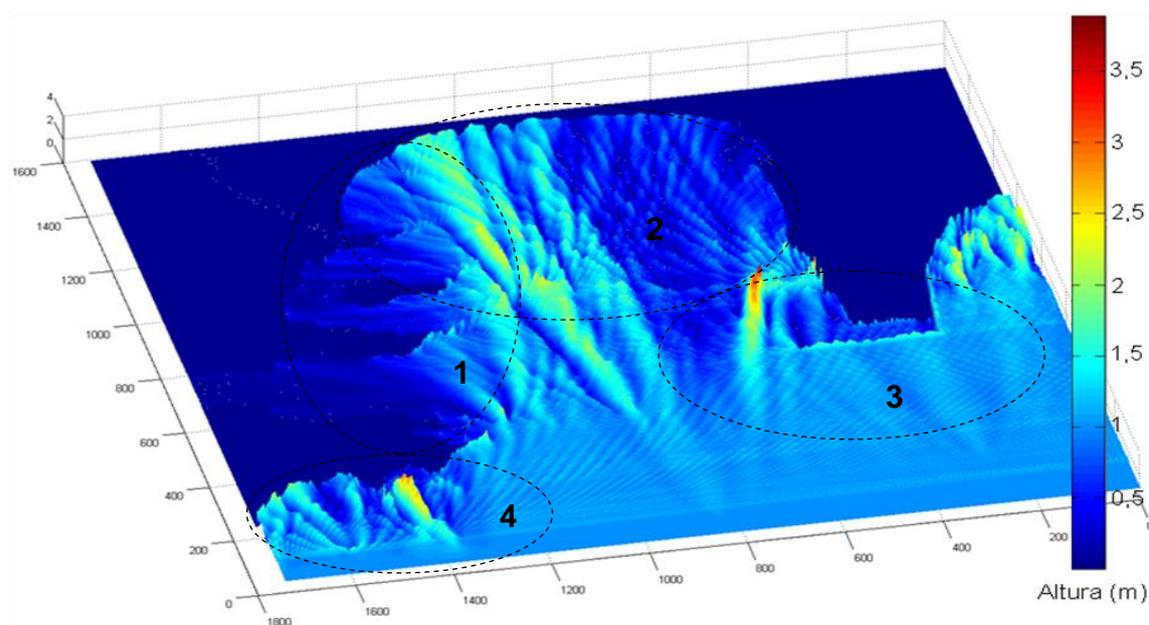


Figura 16c: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES.

6.2.1- Setor 1

O primeiro setor (Figura 17) representa a região compreendida por algumas ilhas, como do Socó (identificada por 1D), do Frade (região entre 1A e 1B) e do Boi (área entre 1B e 1C), além do canal de acesso ao Porto de Vitória (1C).

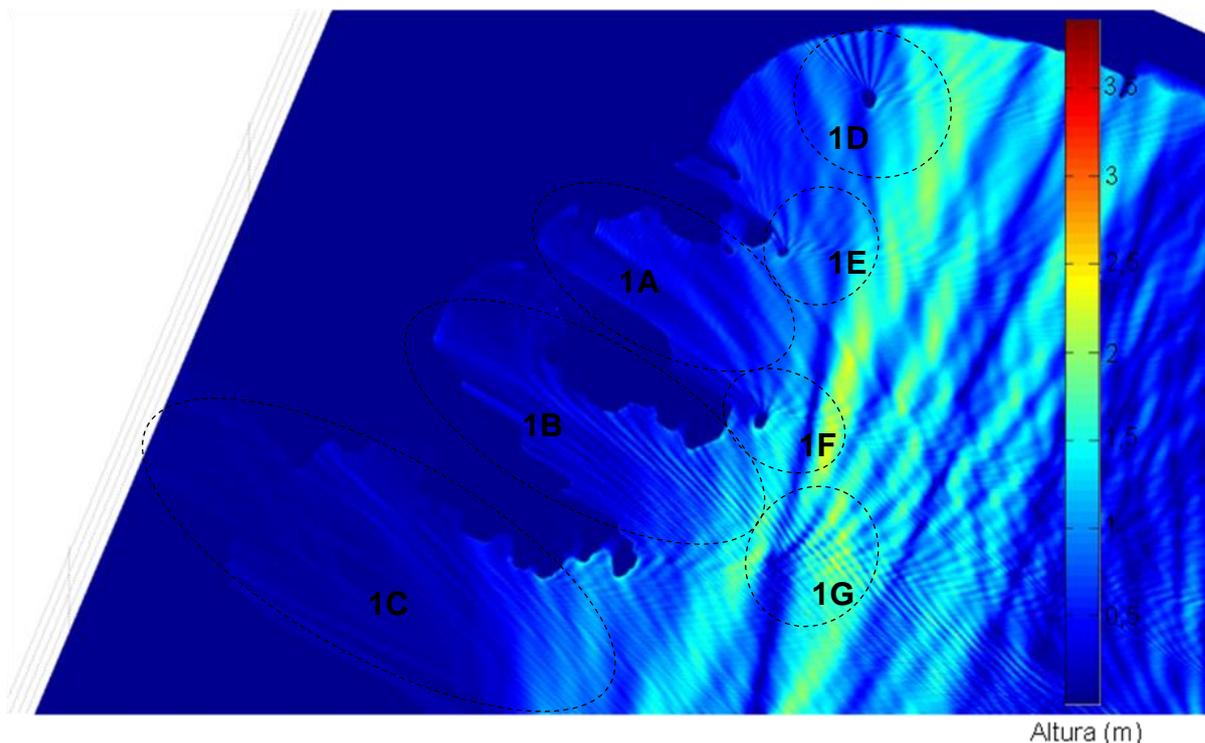


Figura 17: Distribuição espacial das alturas de ondas para o setor 1 da Baía do ES.

