



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MARINA PINTO GUERRA DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA BAÍA DO
ESPÍRITO SANTO USANDO O MODELO NUMÉRICO
MOHID-2D**

VITÓRIA
2010



MARINA PINTO GUERRA DE SOUZA

SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO USANDO O MODELO NUMÉRICO MOHID-2D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana

VITÓRIA
2010

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais e familiares, pelo amor e incentivo sempre.

Ao meu orientador, Prof. Julio Tomás Aquije Chacaltana, pelos ensinamentos e dedicação.

Ao Bruno, pelo carinho, sempre do meu lado me ajudando, alegrando e dando forças nos momentos de desespero.

Aos meus colegas do LABESUL, em especial à Vanessa e ao Henery, que me auxiliaram ao longo do trabalho.

À Madalena e ao Luis Fernandes, que disponibilizaram tempo e atenção esclarecendo dúvidas sobre o modelo.

À Raquel, que contribuiu muito na minha formação, me ajudando desde os primeiros passos na Engenharia Ambiental.

Ao Claudinho e ao Lucas, por tornarem a aprendizagem do modelo muito mais divertida.

Aos meus amigos de curso, que fizeram desses 5 anos momentos inesquecíveis.

À ANP e ao Programa PRH-29 pelo apoio financeiro.

SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO USANDO O MODELO NUMÉRICO MOHID-2D

Marina Pinto Guerra de Souza

RESUMO

A utilização da modelagem computacional em estudos envolvendo corpos de água naturais é cada vez mais presente, sendo considerada ferramenta indispensável para definição de estratégias no gerenciamento ambiental. A modelagem lagrangiana da trajetória do óleo vem sendo aplicada para definir a área de influência do derramamento, na qual se baseia todo o diagnóstico ambiental, bem como através simulações de cenários, planejar ações de contenção mais eficazes. No presente estudo é avaliada a dispersão de um derrame hipotético de óleo no canal de acesso ao Porto de Tubarão, na Baía do Espírito Santo. Foram identificadas as regiões impactadas e o tempo que o óleo demorou em chegar à costa. O sistema computacional MOHID é usado para avaliar a hidrodinâmica e a trajetória do óleo. A hidrodinâmica é forçada pela maré e os ventos. A trajetória do óleo é calculada por um modelo lagrangiano e o processo de espalhamento do óleo é calculado segundo o método de Fay. A hidrodinâmica da baía é realizada no modo barotrópico – 2DH. Considerando como única forçante a maré, os resultados das simulações reproduzem os padrões de circulação descritos em trabalhos anteriores. Incluindo o vento, os resultados mostraram novos padrões de circulação. Como relatado na literatura, é verificado que o vento tem a maior influência na direção de deslocamento da pluma de óleo. Para os seis derrames hipotéticos e para os dois tipos de ventos típicos da região, os resultados mostram que o óleo atinge a linha de costa da baía, independentemente do instante do derrame em relação à maré. Para ventos de SE é encontrado que o óleo atinge a linha de costa entre 4 e 12h e para ventos de NE atinge entre 4 e 8h após o derrame.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Derramamento de óleo. Análise da trajetória de partículas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da atuação dos principais processos de intemperismo com relação ao período pós-derrame (óleo cru médio típico em mar com condições moderada). Fonte: ITOPF (2002).....	21
Figura 2: Representação do sistema estuarino do rio Santa Maria da Vitória e localização da Baía do Espírito Santo. A região em verde representa a área de manguezal.	35
Figura 3: Domínio referente ao sistema estuarino com destaque para a região de interesse (Baía do Espírito Santo).	37
Figura 4: Batimetria da Baía do Espírito Santo.....	37
Figura 5: Localização das estações de monitoramento (P1, P2, S1, S2, T1) e das condições	39
Figura 6: Pontos de emissão utilizados no modelo lagrangiano.....	42
Figura 7: Elevação registrada na estação de monitoramento T1 para o mês de maio. Em destaque de amarelo o período adotado na maré de quadratura e em vermelho na maré de sizígia. As setas indicam o início dos cenários utilizados no modelo lagrangiano.	45
Figura 8: Registro do módulo da velocidade na estação P2.....	46
Figura 9: Registro do módulo da velocidade na estação S1.....	46
Figura 10: Campo de escoamento da Baía do Espírito Santo na máxima vazante do período de sizígia. J1 e J2 – jatos associados aos canais; H1, H2 e H3 – regiões estagnadas; V1 e V2- aumento da velocidade.	47
Figura 11: Campo de velocidades com destaque para a formação de vórtices nos canais (V1) e na ponta do píer do Porto de Tubarão (V2).	48
Figura 12: Campo hidrodinâmico com maré de sizígia: A- vento SE; B- vento NE.	49
Figura 13: Campo hidrodinâmico na maré de quadratura sem vento.....	50
Figura 14: Influência do vento no campo hidrodinâmico com maré de quadratura:.....	50
Figura 15: Diferença na disposição da pluma 29h depois do derrame: A- lançamento com maré enchente; B- lançamento com maré vazante. O ponto em destaque representa o local do lançamento.	52

Figura 16:Diferença na disposição da pluma 29h depois do derrame no ponto em destaque. Lançamento com maré vazante: A- maré de quadratura; B- maré de sizígia.	53
Figura 17: Influencia do jato proveniente do canal de acesso ao Porto de Vitória na dispersão das partículas: A- pluma 32h após o derrame, antes da intensificação do jato; B- pluma 38h após o derrame, com a atuação do jato.....	54
Figura 18: Distribuição das partículas 3 dias após o lançamento, para cada um dos pontos de emissão (E1 a E6). Simulação sem vento com lançamento na sizígia, com corrente e no período de sizígia.	55
Figura 19: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E1: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	56
Figura 20: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E2: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	57
Figura 21: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E3: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	57
Figura 22: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E4: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	58
Figura 23: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E5: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	58
Figura 24: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E1: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.	59
Figura 25: Comparação entre os cenários Q3, Q6, Z3 e Z6. As setas indicam o sentido da maré (enchente/vazante) no momento da emissão.....	61
Figura 26: Regiões atingidas pela pluma de óleo de acordo com os resultados das simulações com vento NE e SE.	62

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Formulação para as fases do processo de espalhamento.....	25
QUADRO 2: Coordenadas UTM das estações de monitoramento.	39
QUADRO 3: Cenários utilizados nas simulações do módulo hidrodinâmico.	40
QUADRO 4: Localização dos pontos de emissão em coordenadas UTM.....	41
QUADRO 5: Propriedades do óleo considerado nas simulações (Kuwait).	42
QUADRO 6: Cenários utilizados nas simulações lagrangianas.....	43
QUADRO 7: Cenários para as simulações sem vento.	51
QUADRO 8: Cenários das simulações com vento NE.	55
QUADRO 9: Cenários das simulações com vento SE.	59
QUADRO 10: Resultados obtidos nas simulações com vento NE.	63
QUADRO 11: Resultados obtidos nas simulações com vento SE.....	64

LISTA DE SIGLAS

ADIOS	<i>Automated Data Inquiry for Oil Spills</i>
APA	Área de Proteção Ambiental
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BES	Baía do Espírito Santo
CATS	<i>Current Analysis for Trajectory Simulations</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EUA	Estados Unidos da América
GNOME	<i>General NOAA Oil Modeling Environment</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LABESUL	Laboratório de Simulação de Escoamentos com Superfície Livre da Universidade Federal do Espírito Santo
MLPDA	Modelo Lagrangiano de Partículas com Deslocamento Aleatório
N	Direção norte
NE	Direção nordeste
OILMAP	<i>Oil Spill Model Assessment Package</i>
OSCAR	<i>Oil Spill Contingency and Response</i>
S	Direção sul
SE	Direção sudeste
W	Direção oeste
2D	Bidimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo Geral	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Modelagem Computacional.....	14
3.2. Estudos com Modelos Computacionais.....	17
3.3. Principais processos atuantes em uma mancha de óleo.....	20
3.3.1. Espalhamento	23
4. METODOLOGIA.....	27
4.1. Descrição do Modelo Numérico MOHID	27
4.1.1. Malha Computacional	28
4.1.2. Hidrodinâmica.....	29
4.1.3. Módulo Lagrangiano.....	31
4.1.4. Módulo de Óleo	33
4.2. Implantação do Modelo na Área de Estudo.....	34
4.2.1. Área de Estudo	34
4.2.2. Definição da Malha Computacional	36
4.2.3. Implantação do Módulo Hidrodinâmico	38
4.2.4. Implantação do Modelo Lagrangiano.....	41

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. Modelo Hidrodinâmico	44
5.1.1. Validação dos resultados	44
5.1.2. Resultados com vento	48
5.2. Modelo Lagrangiano.....	51
5.2.1. Simulações sem vento	51
5.2.2. Simulações com vento NE.....	55
5.2.3. Simulações com vento SE	59
5.2.4. Regiões atingidas.....	61
6. CONCLUSÕES.....	65
7. RECOMENDAÇÕES.....	66
8. REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

O petróleo e seus derivados exercem um papel fundamental na sociedade moderna como uma das principais fontes de energia. Entretanto, sua exploração e transporte são motivos de grande preocupação mundial devido aos riscos de poluição marinha ocasionados por derrames e, conseqüentemente, os impactos não só ambientais, mas também sócio-econômicos que são gerados nas áreas afetadas.

Os grandes derramamentos de óleo têm sérios efeitos, mas as maiores ocorrências de derramado são provenientes de eventos menores. Dentre as principais fontes de derramamento podemos citar acidentes durante as operações de carga e descarga de tanques; durante o abastecimento de navios; ou com embarcações atingidas por choques, afundamentos e encalhes; descargas operacionais durante a exploração e produção de óleo e descargas acidentais durante as operações de limpeza dos tanques (CHACALTANA, 2007). No Brasil, existem relatos de pequenos vazamentos de óleo desde 1955, época em que se fazia o transbordo de petróleo de navios maiores para embarcações com menor calado e melhores condições para adentrarem no Porto de Santos (POFFO et al., 1996, apud SOUZA FILHO, 2006).

A remediação destes acidentes pode demandar intensa utilização de recursos materiais, humanos e financeiros. Além disso, dependendo do volume de óleo derramado, de suas características físico-químicas, e das condições meteoro-oceanográficas, o espalhamento do petróleo pode atingir uma extensa superfície do ambiente marinho, podendo os hidrocarbonetos persistir no ambiente por mais de uma década.

O acidente mais recente, e que está sendo considerado como a pior catástrofe ecológica da história dos Estados Unidos, é o vazamento no Golfo do México, que começou em 20 de abril de 2010 com a explosão e consequente afundamento da plataforma petrolífera *Deepwater Horizon*. O vazamento já se prolonga há mais de dois meses, e pelas últimas estimativas do governo americano, cerca de 25 mil a 40 mil barris de petróleo estão sendo lançados diariamente (GLOBO, 2010). A pesca e os manguezais do estado de Louisiana foram os mais

atingidos até agora, provocando graves prejuízos econômicos e ambientais na costa sul dos EUA. O grupo petroleiro britânico British Petroleum (BP), responsável pelo acidente, declarou que os custos com o derrame já atingiram 3,12 bilhões de dólares (G1, 2010), e o governo americano exigiu a criação de um fundo de 20 bilhões de dólares para garantir o pagamento de indenizações às vítimas.

Para promover uma ação mais eficaz no combate aos derramamentos de óleo ou de seus derivados, é importante que a central de resposta a emergências conheça o comportamento esperado das plumas de óleo. Tal conhecimento também é de fundamental importância no planejamento de rotas para navios tanques, pontos de carga e descarga de óleo, rotas de oleoduto, etc. E é devido à essa crescente necessidade que estudos científicos vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, de forma a dar um tratamento preventivo e de combate a derramamentos pelo uso de modelagem numérica.

A técnica mais utilizada para estimar o comportamento esperado da trajetória e as transformações do óleo em corpos d'água é a aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos aliada ao uso do computador. A dinâmica dos fluidos computacional (CFD - do termo inglês *Computational Fluid Dynamics*) vem sendo utilizada na resolução de um conjunto de equações que representam o transporte e intemperismo do óleo. O uso de sistemas computacionais é uma opção relativamente barata, e de ampla aplicação não apenas para o estudo do comportamento do óleo, mas também para outros problemas relacionados com a qualidade da água.

A modelagem lagrangiana da trajetória do óleo é usada para definir a área de influência do derramamento na qual se baseia todo o diagnóstico ambiental, bem como, para definir cenários através das simulações, permitindo a elaboração de estratégias necessárias ao atendimento emergencial de acidentes que envolvem derramamento de óleo no mar, constituindo, dessa forma, uma ferramenta fundamental na elaboração do estudo e da gestão ambiental das atividades de exploração e produção (PARREIRA, 2008).

A legislação ambiental brasileira, dentro do escopo do licenciamento ambiental, utiliza-se esta ferramenta computacional como diretriz para a avaliação dos possíveis impactos das atividades petrolíferas. A legislação brasileira exige que o empreendedor apresente a

modelagem do derramamento de óleo para delimitação da área de influência indireta da atividade. Esta ferramenta é utilizada também na elaboração de Planos Nacionais de Contingência e Planos de Emergência Individuais de portos, terminais, dutos e plataformas.

Nos últimos anos, o estado do Espírito Santo vem se destacando na produção de petróleo no Brasil, sendo atualmente o segundo maior produtor do país (ESPÍRITO SANTO, 2010), e com estimativa de atingir 15 a 20% da produção nacional ao longo de 2011 (FOLHA VITÓRIA, 2010). A Baía do Espírito Santo apresenta um intenso tráfego de navios de grande porte, já que abriga o Porto de Tubarão, que é maior porto de exportação de minério de ferro do mundo (GAZETA, 2010), e ainda dá acesso à área portuária da Baía de Vitória. Diante de tal cenário, torna-se cada vez mais iminente o risco da ocorrência de derramamento na Baía, e, portanto, é de suma importância uma maior atenção para esta região.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o uso da modelagem computacional para determinar o padrão de escoamento na Baía do Espírito Santo, e, em seguida, avaliar o espalhamento de óleo de um derrame hipotético no canal de acesso ao Porto de Tubarão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Contribuir para o conhecimento do padrão hidrodinâmico e do comportamento de plumas de óleo na Baía do Espírito Santo.

2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar a hidrodinâmica da Baía do Espírito Santo considerando como forçantes o vento e a maré.
- ✓ Avaliar a trajetória da pluma de óleo proveniente de um derrame hipotético próximo ao Porto de Tubarão diante de diversos cenários com diferentes características meteoro-oceanográficas.
- ✓ Identificar as possíveis regiões na costa da Baía do Espírito Santo a serem atingidas por um derrame no Porto de Tubarão e o tempo de chegada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Modelagem Computacional

A utilização da modelagem computacional em estudos envolvendo corpos de água naturais é cada vez mais presente, sendo considerada ferramenta indispensável para definição de estratégias no gerenciamento ambiental.

Modelos permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros, etc. São empregados com maior frequência para simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, reservatórios, lagos e lagoas (ROSMAN, 2006).

Há determinadas limitações na utilização da modelagem. Estas limitações incluem a exatidão de prever a turbulência e o transporte de sedimentos, e os processos químicos e biológicos que se relacionam aos parâmetros da qualidade de água (B&P, 1993 apud VIEGAS, 2006). Além disso, devido à complexidade das equações que representam os modelos matemáticos, muitas vezes as soluções analíticas só podem ser alcançadas mediante simplificações (GOBIRA, 2008). Mesmo com tais limitações, a aplicação de modelos ainda é vantajosa, visto que sem os quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais, além de minimizar custos com medições de campo.

Para auxiliar na avaliação do impacto ambiental, faz-se necessário simular o padrão de escoamento e monitorar o processo de transporte de poluentes. Em geral os modelos para previsão do escoamento ou movimento das águas são denominados “modelos hidrodinâmicos”, enquanto que os modelos de previsão da qualidade da água ou transporte de escalares (qualidade) são comumente chamados de “modelos de dispersão” (ROSMAN, 2006).

A filosofia dos modelos hidrodinâmicos é considerar os diferentes forçantes ambientais (ventos, correntes, marés, etc) e as características geográficas de uma região (batimetria, linha de costa, superfície livre, etc), para determinar o campo resultante de velocidades (horizontais e verticais) do meio aquático. Já a filosofia dos modelos de dispersão é a de considerar a associação dos vários processos de natureza física que interferem na propagação, diluição e espalhamento do constituinte no corpo d'água, tais como advecção e difusão. A advecção refere-se ao transporte do constituinte devido ao movimento do fluido, enquanto a difusão está relacionada ao espalhamento do constituinte pelo movimento molecular e turbulento de partículas. Comumente emprega-se o termo dispersão ao se referir ao processo de espalhamento em função da ação conjunta da advecção e da difusão (FISHER *et al.*, 1979).

