

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

LEONARDO CARVALHO DE JESUS

**HIDRODINÂMICA FORÇADA PELA MARÉ ASTRONÔMICA E VENTO
NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO ESPÍRITO SANTO PARA O
ANO DE 2008**

VITÓRIA
2011

LEONARDO CARVALHO DE JESUS

**HIDRODINÂMICA FORÇADA PELA MARÉ ASTRONÔMICA E VENTO
NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO ESPÍRITO SANTO PARA O
ANO DE 2008**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Oceanografia
da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para a
obtenção do título de Oceanógrafo.

Orientador: Dr. Julio Tomás Aquije
Chacaltana.

VITÓRIA

2011

HIDRODINÂMICA FORÇADA PELA MARÉ ASTRONÔMICA E VENTO
NA PLATAFORMA CONTINENTAL DO ESPÍRITO SANTO PARA O ANO
DE 2008

por

Leonardo Carvalho de Jesus

Submetido como requisito parcial para a obtenção de grau de
Oceanógrafo

na

Universidade Federal do Espírito Santo

Novembro de 2011

© Leonardo Carvalho de Jesus

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 parciais ou totais deste Trabalho de Conclusão de Curso para fins não comerciais

Assinatura do autor.....

Curso de graduação em Oceanografia
Universidade Federal do Espírito Santo
16 de Novembro de 2011

Certificado por

Julio Tomás Aquije Chacaltana
Dr. / Orientador

Certificado por

Daniel Rigo
Prof. Adjunto / Examinador interno
DEA/CT/UFES

Certificado por.....

Alexandre Braga
Dr./ Examinador externo
CEPEMAR

Certificado por.....

Ângelo Fraga Bernardino
Prof. Adjunto / Coordenador do Curso de Oceanografia
Universidade Federal do Espírito Santo
CCHN/DOC/UFES

Quem sabe e não sabe que sabe está dormindo,
Quem não sabe e sabe que não sabe é humilde,
Quem sabe e sabe que sabe é um sábio,
Mas, . . . como saber se se sabe?

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e padrinhos. Ao meu orientador, Prof.º Julio pela orientação e ajuda neste e em outros trabalhos, aos amigos do LABESUL, principalmente Gregório pela ajuda e parceria e também ao Fabio e Thiago pelos valiosos ensinamentos e a Izabel, que mesmo de longe sempre mandava mensagens de otimismo.

Aos amigos de graduação, em especial a Bárbara, Felipe Mantuan, Felipe Thomaz e Ricardo pelos últimos anos juntos e ao Fernando e Franciane pelo trabalho juntos ao longo destes últimos meses.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A maré astronômica, causada pela forças astronômicas gera velocidades que podem ser grandes em regiões de baixa profundidade. Seu movimento faz com que ela seja uma das principais formas entrada e saída de massa e energia em ambientes de alta produtividade marinha, como em manguezais, controlando também a dispersão de nutrientes, poluentes e fito e fauna planctônica. Além da forçante astronômica, o vento desenvolve um importante papel na geração de correntes no oceano, sendo responsável pelas maiores variabilidades as correntes oceânicas. Assim, a proposta do presente trabalho é implantar o sistema de modelação MOHID, a fim de avaliar a circulação hidrodinâmica forçada por maré astronômica e efeitos derivados da tensão do vento, na região da plataforma continental ao largo do estado do Espírito Santo para o ano de 2008. Para a avaliação da hidrodinâmica será utilizado o módulo hidrodinâmico do modelo MOHID, que calcula as equações primitivas do movimento integradas na vertical, assumindo as aproximações de Boussinesq, de Reynolds e de pressão hidrostática. As condições de contornos utilizadas são harmônicos de maré extraídos do modelo TPXO_AO e campos de vento fornecidos do banco de dados de re-análises NCEP/NOAA. A representação da batimetria é feita a partir de dados do ETOPO/NOAA, GEBCO/BODC e carta náutica digitalizada, com linhas de costa digitalizadas a partir do Google Earth e do banco de dados do NOAA ('*coastline*'). A avaliação da modelagem é feita a partir do parâmetro estatístico Raiz Média Quadrática Desajustada (*Root Mean Square Misfit*), comparando os resultados aos harmônicos extraídos a partir de portos localizados na costa do Espírito Santo, fornecidos pela FEMAR. O modelo mostrou-se capaz de capturar as principais características do escoamento dirigido por maré e vento na região da área de estudo, com pequenos erros, semelhante aqueles encontrados em literatura. O escoamento induzido pelo vento mostrou a tendência de direcionamento para sul das correntes, assim como o padrão de ventos, entretanto é necessária a implantação dos módulos barotrópicos 3-D e baroclínicos, além de campos de vento de maior resolução para a melhor representação da hidrodinâmica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	09
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GERAL.....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
3.1. MARÉ ASTRONÔMICA.....	12
3.2. EFEITO DO VENTO	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
5. ÁREA DE ESTUDO	27
5.1. REGIME DE VENTO.....	28
5.2. REGIME DE MARÉ	29
6. METODOLOGIA	30
6.1. O MOHID.....	30
6.2. BATIMETRIA.....	32
6.3. GRADE COMPUTACIONAL.....	33
6.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO	34
6.4.1. Maré	34
6.4.2. Vento	34
6.5. CONDIÇÕES INICIAIS.....	35
6.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
7.1. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM	37
7.2. HIDRODINÂMICA	38
7.2.1. Maré astronômica	38
7.2.2. Maré astronômica e vento	40
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	46
9. REFERÊNCIAS	47

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Interação entre as forças geradoras de maré (força centrífuga – vetor laranja e força gravitacional causada pela Lua – vetor azul), em roxo. Fonte: Adaptado, The Open University (1999)..... 12
- Figura 2** – Co-fases e co-amplitudes para a componente de maré M2, geradas a partir de resultados do modelo NAO99b para a região oceânica ao largo do Brasil, em evidência a presença de um ponto anfidrômico na bacia oceânica do Atlântico Sul..... 14
- Figura 3** – Região do estado do Espírito Santo e área oceânica adjacente estudo .27
- Figura 4** – condições da superfície para o continente sul-americano previstas para o dia 08 de outubro de 2010, em destaque a presença de um ciclone extratropical. Fonte: adaptado, instituto nacional de pesquisas espaciais (INPE).28
- Figura 5** – Batimetria da área de estudo mostrada até a isóbata de 200 m, correspondente a profundidade aproximada da quebra de plataforma.....33
- Figura 6** – RMS calculado para os sete principais harmônicos de maré – (a) fase; (b) amplitude..... 37
- Figura 7** – RMS *misfit* calculado para os sete principais harmônicos de maré entre os resultados de modelagem e aqueles fornecidos pela FEMAR.38
- Figura 8** – Co-amplitude, contorno preenchido, em centímetros e co-fases, contorno, em ° GMT, para o harmônico M2. 39
- Figura 9** – Co-amplitude, contorno preenchido, em centímetros e co-fases, contorno, em ° GMT, para o harmônico S2..... 40
- Figuras 10** – Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o verão/2008, os resultados estão plotados até a isóbata de 600 m..... 41
- Figuras 11** - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o outono/2008, os resultados estão mostrados até a isóbata de 600 m. Em destaque sistemas de recirculação. 42
- Figuras 12** - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o inverno/2008, os resultados estão mostrados até a isóbata de 600 m..... 43
- Figuras 13** - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para a primavera/2008, os resultados estão mostrados até a isóbata de 600 m.. 44
- Figura 14** – Vento calculado a 10 m da superfície, média para a primavera; resultados fornecidos pelo NCEP..... 45

1

INTRODUÇÃO

Atualmente, diversas atividades vêm sendo realizadas no litoral e na região oceânica do Espírito Santo, como a instalação e modernização de portos e a instalação de estruturas offshore, principalmente para atender a indústria petroleira e de mineração. Apesar da extrema importância sócio-econômica, os diversos aspectos da circulação oceânica no litoral do Espírito Santo ainda são pouco conhecidos.

Isso ocorre em virtude dos altos custos envolvidos nas pesquisas oceanográficas, tornando muito escassa a quantidade de dados meteo-oceanográficos para que se possa ter uma ideia mais precisa tanto das características climatológicas quanto das variabilidades espaços-temporais da circulação.

O estudo do movimento das marés como resultante do sistema de forças astronômicas é de grande importância, pois estas podem produzir correntes intensas, principalmente em regiões costeiras e estuarinas, além da influência do vento na dinâmica das correntes locais. Sendo que o padrão do escoamento em plataforma associado às marés é altamente modificado por fatores tais como, a tipologia de linha de costa, a batimetria de fundo e as condições climáticas da região, como o vento, resultando em fenômenos como a maré meteorológica (PEREIRA *et al.*, 2005).

Outro aspecto relevante é que a maré é um dos principais agentes dispersantes de poluentes, fito e fauna planctônica e nutrientes, atuando como uma das mais importantes formas de entrada e saída de massa e energia para ecossistemas marinhos de alta produtividade, como os manguezais.

Os diversos aspectos relativos à circulação de maré e a hidrodinâmica geral de corpos d'água vêm sendo investigados tanto com pesquisas de campo quanto com estudos a partir de modelagem numérica. Neste sentido, modelos computacionais que consigam descrever de forma satisfatória a hidrodinâmica em regiões costeiras e oceânicas são de grande valia na definição de estratégias tanto de gerenciamento e fiscalização de corpos d'água costeiros quanto na instalação e manutenção de

estruturas de engenharia além do estudo de prováveis impactos ambientais desses projetos.

Mesmo que se conheça pouco das condições reais do ambiente, os modelos computacionais podem ser usados para se formar uma ideia preliminar das características mais marcantes da região costeira, levantando hipóteses a serem confirmadas por experiências de campo ou de laboratório.

A aplicação de modelos numéricos é, portanto, uma forma de gestão que considera conjuntamente os aspectos de quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Tais modelos podem ser empregados tanto em análises de diagnóstico, com o objetivo de avaliar as condições ambientais atuais, como em análises de prognóstico, a fim de conhecer as condições ambientais futuras frente aos impactos de modificações a serem introduzidos no meio.

Deste modo, o presente trabalho tem como proposta, a avaliação do regime de circulação induzida pela maré astronômica e pelo vento para o ano de 2008 na região de plataforma continental espírito-santense. As características gerais da circulação poderão ser utilizadas em diversas aplicações técnico-científicas, como por exemplo, no subsídio à tomada de decisão, na aplicação de técnicas de dimensionamento, segurança e instalação de projetos de engenharia na área costeira e oceânica, na melhoria do controle da poluição, além de poderem ser usados para melhorar a acurácia de resultados de modelagem.

2

OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a hidrodinâmica forçada por maré astronômica e efeitos de vento na região oceânica na plataforma do estado do Espírito Santo para o ano de 2008.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de atingir o objetivo deste trabalho de pesquisa propõem-se os seguintes passos específicos:

- Implantar MOHID para a área de estudo;
- Avaliar a hidrodinâmica causada pela maré astronômica;
- Avaliação da hidrodinâmica forçada por efeitos de maré astronômica e vento;
- Validação dos resultados com dados medidos *in situ*;

3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 MARÉ ASTRONÔMICA

A maré astronômica se constitui de uma oscilação periódica da superfície do mar provocada principalmente pelas forças gravitacionais induzidas pela Lua e pelo Sol. Segundo a Teoria Estática, o movimento, principalmente da Lua, faz com que a superfície da água experimente forças tanto centrífugas quanto gravitacionais, resultando nas chamadas forças geradoras de maré, como visto na Figura 1.