É possível observar na figura o efeito da difração ocasionada pelas ilhas (1D, 1E, 1F) e pelo baixio (1G), que funcionam como barreiras físicas modificando a propagação do campo de ondas. Este efeito contribui para uma redistribuição da energia das ondas, que se espalha lateralmente gerando uma forma radial nas alturas das ondas ao redor do obstáculo. Na região 1A também podem ser notados os efeitos da difração, ocasionados pela ilha 1F.

Nas partes posteriores as ilha podem ser observadas zonas sombreamento, caracterizadas por menores alturas de onda (por ficarem abrigadas de sua ação); esta zona pode ser observada, por exemplo, na região que se encontra entre a Ilha do Socó e a praia de Camburi.

Combinada à difração também se pode notar os efeitos de refração que se apresentam claramente nas regiões do canal de acesso ao porto de Vitória (1C) e reentrâncias entre as ilhas do Boi e do Frade (1D). Este efeito é ocasionado por variações de profundidade, que resultam em mudanças na direção de propagação das ondas e alterações em suas alturas. Dessa forma, ocorre o alinhamento das cristas das ondas, que tendem a ser paralelas à linha de costa, independente da direção de aproximação das ondas nas águas mais profundas.

6.2.2- Setor 2

A distribuição das alturas das ondas para o setor 2 é mostrada na Figura 18, o qual representa a região central da baía.

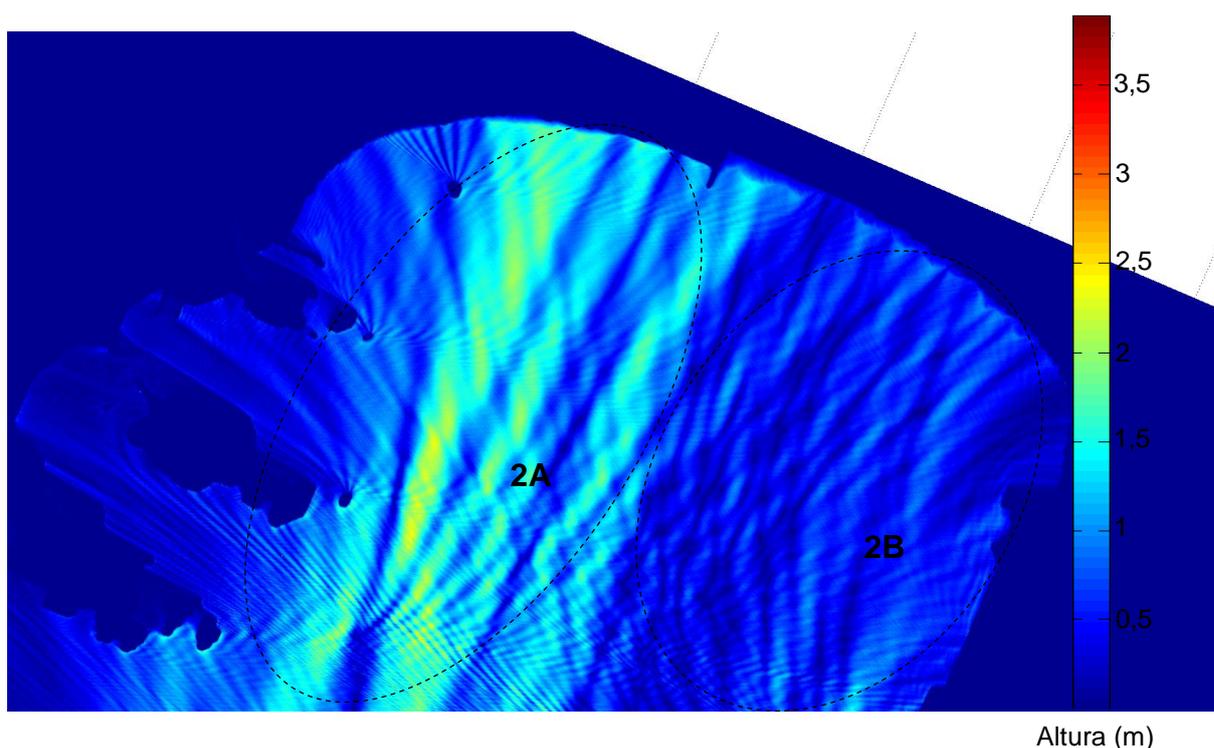


Figura 18: Alturas de ondas obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 2.

Neste setor são observados dois comportamentos bem diferenciados nas alturas das ondas obtidas para as áreas 2A e 2B. Alturas de ondas maiores que a incidente (com cerca 1,5 a 2,5 m) são observadas na região 2A, ao passo do lado oposto da Baía (2B) se verificam ondas menores (abaixo de 1m).