A aplicação de modelos a corpos d'água 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 (ROSMAN, 2006).

De modo geral, as equações que formam o modelo matemático para a representação da hidrodinâmica e dispersão são formadas com base nos princípios de Conservação de Massa, Quantidade de Movimento, Energia e Substância. Essas equações, até então, não possuem solução analítica devido à sua natureza não-linear, ao acoplamento entre elas e à complexidade da geometria do corpo d'água, mas são resolvíveis através de métodos numéricos, sendo que os mais usuais em engenharia são os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos.

Existem dois tipos de referenciais comumente utilizados na mecânica dos fluidos: o referencial de Euler (euleriano) e o referencial de Lagrange (lagrangiano). Na técnica euleriana, em cada instante de tempo as variáveis físico-químicas e biológicas que caracterizam o estado do meio ambiente são analisadas simultaneamente em pontos fixos no espaço. Em contrapartida, a técnica lagrangiana identifica e acompanha uma parcela do fluido que se move com a velocidade do escoamento. Nessa técnica, o fluido é representado por

partículas discretas, medindo suas variáveis de estado ao longo de sua trajetória (GAZE, 2009).

Os modelos eulerianos são os mais difundidos e usados, entretanto a abordagem lagrangiana tem se mostrado mais eficiente em algumas situações. Lonin (1999, apud FONTANA, 2003) utilizou ambos os métodos para determinar a dinâmica de um poluente, e, com base nos resultados obtidos, concluiu que a solução mais apropriada foi apresentada pelo método lagrangiano.

Pereira (2004) também assinala algumas vantagens do modelo lagrangiano em relação ao modelo euleriano, tais como:

- ✓ Simplicidade;
- ✓ Não necessitam de grade numérica;
- ✓ Apresentam igual capacidade de estimar a difusão próxima (near field) e afastada (far field) da fonte;
- ✓ São capazes de estimar o fluxo turbulento no sentido do gradiente;
- ✓ Necessitam somente de informações das propriedades estatísticas do escoamento;
- ✓ São capazes de lidar com emissões do tipo instantânea, contínua e variável, emitidas de fontes do tipo pontual e não-pontual.

De acordo com Ridge (2002), os processos físicos de transporte modelados por técnicas eulerianas apresentam erros numéricos altamente dependentes da escala espacial. Martinez e Tovar (1999) afirmam ainda que na maioria das vezes o método euleriano apresenta solução adequada quando usado para calcular trajetórias de óleo em mar aberto, o que já não ocorre em águas costeiras e rios, pois não representam com precisão a trajetória do óleo devido aos campos de velocidade não uniformes nestas regiões.

Para a simulação do transporte de plumas de óleo, Rosman (2006) aponta que a técnica lagrangiana é mais adequada. Os modelos lagrangianos podem ser considerados aplicáveis aos estudos sobre o espalhamento de óleo assumindo-se que o óleo derramado pode ser representado por um conjunto de partículas discretas, através dos traçadores lagrangianos. Esta abordagem é adotada pela maioria dos modelos que trabalham com óleo, como OSCAR (REED; AAMO; DALING, 2004), GNOME (PARREIRA, 2008; FONTANA, 2003),

OILMAP (ASA, 2010), MLPDA (GAZE, 2009) e MOHID (FERNANDES, 2001; JANEIRO, 2008).

A mancha de óleo originada de um derramamento é transportada pelo campo de correntes gerado por forçantes externos, como o vento e a atração gravitacional, e por forçantes internos, como o campo termo-halino. Os processos de espalhamento e transporte são extremamente importantes na análise ambiental, pois controlam a extensão da mancha e determinam as possíveis áreas a serem contaminadas. Além disso, estes processos também influenciam diretamente os processos de intemperismo do óleo, como a evaporação, dissolução, foto-oxidação e biodegradação (LEMOS, 2009).

Assim, quando se trata da simulação da trajetória de plumas de óleo, alguns modelos incluem também em sua formulação, além da advecção e difusão, processos de intemperismo que atuam sobre as propriedades físico-químicas do óleo, tais como os citados anteriormente. A simulação dos processos de intemperismo do óleo torna o modelo mais eficiente e realístico aos cenários, e seus resultados ajudam a entender como evoluem no tempo as principais características do óleo, como composição química, densidade, viscosidade, ponto de fluidez, ponto de ignição, etc (FERREIRA, 2006).

Outra importante aplicação de modelos de trajetória de manchas de óleo é a simulação de estratégias de resposta utilizando diferentes tipos de equipamentos (contenção, recolhimento, dispersão, etc) e como o volume derramado responde, inicialmente ou continuamente, às estratégias consideradas (FERREIRA, 2006).

3.2. Estudos com Modelos Computacionais

A simulação numérica de derramamento de óleo identifica a área de influência indireta da atividade de petróleo, na qual se baseia todo o diagnóstico ambiental, bem como permite, através da simulação de cenários, a elaboração de estratégias necessárias ao atendimento

emergencial de acidentes que envolvam derramamento de óleo no mar, para elaboração de planos de emergência individual (IBAMA, 2002). A seguir são apresentados estudos que utilizaram a modelagem como ferramenta para estimativas relacionadas a derramamentos de óleo.

Ferreira (2006) avaliou as estratégias de resposta a derramamento de óleo pesado no Campo de Jubarte, litoral sul do Espírito Santo, a partir da simulação de diferentes cenários com o modelo computacional OILMAP. Considerou-se inicialmente um cenário acidental crítico de inverno identificado a partir de um histórico hidrodinâmico e de ventos, o qual resulta em grande volume de óleo atingindo a costa. Em seguida foram simulados cenários utilizando estratégias de resposta previstas na legislação, além de uma série de combinações de estruturas de contenção e recolhimento com dispersão combinada (mecânica e química). Os resultados obtidos sinalizam para uma limitação das estratégias de resposta, no caso de grandes derramamentos em condições ambientais críticas, uma vez que o trabalho revelou que no melhor dos cenários de resposta, uma parcela ainda significativa (~25%) do volume inicialmente derramado continua alcançando uma extensão relativamente grande (~50km) da linha de costa, num prazo relativamente curto (~05 dias).

Para estimar a trajetória que um possível derramamento de óleo pode fazer em função de um acidente na área de fundeadoiro dos portos situados nas Baías de Vitória e do Espírito Santo, Fontana (2003) utilizou o modelo CATS 1.0 β na avaliação da hidrodinâmica e o modelo GNOME para simulação da trajetória de partículas. Observou-se que o vento e as correntes de maré são fatores de influência direta na movimentação da pluma, sendo que o direcionamento foi ditado pelo vento em todos os casos considerados. Concluiu-se também que qualquer que seja o ponto de derrame na região de fundeio, a região costeira é afetada algum tempo depois. Também foram efetuados experimentos de campo para que os resultados apresentados nas simulações computacionais pudessem ser validados, e foi possível verificar que a trajetória obtida na simulação aproxima-se muito daquela registrada em campo.

Parreira (2008) estudou a dispersão de plumas de óleo na região da Baía do Espírito Santo aplicando o modelo GNOME para analisar o cenário de um acidente ocorrido em 1999 no Porto de Tubarão, e pode concluir que as medidas de contenção aplicadas na região do

acidente foram demoradas e pouco eficazes, visto que o óleo atingiu as regiões costeiras dos municípios de Vitória e Vila Velha, regiões estas de grande importância sócio-econômica.

O modelo MOHID foi aplicado por JANEIRO et al (2008) ao sistema estuarino da Lagoa dos Patos, localizada no extremo sul do país, para reproduzir a hidrodinâmica do estuário e da lagoa e então simular um derramamento hipotético de óleo no estuário. Os resultados mostraram que a hidrodinâmica da região é controlada principalmente pelo vento e pela descarga de água do rio contribuinte, e que a evolução da dispersão, da concentração e da espessura do óleo no primeiro dia após o derramamento é determinada pelo equilíbrio entre esses dois fatores. Concluindo que, para cursos d'água maiores que $5.000\text{m}^3/\text{s}$ o rio é o principal responsável pela dispersão do óleo e parte da pluma é transportada para fora do estuário, enquanto que para vazões de $500\text{m}^3/\text{s}$ o vento assume o controle do transporte da pluma de óleo, e após 24 horas a mesma atinge a lagoa.

Lemos (2009) utilizou o modelo OSCAR para determinar uma zona de exclusão para as atividades de exploração e produção de petróleo na região do Banco de Abrolhos e da Área de Proteção Ambiental (APA) Ponta das Baleias. Avaliou-se cenários de derramamento de óleo em alguns blocos de petróleo da região para identificar quais oferecem riscos de contaminação para áreas de preservação ambiental dos ecossistemas citados. Foram identificados os blocos que mais oferecem riscos de contaminação, onde em todos os cenários analisados o óleo atingiu alguma porção das áreas de proteção ambiental, e verificou-se também que um dos blocos não apresentou nenhum risco às áreas de proteção em nenhum cenário de derramamento, colocando a porção norte da Bacia do Espírito Santo como área sem riscos de contaminação ao Banco de Abrolhos e adjacências. Assim, a zona de exclusão se estendeu desde os limites sul da Bacia do Jequitinhonha até os limites norte da Bacia do Espírito Santo. O limite leste é a zona de quebra de plataforma e no limite oeste estabeleceu-se a zona costeira. Além disso, o autor identificou como pior cenário a ocorrência de um derramamento de óleo do tipo intermediário no período de verão.

Leitão et al (2004) realizou diversas aplicações do sistema MOHID em estudos envolvendo hidrodinâmica e transporte de manchas de óleo. As simulações foram utilizadas em estudos de impacto ambiental e de planos de emergência no litoral de Portugal e do Brasil, além da modelagem operacional do acidente do petroleiro Prestige. Para este último, o vento foi

considerado como única forçante na simulação da hidrodinâmica, e em seguida adicionou-se um campo de correntes forçado pelos gradientes de densidade climatológicos para então simular a trajetória do óleo. Os resultados obtidos foram validados com imagens de satélite e pode-se verificar que o modelo e os dados de observação foram muito semelhantes.

Reed et al (1995) realizou uma análise quantitativa comparando algumas estratégias de resposta para derramamento, como o uso de recolhedores e dispersantes químicos, e um cenário de não-resposta. Para tanto, foi utilizado um modelo numérico tridimensional de comportamento físico-químico e destino do óleo, acoplado a um modelo de contingência e resposta (OSCAR). Com o uso deste último, foi possível o cálculo do balanço de massa, indicando, ao longo do tempo, a fração da massa total de óleo que sofreu evaporação, a fração que se encontra na superfície, a fração que foi removida pela estratégia de resposta e a fração que dispersou no corpo d'água. Esta abordagem quantitativa proporciona uma ferramenta útil para avaliar uma alternativa de resposta eficiente e funcional, fornecendo assim a solução de melhor custo-benefício na elaboração de planos de contingência de derramamentos em plataformas offshore, terminais costeiros e refinarias.

3.3. Principais processos atuantes em uma mancha de óleo

Uma vez derramado no mar, o óleo se espalha como uma película sobre a água. O transporte e o destino do óleo derramado são, geralmente, governados por processos físicos, químicos e biológicos que dependem das propriedades do óleo em questão e das condições meteorológicas, hidrodinâmicas e ambientais da região atingida. Estes processos, denominados conjuntamente de intemperismo, ocorrem a taxas variáveis, sendo mais efetivas nos primeiros períodos do derrame. Como consequência da ação do intemperismo, o óleo sofre modificações em sua composição original, tornando-se menos tóxico, mais denso e viscoso e mais persistente (CETESB, 2010).

De acordo com Lehr (2001), os processos de intemperismo podem ser divididos em três categorias: processos que iniciam rapidamente e que geram consequências imediatas ao combate do derramamento, tais como espalhamento, evaporação, dispersão, emulsificação e dissolução; processos mais lentos e que geram efeitos de longo prazo, tais como foto-oxidação e biodegradação; e finalmente aqueles que são importantes apenas em condições ambientais particulares, tais como a sedimentação e a interação óleo-gelo.

A Figura 1 esquematiza a atuação dos principais processos de intemperismo ao longo do tempo, representando através da largura das faixas a intensidade com que ocorrem.

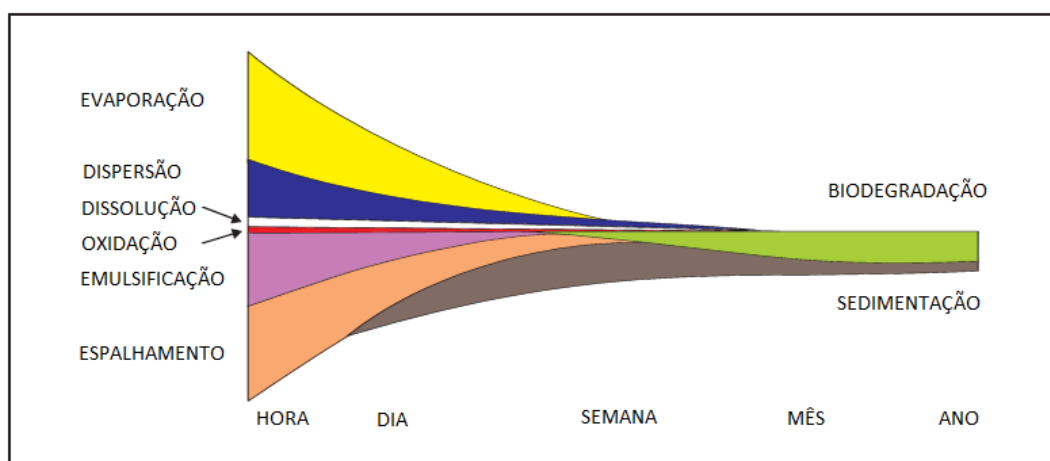


Figura 1: Representação esquemática da atuação dos principais processos de intemperismo com relação ao período pós-derrame (óleo cru médio típico em mar com condições moderada). Fonte: ITOPF (2002).

A seguir apresenta-se uma breve descrição sobre cada um dos processos supracitados. Tendo em vista que o presente estudo abordará o processo de espalhamento nas simulações realizadas, será feita uma abordagem mais detalhada a seu respeito na seção seguinte (3.3.1).

❖ Evaporação:

Componentes mais voláteis do óleo sofrem evaporação para a atmosfera, causando redução do volume de óleo, com conseqüente aumento da densidade e viscosidade. A taxa de evaporação depende da composição do óleo, temperatura do ar e da água, área e espessura da

mancha de óleo, velocidade do vento e radiação solar. Óleos crus leves e produtos refinados podem perder até 40% do seu volume durante o primeiro dia do derrame (ITOPF, 2002).

❖ Emulsificação

Processo físico em que um líquido é disperso em outro líquido na forma de gotículas. A maioria dos óleos crus tendem a absorver água formando emulsões água+óleo, aumentando o volume de poluentes em até quatro vezes (CETESB, 2010). É comum que a maioria dos óleos crus só inicie a emulsificação após certa fase de envelhecimento. A ocorrência deste processo depende da composição do petróleo e do estado do mar, sendo que é favorecida na presença de mar agitado (FERNANDES, 2001).

❖ Dispersão

Processo físico no qual vórtices devido à turbulência atuam no transporte de gotículas de óleo, despreendendo-as da mancha (vórtices menores) e transportando-as verticalmente na coluna d'água (vórtices maiores) (GOBIRA et al, 2007). Essas gotículas podem ter dimensões variáveis. Aquelas menores permanecem em suspensão na coluna d'água, sendo atacadas por processos como biodegradação e sedimentação (CETESB, 2010). Este processo é influenciado por três fatores essenciais: viscosidade do óleo, temperaturas da água e do ar e estado do mar (FERNANDES, 2001).

❖ Dissolução

Processo físico no qual constituintes solúveis do óleo se dissolvem na água. A dissolução e a evaporação são processos competitivos porque estes constituintes solúveis são também os mais voláteis, e se perdem mais rápido por evaporação, normalmente 10 a 1.000 vezes mais rápido que por dissolução (ITOPF, 2002). A dissolução é particularmente importante em superfícies cobertas de gelo ou em gotas de óleo dispersas na coluna d'água, ou seja, onde a evaporação é reduzida (FERNANDES, 2001). É um processo que se inicia logo após o derrame e se perpetua ao longo do tempo, uma vez que a oxidação e a biodegradação constantemente formam subprodutos solúveis (CETESB, 2010).

