UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

# CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GABRIELA MACHADO LOBO

THIAGO ZAMPROGNO MORDENTE

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM DERRAME DE ÓLEO NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

Orientador: Daniel Rigo

VITÓRIA

1

#### GABRIELA MACHADO LOBO

THIAGO ZAMPROGNO MORDENTE

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM DERRAME DE ÓLEO NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo

VITÓRIA

2015

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Daniel Rigo, por sua orientação e confiança ao longo do trabalho;

Ao Prof. Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana e à Prof. Dra. Fabiola Negreiros de Amorim, pela atenção e pelas contribuições na correção do presente Projeto de Graduação;

À equipe do Departamento de Engenharia Ambiental, que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho, fornecendo toda a base do conhecimento ao longo do curso de graduação;

À Lorena, ao Felipe e ao Christian, pela disponibilização de trabalhos e dados que foram fornecidos e pelo apoio no desenvolver da ferramenta utilizada nesse trabalho;

Às nossas famílias, por nos motivarem durante todo o curso de graduação;

Aos nossos amigos e colegas, que nos ajudaram durante os momentos mais difíceis, e também celebraram conosco durante os mais alegres;

Ao nosso relacionamento e companheirismo, pois graças a eles pudemos superar diversos obstáculos durante essa jornada acadêmica;

E principalmente a Deus, por nos abençoar e iluminar nossos caminhos, sempre caprichando em cada detalhe e cada pessoa que cruza o nosso caminho. À Ele toda honra e toda glória;

#### RESUMO

Devido ao crescimento do consumo de bens e serviços, cresce também a necessidade do transporte de mercadorias, seja por terra, mar ou ar. E assim, cresce também o número de acidentes envolvendo esses meios de transportes, principalmente no ambiente marítimo (SZEWCZYK, 2006). Um bom exemplo dessa realidade, é o Porto de Tubarão, localizada na Baía do Espírito Santo, que a cada ano recebe cada vez mais navios cargueiros para transportar os produtos oriundos das empresas metalúrgicas da região (MENEZES, 2005). É nesse contexto que os acidentes envolvendo derrames de petróleo são inseridos. Em virtude dessa fragilidade dos portos, estes devem conter planos de contingência para esse tipo de acidente. E para tal, o uso de modelagem computacional é indispensável (ITOPF, 2002). O presente trabalho visa analisar o comportamento de uma pluma de óleo resultante de um derramamento de pequeno porte situado no Porto de Tubarão, e para tal, o programa SisBaHia será utilizado. Para a implementação do modelo hidrodinâmico 3D, os dados de elevação coletados no Porto de Tubarão foram utilizados (RIGO, 2004). Posteriormente, para a implementação do modelo lagrangeano, foi utilizada uma fonte com formato circular de 200m<sup>2</sup> de diâmetro, com lançamento instantâneo de 8m<sup>3</sup>. E por fim, oito diferentes cenários foram propostos, com quatro direções de vento e duas intensidades diferentes para cada uma das direções. Os resultados apresentaram o mesmo padrão, onde o vento foi a variável mais significativa para a determinação da direção e sentido de propagação da pluma do contaminante, além de determinante para a diferença de tempo de toque na costa de acordo com a intensidade dos ventos. Adicionalmente, os tempos de toque na costa variaram entre 3 e 10 horas. Esse resultado condiz com o esperado, visto que o lançamento superficial fica em contato constante com o vento, sendo forçado a se propagar na mesma direção que esse elemento.

Palavras-chave: Baía do Espírito Santo; derrame de óleo; modelagem computacional; modelo hidrodinâmico 3D.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico do volume de óleo remanescente na superfície da água ao longo do
tempo15
Figura 2: Ilustração do comportamento do óleo sobre uma superfície liquida16
Figura 3: Ilustração do comportamento do óleo sobre uma superfície liquida17
Figura 4: Imagem do Google Maps da região de estudo
Figura 5: Mapa da malha usada na modelagem25
Figura 6: sistema de coordenadas da modelagem 3D27
Figura 7: descrição dos termos da equação de quantidade de movimento, aproximado
hidrostaticamente, na direção x, que analogamente podem ser utilizados para a direção y
Figura 8: descrição dos termos da equação de continuidade integrada ao longo da vertical29
Figura 9: descrição dos termos da equação de continuidade
Figura 10: Dados de elevação coletados no Porto de Tubarão depois de filtrados32
Figura 11: batimetria da região compreendida na malha do modelo
Figura 12: rosa dos ventos da estação meteorológica do aeroporto feita a partir dos dados dos anos de 2010 e 201141
Figura 13: Curva de decaimento de óleo44
Figura 14: O código de cor e característica do litoral de acordo com o valor do ISL46
Figura 15: Mapa da região em estudo com a classificação do ISL para cada tipo de segmento da costa
Figura 16: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 1 (vento NE de 6,3m/s) após 5 horas e 35 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde)

Figura 17: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 2 (vento NE de 8,4m/s) após 3 horas e 54 minutos de simulação e localização da fonte Figura 18: Região afetada no Cenário 1 (vento NE de 6,3m/s) após 15h de simulação e localização da fonte (estrela verde).....52 Figura 19: Região afetada no Cenário 2 (vento NE de 8,4m/s) após 10h de simulação e localização da fonte (estrela verde)......53 ......53 Figura 20: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 3 (vento NEE de 6,9m/s) após 5 horas e 16 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde)......55 Figura 21: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 4 (vento NEE de 7,5m/s) após 4 horas e 42 minutos de simulação e localização da fonte Figura 22: Região afetada no Cenário 3 (vento NEE de 6,9m/s) após 18h de simulação e localização da fonte (estrela verde)......57 Figura 23: Região afetada no Cenário 4 (vento NEE de 7,5m/s) após 16h de simulação e localização da fonte (estrela verde)......57 Figura 24: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 5 (vento E de 4,9m/s) após 8 horas e 31 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde)......59 Figura 25: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 6 (vento E de 7,2m/s) após 4 horas e 57 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde)......60 Figura 26: Região afetada no Cenário 5 (vento E de 4,9m/s) após 20h de simulação e localização da fonte (estrela verde).....61