Nos locais representados por maiores alturas de onda houve um redirecionamento da energia proveniente do oceano (provocado pelas feições do fundo marinho), nos quais se criaram zonas de convergência ("focalização") de ondas.

De forma análoga, criaram-se zonas de divergência ("desfocalização") de ondas em 2B, onde as alturas são menores. Cabe lembrar que nesta região há uma maior presença de baixios que podem contribuir para a quebra das ondas antes destas alcançarem a linha de costa, protegendo a praia de seus impactos mais intensos. Além disso, as pequenas alturas de ondas também podem estar associadas às maiores profundidades do canal do porto de Tubarão, sendo que resultados semelhantes foram obtidos por Piumbini (2006), nos quais apontam a influência deste na diminuição das alturas da onda formando uma zona de sombreamento no local.

A concentração ou o espalhamento de energia podem ser atribuídos ao fenômeno da refração, responsável por gerar mudanças na velocidade de propagação das ondas (devido à variação de profundidade de fundo), formando convergência ou divergência dos raios de onda (linhas perpendiculares às cristas e que viajam no sentido do avanço da onda), conforme Komar (2000).

6.2.3- Setor 3

A região do setor (3) abrange as proximidades do Porto de Tubarão, e é apresentada pela Figura 19.

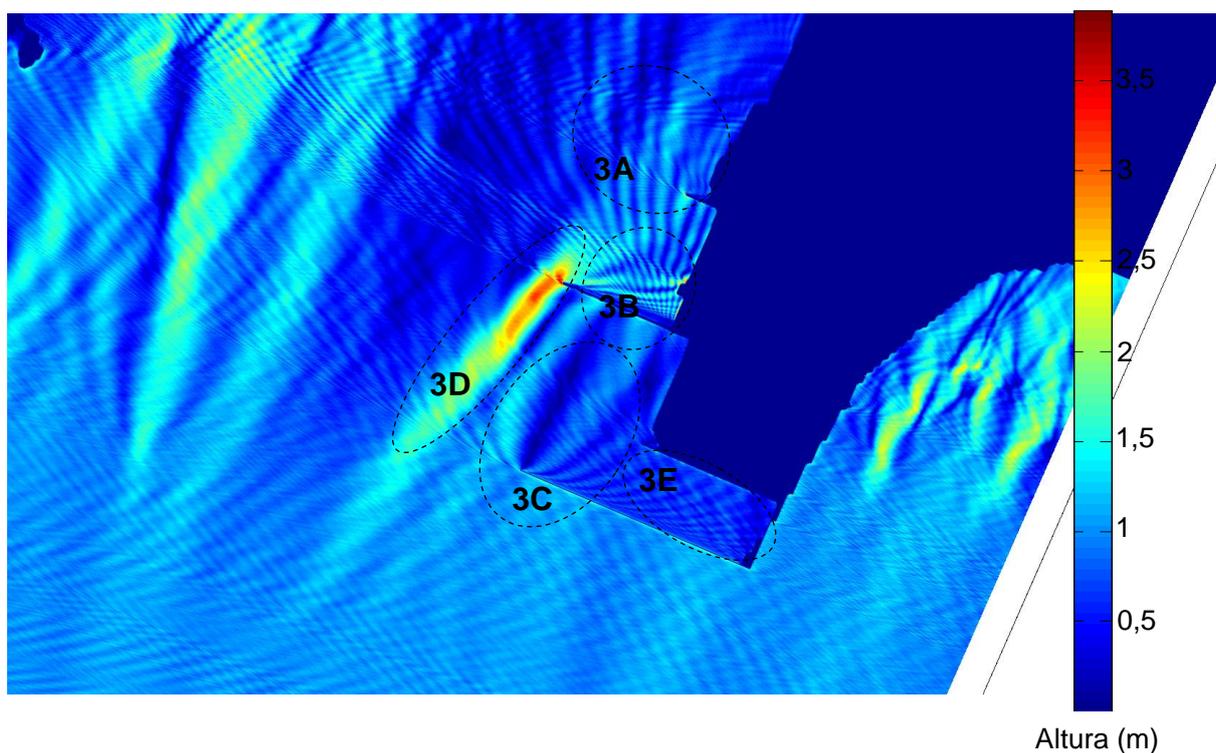


Figura 19: Alturas de onda obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 3.

Ao interagirem com os quebra-mares do Porto de Tubarão (3A, 3B e 3C), as ondas sofrem difração, como se pode observar na figura pelo espalhamento radial de suas cristas.

Nas proximidades do canal de acesso ao porto de Tubarão (3D) se verifica uma região com grandes alturas de ondas (chegando a 3m). Esta concentração de energia também pode ser atribuída à interação de ondas (que se convergem) devido à refração provocada pelas bruscas variações de profundidade do canal.

A área 2E foi destacada por representar o ruído gerado pelo modelo ao calcular a altura da onda. No trabalho de Meirelles e Violante-Carvalho (2007) também foram observados ruídos semelhantes.

6.2.4- Setor 4

A Figura 20 a seguir apresenta o setor 4.