❖ Oxidação

É a reação de combinação ou quebra entre as moléculas de hidrocarbonetos com o oxigênio, promovida pela luz solar. Contribui para o intemperismo do óleo, uma vez que forma compostos solúveis. Sais minerais dissolvidos em água aceleram a taxa de oxidação (CETESB, 2010).

❖ Biodegradação

Consiste na degradação do óleo por bactérias e fungos naturalmente presentes no mar. A taxa de biodegradação é influenciada pela temperatura e disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (CETESB, 2010). Praticamente todos os tipos de petróleo e derivados sob condições favoráveis, sofrem algum grau de degradação biológica sendo, no caso marinho, os microorganismos os principais responsáveis pela degradação biológica do petróleo (GAZE, 2009).

❖ Sedimentação

Poucos óleos crus são suficientemente densos para afundar. A sedimentação ocorre principalmente devido à adesão de partículas de sedimento ou matéria orgânica ao óleo. A sedimentação depende do grau de dispersão, sólidos suspensos na água e da contaminação de ambientes costeiros, principalmente praias (CETESB, 2010).

3.3.1. Espalhamento

Sabe-se que imediatamente após o derrame, os processos de advecção e espalhamento são os principais responsáveis pelo rápido aumento da área exposta do óleo, contribuindo assim para a ação dos demais processos de intemperismo (ITOPF, 2010). Além disso, muitos dos processos de envelhecimento do óleo são diretamente influenciados pela evolução da área

ocupada pela mancha. Assim, optou-se por abordar o processo de espalhamento nas simulações realizadas neste estudo. Nesta seção será descrito o processo em questão, e como ele é abordado na modelagem numérica.

O espalhamento trata-se do movimento horizontal da mancha sobre si mesma, devido à ação da tensão superficial e gravidade, aumentando sua área exposta. Nos primeiros instantes após o derrame, o espalhamento é, provavelmente, o processo predominante. Após algum tempo, e mediante a existência de vento forte, mar agitado e efeito das correntes, a mancha pode ser deformada, fragmentada e dispersa (FERNANDES, 2001).

As forças que dominam o espalhamento são as inerciais, gravitacionais, viscosas e as de tensão superficial, e suas contribuições ao processo de espalhamento dependem do tempo desde o início do derrame do óleo. A equação de Fay que descreve o balanço dessas forças, relacionando-as com o tempo após o derrame é apresentada a seguir.

$$\alpha_1 (\rho_w - \rho_o) g h^2 + \alpha_2 \sigma_n = \frac{\alpha_3 \rho_w v_w^{1/2}}{t^{1/2}} R \frac{dR}{dt} + \rho_w h \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (1)$$

Onde:

ρ_w	é massa específica da água [kg/m ³]
ρ_o	é massa específica do óleo [kg/m ³]
σ_n	é tensão interfacial óleo-água [N/m]
g	é aceleração da gravidade [m/s ²]
R	é raio da mancha assumindo um espalhamento assimétrico [m]
t	é tempo após o derrame [s]
v_w	é viscosidade cinemática da água [m ² /s]
h	é espessura da mancha [m]
α_1, α_2 e α_3	são constantes empíricas adimensionais que podem ser estimadas como sendo 0,42, 1,64 e 0,86 respectivamente, segundo Stolzenbach (1977).

Fay (1969) divide o processo de espalhamento em três fases, de acordo com a ação destas forças. No começo, como a mancha apresenta maior espessura, o balanço é entre as forças inerciais e gravitacionais. Após algumas horas ou dias, com a diminuição da espessura da mancha, as forças viscosas se tornam mais relevantes comparadas às inerciais, e então o balanço é entre forças viscosas e gravitacionais. Quando a espessura da mancha torna-se muito fina, a força gravitacional deixa de ser importante, sendo o espalhamento dominado pelas forças de tensão superficial, e contrariado pela viscosidade (PALADINO, 2000).

Considerando as três fases do espalhamento, a Equação 1 assume as formas apresentadas na Quadro 1, sendo que L é o comprimento característico da mancha para um espalhamento unidimensional; D é o coeficiente de difusão, frequentemente utilizado para cálculo do espalhamento com base em modelos lagrangianos de trajetórias de partículas; V é o volume de óleo derramado, $A = 0,5V / \text{unidade de comprimento da mancha}$, $\Delta = (\rho_w - \rho_0) / \rho_w$ e, k_1 , k_2 e k_3 admitem, respectivamente, valores de 0,57, 0,725 e 0,5.

Fase do espalhamento	L	R	D
Gravitacional-inercial	$1.39(\Delta g A t^2)^{1/3}$	$k_1 (\Delta g V t^2)^{1/4}$	$\frac{\pi k_1^2}{8} (\Delta g V t)^{1/2}$
Gravitacional-viscosa	$1.39 \left(\frac{\Delta g A^2 t^{3/2}}{v_w^{1/2}} \right)^{1/4}$	$k_2 \left(\frac{\Delta g V^2 t^{3/2}}{v_w^{1/2}} \right)^{1/6}$	$\frac{\pi k_2^2}{16} \left(\frac{\Delta g V^2}{v_w^{1/2}} \right)^{1/3} \frac{1}{\sqrt{t}}$
Tensão superficial-viscosa	$1.43 \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 v_w} \right)^{1/4}$	$k_3 \left(\frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 v_w} \right)^{1/4}$	$\frac{3\pi k_3^2}{16} \left(\frac{\sigma}{\rho_w v_w^{1/2}} \right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{t}}$

QUADRO 1: Formulação para as fases do processo de espalhamento.

Uma vez que a fase inicial (gravitacional-inercial) é muito curta, muitas vezes esta não chega a ser modelada diretamente, e a área inicial da mancha (A_0) é assumida então como a área da mancha ao final dessa fase, e início da fase gravitacional-viscosa, que é dada pela equação a seguir, onde $\Delta = \rho_w - \rho_0 / \rho_w$ e V_0 é o volume de óleo derramado.

$$A_0 = \pi \frac{k_2^4}{k_1^2} \left(\frac{\Delta g V_0^5}{v_w} \right)^{1/6} \quad (2)$$

A terceira fase (tensão superficial-viscosa) também é de difícil aplicabilidade, uma vez que só se inicia quando a mancha está muito fina, resultando numa divisão em pequenas manchas devido aos efeitos do vento. Portanto, é comum utilizar apenas a fase gravitacional-viscosa para o cálculo do espalhamento, assumindo que quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor, o espalhamento termina.

.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição do Modelo Numérico MOHID

Na realização do presente trabalho, será utilizado para o estudo da hidrodinâmica e do transporte de partículas o modelo numérico MOHID. Este modelo tem sido utilizado em inúmeros estudos, sendo aplicado a diferentes corpos d'água, como oceanos, zonas fluviais e estuarinas, zonas costeiras e lagoas (JANEIRO et al, 2008, FERNANDES, 2001, RAMOS, 2002).

O MOHID é um sistema computacional de modelagem integrada com a capacidade de simular tanto processos físicos quanto bioquímicos. Foi desenvolvido no Instituto Superior Técnico de Portugal e 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, 2010).

O sistema 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 criação da malha computacional na qual são aplicadas as simulações. Cada módulo é responsável por gerenciar um tipo de informação, podendo ser entendido como um modelo específico. Entretanto, o sistema é composto por um único arquivo executável e é apresentado ao usuário através de interfaces gráficas que permitem o gerenciamento de todo o pré e pós-processamento (MOHID, 2010).

O tempo de execução do programa (tempo simulado versus tempo da unidade central de processamento) varia em função da malha de cálculo e do passo de tempo utilizado. No

entanto, a possibilidade de executar os vários módulos com passos de tempo diferentes permite uma otimização do tempo de cálculo necessário para a execução das simulações (MOHID, 2010).

O sistema desenvolvido para a previsão e simulação de derrames de óleo baseia-se fundamentalmente em três sub-modelos: um modelo responsável pela evolução de todas as propriedades e processos específicos do óleo (densidade, velocidades de espalhamento, evaporação, etc.); um modelo hidrodinâmico que calcula o campo de velocidades das correntes induzidas pela maré ou vento nas zonas de interesse; e um modelo lagrangiano que calcula a evolução espacial das partículas de óleo com base na velocidade das correntes (calculadas no módulo hidrodinâmico), na velocidade devido ao vento, na velocidade do espalhamento do óleo (determinada no módulo do óleo), e ainda na velocidade aleatória representativa do transporte difusivo (FERNANDES, 2001).

A seguir é apresentada uma breve descrição dos principais módulos utilizados para realização deste estudo.

4.1.1. Malha Computacional

No grupo dos módulos relacionados com a malha computacional incorporam-se os módulos responsáveis por tratar a informação batimétrica/topográfica de base, incluindo o módulo da geometria vertical. A geometria vertical é dividida em volumes finitos, permitindo ao usuário escolher a coordenada vertical mais adequada para o estudo em questão. Destaca-se a coordenada vertical sigma para escoamentos baroclínicos (p. e. estuários pouco profundos), a coordenada vertical cartesiana para escoamentos caracterizados por colunas de águas estratificadas (p. e. oceanos); e a coordenada vertical harmônica para sistemas estratificados com uma grande variação do nível da água (NEVES et al, 2001).

Com relação à malha horizontal, vale ressaltar que o modelo Mohid suporta fronteiras móveis. Este conceito é fundamental para zonas que sofrem variações do nível da superfície livre, associada às variações na área horizontal inundada. Nesse caso é definido um parâmetro que indica, a partir de que altura da água, uma célula deve ser considerada descoberta. Quando um ponto tiver uma altura de água inferior a este parâmetro, todos os processos simulados neste ponto são “congelados” (NEVES et al, 2001).

4.1.2. Hidrodinâmica

O módulo hidrodinâmico do Mohid tem como objetivo simular a evolução das propriedades do escoamento, tais como velocidade e elevação. O campo de velocidade é calculado com base nas correntes induzidas pelos forçantes externos, como maré e vento.

Primeiramente resolve-se a equação de conservação de quantidade de movimento (Equação 3) para um meio 3D para calcular as componentes horizontais da velocidade. Em seguida, resolve-se a equação de conservação de massa para um meio 2D (Equação 4) para calcular a variação da superfície livre no tempo. Finalmente resolve-se novamente a equação de conservação de massa (Equação 4), agora para um meio 3D, a fim de calcular a velocidade vertical do escoamento (FERNANDES, 2001).

❖ *Equação de Conservação da Quantidade de Movimento com as aproximações adotadas*

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V u_i dV = & - \oint_A (u_i u_j) n_j dA + \oint_A v_\tau \frac{\partial u_i}{\partial x_j} n_j dA - g \oint (\eta - x_3) n_i dA - g \oint \left(\int \frac{\rho_w - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} dx_3 \right) n_i dA \\ & - \oint p_{atm} n_i dA + \int_V 2\varepsilon_{i3j} \Omega_3 u_j dV + \Phi_i \end{aligned} \quad (3)$$

Para $i, j = 1, 2$.

Sendo que o termo:

$$\begin{aligned}
 g \oint (\eta - x_3) n_i dA & \quad \text{representa a força barotrópica} \\
 g \oint \left(\int_{\rho_{ref}}^{\eta} \frac{\rho_w - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} dx_3 \right) n_i dA & \quad \text{representa a força baroclínica} \\
 \oint p_{atm} n_i dA & \quad \text{representa a pressão atmosférica} \\
 \int_V 2\epsilon_{i3j} \Omega_3 u_j dV & \quad \text{representa a força de Coriolis, e } \Omega_3 = \Omega \sin(\phi) \\
 \Phi_i & \quad \text{representa o potencial de maré}
 \end{aligned}$$

O potencial de maré é um termo que adquire importância em domínios de grandes dimensões, da ordem das centenas de quilômetros, sendo resolvido com base na formulação proposta por Choi et al. (1997, apud FERNANDES, 2001).

❖ Equação de Conservação de Massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_w dV = - \oint_A \rho_w u_i n_i dA + Descargas + Precipitação - Evaporação \quad (4)$$

Onde:

$$\begin{aligned}
 u_j & \quad \text{velocidade do fluido [m/s]} \\
 \nu_\tau & \quad \text{é viscosidade cinemática turbulenta [m²/s]} \\
 \eta & \quad \text{é elevação da superfície livre [m]} \\
 x_3 & \quad \text{é coordenada vertical [m]} \\
 \rho_w & \quad \text{é massa específica da água [kg/m³]} \\
 \rho_{ref} & \quad \text{é massa específica da água de referência [kg/m³]} \\
 p_{atm} & \quad \text{é pressão atmosférica [Pa]}
 \end{aligned}$$

g	é aceleração da gravidade [m/s ²]
Ω	é velocidade angular de rotação da Terra [rad/s]
ϕ	é a latitude [rad]
t	é tempo [s]
n_j	é o vetor unitário normal a superfície de controle

As principais aproximações adotadas na aplicação da lei de conservação da quantidade de movimento a escoamentos oceânicos e costeiros são a aproximação de Boussinesq, devido à pequena variação da massa específica da água; e a hipótese de pressão hidrostática, por o fluido se comportar como se estivesse num equilíbrio estático devido às baixas velocidades na vertical e à estratificação vertical de densidade estável. Além disso, para grandes regiões, cujo comprimento seja maior que 10km, deve-se considerar o efeito da rotação da Terra no escoamento através da força de Coriolis. O termo de pressão é dividido numa componente barotrópica, que considera o efeito do gradiente de nível, e outra baroclínica, que considera o efeito do gradiente de densidade (FERNANDES, 2001).

4.1.3. Módulo Lagrangiano

O módulo lagrangiano é um modelo de transporte tridimensional que simula a evolução espacial de partículas através do conceito de traçadores lagrangianos. É utilizado para simular processos de qualidade da água (RAMOS, 2002), transporte de sedimentos (BRITO, 2005) e dispersão de óleo (FERNANDES, 2001), sendo este último o foco do presente trabalho.

Para simular a dispersão do óleo, o módulo lagrangiano interage com o módulo de dispersão de óleo, e, para simular a qualidade da água, utiliza o módulo de qualidade da água. O

transporte de sedimentos pode ser associado diretamente a traçadores utilizando o conceito de velocidade de sedimentação. Outra característica do modelo de transporte lagrangiano é a capacidade de calcular o tempo de residência, o que pode ser muito útil quando se estuda a troca de massas de água em baías ou estuários.

O modelo de transporte pode ser executado simultaneamente com o modelo hidrodinâmico, obtendo o campo de velocidades do modelo hidrodinâmico em cada instante de cálculo, ou a posteriori, utilizando um campo hidrodinâmico gravado em arquivo. Em relação ao passo temporal do modelo lagrangiano, este é independente do utilizado no modelo hidrodinâmico, sendo assim possível rodar o modelo de deriva com um passo de tempo superior ao passo do modelo hidrodinâmico, aumentando o desempenho do sistema MOHID (FERNANDES, 2001).

A evolução espacial das partículas de óleo é calculada assumindo o óleo como um conjunto de partículas cuja velocidade é obtida a partir de quatro componentes: velocidade da corrente obtida do módulo hidrodinâmico ($\vec{u}_1$), velocidade de deriva devido ao vento ($\vec{u}_2$), velocidade aleatória representativa do transporte difusivo ($\vec{u}_3$) e velocidade devido ao espalhamento específico do óleo ($\vec{u}_4$), obtida do módulo de óleo. Conhecida as componentes da velocidade, a trajetória das partículas é então calculada usando a definição de velocidade:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{U}(\vec{x}, t), \quad \text{onde} \quad \vec{U} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \vec{u}_3 + \vec{u}_4 \quad (5)$$

A área total ocupada pela mancha é calculada somando as áreas das células onde existe pelo menos uma partícula (centro de massa). O volume de cada partícula é o volume total dividido pelo número de partículas. A espessura média de petróleo numa célula do modelo hidrodinâmico é obtida dividindo a soma do volume de partículas cujo centro de massa está dentro dessa célula pela área da mesma (FERNANDES, 2001).