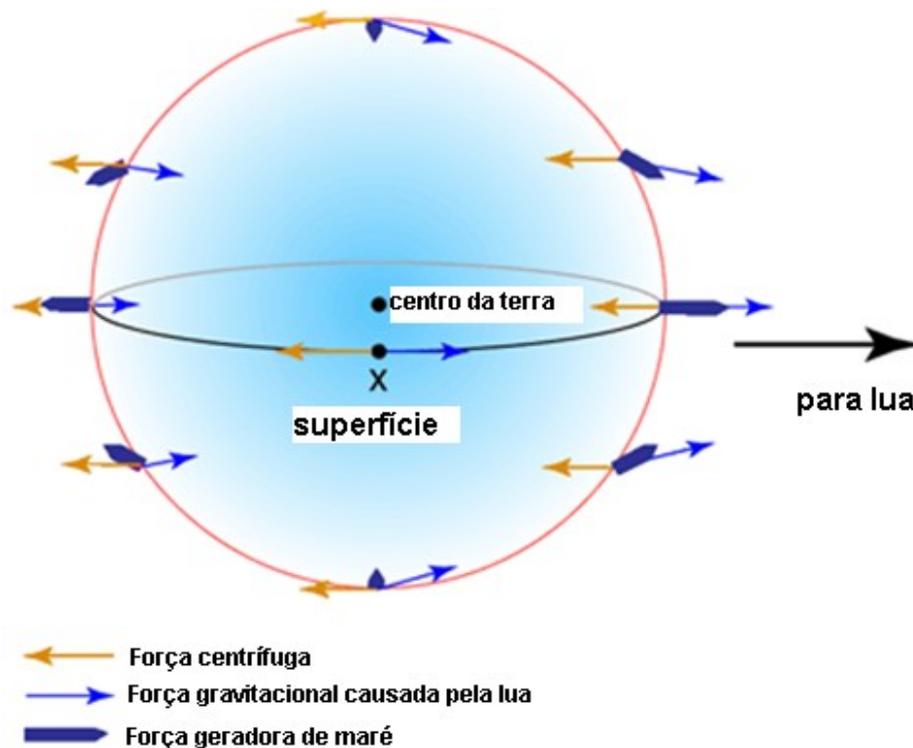


Figura 1 – Interação entre as forças geradoras de maré (força centrífuga – vetor laranja e força gravitacional causada pela Lua – vetor azul), em roxo.

Fonte: Adaptado, The Open University (1999).

A força geradora de maré faz com que a superfície do mar se projete, formando dois bulbos de maré. Entretanto, com a declinação que a Lua possui em relação à linha do Equador terrestre (28.5°) faz com que maré gerada seja desigual em relação à latitude. Além deste efeito, o movimento elíptico da Lua em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua, com períodos em que se encontra mais próxima ou

mais afastada da Terra (os chamados perigeus e apogeus), que faz com que a força geradora de maré varie em cerca de 20% (The Open University, 1999).

Os movimentos realizados pela Lua são a principal força geradora de maré, mas o sol, apesar de está há maior distância da Terra também tem influência relevante na geração de maré, isto, pois a massa do sol em relação à Terra é muito grande. Mesmo estando a 360 vezes mais longe da Terra que a Lua, o Sol pode gerar forças da ordem de 46% da força gerada pela Lua (The Open University, 1999).

Assim como a Lua, o sol também declina em um ciclo anual em relação ao Equador, variando em 23.4° para cada um dos dois hemisférios. Além disto, o Sol também possui órbita elíptica em relação ao centro de massa sistema Terra-Sol, com períodos em que a Terra se encontra mais próxima ao sol – periélio e períodos em que a Terra se encontra mais distante do Sol – afélio, o que reduz ou amplifica a força geradora de maré.

A interação entre as forças geradas pela Lua e pelo Sol faz com que a Terra experimente marés distintas com a configuração cósmica destes dois astros. Quando a Terra, a Lua e o Sol se encontram alinhados (Lua cheia e Lua nova), as forças geradoras de maré são amplificadas gerando amplitudes de maré maiores, as marés de sizígia. Já nos períodos em que a Lua e o Sol estão em um ângulo de 90° entre si, são observadas as menores amplitudes de maré, conhecidas como marés de quadratura.

A Teoria Estática foi primeiramente apresentada por Newton e explicou as diferenças entre as marés ao longo das latitudes e as marés de quadratura e sizígia. Porém, não explica a influência das bacias oceânicas, variações de profundidades, força de Coriolis, inércia, força de fricção para o fluido. Levando em conta estas forças, matemáticos como Bernoulli, Euler e Laplace desenvolveram a Teoria Dinâmica de Maré.

Com a Teoria Dinâmica de Maré, evidenciou-se a presença de sistemas anfidrômicos, que são regiões onde a onda de maré gira em torno de um ponto, o ponto anfidrômico (ponto onde a elevação de maré é igual a zero, com o aumento das amplitudes à medida que se afasta deste ponto). Neste mesmo sentido, foram elucidadas outras características da circulação de maré, como a presença de linhas

co-amplitudes (linhas de mesma amplitude de maré) e linhas de co-fase (linhas com mesmos valores de fase), como mostrado na Figura 2.

Fase (contorno preenchido, em graus) e amplitudes (contorno, em centímetros) para a componente M2 - Modelo NAO99b

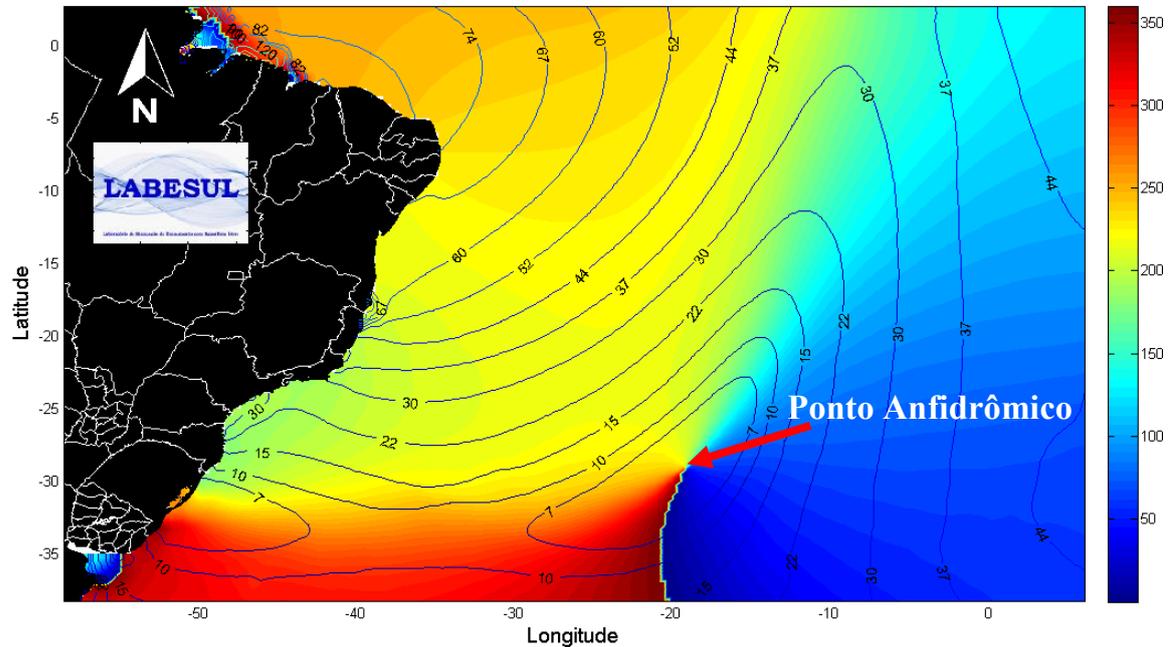


Figura 2 – Co-fases e co-amplitudes para a componente de maré M2, geradas a partir de resultados do modelo NAO99b para a região oceânica ao largo do Brasil, em evidência a presença de um ponto anfidrômico na bacia oceânica do Atlântico Sul.

Os movimentos relativos ao sistema Terra-Lua-Sol geram um grande número de forças geradoras de maré. As variações de altura da superfície do oceano causadas pela maré podem ser decompostos como uma soma de um número finito de termos harmônicos (em função do cosseno), que são chamados constituintes harmônicos de maré.

Já as constantes harmônicas, os valores de fase e amplitude para cada constituinte, sendo estas independentes do tempo, são de grande importância para a caracterização de um dado local. As constantes harmônicas podem ser extraídas matematicamente a partir de análise harmônica de Fourier, em que os coeficientes da série correspondem aos valores de amplitude e fase.

A maré então em determinado local pode ser estimada a partir do somatório de uma função que leva em consideração os valores da amplitude, fase e outros parâmetros como correção nodal e velocidade angular dos constituintes.

Os principais harmônicos de maré são mostrados na Tabela 1, abaixo:

3.2 EFEITO DO VENTO

A variação do nível do mar e geração de correntes pelo vento está relacionada, principalmente à quantidade de energia e momento transferidos das correntes atmosféricas para o meio fluido adjacente. Uma das consequências deste processo é a geração de variações na elevação e nas correntes marinhas, sendo este processo também responsável pela geração de ondas no oceano. A transferência de energia e momentum do vento para as massas líquidas se dá basicamente por força de tensão do vento que atua na superfície do oceano, com o efeito retardatório das correntes mais velozes e de aumento da velocidade do fluido mais lento (POND & PICKARD, 1983). A tensão do vento que atua sobre a superfície livre pode ser considerada a partir de uma equação paramétrica (Equação 1):

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho c_D \overrightarrow{W}_{10} \|\overrightarrow{W}_{10}\| \quad Eq. (1)$$

Em que τ_x e τ_y são as tensões do vento nas direções x e y respectivamente, ρ a massa específica do ar, c_D o coeficiente de arrasto induzidos pela velocidade do vento e \overrightarrow{W}_{10} a velocidade do vento medida a 10 m de altura.

Pond & Pickard (1983) mostram que as tensões provocadas pelo vento aumentam em uma proporção constante até velocidades próximas a 10 m/s, aumentando pouco a partir deste valor.

4

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A circulação induzida pela maré astronômica vem sendo estudada por uma vasta gama de pesquisadores, como Fang e colaboradores (1998) que estudaram os principais harmônicos de maré (M2, S2, K1 e O1) para o mar do sul da China, do Golfo de Tonkin e do Golfo da Tailândia simultaneamente. Para este trabalho foi desenvolvido um modelo baseado no esquema numérico de Kwok (em *Proceedings of the 1st Asian Computational Fluid Dynamics Conference*, 1995, p. 16-19). As equações usadas no modelo são as do movimento e da conservação da massa integradas na vertical, com discretização numérica do tipo diferenças finitas e esquemas numéricos com precisão de segunda ordem. O passo de tempo utilizado é determinado pela condição de Courant – Freidrichs – Lewy, utilizando-se a técnica de discretização temporal ADI (*Alternating Implicit Technique*).

A grade computacional usada tem resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, sendo utilizados como condições de contorno aberto os harmônicos extraídos a partir de estações de maré e interpolados linearmente para as áreas de interesse. A representação da maré metrológica foi feita a partir da adição de um termo a equação de equilíbrio de maré para a componente S2, uma vez que sua energia representa, para a área de estudo, cerca de 10% da energia desta componente solar. O passo de tempo usado foi de 5 minutos e a condição inicial foi do tipo partida a frio. A simulação foi feita para um período de 375 dias, sendo descartados os 10 primeiros dias (tempo de estabilização do modelo).

Os autores produziram cartas de co-fase e co-amplitudes para os principais harmônicos de maré, encontrando algumas discrepâncias com aquelas cartas produzidas por outros pesquisadores, que segundo os autores supracitados é função do espaçamento entre as estações de maré, da complexidade dos sistemas anfidrômicos semidiurnos e da inadequação de trabalhos numéricos anteriores. A localização dos pontos anfidrômicos dos harmônicos M2 e S2 (localizados no Golfo da Tailândia e no mar do sul da China) são esclarecidos neste trabalho, bem como a circulação dos harmônicos diurnos.

Xianwen e colaboradores (2000) estudaram a maré barotrópica e as correntes de maré para a região do mar de Bohai, Mar Amarelo e no mar leste da China, com destaque para os harmônicos M2, S2, K1 e O1. Estes autores desenvolveram um modelo tri-dimensional, baseado nas equações primitivas do movimento, derivadas em relação à coordenada sigma e com um módulo de fechamento de turbulência. A discretização numérica utilizada é do tipo diferenças finitas e a integração no tempo foi dividida em três passos para evitar instabilidades numéricas causadas pelos termos advectivos, com o cálculo do coeficiente de arrasto de fundo de forma empírica. Para as simulações foi utilizada uma grade de alta resolução (5'x5' de resolução horizontal e 15 níveis sigma verticais), em que as condições de contorno aberto são harmônicos de maré extraídos a partir de cartas empíricas de maré e dados de modelagem já existentes.

A validação do modelo foi feita a partir dos quatro principais harmônicos (M2, S2, K1, O1), sendo os resultados comparados a 15 estações de medição (elevação) e 13 fundeios (correntes), mostrando uma boa correspondência com os harmônicos semidiurnos (M2 e S2) tanto para elevação quanto para corrente. A partir dos resultados foram feitos mapas de co-fase e co-amplitudes, evidenciando a presença de quatro pontos anfifrômicos para as componentes semidiurnas na região de estudo, dois no Mar de Bohai e dois no Mar Amarelo, e dois para as componentes diurnas (O1 e K1), bem como a similaridade entre o padrão de circulação da M2 e S2 e das componentes O1 e K1. A análise das correntes de maré foi feita a partir de cartas de elipses de maré, mostrando um padrão horário de rotação.