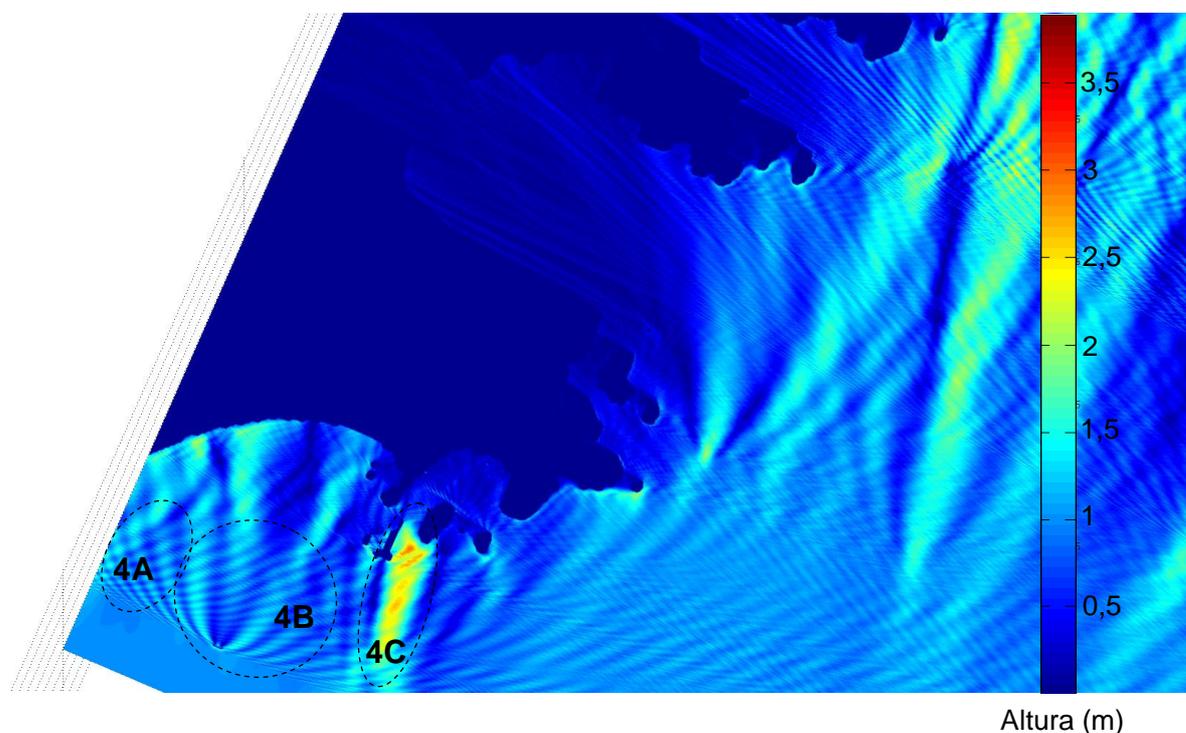


Figura 20: Alturas de onda obtidas para a Baía do ES com destaque para o setor 4.

Este último setor foi destacado por representar bem três importantes fenômenos físicos já discutidos anteriormente: a difração, que predomina na região 4B; a concentração de energia devido à refração na área 4C (com ondas superiores a 2m); e o ruído em 4A.

6.2.5- Direção de propagação das ondas

Uma representação das direções de propagação das ondas na baía do ES foi feita utilizando vetores, como ilustra a Figura 21. Nesta figura, o tamanho dos vetores indica a altura das ondas.