4.1.4. Módulo de Óleo

O módulo de intemperismo do óleo usa variáveis do módulo hidrodinâmico e do módulo de transporte lagrangiano para prever a evolução de propriedades do óleo e processos envolvidos em um derramamento, tais como espalhamento, evaporação, dispersão, sedimentação, dissolução e emulsificação. Além disso, o módulo permite também a integração de algumas técnicas de remoção da mancha da superfície, como a aplicação de dispersantes químicos e a remoção mecânica através de recolhedores. Qualquer um dos processos de intemperismo pode ser desativado pelo usuário do modelo.

Para alguns processos, o modelo considera mais de uma formulação, permitindo que o usuário escolha qual o método a ser utilizado. No caso do processo de espalhamento, pode-se adotar o método de gradiente de espessura ou o método de Fay, tendo sido este último apresentado na seção 3.3.1, e adotado no presente trabalho. Como descrito na referida seção, apenas é simulada a fase gravitacional-viscosa, e assume-se que a área inicial é a área ocupada pela mancha no final da 1ª fase (gravitacional-inercial).

De acordo com Fernandes (2001), a previsão, tendo em conta os processos modelados, só é válida para um período aproximado de 5 dias, uma vez que para períodos maiores deve-se levar em conta outros processos como a biodegradação e foto-oxidação, que não são simulados neste modelo.

Diferente do módulo lagrangiano, no módulo de óleo a simulação é feita para o conjunto das partículas, ou seja, são realizados os cálculos para a mancha de óleo no seu conjunto, e não para cada uma das partículas individualmente. A exceção é o processo de espalhamento, no qual são calculadas as velocidades dependentes da posição espacial das partículas (FERNANDES, 2001).

Uma vez que a evolução das propriedades e os processos do óleo (excetuando o espalhamento) são resolvidos assumindo um comportamento homogêneo do óleo, as condições ambientais e propriedades da água também são consideradas constantes em

qualquer parte da mancha, num determinado instante, sendo que o valor assumido é o valor registrado na origem do acidente (FERNANDES, 2001).

Assume-se também que a temperatura da mancha de óleo após o derrame rapidamente iguale-se a temperatura da água, desprezando efeitos da radiação solar ou qualquer outro processo de transferência de energia.

Para simulação do transporte de óleo devem ser inseridas como dados de entrada no modelo as seguintes propriedades do óleo: grau API, tipo de óleo (cru/refinado), viscosidade cinemática, temperatura da viscosidade de referência, tensão interfacial óleo-água e ponto de fluidez (*pour point*). A densidade inicial do óleo é obtida a partir do seu grau API.

4.2. Implantação do Modelo na Área de Estudo

4.2.1. Área de Estudo

A região de interesse deste estudo é a Baía do Espírito Santo (BES), localizada no Município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, e encontra-se limitada pelas latitudes 20°16'S e 20°19'S e pelas longitudes 40°14'W e 40°18'W. Tal região é caracterizada como um corpo semi-fechado de água, cuja entrada está voltada para SE, e possui aproximadamente 5 km de largura, sendo limitada pela Ponta de Tubarão e pela Ponta de Santa Luzia. Está associada ao sistema estuarino do rio Santa Maria da Vitória (Figura 2), do qual recebe aporte por dois canais: o Canal da Passagem e o canal que dá acesso à Baía de Vitória, sendo esta localizada na porção interna do estuário.

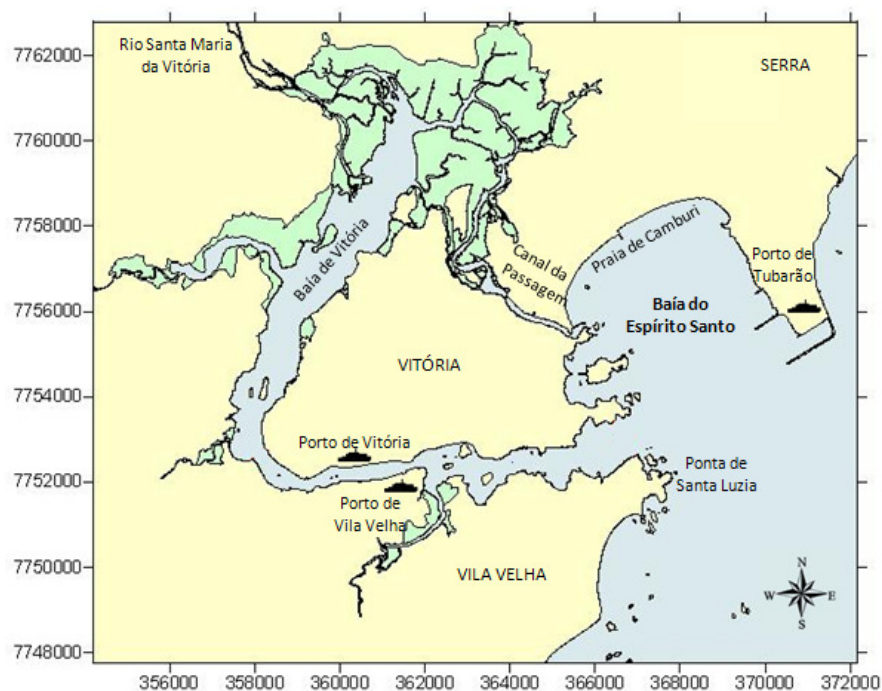


Figura 2: Representação do sistema estuarino do rio Santa Maria da Vitória e localização da Baía do Espírito Santo. A região em verde representa a área de manguezal.

A Baía do Espírito Santo é uma região de grande importância sócio-econômica e cultural, pois abriga duas das principais indústrias siderúrgicas do estado do Espírito Santo; o Porto de Tubarão, que é maior porto de exportação de minério de ferro do mundo; e a principal praia do município de Vitória, a Praia de Camburi. Além disso, a baía dá acesso ao canal no qual estão localizados os Portos de Vitória e Vila Velha, contribuindo ainda mais com o intenso tráfego de embarcações.

As principais forçantes na hidrodinâmica da região são a maré e os ventos (VIÉGAS, 2006). A maré é do tipo semidiurna e sua principal componente harmônica é a componente M2 (lunar semidiurna), com período de 12,4h e altura de 44,2 cm para o Porto de Tubarão (FEMAR, 2000). Segundo Mesquita (1997), o sentido predominante de giro da circulação de maré na região Sudeste é o sentido anticiclônico (anti-horário).

Os ventos são predominantemente do setor Este, com uma significativa influência de Nordeste devido à constante presença de centros de alta pressão sobre o Atlântico Sul; durante o inverno a passagem de frentes frias com ventos de Sul decorre principalmente aos sistemas de

baixa pressão (MELO; GONZALES, 1995). Segundo Sarmiento (1993), a direção dos ventos no período que vai de agosto a maio é predominantemente de NE, com velocidades médias em torno de 5 m/s, provenientes do Oceano Atlântico em função das massas aquecidas Tropical Atlântica e Equatorial. No período que vai de abril a julho a direção do vento predominante é de SE com velocidade média em torno de 4,5 m/s, devido à massa Polar Atlântica.

4.2.2. Definição da Malha Computacional

A implantação do modelo refere-se à colocação do mesmo na área física em estudo. Isso é feito através de uma malha computacional que representa o domínio contínuo em um domínio discreto de pontos que diferenciam água da terra. Para cada ponto da malha correspondente à água é necessário o fornecimento dos valores de profundidade. Os dados de batimetria utilizados para a criação do terreno digital foram cedidos pelo LABESUL, laboratório no qual se realizou o presente trabalho. Estes dados abordam todo o complexo estuarino da ilha de Vitória, e foram gerados através da digitalização da carta náutica 1401 de 8ª edição da Marinha do Brasil e adequação com levantamentos de campo realizados em estudos anteriores.

O domínio adotado para realizar as simulações corresponde a toda a região do sistema estuarino; entretanto o presente estudo abordará apenas a região correspondente à Baía do Espírito Santo. A necessidade de realizar as simulações considerando todo o sistema estuarino deve-se à falta de dados de condição de contorno referentes aos canais que deságuam na baía.

Para criar o domínio, utilizou-se uma malha computacional uniforme com células de 50m x 50m de extensão, sendo 315 células no eixo x, e 300 células no eixo y. A orientação do eixo x da grade foi de 30° em relação ao eixo leste, cuja origem se encontra em (366118,8; 7748747) UTM.

Na Figura 3 está representado o domínio correspondente ao sistema estuarino, dando destaque para a Baía do Espírito Santo.

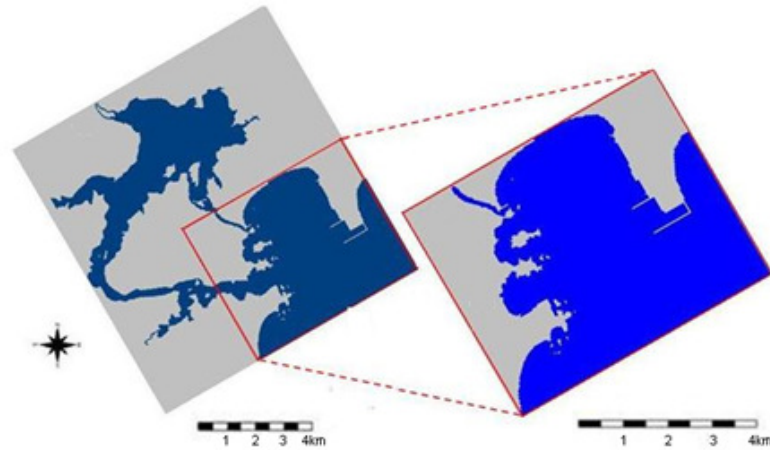


Figura 3: Domínio referente ao sistema estuarino com destaque para a região de interesse (Baía do Espírito Santo).

A área de estudo, em destaque na Figura 3, apresenta um gradiente batimétrico suave, aumentando sua profundidade gradualmente a partir da Praia de Camburi e alcançando até 30m, como observado na Figura 4. Na região interna a baía verifica-se uma profundidade média de 6m, e nos canais de acesso ao Porto de Tubarão e ao Porto de Vitória, as profundidades vão de 12m até 25m.

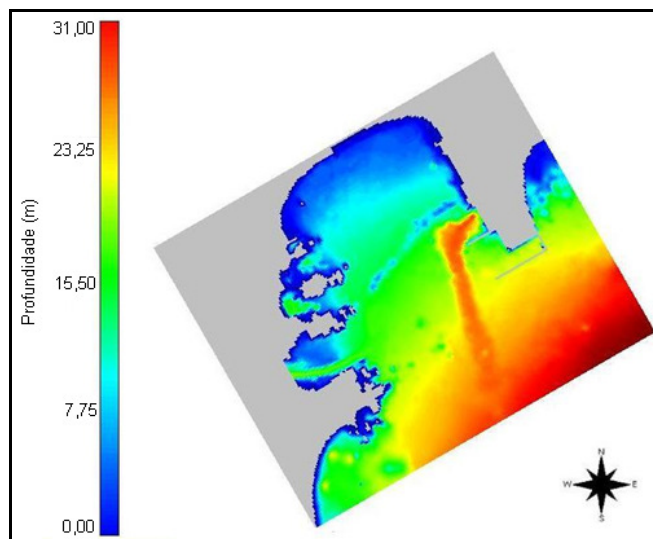


Figura 4: Batimetria da Baía do Espírito Santo.

4.2.3. Implantação do Módulo Hidrodinâmico

A implantação do módulo hidrodinâmico no domínio adotado refere-se ao estabelecimento das condições de contorno. Como pode ser observado na Figura 5, identifica-se a presença de duas fronteiras abertas que forçam a hidrodinâmica do sistema estuarino, a entrada da Baía do Espírito Santo e o rio Santa Maria da Vitória, identificados como C1 e C2 respectivamente. Nesses contornos foram introduzidos dados de maré e vazão. Os dados de maré fornecidos em C1 foram obtidos a partir do Catálogo de Estações Maregráficas da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), que apresenta 25 componentes harmônicas para a estação do Porto de Tubarão. Em C2, o valor de vazão adotado foi de $5\text{m}^3/\text{s}$ (GARÇÃO, 2007), correspondente à contribuição média do rio Santa Maria da Vitória. As vazões dos outros rios contribuintes não foram consideradas.

Inicialmente foi gerado o campo hidrodinâmico de todo o mês de maio com passo temporal de uma hora, a fim de identificar quando ocorreram as marés de quadratura e sizígia. Para tanto, foram registrados os valores de elevação da superfície da água próximo ao Porto de Tubarão através de uma estação de monitoramento (T1). Também foram estabelecidas estações de monitoramento no canal da Passagem (P1 e P2) e no canal que dá acesso à Baía de Vitória (S1 e S2), para comparar as velocidades obtidas com os dados de trabalhos anteriores, validando então o campo hidrodinâmico obtido.

A Figura 5 mostra a localização das estações de monitoramento, e no Quadro 2 estão suas respectivas coordenadas em UTM.

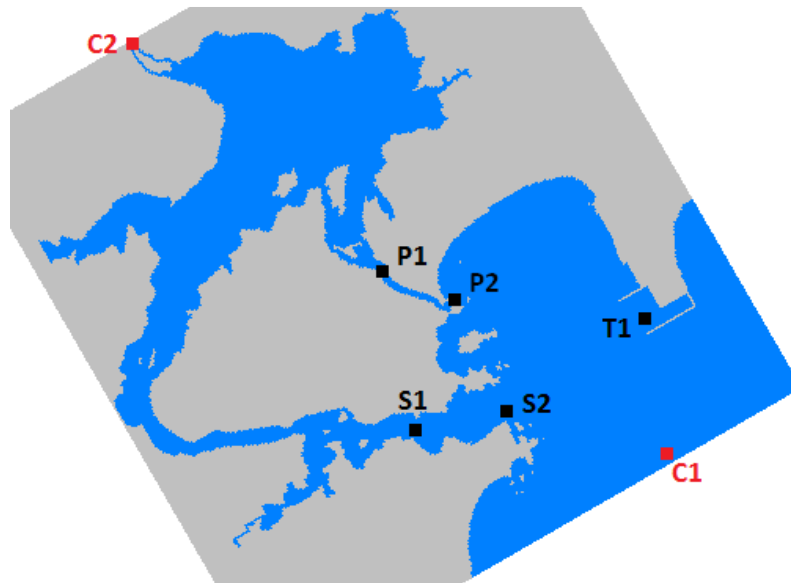


Figura 5: Localização das estações de monitoramento (P1, P2, S1, S2, T1) e das condições de contorno (C1, C2).

Estação	Coordenadas UTM	
	X	Y
P1	363905.1	7756331
P2	365737.6	7755657
S1	365651.9	7752606
S2	367089.4	7752916
T1	369928.5	7755998

QUADRO 2: Coordenadas UTM das estações de monitoramento.

Conhecidos os instantes em que ocorrem a sizígia e quadratura de maré, delimitou-se um intervalo de quatro dias em torno da mínima elevação (4 a 8/mai), e outro em torno da máxima elevação (13 a 17/mai), e para estes intervalos, foram gerados os campos hidrodinâmicos utilizados posteriormente no módulo lagrangiano com uma maior resolução temporal (intervalos de 15 minutos). Isto foi necessário porque optou-se por executar os modelos hidrodinâmico e lagrangiano separadamente, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento, já que desta forma os mesmos dados hidrodinâmicos poderiam ser utilizados em diversas simulações com o modelo lagrangiano.

Foram criados seis cenários com diferentes características meteoro-oceanográficas, considerando como forçantes o vento e a maré. Para cada um dos períodos citados anteriormente foram feitas simulações com e sem vento, a fim de se avaliar a influência do mesmo na hidrodinâmica, e posteriormente na dispersão da pluma de óleo. Nas simulações com vento, foram considerados dois cenários, um de vento com direção NE e outro com direção SE, por serem os de maior ocorrência na região de interesse (SARMENTO, 1993; PIUMBINI, 2009). Em ambos os cenários, adotou-se condições extremas, em que o vento permanece na mesma direção (persistente) e com a mesma intensidade durante toda a simulação. Para a direção NE o módulo do vento foi de 5,0m/s e para a direção SE foi de 4,5 m/s.

O QUADRO 3 resume as características de cada um dos cenários usados no módulo hidrodinâmico.

Maré	Cenário	Vento	
Quadratura (04 a 08/mai)	H1	sem vento	-
	H2	vento NE	5.0 m/s
	H3	vento SE	4.5 m/s
Sizígia (13 a 17/mai)	H4	sem vento	-
	H5	vento NE	5.0 m/s
	H6	vento SE	4.5 m/s

QUADRO 3: Cenários utilizados nas simulações do módulo hidrodinâmico.