Uma das conclusões importantes destes autores foi em relação ao coeficiente de fricção de fundo usado, que para as simulações foi adotado um valor calculado empiricamente e constante para todo o domínio, o que dificultou a captura correta das velocidades de fundo.

Beardsley e colaboradores (2004) usaram dados do ASIAEX (*Asian Sea International Acoustics Experiment*, grupo interdisciplinar formado por pesquisadores americanos e taiwaneses que conduziram diversos experimentos de campo no Mar Nordeste do Sul da China) para o estudo das marés, correntes de maré barotrópica e energia para a região nordeste do mar do sul da China. Esta área foi escolhida devido às fortes correntes de maré locais, a ondas internas de alta frequência e

grande amplitude, que possuem grande influência na propagação do som na quebra de plataforma e devido aos vórtices formados pelas intrusões da corrente de Kuroshio.

A campanha de coleta de dados foi realizada durante abril e maio de 2001, com os aparelhos AANDERA e ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Os dados de corrente utilizados foram pré-processados, removendo-se os valores irrealísticos de velocidade (ocasionados por erros de amostragem), esses valores retirados da série foram recolocados por interpolação linear. Com os dados de correntes e pressão já pré-processados foram calculados os harmônicos de maré a partir do método de análise harmônica de Fourier.

Os quatro principais harmônicos de maré foram analisados, evidenciando o padrão horário de rotação destes harmônicos. Os autores mostraram que na região de estudo as correntes se mostraram bem misturadas, com a dominância das componentes O1 e K1 sobre a parte superior do talude continental, com a diminuição das velocidades de maré em direção a plataforma. As elipses das componentes M2 e S2 têm sentido giro horário e sua amplitude aumenta em direção a norte, na plataforma, sendo que o transporte do fluxo da energia da M2 geralmente estava alinhado com eixo principal de sua elipse, com pequeno atraso de fase entre maré alta e o transporte máximo. As comparações feitas com estudos numéricos mostraram uma boa concordância com os resultados obtidos a partir dos dados coletados pela ASIAEX.

Glorioso e Flather em 1997 analisaram os aspectos relativos à dissipação e propagação de energia gerada pela circulação de maré na plataforma continental da Patagônia, sendo esta feita a partir de modelagem. O modelo usado resolve as equações do movimento integradas na vertical, derivadas do modelo numérico desenvolvido por FLATHER (1976).

Os resultados obtidos foram comparados a dados medidos de 25 portos ao longo da costa da área de estudo. Os resultados mostraram a dominância do harmônico M2, com grande amplificação no Golfo de San Matias, evidenciando também a convergência dos eixos das elipses de maré na região de Bahia Grande. A maioria da energia dissipada na área de estudo ocorre sobre a plataforma continental, em

locais relacionados a frentes de maré, sendo que parte desta energia dissipada escoava gerando marés de águas rasas, principalmente a componente harmônica M4.

O estudo da circulação barotrópica forçada por maré e vento na plataforma sudoeste do Atlântico, entre a região de Cabo Frio (Brasil) e Burdwood Bank (Argentina), foi realizado por Palma e colaboradores (2004). Para este trabalho foi utilizado o modelo numérico POM, com grade curvilínea de resolução horizontal de aproximadamente 10 km e com 25 níveis sigma de resolução vertical, forçado com maré barotrópica e vento. Para retirar os efeitos baroclínicos foram utilizados campos de temperatura e pressão constantes (20C° para temperatura e 35 psu para a salinidade).

A batimetria utilizada foi obtida a partir de cartas náuticas digitalizadas fornecidas pelo Serviço Hidrográfico da Argentina. As condições de contorno utilizadas foram obtidas a partir do modelo global TPXO.5 (*Oregon State University*), para os valores de elevação de superfície, contando com o efeito dos 5 principais harmônicos de maré (M2, S2, N2, K1 e O1) para as simulações da maré. Os efeitos de potencial de maré foram desconsiderados (uma vez que seu efeito representava menos de 2,5% da solução). Para os experimentos realizados com vento foram utilizados valores derivados da climatologia do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

A partir de mapas de co-amplitude, co-fase e velocidades, produzidos com os resultados, verificou-se a dominância dos harmônicos semidiurnos na região de estudo, principalmente em áreas rasas da plataforma da Patagônia, além da presença de um intenso escoamento em direção *offshore* forçado pelos ventos de oeste (*westerly winds*), sobre as componentes geostróficas e de Ekman na plataforma da Patagônia. Em áreas costeiras, com grandes depressões da superfície, as correntes superficiais ficaram alinhadas com a direção do vento, já em regiões longe da costa e do efeito de contorno com o continente, as correntes mantiveram a tendência de desvio para a esquerda da direção do vento (comportamento associado à dinâmica de Ekman).

Os resultados mostraram a presença na parte norte da plataforma de um escoamento em direção ao sul dirigido associado à presença de ventos de nordeste predominantes nesta região da área de estudo. Sendo que as maiores variabilidades

sazonais da circulação forçada pelo vento não foram bem observadas devido à qualidade dos dados usados (já que eram climatologias). Uma das principais conclusões dos autores gira em torno dos aspectos relativos à intrusão de água doce, principalmente do Rio da Prata, dos fluxos barotrópicos da corrente das Malvinas na parte superior do talude da região da Patagônia e penetrações da corrente do Brasil na plataforma, que podem gerar variações espaço-temporais na circulação da plataforma e assim devem ser consideradas neste tipo de estudo.

Harari e Camargo (1994) investigaram a propagação da maré na plataforma sudeste do Brasil, que se estende desde a Ponta do Vigia (SC) a Cabo Frio (RJ). Os nove principais harmônicos de maré (M2, S2, O1, K1, N2, P1, Q1, K2 e M3) foram considerados para o estudo, uma vez que representam cerca mais de 90% da energia da maré. Para modelagem foi utilizada uma grade regular com inclinação de 32° no sentido anti-horário, em direção leste oeste, com 708 elementos de grade.

Para os contornos abertos foram utilizados harmônicos de maré das nove principais componentes de maré extraídas a partir de registros de estações de medição existentes próximos aos contornos de interesse. O passo de tempo do modelo foi de 120 segundos, sendo a condição inicial do tipo partida a frio, com a estabilização do modelo aproximadamente no instante de tempo de 72 horas.

A partir dos resultados os autores plotaram mapas de co-fase e co-amplitudes, mostrando as principais características da propagação de maré. O padrão de rotação das elipses predominante encontrado pelos autores é anti-horário, com exceção da componente M3. Evidenciou-se forte discrepância entre a componente N2 calculada e à medida que é atribuída, segundo os autores, a imprecisão em sua determinação para o contorno.

A N2 foi a única componente que apresentou comportamento que não concordou satisfatoriamente com as medições realizadas na costa. As discrepâncias associadas aos resultados foram atreladas aos efeitos não-lineares de pequena escala que não puderam ser representados pelo modelo e a posição dos marégrafos e dos pontos de medição na grade computacional. Os autores propõem a adição de efeitos gerados por campos de vento, pressão, temperatura para a melhor representação da maré, além de modelos de menor escala para regiões estuarinas ou muito rasas.

O estudo da circulação de maré para a região costeira de Santos foi realizada por Harari e Camargo (1998). Para a realização deste estudo, os autores implantaram o POM (Princeton Ocean Model), com uma grade de resolução espacial de aproximadamente 1 km e 11 níveis sigma na vertical. As condições de contorno abertas utilizadas foram calculadas a partir de mapas de co-amplitudes e co-fase apresentados por Harari e Camargo em 1994, sendo alguns dos valores de contorno corrigidos, considerando amplificações e defasagens suplementares, em comparação com os resultados prévios de modelagem e análises de registros anuais do Porto de Santos.

Foram adotados campos de temperatura e salinidade constantes para evitar os efeitos baroclínicos, além da anulação das forçantes meteorológicas. A primeira parte do trabalho consistiu na simulação dos dois harmônicos principais (M2 e S2) para o período de cinco dias cada, a segunda parte do trabalho foi a simulação para um mês dos nove principais harmônicos para a região da plataforma de Santos. A condição inicial foi do tipo partida a frio, sendo considerados para o processamento os resultados com início em 00 GMT de 28 de dezembro de 1979 a 00 GMT de janeiro de 1980.

A partir dos resultados foram gerados mapas de co-fase, co-amplitudes de elipses de maré, que elucidaram algumas características da circulação na plataforma de Santos. A análise destes mapas mostra o padrão anti-horário de giro dos harmônicos semidiurnos M2 e S2. Os sentidos de propagação da maré para os harmônicos M2 e S2, para a vazante são na direção leste-sudeste enquanto na enchente de oeste-noroeste. Evidencia-se também o efeito da profundidade no comportamento das velocidades (mais fracas em regiões mais profundas e maiores em regiões mais rasas). Os perfis de velocidade mostraram o caráter barotrópico da maré, assim como a análise das correntes em superfície.

Estes resultados também permitiram observar comportamentos peculiares da maré nesta região, como a convergência e divergência de correntes nos canais de Bertioga e São Vicente, onde ocorre o encontro de ondas de maré provenientes de suas extremidades, o padrão uniforme da maré na vertical, além de amplificações, atrasos de fase e sentido predominante de propagação de eixos de elipse na área de estudo.

Os autores propõem a adoção de grades com maior resolução, por meio do método de aninhamento; a inclusão de efeitos baroclínicos e meteorológicos, além da adoção de um modelo de alagamento e exposição do fundo para melhorar os resultados de modelagem.

Harari e colaboradores (2000) estudaram as correntes e a propagação de maré na Baixada Santista (SP), cobrindo também as áreas do Canal do Porto e as Praias de Santos, as praias do Guarujá, o acesso ao Porto de Santos e a área costeira adjacente à Ilha da Moela. Para realização de trabalho os autores implantaram o modelo POM, com uma grade de resolução espacial de aproximadamente 1km, foi utilizado o método de aninhamento, com os sub-modelos de resolução horizontal aproximadamente de 75 m, com 11 níveis sigma de resolução vertical, para as regiões específicas do domínio.

A fim de simular apenas os efeitos da maré astronômica foram utilizados campos de temperatura e salinidade constantes, assim como a anulação dos campos de vento, sendo que em todas as simulações foi adotada a condição inicial de repouso para o oceano. Os resultados da modelagem foram comparados com dados de previsão harmônica e observações do nível do mar. O modelo utilizado apenas considerou o efeito da maré (com campos de temperatura e salinidade constante e com efeitos atmosféricos anulados), com os nove principais harmônicos de maré.

A partir dos resultados foram confeccionados mapas de correntes de maré para a região em diversas profundidades. Evidenciou-se boa correlação entre os resultados do modelo, as previsões harmônicas e os dados de estações de maré. As velocidades encontradas pelos autores são concordantes com trabalhos realizados na região de estudo, principalmente pela FUNDESPA (Fundação de Estudos e Pesquisa Aquáticas, São Paulo). Os autores salientam que a inclusão dos campos de vento, temperatura e salinidade são fundamentais para a melhor representação das correntes e elevações de maré.

Mesquita e Harari (2003) realizaram o estudo da maré e das correntes de maré na plataforma sul-sudeste brasileira, a partir de dados de medições *in situ* de correntes e elevações de maré. Os dados foram coletados a partir de três estações de medição na costa e no cruzeiro da expedição “Hidrodinâmica Costeira” realizado pelo governo brasileiro, sendo utilizados equipamentos de fundeio e do tipo

AANDERAA para amostragens ao longo da plataforma, em que os dados de corrente foram medidos da superfície até o fundo em intervalos de 10 m, com intervalos de tempo que variavam entre 1h e 4h, dependendo da região da plataforma.

As séries de elevação obtidas foram analisadas pelo método de análise harmônica de Fourier e pelo método de resposta, para obtenção das constantes harmônicas de maré. Os resultados mostraram que geralmente as componentes semidiurnas apresentam propagação anti-horária, mostrando aumento de suas amplitudes em direção leste para oeste.

As componentes Q1 e O1 apresentam propagação horária, enquanto as componentes K1 e P1 possuem propagação anti-horária, seguindo o padrão de propagação das componentes semi-diurnas. Os autores sugerem a partir dos resultados que o harmônico K1 possui dois pontos anfidrômicos no Atlântico Sul, um com propagação horária e outro com propagação anti-horária. De modo geral as correntes superficiais de maré são influenciadas pelos ventos superficiais onde o período inercial desenvolve um papel importante sobre as componentes semidiurnas.

Harari e Camargo (2003) estudaram a propagação de maré na região costeira na região de Santos (SP). Os autores implantaram o modelo POM, com grade de resolução horizontal aproximada de 1 km, com coordenada vertical sigma de 11 níveis. A batimetria utilizada foi obtida através da digitalização das cartas náuticas fornecidas pela Marinha do Brasil. Para forçar o modelo foram utilizados os nove principais harmônicos de maré especificados pelo modelo de Harari e Camargo (1994).