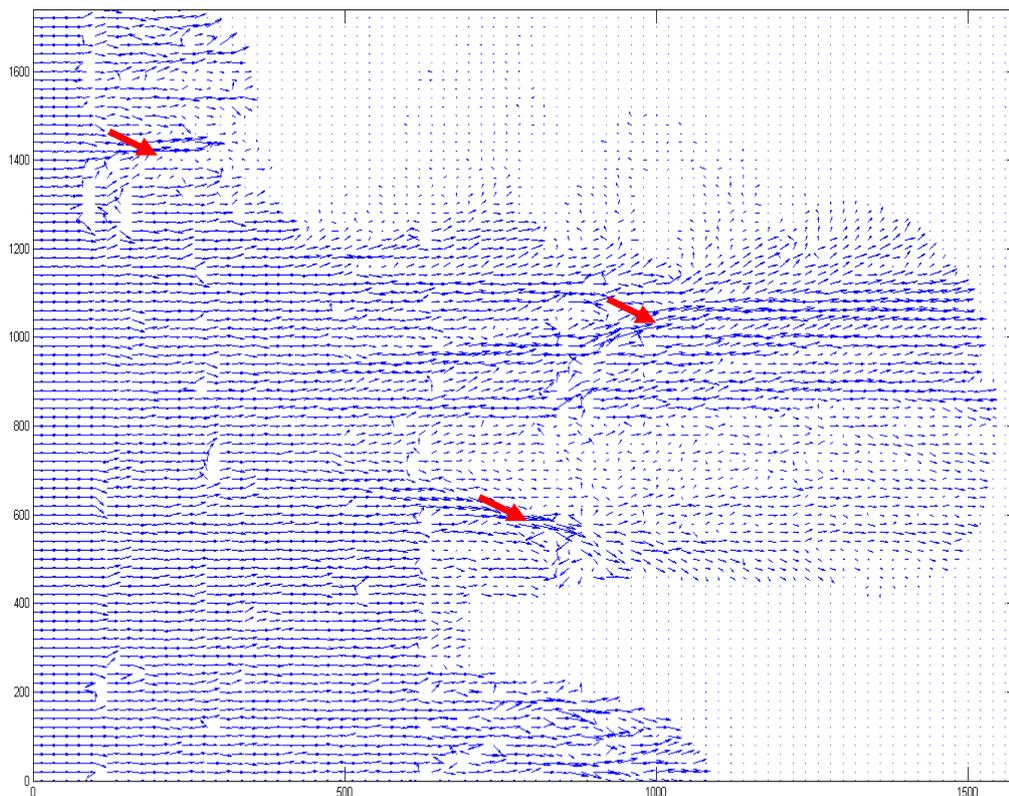


Figura 21: Representação das direções de propagação de ondas na Baía do ES.

Ao observar esta figura notam-se as ondas se propagando de sudeste (SE) com os vetores alinhados em direção à praia de Camburi e, ao interagirem com as feições do fundo, ocorrem mudanças em suas direções de propagação.

As setas indicam os locais onde são observadas as maiores convergências nas direções dos vetores, regiões já discutidas anteriormente por apresentarem com as maiores alturas de ondas.

7- CONCLUSÕES

De modo geral, o modelo REFDFIF representou satisfatoriamente os processos físicos de refração e difração através da reprodutividade de problemas clássicos da literatura e da aplicação à Baía do Espírito Santo, uma vez que os resultados encontrados são, em grande parte, coerentes com outros estudos já realizados para mesma região.

O fenômeno de difração das ondas foi observado em feições como ilhas e quebra-mares, nas quais foi possível notar o espalhamento lateral da energia das ondas.

O processo de refração foi notado principalmente nas regiões com maiores variações de profundidade, como canais e reentrâncias de ilhas. Nestes locais verificaram-se mudanças na direção de propagação das ondas, que tendem a se tornar paralelas à costa.

A modelagem indicou a existência de zonas de alta energia se concentrando no setor 2A (proximidades das ilhas do Frade e do Boi), representado por maiores alturas de ondas (cerca 1,5 a 2,5 m), resultado da convergência de ondas; e de menor energia (setor 2B), onde se apresentam ondas mais baixas (menores que 1m). Esta divergência de energia em 2B deve-se às maiores profundidades do canal de acesso ao porto de Tubarão e à presença de baixios, que pode provocar a quebra das ondas antes destas atingirem a praia de Camburi. A concentração ou o espalhamento de energia podem ser atribuídos ao fenômeno da refração.

O efeito da reflexão não foi observado nos resultados, o que já era esperado, uma vez que as aproximações numéricas empregadas no modelo não reproduzem este fenômeno com precisão.

8- REFERÊNCIAS

ALBINO, J. **Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das Praias de Bicanga a Povoação, ES**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências USP, 1999.

ALBINO, J., OLIVEIRA, R. MAIA, L. P., NASCIMENTO, K.. **Processos atuais de sedimentação marinha e praias do litoral de Vitória, ES**. Relatório final da pesquisa Fundo de amparo à ciência e a tecnologia (FACITEC) – Prefeitura de Vitória, número 198.2506/2000, 2001.

ALMEIDA, A. B. de; EIGER, S.; ROSMAN, P. C. C. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 3, p. 235, 1999.

BARLETTA, R. do C. **Teste e aplicação de modelos parabólicos de refração-difração com ênfase na propagação de ondas sobre parcéis**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2006.

BROWN, E. et al. **Waves, tides, and shallow water processes**. Ed. The Open University, 1999.

COSTA, R. B. **Expansão urbana da área norte de Vitória**. Espírito Santo. Ed. Cultural, 1989.

DAVIS, R. A. **Coastal Sedimentary Environments**. 2nd ed. USA: Halliday Lithograph, 1985.

DEAN, R.,G., DALRYMPLE, R., A. **Water waves mechanics for engineers and scientists. Advanced Series on Ocean Engerineering**. Singapore, New Jersey, Hong Kong: ed. World Scientific, 1998, v.2.

DHN, Tábuas de Marés. Terminal de Tubarão. **Diretoria de Hidrologia e Navegação, Marinha do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004.

FERNANDES *et al.* R. **Modelação de derrames de hidrocarbonetos**. Instituto superior técnico. Licenciatura em Engenharia Ambiental, 2001.

HOEFEL, F.G. **Morfodinâmica de praias arenosas: uma revisão bibliográfica**. Editora da Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, 1998.

FONTANA, A. R. **Análise da trajetória da pluma de derrames de petróleo e derivados na região de fundeadouro das Baías de Vitória e do Espírito Santo para proteção das áreas ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2003.

KIRBY, J .T. **Propagation of weakly-nonlinear surface water waves in regions with varying depth and current**, **ONR Tech. Rept. 14**. Rept. CE-83-37, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, 1983.

KIRBY, J.T. **Verification of a parabolic equation for propagation of weakly non-linear waves**. Coastal Engineering, 1984.

KIRBY, J. T. **Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves**, **J. Geophys. Rés.**, 1986a.