Figura 27: Região afetada no Cenário 6 (vento E de 7,2m/s) após 14h de simulação e	
localização da fonte (estrela verde)6	62
Figura 28: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 7	
(vento SE de 3,6m/s) após 10 horas e 28 minutos de simulação e localização da fonte	
(estrela verde)6	33
Figura 29: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m3) resultantes do Cenário 8	
(vento SE de 6,0m/s) após 6 horas e 37 minutos de simulação e localização da fonte	
(estrela verde)6	64
Figura 30: Região afetada no Cenário 7 (vento SE de 3,6m/s) após 27h de simulação e	Э
localização da fonte (estrela verde)6	35
Figura 31: Região afetada no Cenário 8 (vento SE de 6,0m/s) após 18h de simulação e	Э
localização da fonte (estrela verde)6	35
Figura 32: Elevações medidas no Porto de Tubarão6	68

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos grupos quanto ao grau API do óleo	15
Tabela 2: Dados de entrada diferenciadores de cada cenário para o modelo	
hidrodinâmico	42
Tabela 3: Dados de entrada para o modelo de transporte Lagrangeano	43
Tabela 4: Resumo relacionando ISL com <i>c</i> <sub>A</sub>	47
Tabela 5: Resumo dos resultados encontrados	66

# SUMÁRIO

1.	INT	RO	DUÇÃO	10
2.	OB	JET	IVOS	11
3.	JUS	STIF	ICATIVA	12
4.	RE	VISÁ	ĂO BIBLIOGRÁFICA	13
4	l.1.	CA	RACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO	13
4	l.2.	ÁR	EA DE ESTUDO	18
4	1.3.	MC	DELAGEM COMPUTACIONAL	21
5.	ME	ТОГ	DOLOGIA	24
5	5.1.	SO	BRE O SISBAHIA	24
5	5.2.	MA	LHA	24
5	5.3.	MC	DELAGEM HIDRODINÂMICA	26
	5.3	.1.	Equações governantes	27
	5.3	.2.	Condições iniciais	30
	5.3	.3.	Condições de contorno	32
	5.3	.4.	Métodos de alagamento e secamento	33
	5.3	.5.	Método do filme superficial	35
5 F	5.4. PLUN	МС //А С	DELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO DA DE ÓLEO	36
	5.4	.1.	Condições de contorno para o modelo de transporte lagrangeano	38
6.	CE	NÁF	RIOS SIMULADOS	40
7.	RE	SUL	TADOS E DISCUSSÃO	50
7	<b>'</b> .1.	CE	NÁRIOS 1 E 2	50
7	<b>.</b> 2.	CE	NÁRIOS 3 E 4	54
7	<b>'</b> .3.	CE	NÁRIOS 5 E 6	58

7	7.4.	CENÁRIOS 7 E 8	33
8.	CC	NCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	39
BI	BLIO	GRAFIA	71

#### 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população e consumo mundiais, e a necessidade de um encurtamento das distâncias entre diferentes continentes, cresce também o número de navios que chegam nos diversos portos do Brasil. Essa situação gera maior vulnerabilidade nas regiões portuárias, sendo elas passíveis da ocorrência de diversos acidentes, desde derramamento de óleo, até uma tragédia maior envolvendo naufrágio de navios. Portanto, é de extrema importância estar a par de medidas mitigadoras ou atenuantes desses possíveis danos que os portos podem sofrer.

Este trabalho se concentrará em analisar diferentes cenários os quais ocorre um derramamento de óleo na Baía do Espírito Santo provocado por um navio. A partir dessa análise, ações mais eficientes e efetivas contra esse tipo de acidente podem ser incluídas em um plano de contingência. Deste modo, torna-se necessário conhecer o comportamento esperado de manchas de diferentes proporções, sob diferentes condições ambientais, principalmente aquelas que podem resultar num menor tempo para a mancha alcançar a costa, ou num maior volume de óleo atingindo a costa, ou ainda, numa maior extensão de costa afetada (REED *et al.*, 1999).

Através de uma simulação realística é possível combinar diferentes variáveis e estimar, com certo grau de precisão, os diferentes cenários de derramamento de óleo, para que com isso haja uma melhora na tomada de decisões que diz respeito a contenção da pluma de óleo. A forma mais prática de simular diferentes cenários acidentais é por meio da modelagem computacional, como por exemplo, fazendo o uso do programa computacional Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHIA.

Conduzida criteriosamente, a simulação dos padrões de circulação hidrodinâmicos e de transporte de contaminantes no programa SisBaHiA é capaz de apresentar resultados bastante próximos daqueles de um caso real.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo é fazer uma análise do comportamento de um derrame de óleo na baía do Espírito Santo utilizando modelagem computacional. Em paralelo, os objetivos específicos do presente trabalho são os apresentados a seguir: conhecer melhor a hidrodinâmica da região, determinar uma fonte compatível ao local de interesse e suas características, determinar a extensão da linha de costa que pode ter contato com a mancha de óleo, além de determinar o tempo que leva o contaminante a encostar no litoral.

## 3. JUSTIFICATIVA

As justificativas da realização deste trabalho, e da escolha da região do estuário da Baía do Espírito Santo para a realização deste estudo estão explicitadas a seguir:

- A região abrange uma das principais praias da região de Vitória;
- Um derramamento nesse local causaria danos na fauna e flora da região;
- A região vem sendo constante alvo de pesquisas no mesmo ramo acadêmico. Sendo assim, as conclusões feitas neste estudo podem servir de auxílio para futuros estudos;
- A já disponibilidade de dados, como por exemplo, os de marés, correntes, vento e batimetria;
- A modelagem vem sendo de grande ajuda para a realização de estudos ambientais em diversos tipos de sistemas naturais. Sendo ferramenta imprescindível para a elaboração e escolha de um plano de contingência adequado, no caso de derramamento de óleo.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado informações relativas as características físicas e químicas do petróleo, além de suas interações com o ambiente aquático, dados sobre a área de estudo, tais como hidrodinâmica e clima. Além disso, será apresentado a relevância da modelagem computacional e os processos para sua aplicação.