Para a plataforma foi utilizado um modelo espectral linear tri-dimensional, baseado na solução de Galerkin para a dependência vertical das correntes. Neste modelo as condições de contorno aberto são fornecidas por estações de monitoramento em mar profundo e interpoladas para a grade de interesse, sendo consideradas as componentes Q1, P1, K1, N2, M2, S2, K2 e M3 (correspondendo a mais que 90% da energia). Para evitar os efeitos baroclínicos no modelo costeiro, todos os pontos foram forçados com salinidade constante e com temperatura com um decaimento exponencial com a profundidade. Os resultados foram comparados com os registros

de elevação de estações em Torre Grande, Porto de Santos, o que mostrou a boa correlação entre os resultados e os dados medidos. A partir dos resultados do modelo foram feitos mapas de co-fase, co-amplitudes e de correntes, estes resultados mostraram que a componente mais energética na área de estudo é a M2, seguida pela S2 e O1, sendo que estas possuem as menores amplificações, enquanto a M3 é a componente que mais se amplifica na região de estudo. Os autores evidenciaram que o sentido de propagação das componentes diurnas O1 e K1 ocorre de sul para norte e das componentes semi-diurnas de sudeste para noroeste, com a componente tri-diurna M3 se propagando também de sul para norte.

Os autores sugerem que as ondas de maré são predominantemente progressivas na região profunda (exceto para a componente O1) até a entrada nos canais na costa. A análise das correntes residuais mostrou a presença de três áreas com circulação fechada relacionada a vórtices, na região de das praias de Santos, nas proximidades da Ilha da Moela e do Canal de Bertioga.

Os perfis verticais de correntes de maré apresentaram constantes intensidades e ao longo da vertical. Os resultados mostram que os erros dos resultados do modelo comparados com os dados observados em campo são da ordem de 5 cm (amplitude) e 15 min (fase), contudo os autores enfatizam que somente as correntes mais internas podem ser consideradas como resultados preliminares, deixando como sugestão a melhoria da resolução espacial e a inclusão de efeitos atmosféricos e campos de temperatura e salinidade.

Viégas (2006) investigou o regime de maré na plataforma adjacente ao Espírito Santo desde Cabo Frio (Rio de Janeiro) até as proximidades da desembocadura do Rio Doce. O autor utilizou o modelo DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*). A representação da batimetria foi feita a partir de carta náutica digitalizada e interpolada.

Neste trabalho foram feitos testes para três malhas, com resoluções de 500m, 750m e 1 km, rotacionadas 203° em relação ao norte, sendo escolhida a malha com resolução de 500 m por representar melhor as variações de profundidade. O modelo foi forçado apenas com maré, fornecida como condição de contorno pelo modelo NAO99b (modelo global de elevação da superfície desenvolvido por Matsumoto

(2000), a partir de assimilação de dados do altímetro TOPEX/POSEIDON), com a condição inicial do tipo partida a frio.

Com os resultados foram feitos mapas de co-fase e co-amplitudes para as componentes M2 e S2, mostrando que as amplitudes da S2 crescem em direção as extremidades do domínio, comportamento observado também na M2, mas com menor variação. Mapas de velocidades foram feitos mostrando a intensificação das correntes tanto no extremo norte como no extremo sul da área de estudo, bem como o sentido de giro anti-horário destas correntes. O autor propõe a investigação do parâmetro β no termo não-linear da equação do movimento, o aprimoramento da malha utilizada no DIVAST para melhorar a representação do contorno e a realização de medidas de velocidade ao longo da plataforma como subsídio a confirmação e o aprimoramento dos resultados do modelo.

A investigação da maré barotrópica ao largo da costa do Espírito Santo foi realizada por Lemos (2006), que implantou o POM, com uma grade curvilinear, de espaçamento horizontal irregular, variando entre 4 588,74m a 13.890,32m na direção x e 7.210,73m a 7.470,90m na direção y, e 21 níveis sigma na vertical para a região oceânica adjacente ao Espírito Santo. A representação da batimetria foi feita a partir do banco de dados do ETOPO 5, com 5' de resolução. Os dados de condições de contorno aberto foram fornecidos pelo modelo FES95.2, utilizando os harmônicos M2, S2, N2, K2, K1, O1 e Q1, calculados a partir do método de análise harmônica de Fourier.

A partir dos resultados foram feitos mapas de amplitudes e fases e de elipses de maré, evidenciando as interações das feições costeiras e da complexa batimetria da região de estudo com a maré barotrópica com os fluxos característicos em certas regiões da área de estudo, como a influência do Cabo de São Tomé e do Banco de Abrolhos sobre a plataforma continental capixaba, e sobre a propagação das velocidades de maré barotrópicas associadas a cânions e montes submarinos na região entre o Banco de Abrolhos e a Cordilheira Vitória-Trindade. O autor deixa como sugestão a inclusão de efeitos baroclínicos e de forçantes do vento e correntes superficiais, além da utilização de batimetrias mais refinadas para melhor representação da hidrodinâmica na costa do Espírito Santo.

Rodrigues e Lorenzetti (2001) investigaram os efeitos da topografia, da linha de costa sobre a ressurgência costeira na costa sudeste do Brasil. Neste trabalho os autores utilizaram um modelo de duas camadas para simular os efeitos de vento sobre a geração de correntes marinhas e como se comportavam em diferentes situações, como geometria suavizada, linha de costa suavizada e fundo plano.

Os resultados obtidos foram apresentados em forma de mapas de velocidades integradas ao longo de cinco dias, em que nota-se a tendência de correntes guiadas para sul para todos os casos analisados.

As irregularidades encontradas na linha de costa mostraram-se importantes para a localização de centros de ressurgência, como próximo a Cabo Frio, além disso, este trabalho mostrou que as irregularidades da costa são dominantes sobre a topografia.

Nogueira (2010) investigou o clima de ondas entre as estações para região próxima ao porto de Ubu – ES para o ano de 2008. Implantou-se o sistema de modelos numéricos WW3-SWAN para levar as condições de contorno globais a grade de maior resolução – Ubu. Para o contorno foram utilizados campos de vento e gelo do NCEP para o modelo WW3 e para o SWAN foram fornecidos via aninhamento.

Os resultados encontrados mostram que o padrão de ondas foi influenciado principalmente pelo evento climático La Niña, principalmente para os meses de verão em que a direção predominante era de sudeste. As demais estações aproximaram-se do relatado em literatura.

5

ÁREA DE ESTUDO

O Espírito Santo está situado na porção oriental da região sudeste do estado do Brasil, está localizado ao leste do Oceano Atlântico Sul; possui uma área de 46.184,1 Km². O litoral do Espírito Santo compreende cerca de 411 km, correspondendo a 5.6% aproximadamente dos 7.376 Km do litoral brasileiro. De forma geral, o litoral do Espírito Santo apresenta-se bastante retilíneo, com exceção da Baía de Vitória e Guarapari (BARROS, 2002). A área de estudo estende-se da fronteira do Rio de Janeiro, com limite norte a região acima do rio Piraquê-Açú, como mostrado na Figura 3, abaixo:

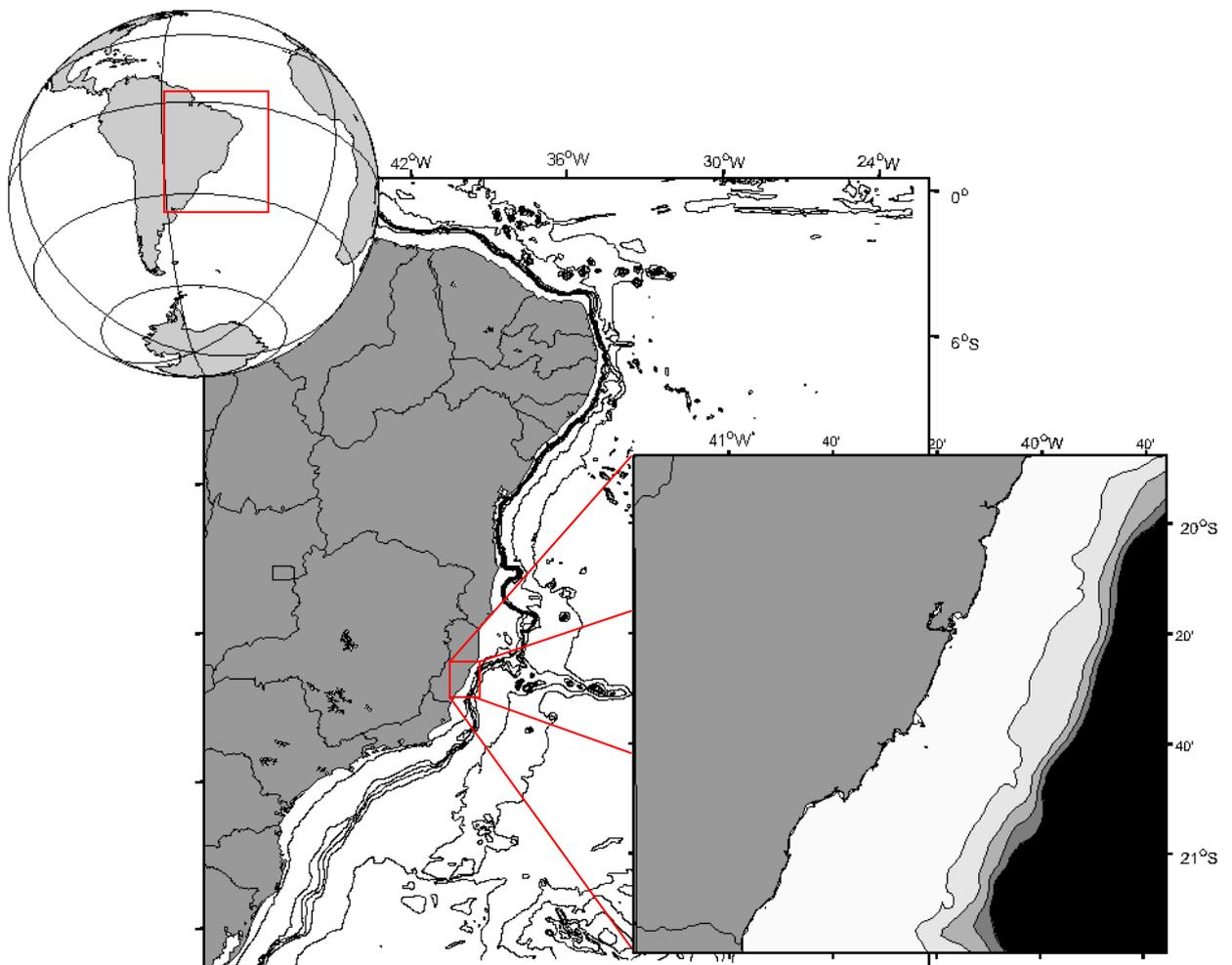


Figura 3 – Região do estado do Espírito Santo e área oceânica adjacente.

5.1 REGIME DE VENTOS

A Região Sudeste do Brasil, onde se localiza o Espírito Santo é caracterizada como uma região de transição entre as latitudes baixas caracterizado por ser uma região de transição entre os climas quentes em latitudes baixas e os climas temperados das latitudes médias (NIMER, 1989). Na parte litorânea é predominantemente controlada pela massa de ar tropical marítima [mT] (Massa de Ar Tropical Atlântica), constituída pelas massas de ar originadas do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (NUNES, 2007).

A região ao norte do Cabo de São Tomé (22°S) possui o clima controlado principalmente pela ação dos ventos alísios (os quais sopram de leste e nordeste) em direção a costa ao longo de praticamente todo ano. Os meses de maio a outubro geralmente apresentam frentes frias provenientes da região sul do continente americano que modificam as velocidades e direções dos ventos (que geralmente se tornam ventos provenientes do quadrante sudeste/sudoeste), sendo que a região ao sul do Cabo de São Tomé encontra-se sobre forte influência dos ciclones extratropicais (Figura 4) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (AQUINO e SETZER, 2005).