KIRBY, J. T. **Rational approximations in the parabolic equation method for water waves**, **Coastal Engineering**, 1986b.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. **A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography**. J. Fluid Mech, 1983a.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. **The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents**. Proc. XT&1 Congress I.A.H.R., Moscow, 1983b.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. **REF/DIF 1: Combined Refraction/ Diffraction Model. – Documentation and User’s Manual. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering – University of Delaware, Newark. Set., 1994.**

KOMAR, P. D. **Coastal Erosion – Underlying Factors and Human Impacts. Shore & Beach**, v. 68, n. 1, p. 3-16, 2000.

LEÃO, C. **Variação espacial e temporal das cúspides da praia de Camburi, Vitória – ES. 2005. 60 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. Disponível em: <<http://www.dern.ufes.br/oceano/link/monografias.html>>. Acesso em: 16 maio 2008.**

MEIRELLES, S.; VIOLANTE-CARVALHO, N. **Modelagem computacional da propagação de ondas superficiais no oceano: um subsídio para a compreensão dos fenômenos ópticos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 555-563, 2007.

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.

MUEHE, D. **Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para fins de Gerenciamento.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v2, Nº 1. 2001. 35-44.

OLIVEIRA, R. J. **Avaliação da qualidade da água da Baía Espírito Santo (Vitória, ES) no período de 2000 a 2005.** Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PAES-LEME, R. **Modelagem física e computacional de ondas geradas pelo vento em um terminal portuário: o desempenho do modelo SWAN 40.51 em uma região com elevada reflexão e difração.** Rev. Bras. Geof. vol.26 no.1 São Paulo, 2008.

PIUMBINI, P. P. **Estudo da refração de ondas de gravidade na baía do Espírito Santo.** Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

POND, S.; PICKARD, G. L. **Introductory Dynamical Oceanography.** 2nd edition. New York: Pergamon press, 1989.

RIS, R.C.; BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; PADILLA-HEMANDEZ L.; HAAGSMA, U. G. **User Manual - Simulation of Waves in the Nearshore Zone.** Delft University of Technology, Netherlands, 1997.

ROMEU, M. **Método operacional para determinação do estado de mar próximo à costa: aplicação à ilha de Santa Catarina.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2007.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBAHIA.** Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

SEGAR, Douglas A.; SEGAR, Elaine Stamman. **Introduction to ocean sciences.** Belmont: Wadsworth, 1998.

SILVA, I. R.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Modelagem de Ondas como Subsídio para a Gestão Ambiental das Praias da Costa do Descobrimento, sul do Estado da Bahia.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE, p. 4691-4697, 2007.

SOARES, S. B.; CHACALTANA, J. T. A. **Refração e Difração de Ondas em Regiões Costeiras**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 2003.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Marinha, com termos correspondentes em Inglês, Francês e Espanhol**. T. A. Queiroz. São Paulo. 1992.

WEI, G., KIRBY, J.T. “**Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations**”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, pp. 251-261, 1995.

ZÓZIMO, A. C. Ferramenta **SIG para Modelos de Propagação de Ondas**. Desenvolvimentos Preliminares. In: VII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora, 2005.

ANEXO A

Estrutura do Modelo REFDIF

Subrotinas do modelo REFDIF:

1. *inref*: lê os dados que controlam as dimensões da grade de referência e o esquema de interpolação da grade a partir de um número de dispositivos lógicos de unidade *iun(5)*, e lê na grade de referência os valores de profundidade *dr*, direção da velocidade em *x*, *ur*, e direção da velocidade em *y*, *vr*, a partir do número do dispositivo lógico *iun(1)*;
2. *inwave*: lê nos dados a especificação do campo de onda inicial ao longo da primeira fila de pontos da grade de referência. Os dados são lidos no dispositivo lógico pelo número *iun(5)*;
3. *model*: controla a execução da parte computacional do programa;
4. *grid*: executa a interpolação exigida sobre um único bloco da grade de referência como especificado na entrada de dados;
5. *con*: calcula várias constantes para a grade de referência criada para o *grid*;
6. *fdcalc*: executa a integração da equação parabólica sobre a grade definida pelo *grid*. Os coeficientes da forma de diferenças finitas da equação parabólica são desenvolvidos de acordo com o método de *Crank-Nicolson*;
7. *ctrida*: rotina utilitária que é chamada pelo *fdcalc* para executar a eliminação de dupla varredura para resolver o conjunto implícito de equações;
8. *diss*: calcula os coeficientes de dissipação da fricção baseado nos valores das bandeiras lidas por *inref*;
9. *wvnum*: executa uma solução de *Newton-Raphson* da relação de dispersão linear onda-corrente para obter valores do número de onda *k*;
10. *rand*: é um gerador de número randômico simples usado para inicializar as fases de onda randômicas se o modelo de espriamento direcional estiver sendo usado;

11. *acalc*: normaliza a densidade de energia de espectro direcional sobre um setor de 90°;
12. *bnum*: calcula o número de *Bernoulli* $n!/k!(n - k)!$;
13. *fact*: calcula o $n!$ de um número inteiro n ;
14. *infile*: fornece as informações para definir o *namelist* do arquivo de entrada.