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO

O petróleo é uma mistura complexa de moléculas de carbono, oxigênio, enxofre, vanádio, níquel e sais minerais. Entretanto, apesar dessa grande variedade de elementos, 75% dos compostos do petróleo são formados por hidrocarbonetos. Por esse motivo, o petróleo é comumente chamado de "Hidrocarboneto" ou óleo (SZEWCZYK, 2006).

Esses hidrocarbonetos podem ser agrupados em cinco diferentes categorias, dependendo da sua composição química, sendo eles os alcanos, naftenos, aromáticos, alcenos e asfaltenos. Os alcanos são compostos estáveis e saturados que apresentam ligação simples entre as moléculas de carbono, sendo os principais constituintes do petróleo. Os naftenos também são compostos saturados, contudo apresentam ligações numa estrutura anelar fazendo com que sejam insolúveis em água (JOKUTY, 1999).

Os hidrocarbonetos saturados mencionados anteriormente podem ser divididos em duas categorias. Quando possuem menos de 18 carbonos, esses hidrocarbonetos são mais leves e voláteis, constituindo assim a parcela mais passível de dispersão entre os óleos. Entretanto, quando possuem moléculas maiores (ceras) podem provocar anomalias nos processos de evaporação, dispersão e emulsificação. Por essa razão, o tamanho da cadeia de carbonos é importante quando se está lidando com derramamento de petróleo (SOTO, 2004).

Outro fator importante é a composição química do hidrocarboneto. Enxofre, Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos são compostos comuns na constituição do petróleo. Elas são as frações mais moveis e solúveis dos produtos de petróleo, e por isso,

frequentemente contaminam solos e porções superficiais de água quando ocorrem acidentes (JOKUTY, 1999).

A maioria dos óleos combustíveis possui massa específica inferior à da água (1,0 mg/L), entretanto alguns dos óleos crus podem apresentar uma massa específica superior a essa. Essa característica influenciará no comportamento do óleo de flutuar ou não sobre a água, fazendo com que a salinidade e a temperatura sejam fatores decisivos para o resultado final. Vale lembrar que como o petróleo possui partes voláteis, sua densidade tende a aumentar com o passar do tempo após o derrame inicial. Passado tempo suficiente, essa evaporação pode fazer com que a massa específica aumente até ao ponto de ocorrer uma inversão na camada superficial da água, ou seja, a massa específica do óleo se torna maior que a da água salgada. Portanto, o tempo é outro fator importante para a determinação de uma das características fundamentais do óleo, a massa específica (SOTO, 2004).

A densidade e o grau API (*American Petroleum Institute*) são outras propriedades relacionadas à massa específica e que são frequentemente utilizadas para caracterizar o petróleo. A densidade é a razão entre a massa específica do óleo e a massa específica da água a uma mesma temperatura. Já o grau API é mais frequentemente utilizado na indústria do petróleo, sendo expressa da seguinte forma.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{Densidade(15^{\circ}C)} - 131,5$$
(1)

Por ser amplamente utilizada, o grau API classifica o petróleo em cinco grupos distintos conforma a Tabela 1.

Grupo	⁰API (15ºC)
I	>45,0
II	35,0 - 45,0
III	17,5 - 35
IV	10,0 - 17,5
V	<10,0

Tabela 1: Classificação dos grupos quanto ao grau API do óleo.

Fonte: NOAA, 2000 apud SOTO, 2004.

De acordo com a publicação técnica Nº 2 do *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF, 2002), os óleos que possuem um grau API mais elevada tenderão a persistir menos no meio ambiente. Isso pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Gráfico do volume de óleo remanescente na superfície da água ao longo do tempo.



Fonte: ITOPF, 2002.

Vale lembrar que a variação do comportamento do óleo dependerá não só do tempo, mas também das características da sua constituição química e condições ambientais durante o tempo decorrido do acidente, assim como mencionado anteriormente.

SOTO (2004) afirma que devido a essa grande variedade das propriedades do petróleo com o passar do tempo, juntamente com as variações químicas que esse material possui, a formulação de modelos que descrevam seu comportamento é uma tarefa muito complexa. Além disso, o óleo derramado sobre o mar está sujeito a diversos processos físicos tais como: espalhamento, evaporação, dispersão, sedimentação, emulsificação, dissolução, biodegradação e foto-oxidação, os quais influenciam na viscosidade em massa especifica do óleo. Esses processos estão ilustrados na Figura 2.



Figura 2: Ilustração do comportamento do óleo sobre uma superfície liquida.

Fonte: ITOPF, 2002.

Entretanto, esses processos não afetam a mancha da mesma forma. Alguns deles, como a evaporação e o espalhamento são mais relevantes nos momentos iniciais. Enquanto a emulsificação e dispersão são mais relevantes após um longo período de tempo (ITOPF, 2002; SZEWCZYK, 2006; SOTO, 2004). A Figura 3 apresenta de forma resumida quando

esses processos que afetam uma mancha de óleo são mais relevantes em um derramamento de óleo.



Figura 3: Ilustração do comportamento do óleo sobre uma superfície liquida.

Fonte: adaptado de DOERFFER, 1992 (apud SZEWCZYK, 2006).

SZEWCZYK (2006) definiu o espalhamento como sendo a expansão horizontal da mancha devido à tendência do óleo de escoar sobre si mesmo. Isso ocorre devido a interação entre a força da gravidade e a tensão superficial do óleo e da água. Este processo é um dos que mais afetam o comportamento do espalhamento da mancha, principalmente durante os primeiros momentos.