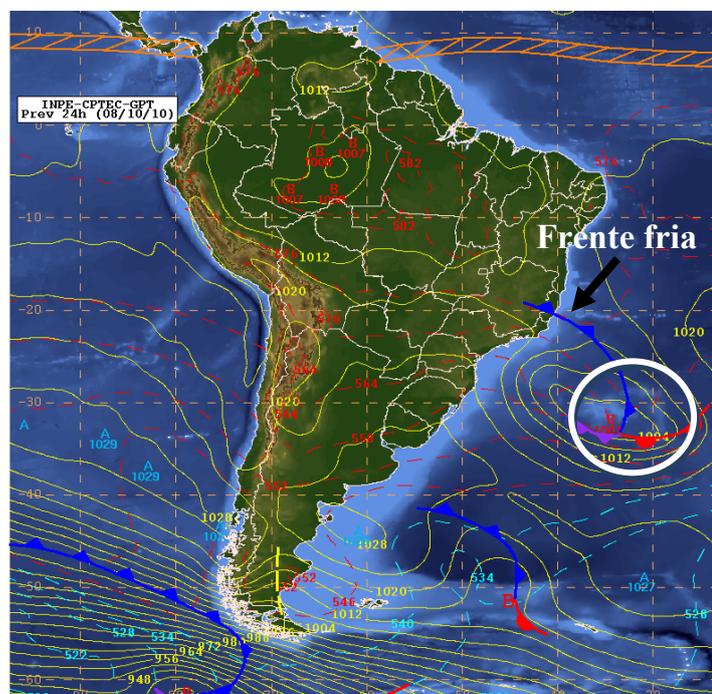


Figura 4 – Condições da superfície para o continente sul-americano previstas para o dia 08 de outubro de 2010, em destaque a presença de um ciclone extratropical.
Fonte: Adaptado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

5.2 REGIME DE MARÉ

Segundo Harari e Mesquita (1998) o regime de maré no Espírito Santo é do tipo semi-diurno, prevalecendo à influência do ponto anfidrômico do Atlântico Sul (giro anti-horário), em que predomina a componente lunar semi-diurna (M2), com período de 12,4h e amplitude aproximada de 42 cm na região de estudo. A segunda componente mais importante é a S2, com aproximadamente 23 cm na maior parte do Espírito Santo e fase aproximada de 190° (GMT).

A configuração da plataforma faz com que o norte e o sul do Espírito Santo sofram ampliações de maré devido, principalmente a presença do Banco de Abrolhos na região norte e a aumento da extensão da plataforma continental.

6

METODOLOGIA

6.1 O MOHID

O modelo numérico MOHID é utilizado neste trabalho. Este modelo se constitui de um sistema computacional de modelagem integrada, com a capacidade de simular tanto processos físicos quanto bioquímicos, como a dispersão de petróleo, correntes marinhas, emissões de efluentes entre outros. O início de seu desenvolvimento data de 1985, sendo desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico de Portugal e HIDROMOD Ltda.

O MOHID vem sendo utilizado em diversos trabalhos em áreas costeiras e estuarinas, principalmente ao largo da costa Ibérica, da região atlântica e alguns estuários europeus (como na Holanda e Irlanda).

É programado em ANSI FORTRAN95 recorrendo à programação orientada por objetos, ferramenta que possibilita o uso de vários modelos encaixados em simultâneo, sendo as condições de contorno fornecidas do modelo geral aos sub-modelos. Esta filosofia permite estudar com detalhe áreas de pequenas dimensões com uma malha muito fina (MOHID, 2011).

O sistema MOHID é constituído por mais de 40 módulos capazes de simular a hidrodinâmica, os fenômenos de dispersão (abordagens lagrangiana e euleriana), a qualidade da água e o transporte de sedimentos (coesivos e não-coesivos), além de um módulo de sistema de informações geográficas que permite a manipulação dos dados básicos para a simulação. Cada informação é gerenciada por um módulo diferente, mas o conjunto é gerenciado por um executável único, tendo várias ferramentas gráficas para o gerenciamento das informações tanto para alimentar o modelo quanto para a execução e visualização de resultados (MOHID, 2011).

O módulo hidrodinâmico do MOHID foi utilizado para a reconstituição da hidrodinâmica para o ano de 2008. Este módulo calcula as equações primitivas do movimento em três dimensões (Equações 2, 3 e 4), assumindo as aproximações de

Boussinesq, de Reynolds e do equilíbrio hidrostático (sendo todas as equações derivadas levando em conta estas aproximações).

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad Eq. (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad Eq. (3)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \rho_r \vec{g} - \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad Eq. (4)$$

em que t , representa o tempo; u, v, w as componentes da velocidade; f o parâmetro de Coriolis, p a pressão, ρ_r a densidade da água; \vec{g} a aceleração da gravidade e, A_H e A_V - viscosidade cinemática turbulenta na horizontal e vertical respectivamente.

Contudo para o presente estudo são utilizadas as equações em modo 2D integradas na vertical. Assim, a velocidade é calculada a partir da continuidade (Eq. 5) na forma incompressível (equação do balanço de massa):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad Eq. (5)$$

Integrando do fundo até uma profundidade arbitrária z , a velocidade w pode ser calculada como:

$$w(z) = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^z u dx + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^z v dy \quad Eq. (6)$$

A equação para a superfície livre é obtida integrando a equação da continuidade sobre toda a coluna d'água (entre a elevação de superfície e o fundo):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz \quad Eq. (7)$$

A aproximação hidrostática é assumida como:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad Eq. (8)$$

Em que u é a velocidade na direção x , v a velocidade na direção y , g a aceleração da gravidade, ρ a massa específica e η a elevação da superfície.

A discretização espacial do modelo pode ser tanto do tipo sigma, cartesiana, híbrido entre sigma e cartesiana e lagrangiana. Neste trabalho é escolhida a coordenada vertical sigma (σ) devido a sua facilidade em capturar a superfície livre. A forma da coordenada sigma é mostrada na Eq. 9.

$$\sigma = \frac{z - \eta}{h + \eta} \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que é substituída a coordenada vertical z pela coordenada σ , sendo que η é a elevação da superfície e h a profundidade.

A discretização numérica dos módulos baseados na formulação euleriana são feitos a partir do método dos volumes finitos, enquanto a discretização temporal é feita a partir do algoritmo introduzido por Peaceman e Racford em (1955), o método ADI (*Alternate Direction Implicit*). Este algoritmo calcula alternadamente uma componente da velocidade horizontal implicitamente, enquanto as outras são calculadas explicitamente.

6.2 BATIMETRIA

São utilizadas as bases de dados de batimetria do ETOPO/NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, EUA – disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>>), com resolução espacial de 1 minuto, do GEBCO/BODC (*British Oceanographic Data Centre*, Inglaterra – disponível em: <<http://www.gebco.net/>>), com resolução espacial de 30 segundos e um conjunto de cartas náuticas fornecidas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), digitalizadas e interpoladas, correspondentes as cartas 1400, 1402 e 1403. Na Figura 5 é mostrada a batimetria, extraída e interpolada das cartas náuticas, para a área de estudo até a isóbata de 200 m, o que representa a profundidade aproximada onde está localizada a quebra de plataforma.

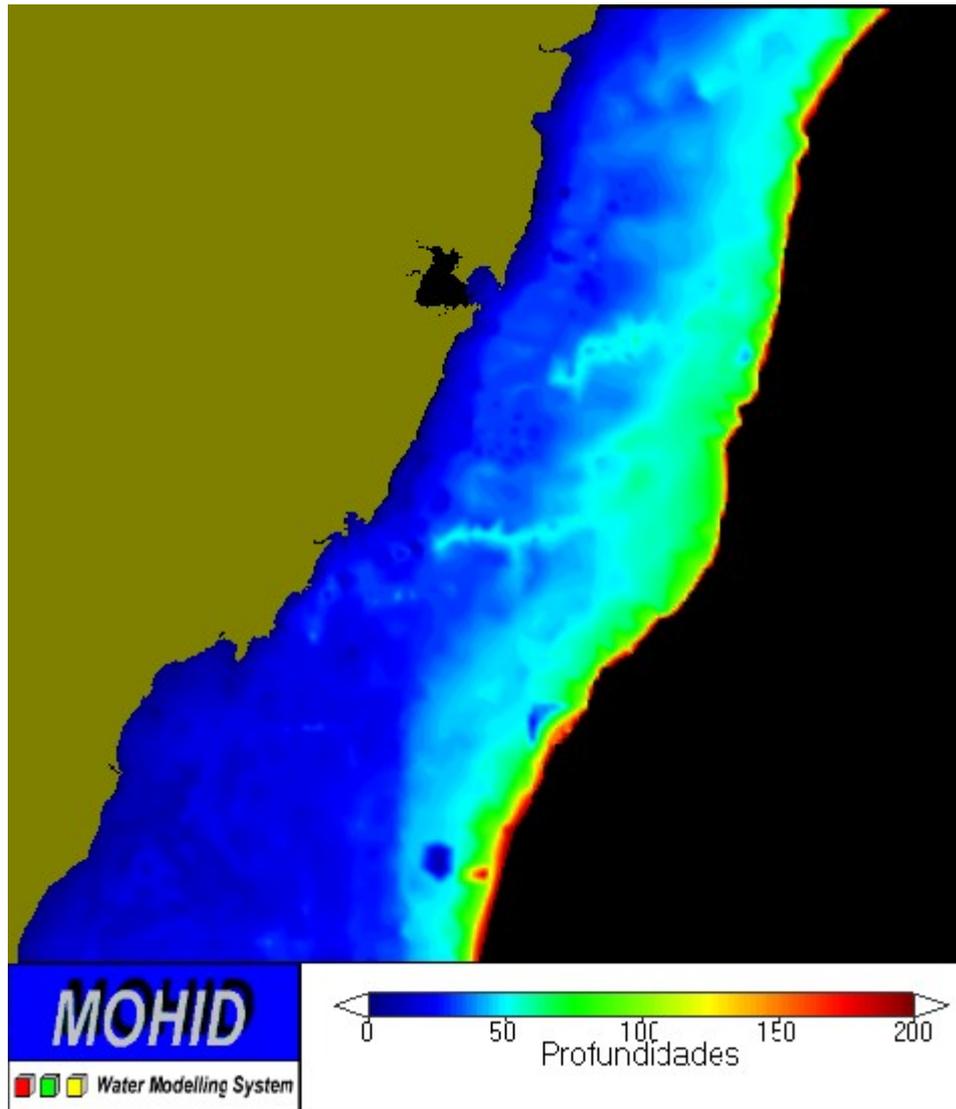


Figura 5 – Batimetria da área de estudo mostrada até a isóbata de 200 m, correspondente a profundidade aproximada da quebra de plataforma.

6.3 GRADE COMPUTACIONAL

Toda a geração de grades e modelos digitais de terreno foi feita com o MOHID GIS; este módulo do MOHID permite a criação de malhas computacionais e a interpolação da batimetria para a malha de interesse (modelo digital de terreno). A grade computacional é do tipo regular, com espaçamento constante na direção x e y. São criadas quatro grades para levar as condições de contorno globais à grade de maior resolução, recorrendo-se a técnica de aninhamento, em que cada grade aninhada tem resolução de 1/5 da grade anterior a partir do segundo nível, que é a máxima resolução adotada para o aninhamento, segundo o manual do MOHID. A resolução entre o primeiro e o segundo nível é a mesma, que é uma metodologia usada no MOHID em que é passado apenas maré ao primeiro nível e a partir dos

demais níveis são implantados os demais efeitos como vento, campos de sal e temperatura etc. Foram criadas quatro grades para que a resolução sobre a plataforma seja aproximadamente 500 m, conseguindo representar assim melhor as variações de morfologia da plataforma da área de estudo.

As grades criadas são a L1, L2, L3 e L4, as especificações estão na Tabela 1, abaixo, sendo que a L1 corresponde ao primeiro nível e L4 ao último.

Tabela 1 – Especificações das grades criadas para as simulações de maré.

	L1	L2	L3	L4
Espaçamento	0.1°	0.1°	0.02°	0.004°
Pontos de grade (i, j)	45x69	34x60	76x90	348x430
Origem (x, y)	-41.17, -21.96	-41.15, -21.56	-40.98, -21.36	-40.96, -21.28

A delimitação da área continental é realizada com linha de costa digitalizada a partir do Google Earth® e do banco de dados 'coastline' do NOAA (disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/>>).

6.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

6.4.1 Maré

Os harmônicos de maré passados como condições de contorno são calculados a partir do modelo TPXO_AO (EGBERT & EROFEEVA, 2002), sendo este a versão correspondente ao modelo regional para o oceano Atlântico, com resolução espacial de 1/12°. O trabalho de Jesus & Chacaltana (2011) mostrou que este modelo é o que fornece o menor erro para os harmônicos calculados sobre a plataforma do Espírito Santo.

São calculados para solução do valor de contorno os onze principais harmônicos de maré (M2, S2, K1, K2, N2, O1, Q1, P1, M4, MN4 e MS4).

6.4.2 Vento

Os dados de vento são adquiridos da base de dados do NCEP/NCAR, com resolução espacial de 1°x1,25° e interpolados no espaço-tempo para cada ponto de grade, para cada grade criada a exceção da L1. O método de interpolação utilizado

foi o de triangulação. Para a interpolação dos dados foi desenvolvido um programa de interpolação.