Todas as simulações hidrodinâmicas foram realizadas a partir de uma “partida fria” (*cold start*), em que valores de velocidade e elevação são uniformes para todos os pontos de malha do domínio, e com passo de tempo de 5 segundos para um número de Courant de aproximadamente 3,5.

4.2.4. Implantação do Modelo Lagrangiano

O modelo lagrangiano foi utilizado para simular a trajetória do óleo proveniente de derrames hipotéticos na região do Porto de Tubarão, mais especificamente no canal dragado de acesso ao porto. Foram considerados seis pontos de emissão (E1 a E6) ao longo do canal, escolhidos dividindo região em seis polígonos e adotando o centro de cada um deles. As emissões foram do tipo pontual e instantânea, considerando um volume hipotético de 10m³ de óleo Kuwait em cada uma, e representados por 5.000 partículas. Vale ressaltar que como o foco de interesse deste trabalho é o acompanhamento qualitativo da trajetória das partículas, nenhum estudo específico foi considerado para a definição da quantidade de óleo a ser derramada.

O Quadro 4 apresenta as coordenadas dos pontos de emissão e a Figura 6 mostra a localização de cada um deles na BES.

Ponto de emissão	Coordenadas UTM	
	X	Y
E1	369803.8	7756076
E2	369299.0	7755800
E3	369480.0	7755281
E4	369665.7	7754762
E5	369799.1	7754257
E6	369970.5	7753705

QUADRO 4: Localização dos pontos de emissão em coordenadas UTM.

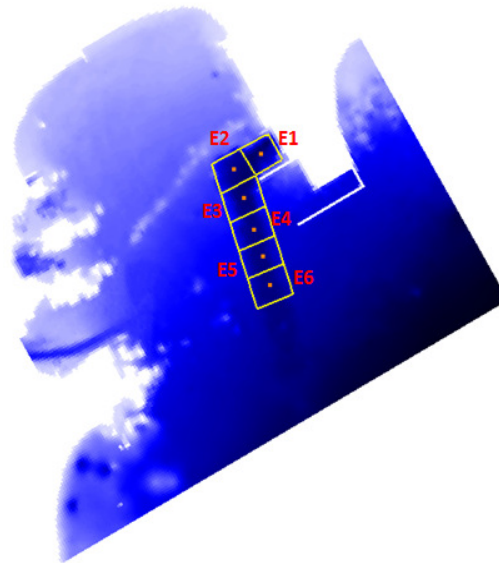


Figura 6: Pontos de emissão utilizados no modelo lagrangiano.

No módulo óleo, foram inseridos alguns dados de propriedades do óleo Kuwait. Estas informações foram obtidas através do modelo de derramamento de óleo ADIOS2, e estão listadas no quadro a seguir.

Propriedades - Óleo Kuwait	
Tipo	Cru
Grau API	30,6
Viscosidade cinemática (cSt)	8,0
Temperatura da viscosidade de referência (°C)	50
Tensão interfacial óleo-água (dyne/cm)	29,1
Ponto de fluidez (°C)	-20

QUADRO 5: Propriedades do óleo considerado nas simulações (Kuwait).
FONTE: Modelo ADIOS2.

A dispersão horizontal das partículas deve-se aos processos de espalhamento e advecção horizontal devido ao vento e à corrente de maré. O coeficiente de deriva do vento adotado foi de 3%.

A partir dos seis cenários criados no módulo hidrodinâmico, foram escolhidos os dias e horários de emissão de acordo com o sentido da maré (enchente ou vazante), gerando um total de 12 cenários para o modelo lagrangiano, como mostra o QUADRO 6.

Maré		Cenário	Vento	
Período	Sentido			
Quadratura	Vazante (05/mai - 0h)	Q1	sem vento	-
		Q2	vento NE	5.0 m/s
		Q3	vento SE	4.5 m/s
	Enchente (06/mai - 21h)	Q4	sem vento	-
		Q5	vento NE	5.0 m/s
		Q6	vento SE	4.5 m/s
Sizígia	Enchente (14/mai - 0h)	Z1	sem vento	-
		Z2	vento NE	5.0 m/s
		Z3	vento SE	4.5 m/s
	Vazante (15/mai - 19h)	Z4	sem vento	-
		Z5	vento NE	5.0 m/s
		Z6	vento SE	4.5 m/s

QUADRO 6: Cenários utilizados nas simulações lagrangianas.

Diferente das simulações da hidrodinâmica, as simulações lagrangianas foram realizadas a partir de uma “partida quente” (*hot start*), realizando a emissão no mínimo 24h após o início do período de simulação do campo hidrodinâmico, o que corresponde a aproximadamente dois ciclos de maré. É importante aguardar pelo menos um ciclo antes do lançamento das partículas para que o modelo hidrodinâmico atinja sua estabilidade numérica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelo Hidrodinâmico

Primeiramente serão apresentados os resultados das simulações sem vento, comparando-os com outros trabalhos realizados para validação do campo hidrodinâmico obtido, e em seguida serão apresentados os resultados das simulações com vento, mostrando sua influência no escoamento da baía.

5.1.1. Validação dos resultados

Os resultados de elevação da superfície livre e de magnitude da velocidade, registrados nas estações de monitoramento mostradas na Figura 5 para todo o mês de maio de 2010, são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

Na Figura 7 é mostrado o resultado da elevação da superfície da água referente ao registro de elevação da estação T1. Uma análise comparativa das características da série temporal obtida com os resultados de estudos anteriores (NASCIMENTO, 2009; VIEIRA, 2007; MENEZES, 2005) verificam que o modelo MOHID reproduziu o comportamento da maré da região. A elevação da superfície da água mostra duas oscilações por dia, quadraturas e sizígias espaçadas por um período de aproximadamente 15 dias, duas quadraturas e duas sizígias, elevação máxima próximo a 0,8m na preamar de sizígia e 0,2m na preamar de quadratura. A altura da onda de maré atinge aproximadamente 1,45m na sizígia e 0,4m na quadratura.

O período de tempo da simulação dos cenários para a hidrodinâmica e a trajetória do óleo derramado é escolhido considerando as menores velocidades que ocorrem durante o período próximo da quadratura e as maiores velocidades que ocorrem durante o período próximo da sizígia. O retângulo em amarelo indica o período adotado próximo à maré de quadratura

(cenários H1, H2 e H3) e o retângulo em vermelho indica o período próximo à maré de sizígia (cenários H4, H5 e H6). Os tempos de simulação destacados correspondem aos dias 4/mai (259.200s), 8/mai (604.800s), 13/mai (1.036.800s) e 17/mai (1.382.400s). Também estão sinalizados os momentos em que iniciaram as emissões realizadas no modelo lagrangiano.

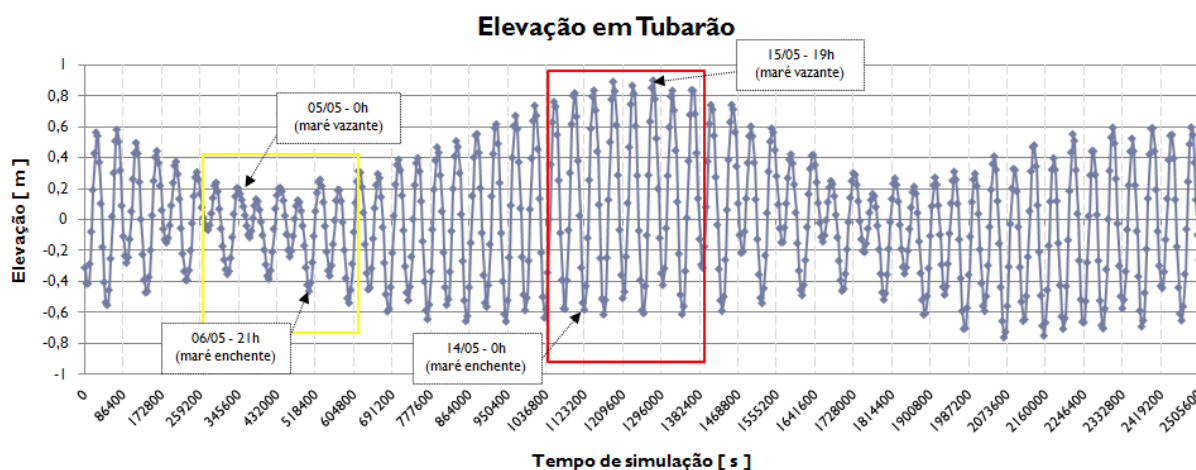


Figura 7: Elevação registrada na estação de monitoramento T1 para o mês de maio. Em destaque de amarelo o período adotado na maré de quadratura e em vermelho na maré de sizígia. As setas indicam o início dos cenários utilizados no modelo lagrangiano.

Nas Figuras 8 e 9 são mostradas respectivamente as séries temporais das velocidades simuladas no canal da Passagem (P2) e no canal de acesso ao Porto de Vitória (S1). A análise desses registros mostra resultados similares a estudos anteriores. Com a utilização de correntógrafos, Vieira (2007) registrou velocidades máximas na entrada do canal da Passagem em torno de 0,45 m/s e mínimas de 0,1 m/s nas vazantes de sizígia e quadratura respectivamente, e MENEZES (2005) registrou para o canal de acesso ao Porto de Vitória velocidades máximas em torno de 0,5m/s e na vazante e 0,35m/s na enchente, ambas registradas próximo a ocorrência da sizígia.

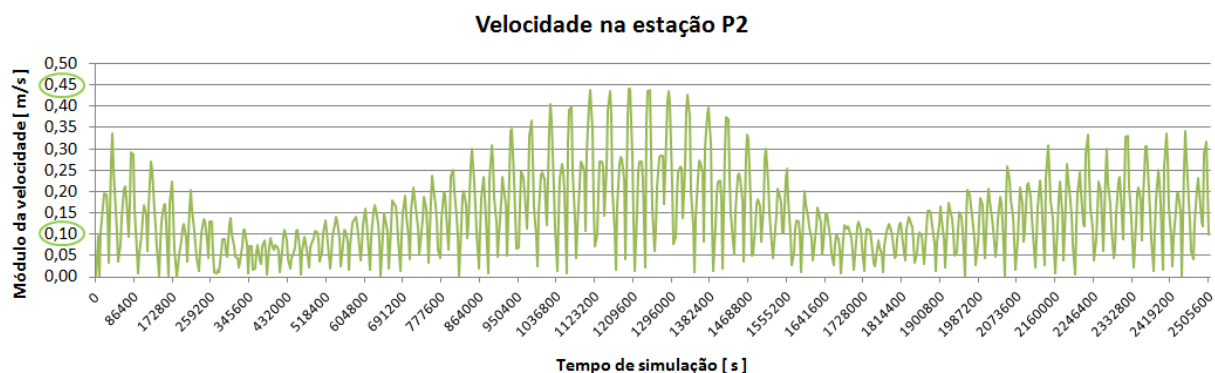


Figura 8: Registro do módulo da velocidade na estação P2.

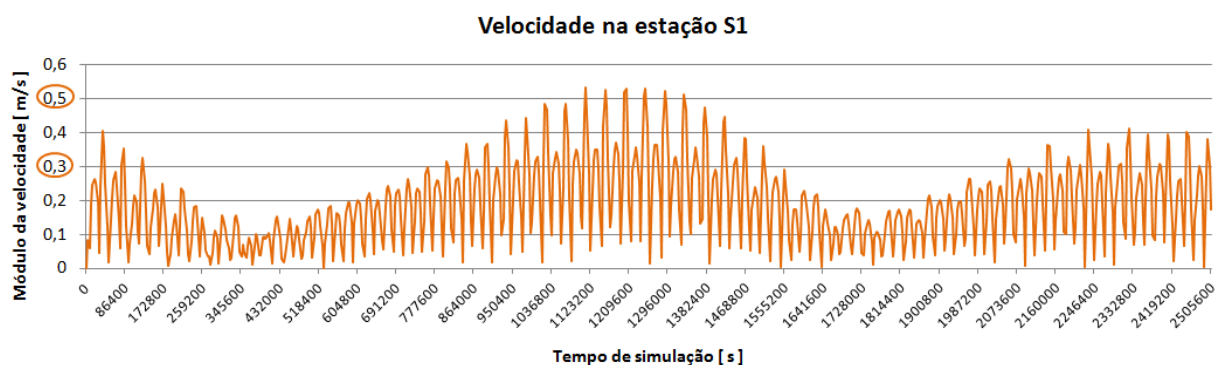


Figura 9: Registro do módulo da velocidade na estação S1.

Apenas na estação P1, localizada no estreitamento do canal da Passagem, as velocidades obtidas não apresentaram a mesma magnitude observada em outros estudos, de aproximadamente 0,9m/s (NASCIMENTO, 2009). A velocidade máxima obtida através do modelo hidrodinâmico foi de 0,5m/s, que pode ser explicada pela resolução espacial da malha computacional adotada, que não representou bem o local. Na região do estreitamento, o canal tem aproximadamente 37m de largura, entretanto esta região foi representada por uma célula de 50m.

Com relação ao campo de escoamento obtido através do modelo hidrodinâmico para a Baía do Espírito Santo, também foi possível observar um comportamento semelhante ao descrito em outros trabalhos que consideraram como única forçante a maré astronômica (GAZE,

2009; MENEZES, 2005; CASTRO, 2001). Na Figura 10 é mostrado um instante típico de vazante que ocorre na sizígia. Como pode ser observado, existe um jato associado a cada canal (J1 e J2), regiões praticamente estagnadas (H1, H2 e H3), e a ocorrência de maiores velocidades associados ao baixio (V1) e na extremidade do píer da ponta de Tubarão (V2). Na mesma figura é observado que no canal de acesso ao Porto de Vitória ocorrem as maiores velocidades sobre a região dragada.

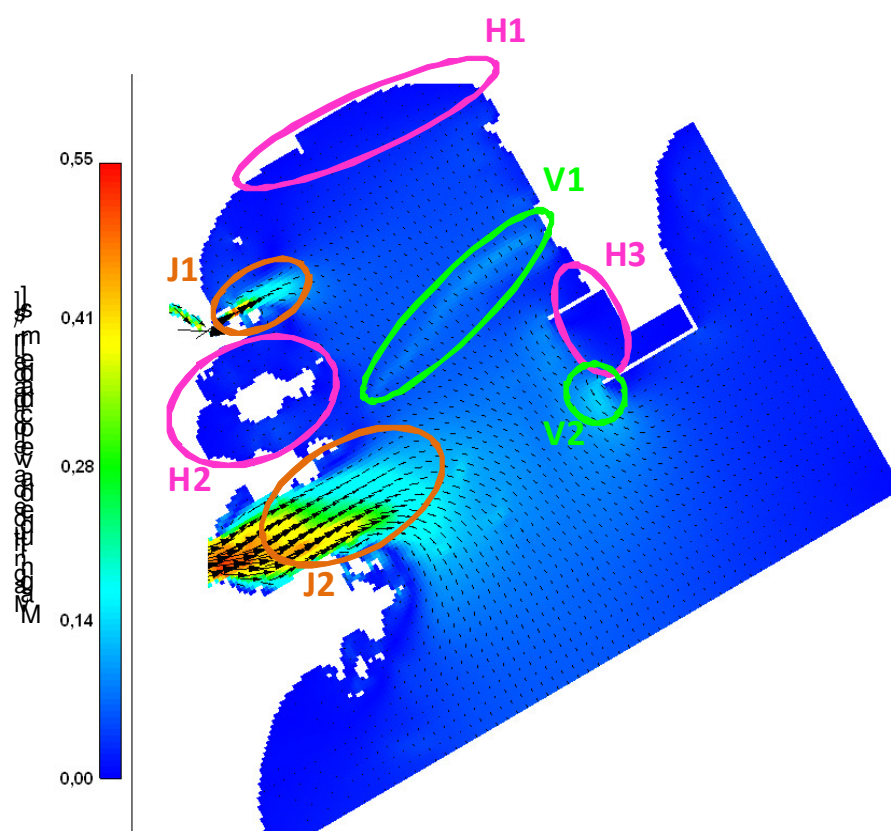


Figura 10: Campo de escoamento da Baía do Espírito Santo na máxima vazante do período de sizígia. J1 e J2 – jatos associados aos canais; H1, H2 e H3 – regiões estagnadas; V1 e V2- aumento da velocidade.

Na Figura 11 é mostrada a presença de vórtices associados aos jatos (V1) e a ponta do píer de Tubarão (V2), ocasionados pelo cisalhamento do jato com seu entorno, que apresenta menores velocidades, e do escoamento junto à estrutura respectivamente.