A evaporação é outro processo importante nesses momentos iniciais. Ela é um processo extremamente complexo para o petróleo devido ao fato deste composto apresentar uma diversidade muito grande de componentes, fazendo com que existe uma grande variação no ponto de ebulição dos mesmos. Vários autores concordam que a taxa de evaporação de uma mancha de óleo depende fundamentalmente dos seguintes fatores: velocidade do vento no local, propriedades físicas do óleo, superfície da mancha, pressão de vapor, espessura da mancha, temperatura local e condições de radiação (SZEWCZYK, 2006).

## 4.2. ÁREA DE ESTUDO

A região da Baía do Espírito Santo (20°27' S; 40°27' W) está associada ao sistema estuarino do Rio Santa Maria da Vitória, o qual deságua nesta pela baía de Vitória e pelo canal da Passagem (MENEZES, 2015). Existem algumas regiões de destaque nessa área, tais como o porto de Tubarão, e o Canal da passagem e o canal de acesso ao Porto de Vitória que interligam a Baía de Vitória com a Baía do Espírito Santo. Com relação a Baía de Vitória, essa varia de 1,6 Km na região da Ilha das Caieiras, onde possui a menor profundidade (entorno de 4 m), até 160 m na área em frente ao Morro do Penedo na região do porto de Vitória, onde a profundidade alcança 24 m (RIGO, 2004; MACIEL, 2004 *apud* SALDANHA, 2007).

Já a Baía do Espírito Santo é limitada ao norte pela Ponta de Tubarão e a sul pela Ponta de Santa Luzia. Como o nome sugere, o Porto de Tubarão encontra-se na porção norte dessa baía. Adicionalmente, essa região recebe influência das ondas geradas no oceano, tendo 3,6km de extensão na boca. Suas profundidades aumentam gradualmente, a partir da Praia de Camburi, até cerca de 15 m, com o canal de acesso ao Porto de Tubarão dragado a 22 m (RIGO, 2004). A Figura 4 ilustra resumidamente essa região de estudo.



Figura 4: Imagem do Google Maps da região de estudo.

Fonte: Adaptado do Google Maps, 2014.

A área também está constantemente sujeita a derrames de poluentes do tipo hidrocarbonetos, decorrente do intenso fluxo de embarcações associadas aos portos de Tubarão (na porção leste da baía), e de Vitória (na Baía de Vitória, próxima à região); derramamentos que tendem a aumentar com o crescimento das atividades portuárias e da indústria do petróleo (MENEZES, 2015).

A Baía de Vitória pode ser considerada como parte da região estuarina do Rio Santa Maria, onde é feita a captação de água por parte da CESAN. Para isso, a CESAN construiu uma barragem submersa, a qual limita o avanço da cunha salina (CORREA JUNIOR, 2003).

A região estuarina do Rio Santa Maria pode ser classificada como bem misturada. De acordo com BARROS FILHO (2002), as marés dessa região são classificadas como semidiurnas com desigualdades diurnas, com variações de maré que não ultrapassam os 2 m de altura.

RIGO (2004) ressalta que os dados de maré medidos ao longo da região da Baía de Vitória mostram que a maré incidente nessa região é proveniente da Baía do Espírito Santo. Essa maré chega a atingir os bairros Santo Antônio, Caieiras e Maria Ortiz, passando pelo acesso do porto de Vitória. Entretanto, existe um segundo acesso pelo Canal da Passagem, o que faz com que a Baía de Vitória sofra influência desses dois acessos. Adicionalmente, RIGO & SARMENTO (1993) descrevem uma região entre Maria Ortiz e o Canal da Passagem no qual os gradientes de velocidade se anulam durante a maré enchente, local esse que recebeu o nome de "Tombo" da Maré. Como resultado, o manguezal das regiões próximas começa a ser inundado. Entretanto, durante a maré vazante o escoamento se inverte e a água da região que possuía gradientes nulos de velocidades começa a se dirigir para o norte, até as proximidades da desembocadura do Rio Santa Maria, fazendo com que o escoamento do Canal da Passagem se dirija para a direção sul.

Após um período do início da maré vazante nessa região, a porção de água com velocidades nulas retorna para a região onde se encontrava anteriormente fazendo o caminho reverso. Até o fim da maré vazante, esta região permanece atuando como divisor entre os escoamentos que se dirigem para o sul e para o norte, realizando assim, o esvaziamento do manguezal. Este ciclo se repete a cada mudança de maré, com a posição da região de gradientes de velocidade nulos variando em função da amplitude da maré (SALDANHA, 2007).

A respeito do clima da região de estudo, KOPPEN (1948, *apud* MARTIN; SUGUIO; FLEXOR, 1993) descreve como sendo um clima quente e úmido, com estações secas no

outono (abril a setembro), e apresenta maior quantidade pluviométrica na primavera e verão (outubro a março). A temperatura varia entre 30º (média das máximas) e 15º (média das mínimas).

Com relação aos ventos, MATTIUZZI & MACHIORO (2012) constataram que a direção predominante de ventos em Vitória é no quadrante nordeste, com a presença, em menor escala, de ventos provenientes de S-SE e S-SSW. A predominância de ventos de NE deve-se ao efeito de Coriolis, que ocasiona o movimento do ar no sentido anti-horário para as células de alta pressão no hemisfério Sul, que associada à direção da linha de costa do litoral oriental brasileiro onde está situado o município de Vitória, possibilitam a ocorrência preferencial de ventos do quadrante mencionado. Além disso, MATTIUZZI & MACHIORO (2012) também verificaram que essa predominância de ventos nordeste pode ser modificada pela entrada de uma Frente Fria na região. Esse evento leva a predominância de ventos do quadrante nordeste mudar para predominância de ventos S-SE e S-SW. Sendo assim, MACHIORO (2012) em outro artigo seu, porém da mesma linha, concluiu que Frentes Frias são importantes sistemas dinamizadores do comportamento dos elementos climáticos do município de Vitória.