6.5 CONDIÇÕES INICIAIS

A condição inicial usada foi a condição de partida a frio, onde a elevação do nível d'água é conhecida e o campo de velocidades é considerado nulo. Sendo o modelo executado para o ano de 2008, com resultados horários para os campos de velocidade e elevação da superfície.

6.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O desempenho do modelo é medido a partir do método de Raiz Média Quadrática Desajustada (RMS Misfit, *Root Mean Square Misfit*), sendo definida como:

$$RMS_M = \left[\frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{2} (A_M^2 - 2A_M A_{Ob} \cos(\theta_M - \theta_{Ob}) + A_{Ob}^2) \right]^{1/2} \quad Eq. (10)$$

Em que N representa o número de estações de medição, A e θ as amplitudes e fases, com os subscritos M e Ob para as constantes harmônicas fornecidas pelo modelo e pela estação de medição, respectivamente. As constantes harmônicas usadas para a avaliação estatística do modelo são fornecidas pela FEMAR (Fundação de Estudos do Mar) para portos e estações de medição localizados na costa da região de estudo, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações de medição utilizadas para comparação com os resultados do modelo

Estação	Longitude (W)	Latitude (S)
Barra do Itapemirim	40° 48,45'	21° 0,004'
Guarapari	40° 29,5'	20° 40,0'
Meaípe	40° 32,2'	20° 44,7'
Piraquê-Açú	40° 09,0'	19° 57,3'
Ponta de Ubu	40° 34,1'	20° 47,1'
Tubarão	40° 14,5'	20° 17,1'

Além deste é realizado cálculo de erro quadrático médio (RMS, Eq. 11) tanto para a fase quanto para a amplitude para o mesmo conjunto de dados usados para o cálculo do RMS_M .

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_N (P_M - P_O)^2 \right]^{1/2} \quad Eq. (11)$$

Em que N é o número de estações de observação e P_M e P_O são os variáveis que se deseja calcular o erro, sendo a primeira a medida e a segunda a observada, que neste caso são a fase e amplitude.

7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são divididos em duas classes, aqueles referentes à validação e aqueles relativos à hidrodinâmica.

7.1 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM

O erro quadrático médio (RMS), feito para o conjunto de dados obtidos para as estações de medição fornecidas pela FEMAR e os resultados gerados pelo modelo, mostra a capacidade do modelo em capturar o comportamento dos harmônicos analisados, uma vez que o RMS é menor que 2 cm para a amplitude (Figura 6.a), entretanto o erro para a fase (Figura 6.b) foi de 25° e 45°, com exceção da componente K1 em que o erro foi aproximadamente 10°.

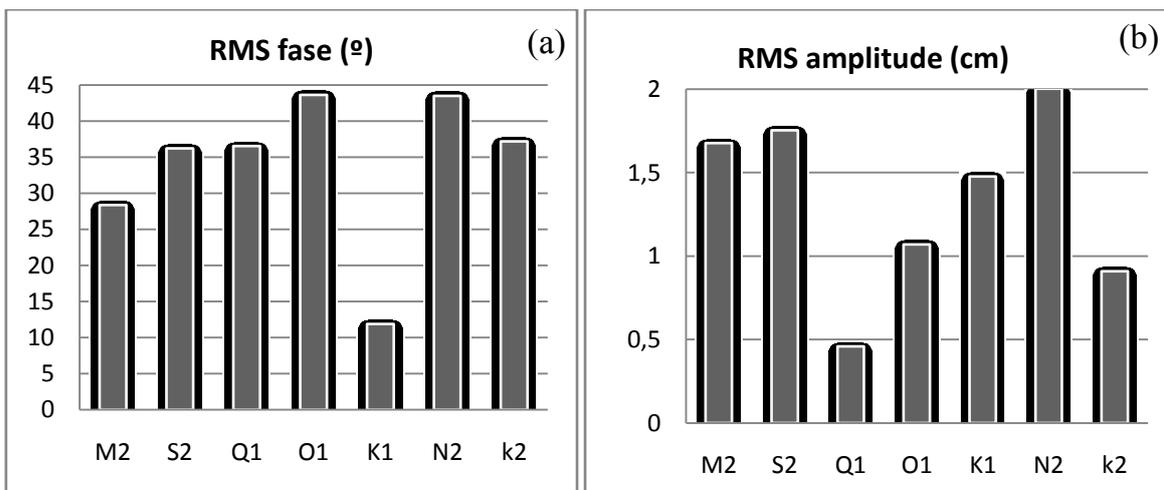


Figura 6 – RMS calculado para os sete principais harmônicos de maré – (a) fase; (b) amplitude.

O erro médio quadrático desajustado é mostrado na Figura 7. Os maiores erros estão relacionados aos harmônicos de maior amplitude (M2 e S2), com valores próximos a 16 cm para a componente M2 e de 9 cm para a S2, que estão próximos daqueles relatados por outros autores, como no trabalho de Sacareno e colaboradores (2010) e os resultados apresentados por Matsumoto e colaboradores (2000) numa compilação de análises harmônicas para estações de medição ao redor do mundo.

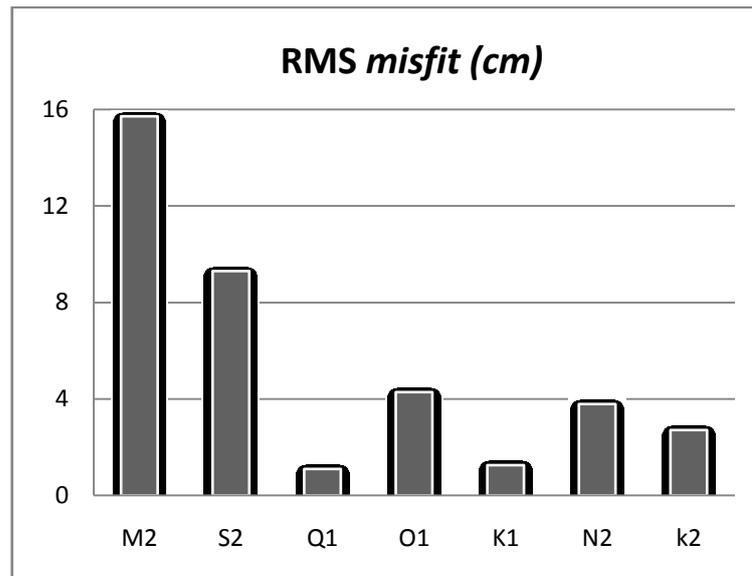


Figura 7 – RMS *misfit* calculado para os sete principais harmônicos de maré entre os resultados de modelagem e aqueles fornecidos pela FEMAR.

7.2 HIDRODINÂMICA

Os resultados relativos à hidrodinâmica estão subdivididos em dois tópicos, os referentes à hidrodinâmica forçada por maré astronômica e aquela forçada por maré astronômica e vento.

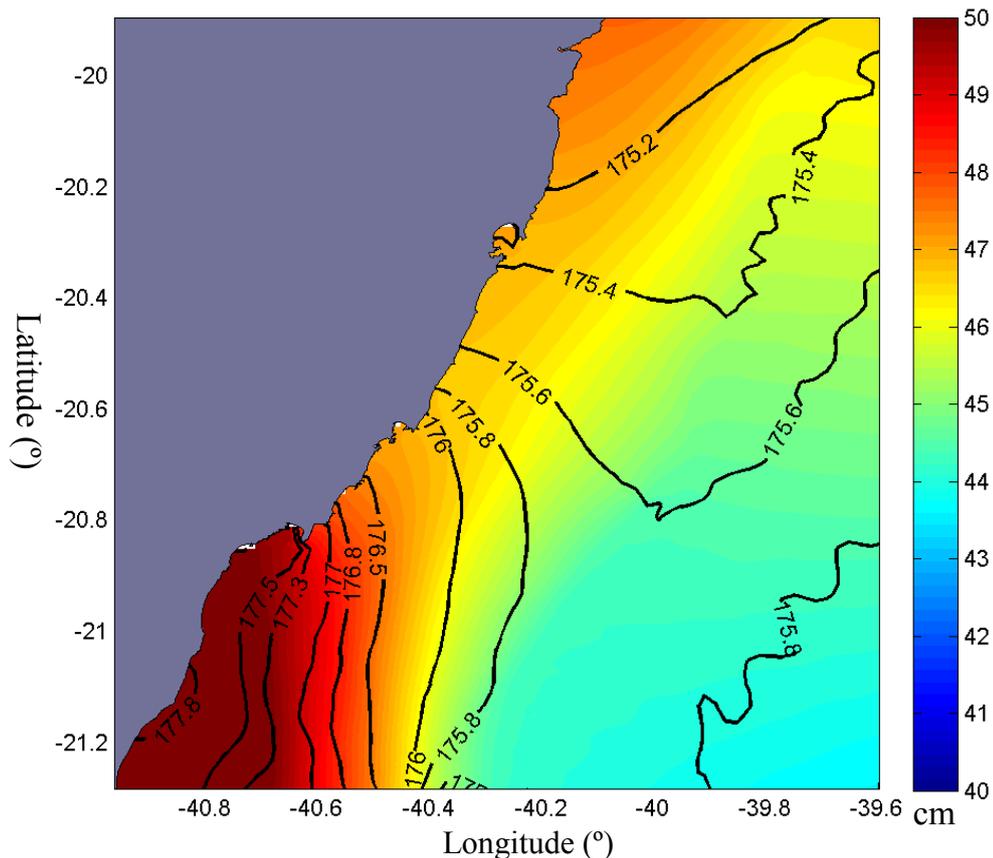
7.2.1 Maré astronômica

A maré astronômica no domínio de estudo é representada por mapas de co-fase e co-amplitude para os dois principais harmônicos de maré (M2 e S2), já que estes representam os harmônicos de maior amplitude para a área de estudo.

Na Figura 8 observa-se o mapa de co-fase e co-amplitude para o harmônico M2, onde nota-se uma amplificação da amplitude tanto na parte norte do domínio quanto ao sul, o que pode estar ligado ao padrão de giro dos principais pontos anfidrômicos do Atlântico Sul (o ponto localizado no Rio Grande do Sul – giro horário; e aquele localizado na região centro sul do Atlântico Sul – giro anti-horário). Uma vez que ondas de maré (M2 e S2) relativas a estes giros encontram-se na região sudeste, assim como relatado por Mesquita (1997).

Além do fenômeno relatado acima, a intensificação das correntes pode também estar relacionado ao padrão de morfologia, tanto de linha de costa quanto de batimetria.

O comportamento observado para a componente M2 foi semelhante aquele encontrado por Viégas (2006), com diferença de fase de aproximadamente 3° e 2 cm de amplitude para o domínio da área de estudo. Estes resultados também se assemelham aos encontrados por Lemos (2006), com diferença de amplitude de 2,4 cm aproximadamente.



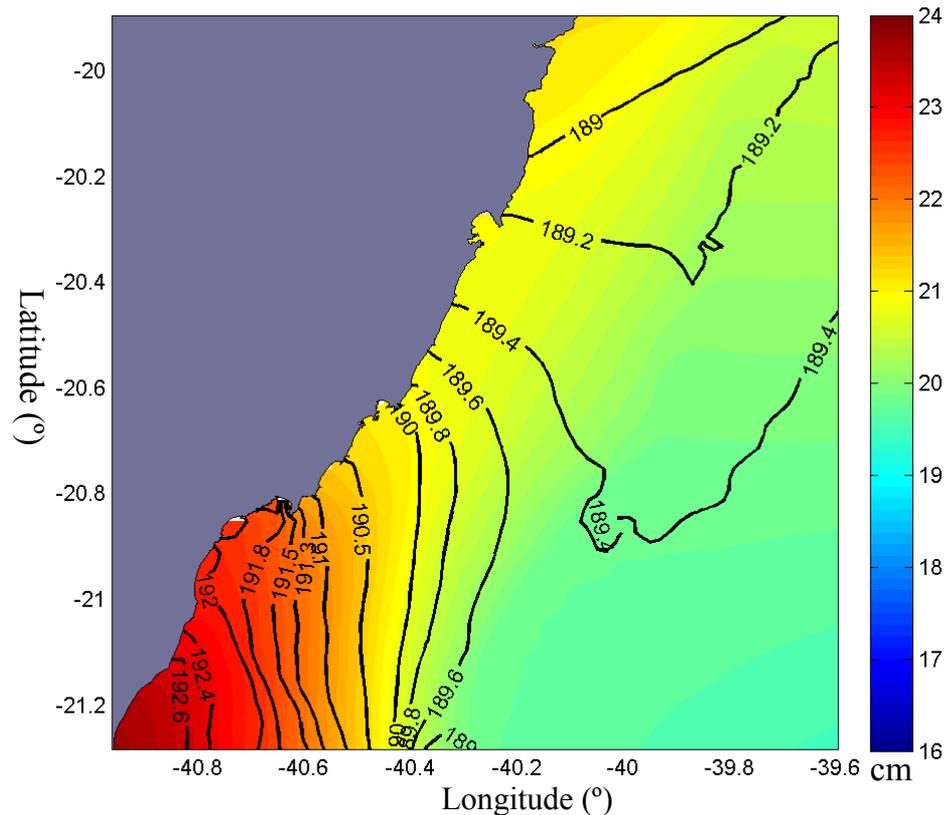


Figura 9 - Co-amplitude, contorno preenchido, em centímetros e co-fases, contorno, em ° GMT, para o harmônico S2.