Definição das variáveis de entrada

Os dados de ondas são organizados em várias listas e inseridos no arquivo *indat.dat* que usa a convenção *namelist*. As variáveis de entrada do modelo são definidas a seguir.

grupo namelist ingrid

- *mr, nr*: dimensões da grade de referência (os valores máximos são *ixr, iyr* respectivamente);
- *iu*: é a bandeira para unidades físicas; *iu=1*, MKS; *iu=2*, Inglês. O programa padrão adota *iu=1* se houver um erro na entrada de dados;
- *ntype*: é a bandeira para a não-linearidade; *ntype=0*, modelo linear; *ntype=1*, modelo composto; *ntype=2*, Modelo de Onda de Stokes;
- *icur*: é a bandeira para a entrada de dados de correntes. *icur=0*, não há dados de entrada de correntes; *icur=1*, dados de entrada de correntes;
- *ibc*: é a bandeira para condições de contorno (fronteira). *ibc=0*, fronteira fechada; *ibc=1*, fronteira aberta; *ibc* padroniza um valor de zero caso um erro de entrada for detectado;
- *dxr, dyr*: grades de referência com espaçamento x e y são assumidas para serem uniformes na grade de referência inteira;
- *dt*: valor de tolerância de profundidade;

- *ispace*: é a bandeira que controla as subdivisões; *ispace=0*, tentativa do programa de realizar suas próprias sub-divisões de *x*. *ispace=1*, o usuário especifica as subdivisões de *x*;
- *nd*: é o número de subdivisões na direção *y* (é necessária em qualquer caso);
- *iff(1)*, *iff(2)*, *iff(3)*: bandeiras de dissipação; *iff(1)=1*, ativa a camada limite turbulenta; *iff(2)=1*, ativa o amortecimento em fundo poroso; *iff(3)=1*, ativa a camada limite laminar. Não há amortecimento se todos os valores são iguais a zero;
- *isp*: bandeira especificada pelo usuário nas especificações da subgrade. *isp=0*, não há subgrade para ser lida; *isp=1*, serão lidas as subgrades;
- *iinput*: especifica se o programa ou o usuário gerarão a primeira fila de valores de amplitude complexa *A*. Se *iinput=1*, o programa constrói *A* baseado na entrada das condições especificadas como segue. Se *iinput=2*, o usuário tem que especificar *A* no arquivo de dados externo *wave.dat*. Esta opção não está disponível em LRSS;
- *ioutput*: especifica se a última fila de amplitudes complexas *A* será armazenada em arquivo *wave.dat*. Um valor de *A* *ioutput=1* pula esta opção. *ioutput=2* ativa esta opção.

grupo *namelist inmd*

- *md(ixr)*: se *ispace=1*, as subdivisões na direção *x* são inseridas aqui (uma para cada bloco da grade de referência). A matriz de ordem *md* deve ser dimensionada de acordo com o valor de *ixr* no programa principal, se importar quantos valores de fato estão sendo usados.

grupo *namelist fnames*

- *fname1: refdat.dat*, arquivo de dados da grade de referência;
- *fname2: outdat.dat*, arquivo padrão de dados de saída antigo (Este arquivo será desconsiderado em alguma versão intermediária 2.5);
- *fname3: subdat.dat*, subgrade especificada pelo usuário;
- *fname4: wave.dat*, amplitude complexa especificada pelo usuário na fila 1 (para *iinput = 2*);
- *fname5: owave.dat*, amplitude complexa na última fila (para *ioutput = 2*);
- *fname6: surface.dat*, dados de amplitude complexa para a construção de uma imagem instantânea da superfície da água em resolução computacional;
- *fname7: bottomu.dat*, magnitude da velocidade de fundo nos pontos da grade de referência;
- *fname8: angle.dat*, direção da onda θ em graus nos pontos da grade de referência;
- *fname9*: não é usado atualmente, fornece um nome falso;
- *fname10: refdif1.log*, roda o *log* (onde se escreve mensagens de erro) para o programa *refdif1*;
- *fname11: height.dat*, alturas de onda localizadas na grade de referência. Este arquivo sempre é gerado;
- *fname12: sxx.dat*, componentes de *Sxx* em locais de grade de referência;
- *fname13: sxy.dat*, componentes *Sxy* localizadas na grade de referência;
- *fname14: syy.dat*, componentes *Syy* localizadas na grade de referência;
- *fname15: depth.dat*, valores de maré corrigidos nas localizações da grade de referência. Este arquivo sempre é gerado.

Se *iinput* = 1, o restante do *indat.dat* é:

grupo *namelist waves1a*

- *iwave*: bandeira para cada tipo de campo de onda. *iwave*=1, componentes de onda discretos. *iwave*=2, modelo de propagação direcional;
- *nfreqs*: número de componentes de frequência para serem rodados. O máximo é valor de *ncomp* no *param.h*.

O restante do arquivo depende da escolha do *iwave*.

Para *iwave*=1:

grupo *namelist waves1b*

- *freqs(ncomp)*: o período de onda para cada componente de frequência;
- *tide(ncomp)*: relativo à maré para cada componente de frequência;
- *nwaves(ncomp)*: número de componente de onda para cada frequência;
- *amp(ncomp, ncomp)*: amplitude para cada componente de onda;
- *dir(ncomp, ncomp)*: direção em graus relativos ao eixo x para cada componente de onda.