#### 4.3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A praticidade da modelagem computacional está no fato de conseguir fazer com que vários modelos computacionais mais simples possam trabalhar acoplados num sistema maior, de forma a obter resultados de equacionamento muito complexos. Tais como, quantificar destinações físicas resultantes do lançamento de algum poluente em ambientes aquáticos para diferentes propósitos. Um modelo computacional pode ser usado para determinar o comportamento de uma mancha de óleo derramado na costa devido a algum tipo de acidente. E assim, gerar diferentes cenários que possam ser úteis para a tomada de decisão de medidas remediadoras (FERREIRA, 2006).

É importante observar as considerações feitas por cada modelo e não depositar confiança em excesso nos resultados obtidos através dele. Entretanto, a utilização de

modelos computacionais serve como uma diretriz bastante útil para o entendimento de certos aspectos do comportamento do espalhamento de manchas de óleo (ITOPF, 2002).

Sendo assim, pode-se definir os modelos computacionais como sendo representações do comportamento dos sistemas, existindo duas formas de soluciona-los: soluções analíticas e soluções numéricas. Nem todo sistema possui solução analítica, de fato, quanto mais complexo um sistema maior a chance desse sistema não ter solução analítica. Entretanto, praticamente qualquer modelo matemático pode ser resolvido através de soluções numéricas, e em geral há uma perda relativamente pequena de dados (SALDANHA. 2007).

Os modelos numéricos também possuem algumas ressalvas, dentre as quais podem ser citadas: a necessidade de um grande nível técnico de conhecimento, a escolha de um esquema de solução adequado e a utilização por pessoas capacitadas. Um exemplo dessas limitações são os modelos hidrodinâmicos, os quais possuem dificuldades em se equacionar os efeitos da turbulência e do atrito devido a rugosidade do fundo e em escoamentos não permanentes e não uniformes, o valor dos coeficientes de dispersão e de difusão ainda não são bem conhecidos. Por outro lado, possuem baixos custos (quando comparados aos modelos físicos), são adaptáveis a situações distintas, fornecem informações sobre toda área a ser modelada e facilitam a confecção de saídas gráficas (FALCONER, 1992).

SALDANHA (2007) resumiu bem o processo de modelagem computacional em três etapas. Primeiro, é necessário que se realize a implementação do modelo, onde será realizado o levantamento de dados de forma a inserir no modelo as características da região de estudo. Segundo, a calibração do modelo é uma das etapas mais importantes, visto que esse processo eleva o potencial de utilização e coerência dos resultados. Na calibração são utilizados processos iterativos que ajustam os parâmetros para fazer com que eles gerem resultados coerentes com a situação real da área de estudo. Terceiro, a aplicação do modelo que consiste na última etapa do processo de modelagem, onde o aplicador executa o modelo para se adquirir os resultados necessários para o estudo desejado.

Alguns autores utilizaram da modelagem computacional para estudar o comportamento de derrames de petróleo na região da Baía de Vitória e do Espírito Santo. PARREIRA (2008) estudou o acidente do navio Sarah, ocorrido em 1999 no Porto de Tubarão. Ela utilizou o *software* GNOME para simular esse acidente com a intenção de determinar o tempo de toque na costa caso não houvessem medidas de contenção no porto. Adicionalmente, essa autora reproduziu esse acidente para diferentes cenários com o objetivo de identificar áreas de fragilidade na Baía do Espírito Santo.

Outro autor que estudou derramamentos nessa mesma região foi FONTANA (2003). Ele simulou diferentes cenários, através do *software* GNOME, na região de fundeadouro, próximo à Baía do Espírito Santo com o intuito de estimar as possíveis trajetórias das plumas de óleo e assim contribuir na elaboração de planos de contingência de forma a controlar o acidente em tempo hábil.

Adicionalmente, CONCEIÇÃO FILHO (2003) analisou o movimento de manchas de óleo na Baía de Vitória. Por meio de experimentos de campo e pela aplicação do software SisBaHiA, ele foi capaz de avaliar a influência de variáveis meteo-oceanográficas (correntes de maré, ventos, entre outros) no espalhamento horizontal do óleo derramado. Com o estudo foi possível identificar possíveis áreas a serem atingidas.

## 5. METODOLOGIA

Toda a metodologia usada para as simulações de comportamento da pluma de óleo na Baía de Vitória e na Baía do Espírito Santo será descrita a seguir nos próximos tópicos.

#### 5.1. SOBRE O SISBAHIA

É conveniente que se dê uma visão geral sobre o programa SisBaHiA para conhecer melhor seu funcionamento. Este programa contém diversas funções. Dentre as funções que ele tem, as que serão usadas para a realização da modelagem proposta neste trabalho são: o modelo hidrodinâmico e o modelo lagrangeano de transporte advectivo difusivo.

Não se pode esquecer de mencionar a interface amigável do programa, a qual interage com diferentes programas comerciais: o Grapher, o Surfer, e o Argus One. Este último programa serve para gerar e manipular a malha, a qual será o domínio da modelagem. Ele gera um arquivo que pode ser diretamente importável pelo SisBaHiA. Já o Grapher e o Surfer são capazes de gerar gráficos e mapas para uma melhor apresentação de resultados gerados pela modelagem e para manipulação de dados em geral.

#### 5.2. MALHA

A malha da Baía de Vitória e da Baía do Espírito Santo utilizada para concluir a simulação foi a mesma usada por MARVILA (2014). Essa escolha foi feita, pois a malha respondeu satisfatoriamente no trabalho citado, permitindo que o estudo fosse completo. A malha possui 1810 elementos quadrangulares biquadráticos, totalizando 8671 nós, a qual é apresentada na Figura 5.