7.2.2 Maré astronômica e vento

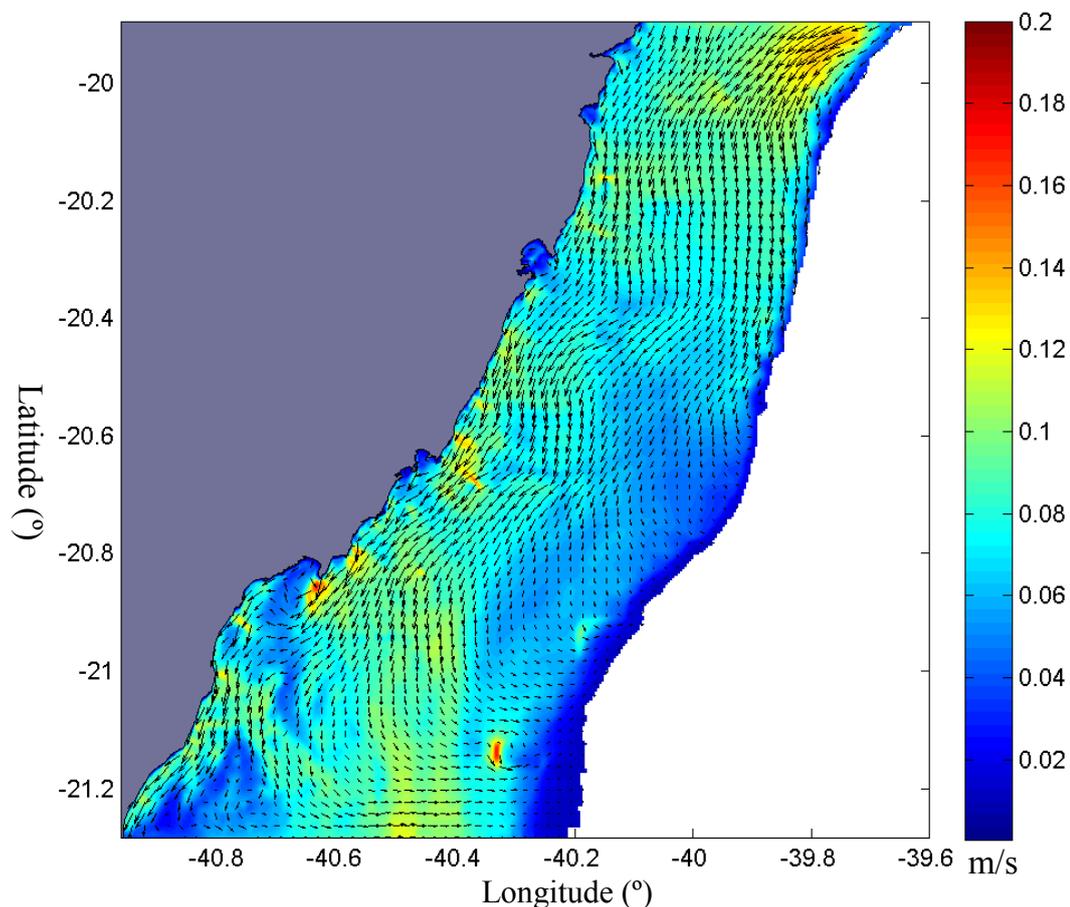
Para a análise conjunta entre as forçantes de vento e astronômicas são feitos mapas de correntes médias para as estações, em que são mostrados apenas os resultados na qual a profundidade era menor que 600 m, uma vez que o objetivo é analisar as correntes geradas em região de plataforma e que os efeitos de vento foram mais evidentes em profundidades menores que 600m.

Para a análise dos efeitos de vento e maré astronômica optou-se por fazer as médias das correntes calculadas pelo modelo, subdividindo os resultados em estações. As estações foram definidas como: verão – janeiro, fevereiro e março; outono – abril, maio e junho; inverno – julho, agosto e setembro e; primavera – outubro, novembro e dezembro. As velocidades médias foram calculadas somando-se as componentes das velocidades calculadas pelo modelo e dividindo pelo número de horas correspondente a estação analisada para cada ponto de grade.

- VERÃO 2008

No mapa de correntes para o verão de 2008 (Figura 10) observa-se a predominância das correntes dirigidas para sul, que estão ligadas diretamente aos ventos de nordeste e leste, predominantes na área de estudo para esta estação, assim como observado no trabalho de Nogueira (2010).

O padrão de distribuição de correntes dirigidas para o sul é semelhante ao encontrado por Rodrigues e Lorenzetti (2001) para a região entre o Rio Doce (ES) e a plataforma do Rio de Janeiro (próximo a Cabo Frio), para as correntes superficiais gerados por vento para o verão.



Figuras 10 – Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o verão/2008, os resultados estão plotados até a isóbata de 600 m.

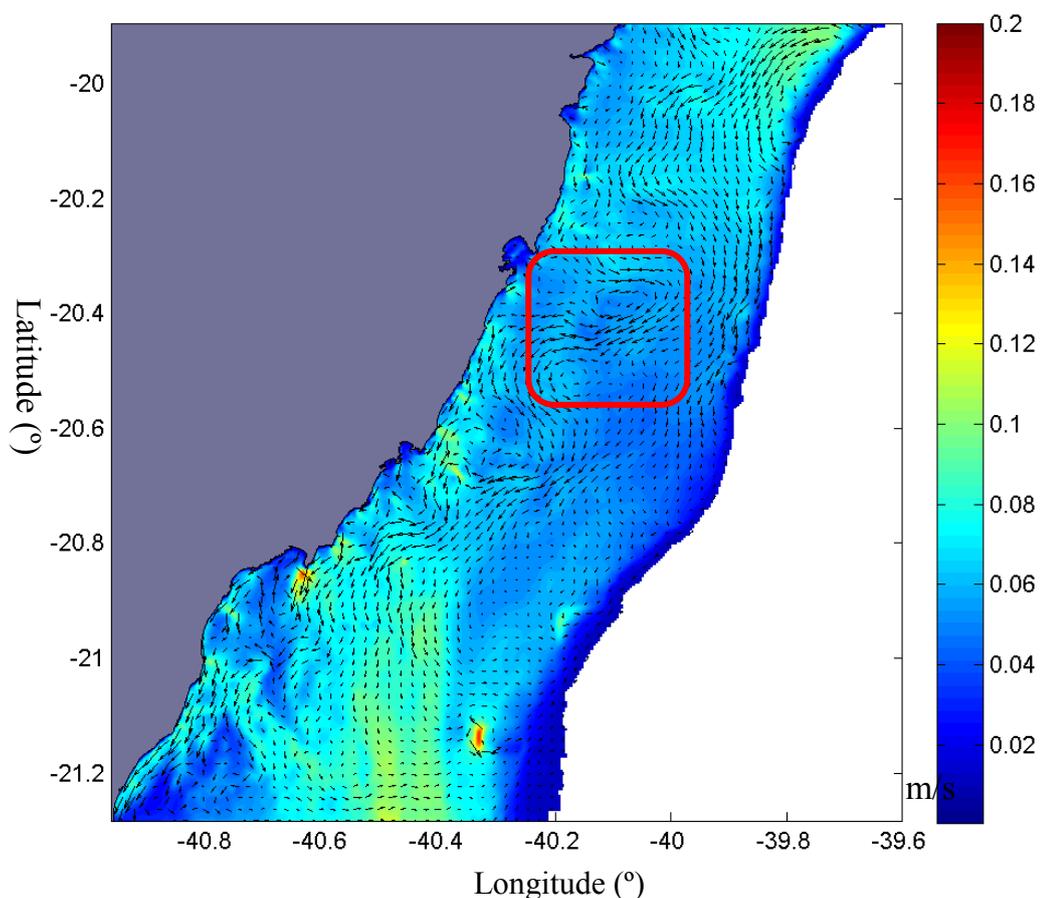
As velocidades no verão atingiram máximas de aproximadamente 0,16 m/s, associadas a locais de baixa profundidade, como na região sul do domínio, sendo este em conjunto com a morfologia da linha de costa um importante fator na distribuição das correntes, em que há tendência de aumento das velocidades quando se aproxima da costa. Além disso, a parte sul da área de estudo apresenta

plataforma mais larga fazendo com que haja efeitos de ressonância e amplificação de maré, gerando correntes perpendiculares a costa mais intensas, o que se repete nas demais estações.

- OUTONO

O outono foi a estação que apresentou distribuição de correntes (Figura 11) mais distinta entre as estações analisadas.

A distribuição das correntes para esta estação, com correntes menos intensas e o aparecimento de sistemas de recirculações, principalmente na parte central da região de estudo, que está provavelmente ligado à propagação de sistemas frontais característicos desta estação, com ventos de sudeste/sul, assim como visto no trabalho de Palma e colaboradores (2004) que evidenciaram que principalmente o outono e a primavera são as estações em há mais ocorrências de entradas de frentes-frias. As correntes para o outono são de ordem de magnitude em torno de 0.12 m/s



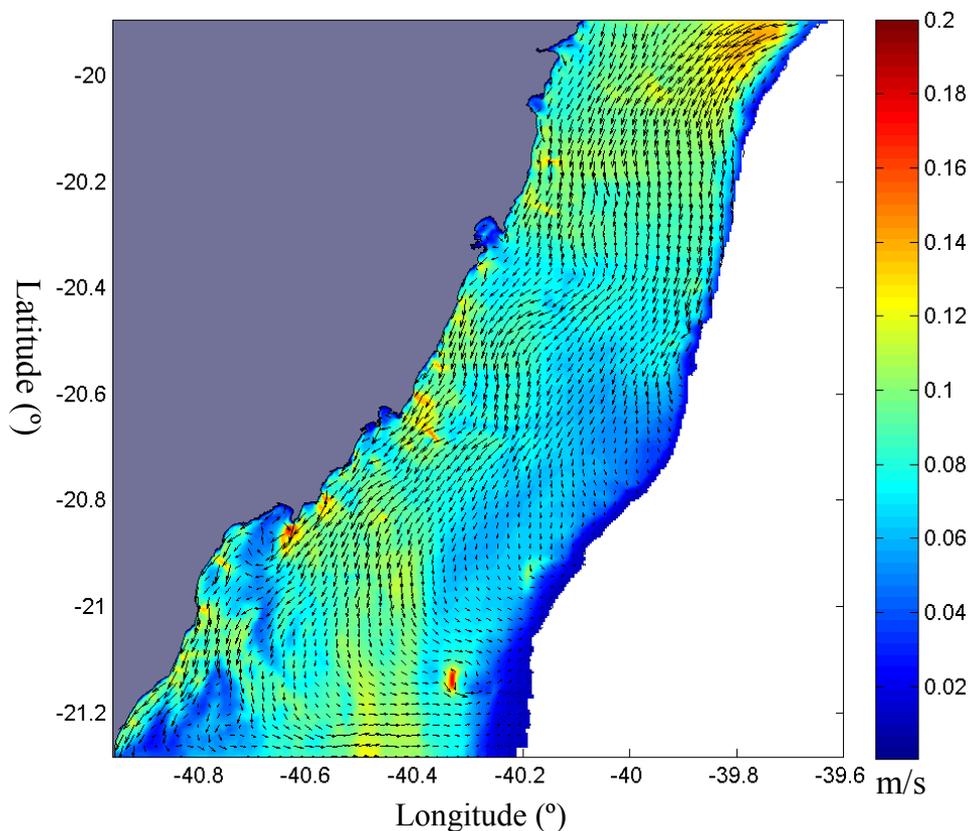
Figuras 11 - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o outono/2008, os resultados estão mostrados até a isóbata de 600 m. Em destaque sistemas de recirculação.

- INVERNO

A distribuição de correntes do inverno (Figura 12) segue a tendência de intensificação dos ventos de nordeste/leste, e provável menor incidência de frentes frias.