Para *iwave*=2:

grupo *namelist waves1c*

- *thet0*: a direção central para o espectro modelo;
- *freqs(ncomp), tide(ncomp)*: como acima;
- *edens(ncomp)*: densidade de variância (*m2* ou *ft2*) para cada componente de frequência;

- *nwavs(ncomp)*: fator de espreadimento direcional (o fator n no $\cos 2n (\theta/2)$);
- *nseed*: o valor semente para o gerador de número randômico (entre 0 e 9999).

Para *iinput* = 2, o restante do arquivo de dados é:

grupo *namelist waves2*

- *freqin, tidein*: período da onda e balanço da maré para o único componente de frequência.

ANEXO B

Arquivos de dados de entrada *indat.dat*.

Exemplo 1: *Propagação de ondas ao redor de uma ilha artificial não submersa*

```

$fnames
fname2 = 'refdat.dat '
fname3 = 'subdat.dat '
fname4 = 'wave.dat '
fname5 = 'owave.dat '
fname6 = 'surface.dat '
fname7 = 'bottomu.dat '
fname8 = 'angle.dat '
fname9 = ' '
fname10 = 'refdif1.log '
fname11 = 'height.dat '
fname12 = 'sxx.dat '
fname13 = 'sxy.dat '
fname14 = 'syy.dat '
fname15 = 'depth.dat '
$end
$ingrid
mr = 100
nr = 100
iu = 2
ntype = 1
icur = 0
ibc = 0
dxr = 20.00000
dyr = 20.00000
dt = 10.00000
ispace = 0
nd = 1
iff = 0, 0, 0
isp = 0
iinput = 1
ioutput = 1
$end
$waves1a
iwave = 1
nfreqs = 1
$end
$waves1b
freqs = 10.00000
tide = 0.0000000E+00
nwavs = 1
amp = 14.00000
dir = 0.0000000E+00
$end

```

Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

Exemplo 2: Ondas sobre um baixo submerso

```

$names
fname2 = 'refdat.dat '
fname3 = 'subdat.dat '
fname4 = 'wave.dat '
fname5 = 'owave.dat '
fname6 = 'surface.dat '
fname7 = 'bottomu.dat '
fname8 = 'angle.dat '
fname9 = ' '
fname10 = 'refdif1.log '
fname11 = 'height.dat '
fname12 = 'sxx.dat '
fname13 = 'sxy.dat '
fname14 = 'syy.dat '
fname15 = 'depth.dat '
$end
$ingrid
mr = 100
nr = 100
iu = 1
ntype = 1
icur = 0
ibc = 0
dxr = 0.2500000
dyr = 0.2500000
dt = 10.00000
ispace = 0
nd = 1
iff = 0, 0, 0
isp = 0
iinput = 1
ioutput = 1
$end
$waves1a
iwave = 1
nfreqs = 1
$end
$waves1b
freqs = 1.000000
tide = 0.0000000E+00
nwavs = 1
amp = 2.3200000E-02
dir = 0.0000000E+00
$end

```

Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

Exemplo 3: Ondas interagindo com uma corrente de retorno

```
$fnames
fname2 = 'refdat.dat '
fname3 = 'subdat.dat '
fname4 = 'wave.dat '
fname5 = 'owave.dat '
fname6 = 'surface.dat '
fname7 = 'bottomu.dat '
fname8 = 'angle.dat '
fname9 = ' '
fname10 = 'refdif1.log '
fname11 = 'height.dat '
fname12 = 'sxx.dat '
fname13 = 'sxy.dat '
fname14 = 'syy.dat '
fname15 = 'depth.dat '
$end
$ingrid
mr = 100
nr = 100
iu = 1
ntype = 1
icur = 1
ibc = 0
dxr = 5.000000
dyr = 5.000000
dt = 10.000000
ispace = 0
nd = 1
iff = 0, 0, 0
isp = 0
iinput = 1
ioutput = 1
$end
$waves1a
iwave = 1
nfreqs = 1
$end
$waves1b
freqs = 8.000000
tide = 0.0000000E+00
nwavs = 1
amp = 0.5000000
dir = 0.0000000E+00
$end
```

Fonte: Kirby e Dalrymple (1994).

Aplicação do modelo à Baía do Espírito Santo

```
$names
fname1 = 'refdat.dat '
fname2 = 'outdat.dat '
fname3 = 'subdat.dat '
fname4 = 'wave.dat '
fname5 = 'owave.dat '
fname6 = 'surface.dat '
fname7 = 'bottomu.dat '
fname8 = 'angle.dat '
fname9 = ' '
fname10 = 'refdif1.log '
fname11 = 'height.dat '
fname12 = 'sxx.dat '
fname13 = 'sxy.dat '
fname14 = 'syy.dat '
fname15 = 'depth.dat '
$end
$ingrid
mr = 1596
nr = 1746
iu = 1
ntype = 1
icur = 0
ibc = 0
dxr = 5.00000
dyr = 5.00000
dt = 10.0000
ispace = 0
nd = 1
iff = 0, 0, 0
isp = 0
iinput = 1
ioutput = 1
$end
$waves1a
iwave = 1
nfreqs = 1
$end
$waves1b
freqs = 10.00000
tide = 0.0000000E+00
nwavs = 1
amp = 0.500000
dir = 0.0000000E+00
$end
```