Figura 5: Mapa da malha usada na modelagem.

Como pode ser visto na Figura 5, a Baía de Vitória possui duas aberturas para o Oceano Atlântico, uma pelo Canal Principal e outra pelo Canal da Passagem. Adicionalmente, é importante ressaltar que a região destacada em verde representa a região de mangue, a amarela a região terrestre e a azul o Oceano Atlântico.

Segundo ROSMAN (2015), a modelagem de transporte de manchas de óleo geralmente é acompanhada de um conflito entre escalas espaciais das manchas de óleo (fenômeno que é observado) e escalas usadas na discretização do modelo hidrodinâmico. É recomendado pelo mesmo autor que, para que o modelo numérico possua escalas resolvíveis, o fenômeno a ser analisado tenha uma escala pelo menos quatro vezes maior que a escala de discretização. Portanto, locais onde os fenômenos analisados são de menor proporção, menor deve ser a discretização.

## 5.3. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O modelo hidrodinâmico serve como base para obter resultados em qualquer tipo de análise posterior, seja análise de transporte de sedimentos, de qualidade da água, ou de transporte de uma pluma de óleo. Com ele se obtém a dinâmica encontrada normalmente neste corpo d'água, dadas as condições predeterminadas. O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é da linhagem FIST, otimizado para corpos d'água naturais. A linhagem FIST possui um sistema com uma série de modelos hidrodinâmicos, onde a modelagem da turbulência é fundamentada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas usadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES – *Large Eddy Simulation*). No caso, o SisBaHiA usará a versão 3D do FIST (FIST3D), a qual resolve as equações de Navier-Stokes com aproximação de águas rasas.

Existem dois módulos utilizados pelo FIST3D, o módulo 2DH que calcula os valores de elevação da superfície livre através de um modelamento bidimensional integrado na vertical (2DH) e, o módulo 3D que calcula o campo de velocidades tridimensional (ROSMAN, 2015).

No presente caso será usada uma circulação hidrodinâmica 3D em virtude das características de lançamento do poluente, visto que este é advectado e difundido por uma camada especifica da coluna d'água (camada superficial).

#### 5.3.1. Equações governantes

Este tópico vai ser responsável por embasar teoricamente toda a hidrodinâmica envolvida nesse modelo. Esses fundamentos são encontrados na Referência Técnica do SisBaHiA, escrita por ROSMAN (2015). Segundo esse autor, as equações de Navier-Stokes governam a mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento. Além disso, estas equações representam o princípio da conservação de quantidade de movimento e, combinadas com a equação de continuidade, a equação de estado e a equação de transporte para cada integrante da equação de estado, formam o modelo matemático básico para todos corpos de água.

Com a Figura 6 representando o corpo de água, sendo ui a velocidade horizontal na direção i e NR o nível de referência, o sistema de coordenadas da modelagem é de mais fácil visualização.





A partir disso, é possível resumir abaixo o sistema resolvido pelo programa ao apresentar as quatro equações essenciais, usadas para obter as quatro variáveis de circulação hidrodinâmica (u, v, w,  $\zeta$ ) em um escoamento 3D. Para começar, abaixo é apresentada a equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x:

Fonte: ROSMAN, 2015.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_{z}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi sen\theta v$$
(2)

Por outro lado, a equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y é:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_{z}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi sen\theta u$$
(3)

Assim como é apresentada a equação de continuidade do volume integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u \, dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v \, dz = q_P - q_E + q_I \tag{4}$$

E a equação da continuidade do volume, considerando o fluido incompressível é:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
<sup>(5)</sup>

Como explicação de cada termo das equações 2 e 3 de quantidade de movimento, será utilizado como exemplo a equação na direção x. Analogamente, o significado dos termos na direção y, que são semelhantes aos termos da equação na direção x, serão iguais.

Figura 7: descrição dos termos da equação de quantidade de movimento, aproximado hidrostaticamente, na direção x, que analogamente podem ser utilizados para a direção y.

$\frac{\partial u}{\partial t} \rightarrow$	Representa a aceleração local do escoamento, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} \to$	Representa a aceleração advectiva do escoamento, i.e., em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos advectivos, por uni- dade de área, de quantidade de movimento na direção $x$ , por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \rightarrow$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção <i>x</i> (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção <i>x</i> . Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para lugares onde o nível de água é mais baixo.
$-rac{1}{ ho_0}g\int\limits_z^\zeta rac{\partial ho}{\partial x}dz ightarrow$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade ( $\rho/\rho_0$ ). Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa, gerando efeitos de empuxo que tendem a deixar no fundo a água mais densa. Note que $\rho$ será computado pela equação (5) e os constituintes por equações de transporte, cf. seção 6.
$\frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \rightarrow$	Representa a resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, i.e., em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos difusivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na dire- ção <i>x</i> , por unidade de massa. Entre outras coisas, é através desses termos que o escoamento sente o atrito do fundo e a ação do vento sobre a superficie livre gerando os perfís de velocidade.
$2\Phi \operatorname{sen} \theta \nu \rightarrow$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se mo- vendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, i.e. em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara, por exemplo.

Fonte: ROSMAN, 2015.

Para a equação da continuidade integrada ao longo da vertical, tem-se:

Figura 8: descrição dos termos da equação de continuidade integrada ao longo da vertical.

$\frac{\partial(\zeta+h)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz + q_P - q_E \pm q_I \rightarrow$	Evidentemente, possui o mesmo significado do caso anterior. Entre- tanto, da forma que se encontra escrita à esquerda, pode-se observar que a altura da coluna de água ( $\zeta$ + $h$ ) varia no tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna de água nas direções $x e y$ res- pectivamente, $\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz e \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz$ , e do balanço dos fluxos de pre-
	cipitação $q_P$ , evaporação $q_E$ e infiltração $q_I$ , por unidade de área.

Fonte: ROSMAN, 2015.