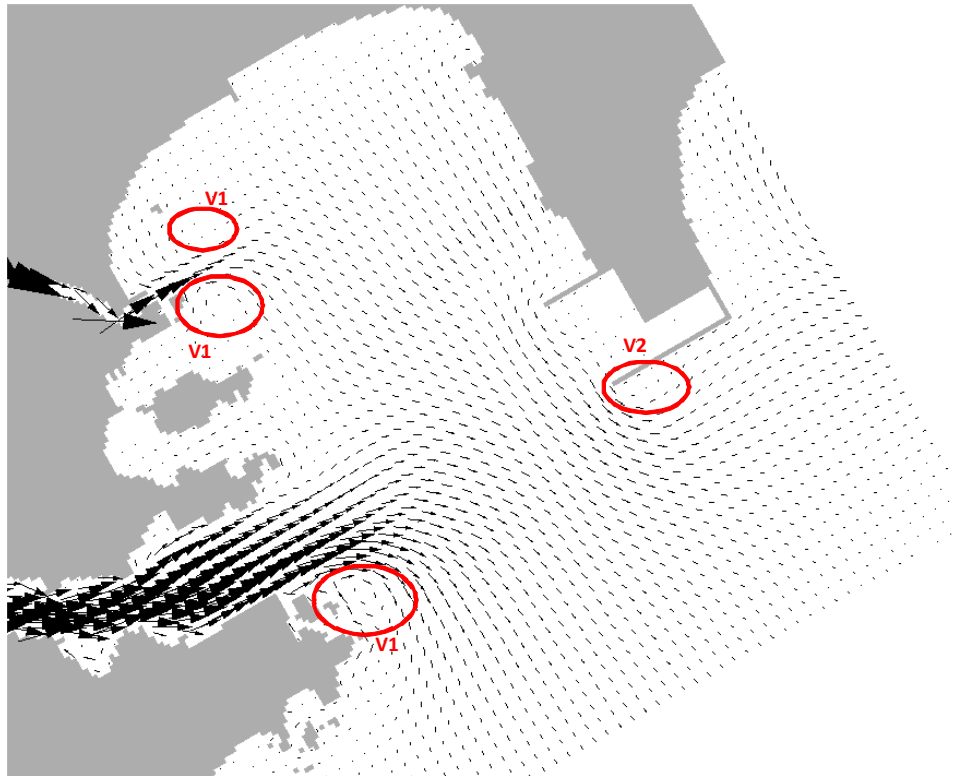


Figura 11: Campo de velocidades com destaque para a formação de vórtices nos canais (V1) e na ponta do píer do Porto de Tubarão (V2).

5.1.2. Resultados com vento

Com base nos resultados das simulações com vento, pode-se observar que houve uma maior modificação do comportamento hidrodinâmico para os cenários com maré de quadratura, enquanto que para os cenários com maré de sizígia as modificações se limitam a mudança na magnitude da velocidade.

Na Figura 12 estão representados os campos de velocidade típicos de maré de sizígia com atuação dos ventos SE (Figura 12-A) e NE (Figura 12-B). Uma análise comparativa entre as Figuras 10, 12-A e 12-B mostra que a ação do vento não provocou mudanças significativas na hidrodinâmica da região, apenas um leve aumento na magnitude das velocidades na porção central da baía, e no caso de vento NE, um aumento mais intenso na região circulada.

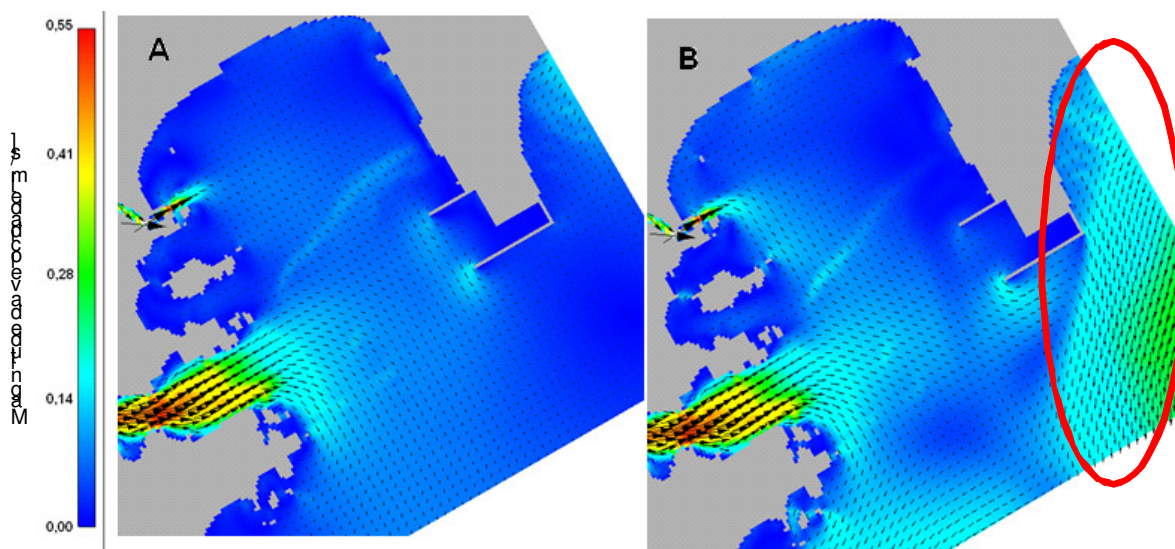


Figura 12: Campo hidrodinâmico com maré de sizígia: A- vento SE; B- vento NE.

Nos resultados com maré de quadratura, no entanto, a presença do vento constante e persistente gerou várias alterações na hidrodinâmica local, como pode ser visto comparando a Figura 13, que mostra o campo hidrodinâmico de maré de quadratura sem a ação do vento, e as Figuras 14-A e 14-B, que mostram a hidrodinâmica induzida pelos ventos SE e NE respectivamente. Nas regiões circuladas de vermelho observa-se a formação de vórtices após aproximadamente 6 horas de vento constante. Estes vórtices permanecem durante os próximos três dias de simulação, ocorrendo apenas um deslocando pequeno do seu ponto central em torno da região, possivelmente ocasionado pela variação da maré de enchente e vazante. Na Figura 14-A o extremo oeste da Praia de Camburi também está destacado, circulado de preto e sinalizado pelo número 1, mostrando a mudança que ocorre no escoamento do canal da Passagem, que está acompanhando a linha de costa ao invés de formar um jato na mesma direção que o canal desemboca na baía.

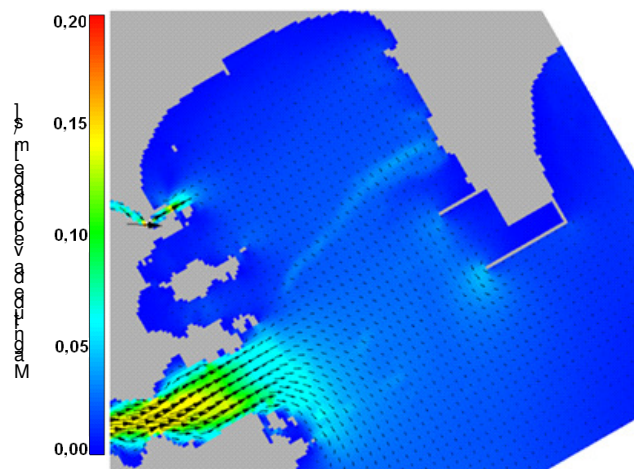


Figura 13: Campo hidrodinâmico na maré de quadratura sem vento.

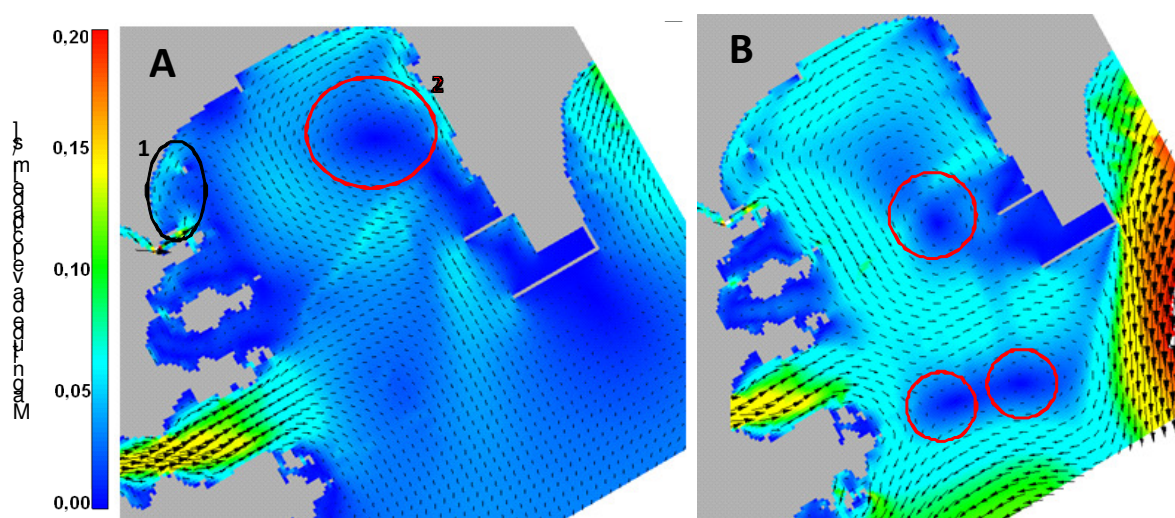


Figura 14: Influência do vento no campo hidrodinâmico com maré de quadratura:
A- vento SE; B- vento NE. Formação de vórtices nas regiões circulasdas de vermelho (2) e mudança no fluxo do canal da Passagem em preto (1).

5.2. Modelo Lagrangiano

Os resultados apresentados nas seções seguintes visam mostrar a influência das condições meteorológico-oceanográficas do instante de lançamento na disposição final da pluma de óleo. Para um melhor entendimento, os resultados serão divididos naqueles provenientes das simulações sem vento, das simulações com vento NE e das simulações com vento SE.

5.2.1. Simulações sem vento

Os cenários das simulações sem vento são descritos novamente no quadro a seguir:

Cenário	Maré	
	Período	Sentido
Q1	Quadratura	Vazante
Q4		Enchente
Z1	Sizígia	Enchente
Z4		Vazante

QUADRO 7: Cenários para as simulações sem vento.

As simulações sem vento foram realizadas para verificar o comportamento das partículas tendo como forçante apenas a corrente de maré, uma vez que o vento atua como principal forçante no deslocamento da pluma de óleo quando presente.

De maneira geral, foi possível verificar a movimentação das partículas de acordo com o sentido da corrente de maré. Entretanto, como o deslocamento médio por período de maré é pequeno, e devido à constante inversão de sentido das correntes, aproximadamente a cada 6 horas, as partículas acabam voltando praticamente para o mesmo lugar, sendo o deslocamento real da pluma com relação ao ponto de emissão muito pequeno e causado basicamente pela

dispersão natural. Isto pode ser observado na Figura 15, que mostra a pluma de óleo 29h depois do derrame, ainda muito próxima do ponto de emissão, sinalizado na figura.

Na Figura 15 é mostrada também a influência do sentido da corrente de maré no instante do lançamento para o destino final da pluma. Os resultados são mostrados 29 horas após a emissão e correspondem à emissão no ponto E5 durante a maré de sizígia. Entretanto no resultado da Figura 15-A a maré inicial é de enchente (cenário Z1), enquanto que na Figura 15-B a maré inicial é de vazante (cenário Z4), o que provocou um deslocamento da maior parte da pluma para fora da baía.

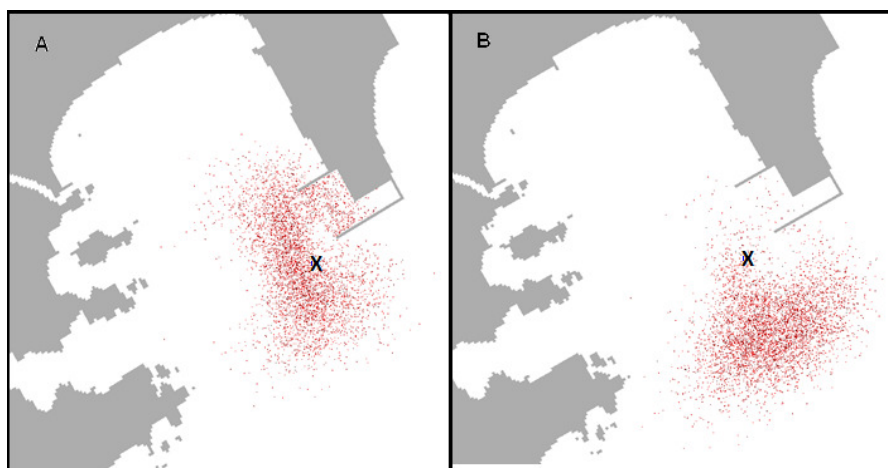


Figura 15: Diferença na disposição da pluma 29h depois do derrame: A- lançamento com maré enchente; B- lançamento com maré vazante. O ponto em destaque representa o local do lançamento.

Comparando os resultados obtidos com os cenários com maré de sizígia (Z1 e Z4) com os cenários com maré de quadratura (Q1 e Q4), pode-se observar que independente do ponto de emissão as partículas conseguem se dispersar mais sob maré de sizígia, devido às maiores velocidades de corrente. Enquanto que, sob maré de quadratura a pluma permanece basicamente com o formato circular. A Figura 16 ilustra um exemplo dessa comparação, mostrando a diferença na disposição da pluma 29h após o derrame em E4, para os cenários

Q1 (Figura 16-A) e Z4 (Figura 16-B). Em ambos os cenários o lançamento ocorre durante a maré vazante, entretanto, como na Figura 16-B o lançamento foi sob maré de sizígia, a pluma dispersou mais, ocupando uma área muito maior.

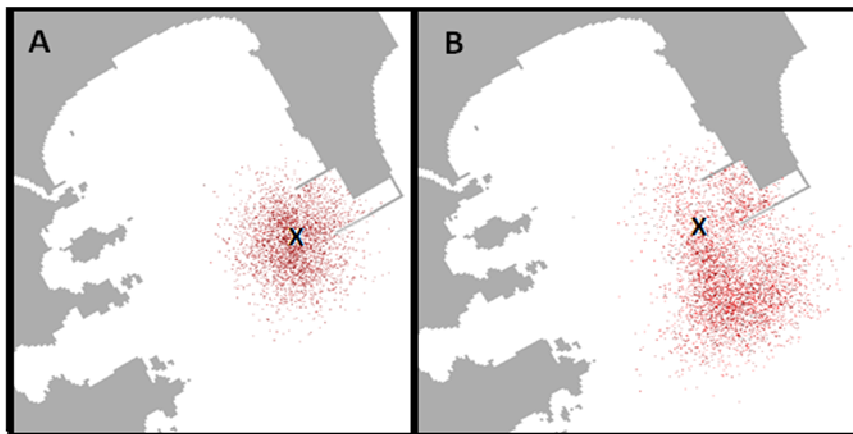


Figura 16:Diferença na disposição da pluma 29h depois do derrame no ponto em destaque. Lançamento com maré vazante: A- maré de quadratura; B- maré de sizígia.

Além da maré, outro fator que se mostrou importante, influenciando o formato da pluma, foi o jato proveniente do canal de acesso ao Porto de Vitória. No instante em que as correntes de vazante são mais intensas a pluma é forçada em direção ao Porto de Tubarão, como mostrado na Figura 17. Na Figura 17-A é apresentada a situação da pluma 32h após o derrame, antes da vazante, e a Figura 17-B representa a pluma 6 horas depois (38h após o derrame), quando a corrente de maré no canal está no estágio final da vazante. Estes resultados são referentes à simulação com o cenário Z1.