As correntes apresentaram comportamento semelhante ao observado no verão, o que confirma a tendência de aumento das intensidades dos ventos iniciando-se no inverno até o verão, que pode estar relacionado ao evento forte de La Niña que ocorreu entre os anos de 2007 e 2008 (WMO, 2008).

Para o inverno as velocidades alcançaram valores em torno de 0,16 m/s, com máximos no extremo norte do domínio e em regiões de baixa profundidade.



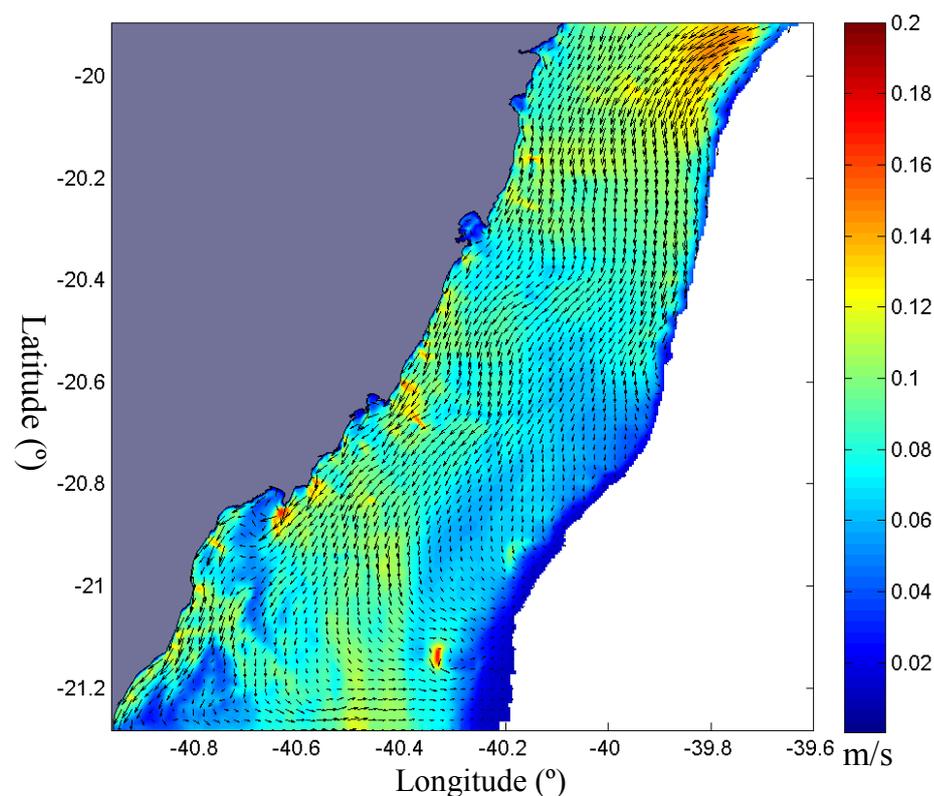
Figuras 12 - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o inverno/2008, os resultados estão plotados até a isóbata de 600 m.

- PRIMAVERA

A primavera foi a estação em que as correntes (Figura 13) tiveram maior magnitude, devido a intensificação dos ventos de nordeste/leste, este mesmo comportamento foi observado no trabalho de Palma e colaboradores (2004), que mostraram que as velocidades de correntes ao longo da plataforma entre 20° e 25° possuem uma intensificação causada pelo aumento da intensidade dos ventos de nordeste.

Este padrão também é observado a partir da média para a estação da primavera dos resultados fornecidos pelo NCEP (Figura 14), em que são observadas as maiores intensidades dentre as estações analisadas, com intensidades de vento chegando a 4.5 m/s na região sul do domínio.

As magnitudes alcançaram valores próximos a 0,18 m/s, acompanhando a tendência de aumento da intensidade dos ventos de nordeste.



Figuras 13 - Correntes geradas por maré e vento para a região de estudo para o inverno/2008, os resultados estão plotados até a isóbata de 600 m.

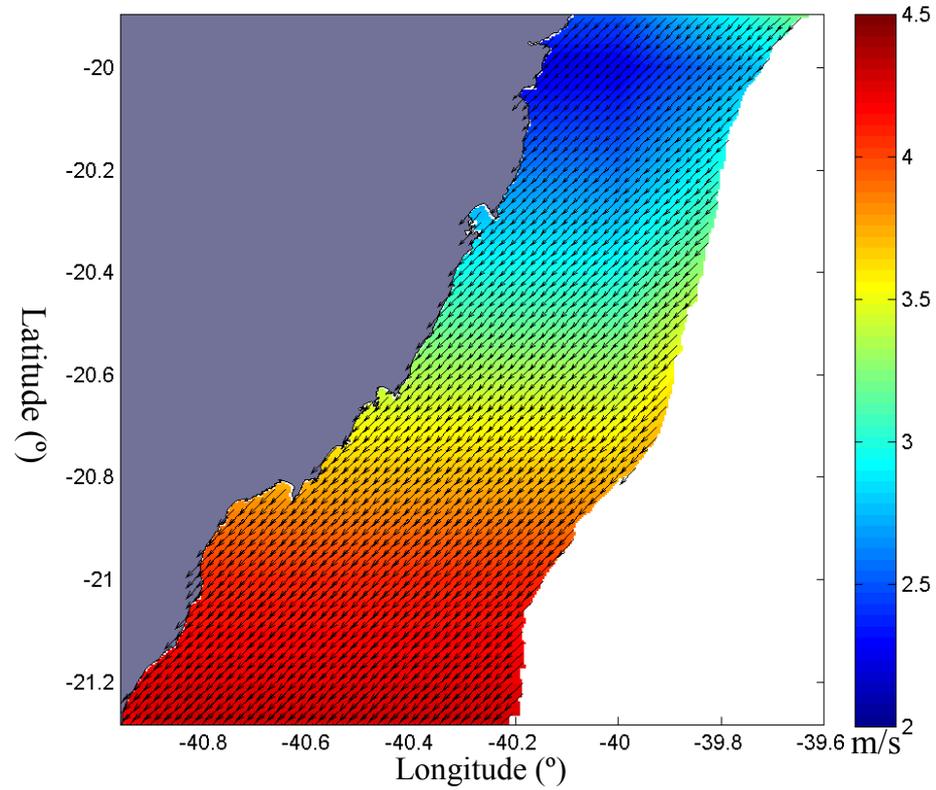


Figura 14 – Vento calculado a 10 m da superfície, média calculada para a primavera; resultados fornecidos pelo NCEP.

8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O modelo numérico usado foi capaz de reproduzir satisfatoriamente o padrão de circulação dos principais harmônicos de maré, com pequenos erros induzidos, provavelmente, pela definição da condição de contorno, sendo estes bem próximos aqueles relatados em literatura.

O padrão de escoamento induzido pela forçante astronômica e meteorológica é influenciado principalmente pelos ventos de nordeste/leste característicos da região de estudo, com correntes dirigidas principalmente para sul, sendo que a estação que apresentou maior variabilidade foi o outono devido, principalmente, a entrada de sistemas frontais, característicos desta estação.

As correntes de maré na região sul da área de estudo desenvolvem um papel importante na hidrodinâmica, sendo responsável pela mudança de direção do escoamento.

A representação do vento não foi suficientemente boa, uma vez que os dados utilizados apresentam resolução de $1^\circ \times 1,25^\circ$, não representando satisfatoriamente o padrão de ventos sobre a plataforma continental.

Assim sugere-se a implantação de campos de vento com maior resolução, ou de sistemas de modelos numéricos para simular os ventos em maior nível de resolução e usá-los como condições de contorno, bem como a análise sazonal para uma série longa para determinar a climatologia das correntes na região de estudo.

Além disso, faz-se necessário a implantação dos módulos, primeiro barotrópico 3-D e após baroclínico e a implantação de efeitos de maré meteorológica e de campos de pressão para uma representação mais real da hidrodinâmica.

9

REFERÊNCIAS

- AQUINO, F. E., SETZER, A. W. **O Clima da Amazônia Azul**. In: SECIRM; MEC. (Org.). O Mar no Espaço Geográfico Brasileiro, Coleção O Mar no Espaço Geográfico Brasileiro, Coleção Explorando o Ensino. Brasília: 2005, v. 8, p. 226-230.
- BAO, X., GAO, G., YAN, J. Three Dimensional Simulation of Tide and Tidal Characteristics in the East China Sea. **Oceanologica Acta**. Vol. 24, nº2, 2000.
- BARROS, M. B. **Uma Contribuição para a Elaboração de Planos de Contigência para Derramamentos de Petróleo das Atividades de Exploração OFFSHORE do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.
- BEARDSLEY, R.C., DUDA, T. M., LYNCH, J., F. IRISH, J. D., RAMP, S. R., CHIU, C., TANG, T. Y., YANG, Y., FANG, F. Barotropic Tide in the Northeast South China Sea. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, Vol. 29, 2004.
- EGBERT, G. D., EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. Vol 19, p. 183-204, 2002.
- FANG, G., KWOK, Y., YU, K., ZHU, Y. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand. **Continental Shelf Research**. vol. 19, p. 845 – 869, 1998.
- FLATHER, R.A. **A tidal model of the Northeast Pacific**. Institute of Oceanographic Sciences. Bidston Observatory. Birkenhead, England, 1986.
- GLORIOSO, P. D., FLATHER, R. A. The Patagonian Shelf Tides. **Progress in Oceanography**. Vol. 40, p. 263 – 283, 1997.
- HARARI, J., CAMARGO, R. CACCIARI, P. L. Resultados da Modelagem Numérica em Simulações Tri-dimensionais das Correntes de Maré na Baixada Santista. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 5. Nº 2. p. 71 – 87. 2000.

HARARI, J., CAMARGO, R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. **Revista Brasileira de Oceanografia**. Vol. 46. p. 135 – 156. 1998.

HARARI, J., CAMARGO, R. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24_S 46_W). **Continental Shelf Research**. Vol.23. p. 1597 – 1613. 2003.

HARARI, J., CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. **Boletim Instituto Oceanográfico**. Vol. 42, p. 35 – 54, 1994.

JESUS, L. C., CHACALTANA, J. T. A. Comparação de modelos de maré para a plataforma continental do Espírito Santo. **IX OMAR-SAT**. Arraial do Cabo – RJ, 2011.

LEMOS, A. T. **Modelagem Numérica da Maré Barotrópica na Costa do Espírito Santo**. Monografia (Programa de Graduação em Oceanografia). Universidade Federal do Espírito Santo. 2006.

MATSUMOTO, K., TAKANEZAWA, T., OOE, MASATSUGU. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan. **Journal of Oceanography**. Vol. 56, p. 567-581, 2000.

MESQUITA, A. R. **Marés, circulação e nível do mar na costa sudeste do Brasil**. IO/USP – FUNDESPA, 1997.

MESQUITA, A. R., HARARI, J. On the harmonic constants of tides and tidal currents of the South-eastern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**. Vol. 23. p. 1227 – 1237. 2003.

MOHID. **Sistema de Modelação**. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Secretaria de Planejamento e Coordenação da Presidência da República e IBGE, Rio de Janeiro: 1989, 421 p.

NOGUEIRA, I. C. M. **Caracterização sazonal de ondas na região adjacente ao porto de Ubu, Anchieta – ES, para o ano de 2008.** Monografia. Centro de Ciências Humanas e Naturais, Departamento de Oceanografia e Ecologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2010.

NUNES, A. L. **Determinação das Marés Meteorológicas na Região da Baía do Espírito Santo e sua Influência na Drenagem de Águas Continentais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

PALMA, E. D., MATANO, R. P., PIOLA, A. R. A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. **Journal of Geophysical Research.** Vol. 109. 2004.

PEREIRA, A. F., BELÉM, A.L., BELMIRO, M. C., GEREMIAS, R. Tide-topography interaction along the eastern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research.** p. 1521-1539. São Paulo, 2005.

POND, S., PICKARD, G. L. **Introductory Dynamical Oceanography. 2nd ed.** Oxford: Pergamun Press, 1983. 329 p.

SACARENO, M., D'ONOFRIO, E. E., FIORE, M. E., GRISMEYER, W. H. Tide Model Comparison Over the Southwestern Atlantic Shelf. **Continental Shelf Research.** 2010 Vol 30; p 1865-1875.

THE OPEN UNIVERSITY. **Waves, Tides and Shallow-Water Processes.** Reino Unido, Elsevier, 1999.

VIÉGAS, N.J.F. **Modelagem numérica das marés no litoral do Espírito Santo.** *Dissertação de Mestrado.* Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2006.

WMO - World Meteorological Organization. **El niño/La niña update,** 2008.