Já com relação a equação de continuidade, os significados dos termos são apresentados na Figura 9:

Figura 9: descrição dos termos da equação de continuidade.

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \rightarrow$	Faz com que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo. Ou seja, uma massa fluida escoa de forma incompressível, i.e., muda de forma mas permanece
OX OY OZ	com o mesmo volume à medida que movimenta.

Fonte: ROSMAN, 2015.

#### 5.3.2. Condições iniciais

Na modelagem hidrodinâmica FIST3D, é necessário fornecer, para o instante inicial,  $t_0$ , os valores da elevação da superfície livre,  $\zeta$ , e as componentes de velocidade 2DH, U e V, para todos os nós do domínio. Existe dois tipos de simulações que podem ser feitas nesse caso. A que é feita com "partida a quente", e a feita com "partida a frio". No caso da de "partida quente", é preciso obter um resultado prévio desses dados de entrada, os quais podem ser usados como condição inicial, mesmo a condição não representando o instante zero, porém correspondendo a um padrão de circulação realista.

Para se obter um resultado prévio da elevação da superfície livre no período da simulação, dados de elevação do nível d'água medidos *in situ* em qualquer período de tempo (porém durante um período de tempo suficiente para se obter todos os harmônicos mais significativos da maré local) são necessários.

Por outro lado, se a simulação é feita a "partida a frio", o resultado apresentado pelo modelo hidrodinâmico precisa de um tempo de aquecimento para mostrar resultados condizentes com a realidade. Portanto, essa parte dos resultados pode ser desconsiderada.

Algumas observações quanto a esses diferentes tipos de condições iniciais devem ser observadas antes de rodar o programa:

- Ao usar a "partida a frio", a condição inicial deverá satisfazer às equações governantes. O fato de simplesmente determinar o nível d'água horizontal, e velocidades 2DH nulas, já fará com que essas equações sejam satisfeitas.
- Conflitos gerados por diferença significativa entre condições iniciais e de contorno devem ser evitados.
- Determinar condições iniciais "não naturais" contribui para o aumento do período de aquecimento exigido pelo modelo.

Nesta simulação será usada a "partida a quente". Para isso foram utilizados os dados brutos medidos em intervalos de 10 minutos na estação localizada no Porto de Tubarão (RIGO, 2004). Entretendo, esses dados apresentavam ruídos oriundos do equipamento de medição, e por esse motivo foi necessário que esses dados fossem filtrados para que os resultados hidrodinâmicos não fossem afetados por esses ruídos. Assim, foi utilizado o recurso de médias móveis, com o auxílio do *software* MATLAB, para a eliminação de tais ruídos. O resultado da filtragem dos dados pode ser observado na Figura 10.



Figura 10: Dados de elevação coletados no Porto de Tubarão depois de filtrados.

#### 5.3.3. Condições de contorno

Dos tipos de condições de contorno, existem os horizontais e os verticais. Paras os verticais as condições de contorno são velocidade zero no fundo e tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento dadas. Já a respeito dos contornos horizontais existem dois tipos: contornos de terra e contornos abertos.

Os contornos de terra geralmente são as margens do corpo de água e possíveis pontos com afluxo e efluxo, como rios, estuários, etc. Os contornos abertos geralmente são os limites do domínio de água modelado, o que não é uma fronteira física.

No modelo FIST3D é usual relacionar os contornos terrestres à prescrição de fluxos ou velocidades normais, e os contornos abertos são associados às elevações da superfície livre. Geralmente, contornos de terra não possuem contribuição externa de uma velocidade normal, portanto seu valor é nulo. Contudo, em nós posicionados em embocadura de rios, pequenos estuários ou vertedores, o fluxo de velocidade deve ser dado.

Existem situações onde é desejável que se considere efeitos de alagamento e secamento em certas regiões do domínio de modelagem (geralmente na fronteira), as quais representam os fenômenos observados na região de manguezal da Baía de Vitória. Existem três possibilidades de tratamento dessa situação:

- 1. Alagamento e secamento virtual em pontos de contorno, com e sem manguezal;
- 2. Alagamento e secamento real pelo método do filme superficial;
- 3. Alagamento e secamento real por métodos de meio poroso.

O fenômeno de alagamento e secamento da região de mangue serão tratados pela segunda opção para determinação das condições de contorno.

#### 5.3.4. Métodos de alagamento e secamento

Um dos principais problemas das equações de águas rasas na modelagem de corpos d'água naturais consiste em sua incapacidade de lidar com áreas expostas ao processo de alagamento e secamento, onde a profundidade pode se aproximar de zero. O objetivo da aproximação dos processos de alagamento e secamento é permitir o aparecimento e o desaparecimento de áreas secas (BATES & HORRITT, 2005). Existem três métodos oferecidos pelo SisBaHiA para tratar de modelagem em áreas que podem alagar e secar em função da variação do nível d'água:

- MMP (Método de Meio Poroso)
- MFS (Método do Filme Superficial)

• MPR (Método Poroso-Rugoso)

Apesar de semelhantes, esses métodos possuem suas diferenças e foram testados por diferentes autores. De acordo com SFRENDRECH (2012), o qual realizou um estudo de modelagem hidrodinâmica no manguezal da região da foz do Rio Amazonas, o MFS não produziu resultados, pois criava-se uma instabilidade numérica para áreas de batimetria complexa. O mesmo autor ainda afirmou que ao testar o MMP e MPR, ambos conseguiram reproduzir a realidade. Além disso, constatou que o MPR teve desempenho 30% mais rápido que o MMP para o passo de tempo estabelecido na simulação.

Como a Baía do Espírito Santo possui uma área de batimetria relativamente simples, conforme pode ser visto na Figura 11, e também por receber pouca influência das áreas de manguezais na área de interesse da modelagem (próxima ao Porto de Tubarão), neste trabalho será utilizado o MFS de forma a simplificar a análise do modelo hidrodinâmico.