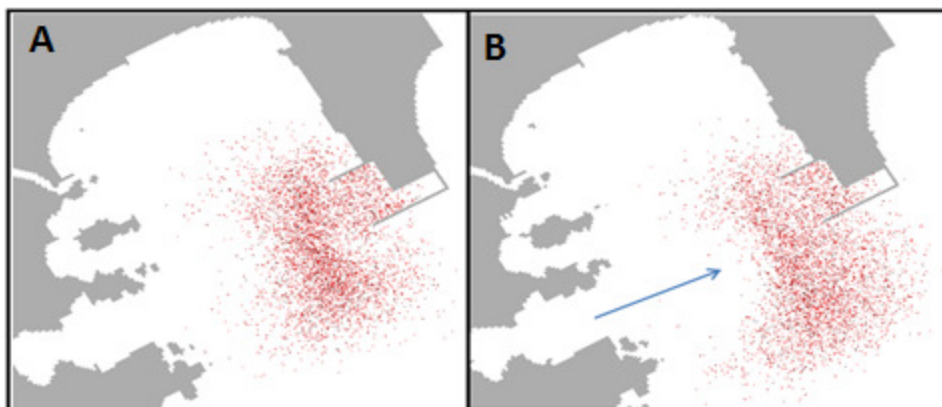


Figura 17: Influência do jato proveniente do canal de acesso ao Porto de Vitória na dispersão das partículas: A- pluma 32h após o derrame, antes da intensificação do jato; B- pluma 38h após o derrame, com a atuação do jato.

As simulações com os cenários Q1 e Z1 foram realizadas para 3 dias, e pode-se observar que mesmo para o cenário Z1, que apresenta maiores velocidades por ocorrer durante a maré de sizígia, o movimento advectivo não se mostra muito atuante, já que a pluma permanece próxima ao ponto de emissão. Com isso o tempo de residência da pluma na baía torna-se maior, e ela se espalha mais, atingindo até mesmo o interior do canal de acesso ao Porto de Vitória, no caso da emissão no ponto E6 (ver Figura 18-E6).

Outra observação importante é a baixa hidrodinâmica no Porto de Tubarão, citada na seção 5.1.1. Esta característica influenciou a dispersão da pluma para a maioria dos pontos de emissão, conservando uma considerável porção em seu interior, mesmo após 3 dias.

A Figura 18 apresenta uma comparação do destino da pluma após 3 dias do derrame, para cada ponto de lançamento (E1 a E6). Nota-se que a pluma se espalha por uma área considerável da baía em todos os casos, e que ocorre uma grande concentração de óleo próximo aos píers do Porto de Tubarão nos casos de lançamento em E1, E2, E3 e E4. Estes resultados são referentes ao cenário Z1.



Figura 18: Distribuição das partículas 3 dias após o lançamento, para cada um dos pontos de emissão (E1 a E6). Simulação sem vento com lançamento na sizígia, com corrente e no período de sizígia.

5.2.2. Simulações com vento NE

Os cenários das simulações com vento NE são descritos novamente no quadro a seguir:

Cenário	Maré	
	Período	Sentido
Q2	Quadratura	Vazante
Q5		Enchente
Z2	Sizígia	Enchente
Z5		Vazante

QUADRO 8: Cenários das simulações com vento NE.

As simulações realizadas com vento NE foram as que apresentaram os resultados mais diversificados, variando o comportamento da pluma de acordo com o cenário e o ponto de lançamento; e os maiores impactos, atingindo diversas regiões do entorno da Baía do Espírito

Santo. Assim, optou-se por concentrar a apresentação dos resultados nesta seção, mostrando uma comparação do comportamento da pluma nos quatro cenários, e para cada um dos pontos de emissão considerados.

As Figuras 19 a 24 mostram a situação da pluma de óleo 6 horas após o derrame em cada um dos cenários, para os pontos de lançamento E1 a E6 respectivamente. Em todas as figuras é possível observar a atuação da maré atrasando ou contribuindo com a movimentação da pluma, caso seja maré enchente ou vazante (representada pela seta), e uma maior abertura da pluma nos cenários de maré de sizígia (Z2 e Z5) do que nos cenários de maré de quadratura (Q2 e Q5), com as partículas um pouco mais dispersas. Observa-se que na maioria dos resultados a seguir a pluma já está atingindo alguma região da costa.

É válido destacar também os resultados mostrados nas Figuras 23-Z5 e 24-Z5, nos quais praticamente toda a pluma sai da Baía do Espírito Santo, seguindo a direção sudoeste até atingir a Praia da Costa, localizada no município de Vila Velha.

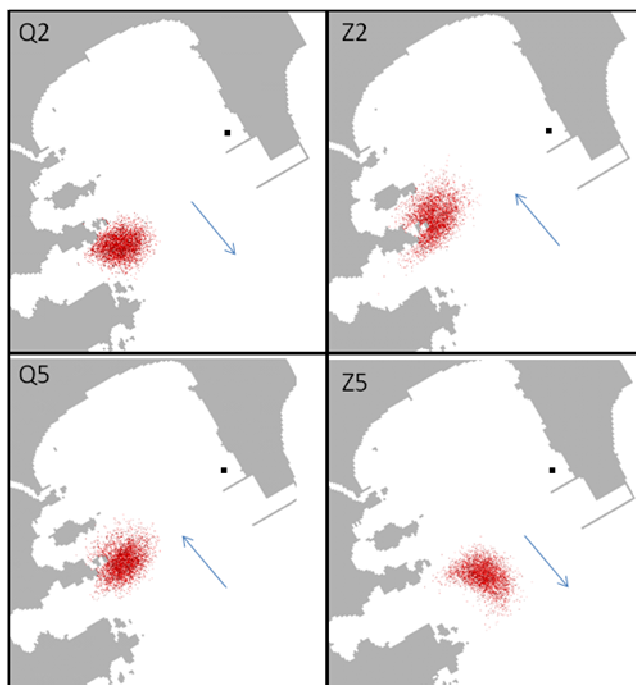


Figura 19: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E1: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

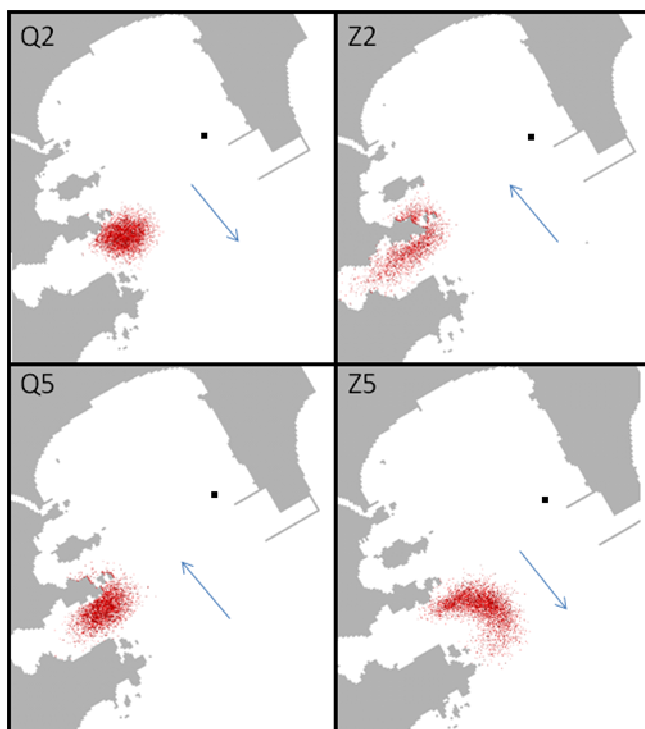


Figura 20: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E2: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

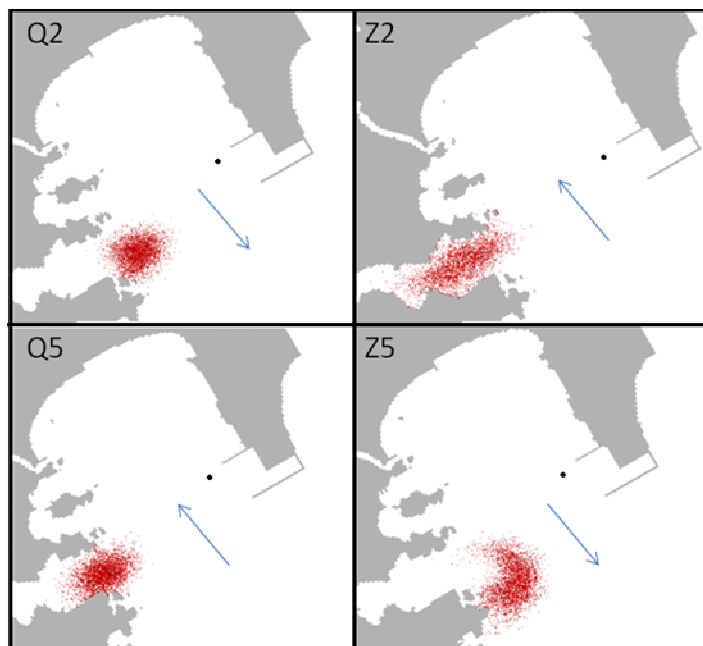


Figura 21: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E3: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

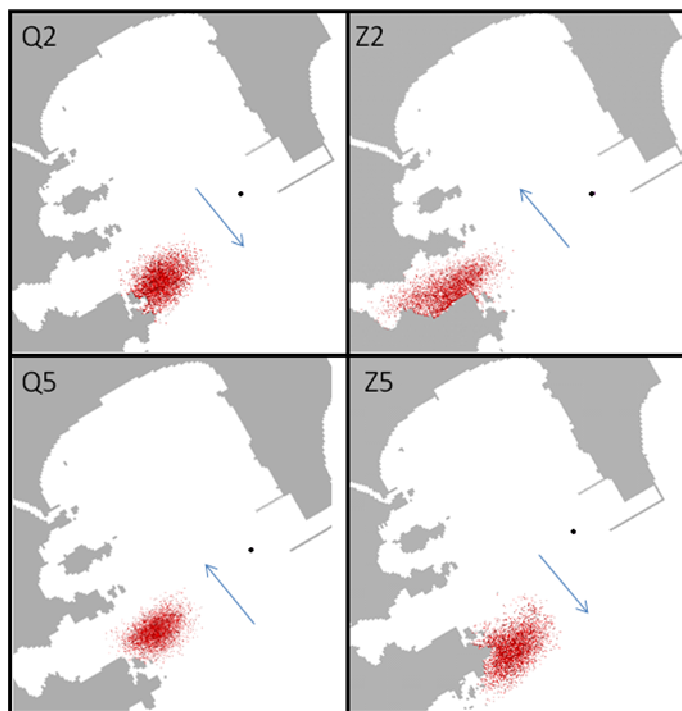


Figura 22: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E4: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

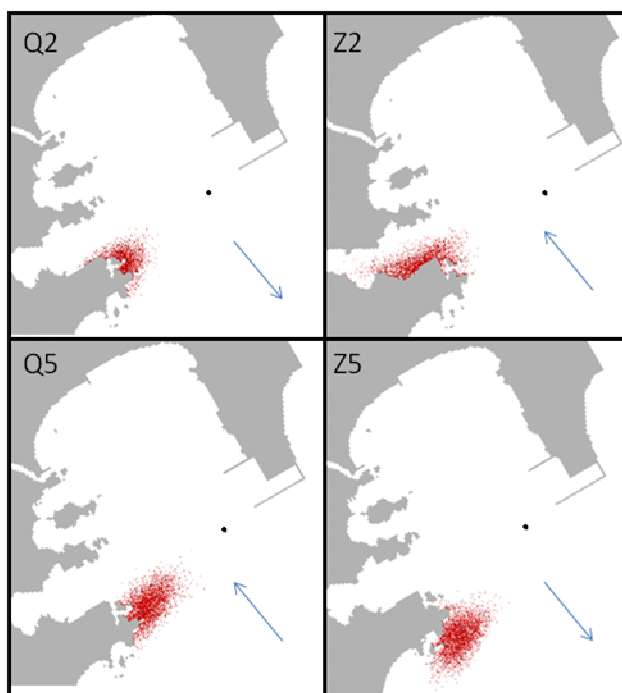


Figura 23: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E5: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

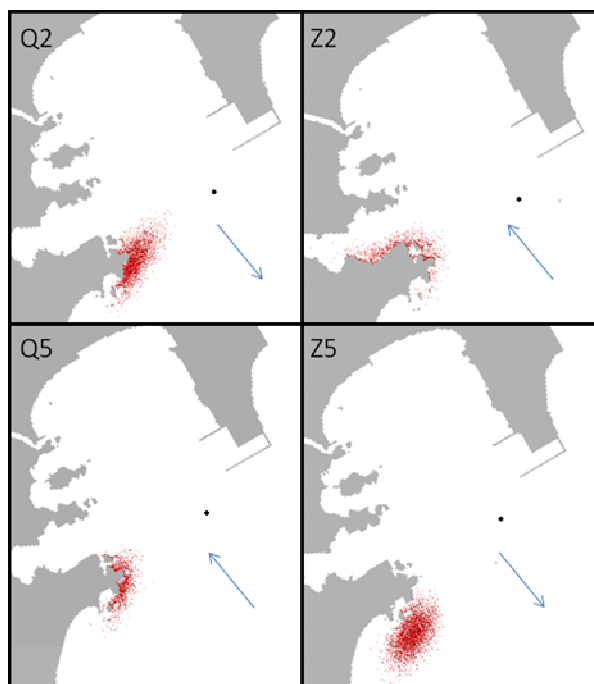


Figura 24: Comparação entre os resultados obtidos para cada um dos cenários 6h após o lançamento em E1: Q2- quadratura, vazante; Q5- quadratura, enchente; Z2- sizígia, enchente; Z5- sizígia, vazante. As setas indicam o sentido da maré.

5.2.3. Simulações com vento SE

Os cenários das simulações sem vento são descritos novamente no quadro a seguir:

Cenário	Maré	
	Período	Sentido
Q3	Quadratura	Vazante
Q6		Enchente
Z3	Sizígia	Enchente
Z6		Vazante

QUADRO 9: Cenários das simulações com vento SE.

Nos resultados das simulações com vento SE não houve uma variação significativa do comportamento da pluma em relação aos cenários (Q3, Q6, Z3 e Z6) e aos pontos de lançamento avaliados. O transporte da pluma é dominado pela ação do vento, que a leva em

direção à Praia de Camburi, e em poucas horas toda a pluma já se encontra aderida à costa. Como esse deslocamento é muito rápido, e a pluma é levada mais para o interior da baía, onde a hidrodinâmica é mais baixa, a pluma não se dispersa muito como nos cenários sem vento, mantendo o formato circular e com as partículas bem concentradas.

A Figura 25 compara os resultados apresentados pelos quatro cenários adotados com vento SE para o mesmo instante de tempo, 4 horas após a emissão, onde é possível verificar que as diferenças são bem sutis.

Comparando o cenário Q3 com o cenário Q6, e o Z3 com o Z6, observa-se apenas um atraso no deslocamento da pluma, que pode ser explicado pelo sentido da maré no momento da emissão. Nos cenários Q3 e Z6 a maré, por ser vazante, atua contra o movimento forçado pelo vento, enquanto que nos cenários Q6 e Z3 ela atua ajudando o deslocamento em direção à praia.

Comparando agora os cenários Q3 e Q6 com os cenários Z3 e Z6, pode-se observar uma diferença com relação à abertura da pluma. Sob maré de sizígia (Z3 e Z6) as partículas se dispersaram um pouco mais, comportamento explicado mais uma vez devido às maiores velocidades, quando comparado com a maré de quadratura.

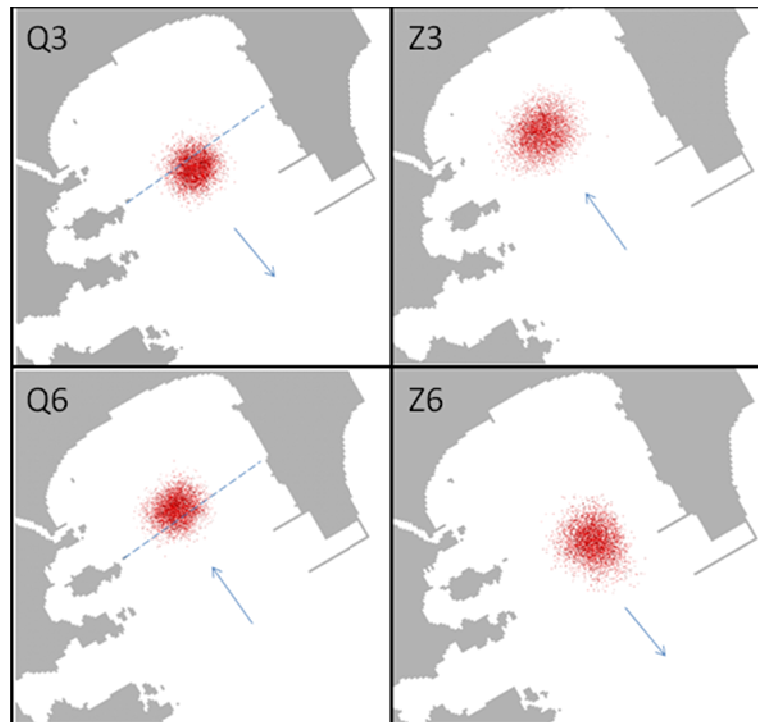


Figura 25: Comparação entre os cenários Q3, Q6, Z3 e Z6. As setas indicam o sentido da maré (enchente/vazante) no momento da emissão.

5.2.4. Regiões atingidas

Um dos resultados de grande interesse ao se aplicar modelos numéricos é a previsão dos possíveis destinos da pluma de óleo e o tempo que demora em atingir a linha de costa, contribuindo assim para o planejamento de ações de contenção. Diante disso, foi feito um levantamento das regiões atingidas nas simulações realizadas neste estudo. Foram considerados aqui apenas os cenários com vento, já que são os casos em que a pluma se move diretamente para uma região.

Com base nos resultados obtidos das simulações com vento, a região da Baía do Espírito Santo foi dividida em algumas áreas, destacadas na Figura 26, para melhor visualização dos impactos gerados em cada cenário. As simulações sem vento não foram consideradas neste

mapeamento, uma vez que a pluma não se deslocou para uma região específica, permanecendo próxima do ponto lançamento e se espalhando por toda a baía.

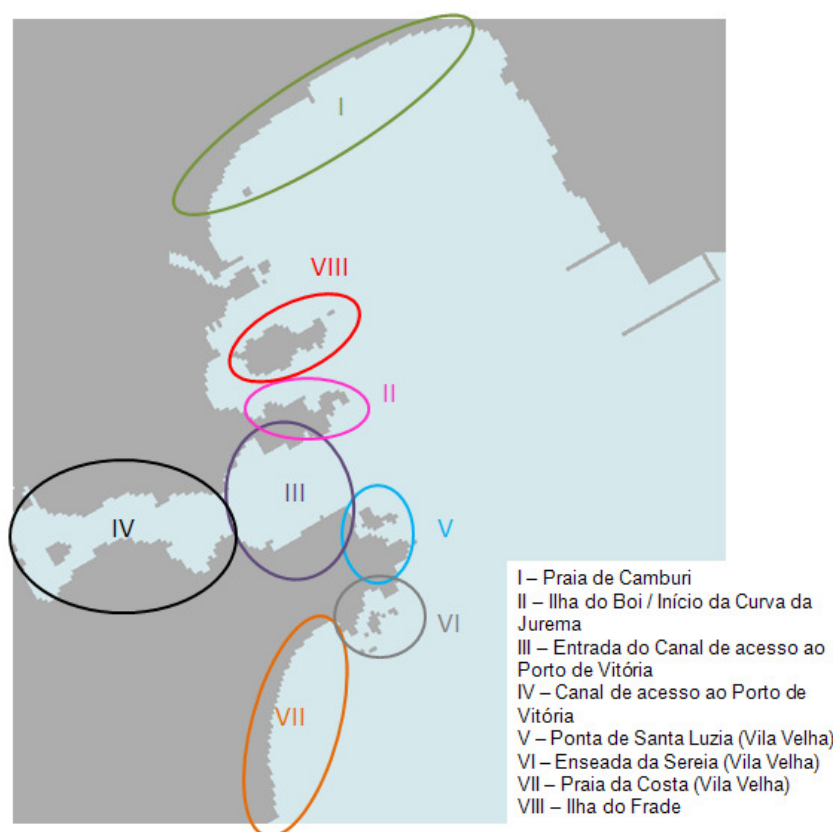


Figura 26: Regiões atingidas pela pluma de óleo de acordo com os resultados das simulações com vento NE e SE.

Os Quadros 10 e 11 resumem o que foi observado em cada uma das simulações realizadas com vento, relacionando o cenário (condições da maré e vento) e o ponto de lançamento. Em alguns casos o tempo gasto para atingir a costa está descrito como um intervalo, devido à resolução temporal adotada para os arquivos de saída (*outputs*), que foi de 1 hora.

É importante ressaltar que os valores de tempo aqui apresentados representam um limite inferior, pois resultaram de considerações extremas, que são: vento na mesma direção (persistente) e com a mesma intensidade durante toda a simulação.

VENTO NE				
Maré		Ponto	Tempo para atingir a costa	Região da costa atingida
Período	Sentido			
Quadratura	Vazante	E1	7h	II, V, III, IV
		E2	5h	II, V, III, IV
		E3	6h	V, III, IV
		E4	6h - 7h	V, III
		E5	5h	V, VI
		E6	5h - 6h	V, VI, VII
	Enchente	E1	5h - 6h	II, III, V
		E2	4h	II, III, V
		E3	5h	II, III, V
		E4	5h	V, III
		E5	4h - 5h	V, III, VI, VI
		E6	4h	V, VI, VII
Sizígia	Enchente	E1	5h	II, VII, III, IV, VI
		E2	4h	II, III, IV, V
		E3	4h	II, III, IV, V
		E4	5h	V, III, IV
		E5	4h - 5h	V, III, IV
		E6	4h	V, III, VI, VII
	Vazante	E1	8h	V, III, IV
		E2	6h - 7h	V, III, IV
		E3	7h	V, III, V, IV, VII
		E4	5h	V, VI, III, VII
		E5	5h	V, VI, VII
		E6	5h	VI, VII

QUADRO 10: Resultados obtidos nas simulações com vento NE.

VENTO SE				
Maré		Ponto	Tempo para atingir a costa	Região da costa atingida
Período	Sentido			
Quadratura	Vazante	E1	5h	I
		E2	5h - 6h	I
		E3	7h	I
		E4	8h	I
		E5	9h	I
		E6	10h	I
	Enchente	E1	4h - 5h	I
		E2	5h	I
		E3	6h	I
		E4	7h - 8h	I
		E5	8h - 9h	I
		E6	9h - 10h	I
Sizigia	Enchente	E1	4h	I
		E2	4h - 5h	I
		E3	5h - 6h	I
		E4	6h - 7h	I
		E5	7h	I
		E6	8h	I
	Vazante	E1	5h - 6h	I
		E2	6h	I
		E3	7h	I
		E4	8h	I
		E5	9h	I
		E6	11h - 12h	I

QUADRO 11: Resultados obtidos nas simulações com vento SE.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo teve por objetivo avaliar a dispersão de óleo na Baía do Espírito Santo utilizando como ferramenta o modelo numérico MOHID 2D. Para tanto, aplicou-se primeiramente o modelo hidrodinâmico para gerar o campo de escoamento da área de estudo, e em seguida utilizou-se do modelo lagrangiano para a simulação da dispersão de óleo frente a diversos cenários.

Com relação à modelagem hidrodinâmica, comparações realizadas com estudos anteriores ratificaram os resultados obtidos, mostrando que o modelo em questão conseguiu simular satisfatoriamente a hidrodinâmica local induzida pela maré. Pode-se observar algumas características do campo de escoamento da baía, como a formação de vórtices próximo ao píer do Porto de Tubarão e na entrada dos canais que desembocam na baía.

A partir dos resultados obtidos pelo modelo lagrangiano simulando diferentes cenários pode-se observar como as condições de maré e vento no instante do lançamento influenciam na dispersão e no destino final da pluma. Como observado em estudos anteriores, na presença de vento, este se mostrou dominante no transporte da pluma, atuando de forma decisiva no seu direcionamento, levando-a a atingir a costa poucas horas após a emissão. Para os casos de vento NE considerados, a pluma atingiu a região costeira no intervalo de 4 a 8h após o derrame, enquanto que para ventos SE, este intervalo chega a 12h após o derrame.

Concluiu-se também que para qualquer um dos pontos de lançamento considerados, a região costeira é afetada em poucas horas, necessitando assim de uma ação de resposta rápida a possíveis acidentes na região.

7. RECOMENDAÇÕES

A seguir são indicadas sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Realizar simulações utilizando série histórica de dados de vento da região
- ✓ Utilizar uma malha mais refinada na área de estudo a fim de ter um maior detalhamento dos resultados.
- ✓ Incluir os demais processos de intemperismo do óleo disponíveis no modelo.

8. REFERÊNCIAS

ASA, Applied Science Associate. **OILMAP - Oil Spill Model Assessment Package**. Disponível em: <<http://www.asascience.com/software/oilmap/index.shtml>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

BRITO, D. A. C. **Integração de detecção remota, dados in-situ e modelos numéricos no estudo do transporte de sedimentos coesivos no estuário do Tejo**. Trabalho final de curso. Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2005.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Intemperismo do Óleo**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/oleo/intemperismo.asp>>. Acesso em: 28 jun. 2010.

CHACALTANA, T.S.A., 2007: **Mapeamento de áreas de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo na Baía de Vitória, ES**. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. 2007.

ESPÍRITO SANTO, Portal do Governo do Estado do. **Petróleo**. Disponível em: <http://www.es.gov.br/site/espírito_santo/petroleo_gas.aspx>. Acesso em: 13 jun. 2010

FAY, J. A.. **The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea**. Oil on the sea Plenum, New York, 1969.

FEMAR. **Catálogo de estações maregráficas brasileiras**. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro. 2000. Disponível em: <<http://www.femar.com.br/biblioteca/emb/indice.html#espíritosanto>>. Acesso em: 1 nov 2008. CHACALTANA, 2007

FERNANDES, R. M. **Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos**. Trabalho de final de curso (Licenciatura em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2001.

FERREIRA, J. P. **Análise de estratégias de resposta a derramamento de óleo pesado no litoral do Espírito Santo utilizando modelagem computacional**. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2006.

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

FOLHA VITÓRIA. **Estado deverá atingir de 15 a 20% da produção nacional de petróleo em 2011**. Vitória, 1 jun. 2010. Disponível em: <<http://www.folhavitória.com.br/economia/noticia/2010/06/estado-devera-atingir-de-15-a-20-da-producao-nacional-de-petroleo-em-2011.html>>. Acesso em: 11 jun. 2010.

FOLHA UOL. **Governo dos EUA já gastou US\$ 140 mil no golfo do México**, 11 jun. 2010. Disponível em < <http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/749680-governo-dos-eua-ja-gastou-us-140-mi-no-golfo-do-mexico.shtml>>. Acesso em 13 jun. 2010.

FONTANA, A. R. **Análise da trajetória da pluma de derrames de petróleo e derivados na região de fundeadoiro das baías de Vitória e do Espírito Santo para proteção das áreas ambientais sensíveis**. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2003.

G1: Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia-e-negocios/noticia/2010/07/mare-negra-no-golfo-de-mexico-ja-custou-us-312-bilhoes-a-bp.html>>. Acesso em: 06 jul. 2010.

GARÇÃO, H. F. **Estudo da hidrodinâmica e da distribuição de salinidade na baía de vitória através de modelagem computacional**. Monografia (Graduação em Oceanografia), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2007.

GÁS BRASIL: **ES marca história mundial da exploração do petróleo**. Disponível em: <<http://www.gasbrasil.com.br/noticia/noticia.asp?NotCodNot=28479>>. Acesso em 26 out. 2008.

GAZE, F. N. **Aplicação do método do Kernel de densidade na modelagem lagrangiana da trajetória e evaporação de mancha de óleo em águas rasas**. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2009.

GAZETA, A. **Tubarão: 44 anos e mais produtivo do que nunca**, 3 abr. 2010. Disponível em: <http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2010/04/620760-tubarao+44+anos+e+mais+produtivo+do+que+nunca.html>. Acesso em: 13 jun. 2010.

GLOBO, O. **Óleo ameaça as Bahamas e governo americano dobra estimativa da quantidade de petróleo que já vazou**. 11 jun. 2010. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/ciencia/mat/2010/06/11/oleo-ameaca-as-bahamas-governo-americano-dobra-estimativa-da-quantidade-de-petroleo-que-ja-vazou-916846497.asp>>. Acesso em: 13 jun. 2010.

GOBIRA, A. B.; GAZE, F. N.; BARRETO, J. A.; PARREIRA, V. X. **Principais propriedades e processos envolvidos no derrame de uma mancha de óleo em ambiente marinho**. Relatório 001/2007. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2007.

GOBIRA, A. B. **Modelagem do espalhamento de óleo em águas rasas**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2008.

IBAMA, **Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar**. Informação Técnica ELPN/IBAMA N° 023/02, 2002. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/brnd/round6/guias/PERFURACAO/PERFURACAO_R6/MODELAGEM/index2.htm>. Acesso em: 20 mai. 2010.

ITOPF, **Fate of marine oil spills**. Technical Information Paper. N° 2, 2002. Disponível em: <<http://www.itopf.com/marine-spills/fate/weathering-process/documents/tip2.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2010.

JANEIRO, J., FERNANDES, E., MARTINS, F., FERNANDES, R., 2008: Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, Vol. 56, p 650-665, 2008.

LEHR, W. J. **Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior**. In Oil Spill Modelling and Processes (Capítulo 3). C.A. Brebbia. Southampton, Reino Unido, 2001.

LEITÃO, J. C.; LEITÃO, P.C.; BRAUNSCHWEIG, F.; FERNANDES, R., 2004: **Dispersão de petróleo – metodologias para a sua previsão**. In: 7º Congresso da Água. Lisboa, Portugal, 2004. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

LEMO, A. T., 2009: **Modelagem numérica como ferramenta de determinação de uma zona de exclusão para as atividades de exploração e produção (E&P) de petróleo na região do banco de Abrolhos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, 2009.

MARTINEZ, R. G.; TOVAR, H. F., 1999. **Computer Modeling of Oil Spill trajectories with a high accuracy method**. Science & Tecnology Bulletin, Vol. 5, N° 5/6, p.323 – 330, 1999.

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.

MENEZES, G. S. C. **Modelagem de correntes residuais na Baía do Espírito Santo.** Monografia (Graduação em Oceanografia), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2005.

MESQUITA, A. R. **Marés, Circulação e Nível do Mar na Costa sudeste do Brasil.** IOUSP.FUNDESPA, dez. 1997. MAPTOLAB – USP. Disponível em: <<http://www.mares.io.usp.br/sudeste/sudeste.html>>. Acesso em: 2 nov. 2008.

MOHID. Sistema de Modelação. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm>>. Acesso em: 2 jun. 2010.

NASCIMENTO, T. F. **Avaliação da hidrodinâmica antes e depois da obra da Ponte da Passagem, através de modelagem numérica.** Monografia (Graduação em Oceanografia), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2009.

NEVES, R.; SILVA, A.; BRAUNSCHWEIG, F.; LEITÃO, P. C.; WANDEL, R.; PINA, P.; PITA, G. **Hidroinformática e otimização da gestão de ecossistemas aquáticos.** A Hidroinformática em Portugal, Lisboa, Portugal, 2001. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com/PublicData/Products/ConferencePapers/cp-new6.pdf>>.

PALADINO, E. E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar.** Dissertação de Mestrado. Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. 2000.

PARREIRA, V. X. **Modelagem da trajetória da pluma de óleo para derramamentos na região do porto de Tubarão.** Monografia (Graduação em Oceanografia), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2008.

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

PIUMBINI, P. P. **Clima de ondas de gravidade e estado de agitação marítima, em ambientes marinhos no Espírito Santo.** Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil, 2009.

RAMOS, P. C. C. **Modelação matemática da qualidade da água no estuário do Tejo.** Dissertação de Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.

REED M.; AAMO, O. M.; DALING, P. S. **Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR**. Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 2, Nº 1, p 67-74, 1995.

REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRORS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. **Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters**. Environmental Modelling & Software, Vol. 19, p 681-690, 2004.

RIDGE, M. M. **Three-Dimensional Simulation of Pollutant Dispersion in Coastal Waters**. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBahia**. COPPE – Engenharia Costeira & Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Revisão 2006.

SARMENTO, R. **Determinação do Tombo da Maré no Canal da Passagem**. Relatório Final, Laboratório de Hidráulica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. 1993.

SÉCULO DIÁRIO. Disponível em:
<http://www.seculodiario.com.br/arquivo/2006/junho/02/noticiario/meio_ambiente/02_06_07.asp>. Acesso em: 26 out. 2008.

SOUZA FILHO, A. M. **Planos nacionais de contingência para atendimento a derramamento de óleo**: Análise de países representativos das Américas para implantação no caso do Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.

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.

VIEIRA, S.D.M.A. **Modelagem do transporte advectivo-difusivo da pluma de coliformes lançada pelo Canal da Passagem na Baía do Espírito Santo**. Monografia (Graduação em Oceanografia), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil. 2007.