Figura 11: batimetria da região compreendida na malha do modelo.

#### 5.3.5. Método do filme superficial

ROSMAN (2015) explica que a concepção básica do método consiste em supor que a superfície livre funciona como um filme que, na medida em que ocorre secamento, vai se posicionando sobre a superfície do fundo. Quando essa opção é usada no modelo hidrodinâmico, o FIST3D irá automaticamente gerar uma condição de contorno de nó seco para cada nó com profundidade total menor que uma profundidade mínima

admissível. Usualmente a amplitude,  $\varepsilon$ , da rugosidade equivalente do fundo é utilizada como condição. Usando  $\varepsilon$  como indicativo da profundidade mínima admissível, a condição de nó seco seria escrita como:

$$\zeta = \varepsilon + h$$
  $U = V = 0$ ; em qualquer nó seco (6)

A inclusão de efeitos de alagamento e secamento em qualquer modelo requer a elaboração cuidadosa da malha de discretização no que concerne à geometria e topografia do fundo na área sujeita a secar.

# 5.4. MODELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO DA PLUMA DE ÓLEO

Esse modelo é usado para simulações envolvendo transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas pré-determinadas de escoamentos 2DH ou 3D. Paralelamente, esse modelo é vastamente utilizado em problemas com fontes de escala pequena (em relação ao domínio), ou com gradientes altos, sem perder a eficiência dos resultados. Logo, se apresenta como um modelo muito adequado para casos de derramamentos de óleo instantâneos ou por período definido.

Uma breve descrição do modelo, assim como o embasamento teórico e demais informações, serão explicitados a seguir com grande parte do conteúdo retirado da Referência Técnica do SisBaHiA, escrita por ROSMAN (2015).

Uma análise Lagrangeana de uma ocorrência de transporte hidrodinâmico de uma pluma pode ser simplificada ao se afirmar que o volume de controle (local de interesse) acompanha a trajetória da partícula. Portanto, com este tipo de modelagem, a incógnita não se resume na concentração do poluente, mas sim na posição das partículas discretas em questão. Logo, com o propósito de apresentar resultados, se discretiza a massa do contaminante em múltiplas partículas, as quais suas trajetórias são determinadas de acordo com os resultados do modelo hidrodinâmico. Por assim se dizer, cada partícula é
o centroide da nuvem individual do contaminante, de modo que ao se adicionar todas as nuvens individuais, o resultado forma a nuvem de contaminante global.

Em adição a isso, no caso de manchas individuais muito pequenas, elas serão consideradas localmente homogêneas e as funções Gaussianas de distribuição de massa de uma determinada mancha individual em torno de seu centroide são de razoável aproximação.

Sabendo que a incógnita principal no modelo Lagrangeano é a posição da partícula, as quais são dispostas na região fonte aleatoriamente e que sofrem todos os efeitos de dispersão previstos no modelo hidrodinâmico, a posição  $P^{n+1}$  pode ser determinada pela expansão da série de Taylor a partir de uma posição conhecida  $P^n$ .

$$P^{n+1} = P^{n} + \Delta t \frac{dP^{n}}{dt} + \frac{\Delta t^{2}}{2!} \frac{d^{2}P^{n}}{dt^{n}} + T.A.D$$
(7)

Em que T.A.D são os termos de alta ordem desprezados. Para resolver a derivadas temporais de P, que são obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico, as duas equações a seguir auxiliam.

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \tag{8}$$

$$\frac{d^2 P}{dt^n} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + u\frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + v\frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w\frac{\partial\vec{V}}{\partial z}$$
(9)

Onde as velocidades hidrodinâmicas obtidas com o FIST3D e as velocidades que promovem o transporte advectivo das partículas  $\vec{V}(u, v, w)$  são consideradas as mesmas. Vale ressaltar que apesar de ter se aplicado os termos de velocidade em 3D, o mesmo processo pode ser feito com velocidades médias na vertical. Também é possível se adicionar termos de aceleração na equação, porém isso permite o uso de intervalos significativamente maiores, com boa acurácia. Após a consideração da dispersão advectiva, pode se incluir as "velocidades difusivas" no movimento das partículas. As velocidades difusivas são função da variação espacial da difusividade turbulenta, e o

processo difusivo pode ser dividido em duas partes: uma simplesmente difusiva e outra que acrescenta incerteza à advecção.

Após isso, é possível calcular a quantidade de massa de cada partícula quando esta entra no domínio da modelagem. Com esse valor em mãos, pode-se determinar a quantidade de massa de uma dada partícula que pode estar em uma determinada célula i da malha, em qualquer momento da simulação. Logo, a concentração de cada substância em uma dada célula é simplesmente a quantidade de massa da substância em uma célula, dividida pelo próprio volume da célula.

#### 5.4.1. Condições de contorno para o modelo de transporte lagrangeano

Existem dois tipos de condições de contorno: para contorno aberto e para contorno de terra. O primeiro se refere a limites ao longo dos contornos abertos (contorno onde tem água do lado de fora do domínio) aos quais as partículas saem do domínio modelado e são perdidas. Para evitar essa perda, não se deve colocar a fonte do poluente perto dos limites dos contornos abertos, de forma que, se as partículas por um acaso atravessarem esse limite, não serão constatadas perdas sensíveis para o problema modelado.

Já para as condições de contorno de terra, se a partícula tender a atravessar esse limite, duas situações podem ser observadas. Na primeira situação a partícula simplesmente retorna ao meio sem sofrer perda de massa, e na segunda situação a partícula retorna ao meio, porém uma parte da sua massa é absorvida pelo terreno em contato. A fração absorvida pode ser fornecida por meio de um coeficiente de absorção característico de cada tipo de fronteira de terra,  $c_A = [0,1]$ , com valores entre zero e um. Para  $c_A = 0$  há reflexão total da partícula, já para  $c_A = 1$ , há absorção total. Cada nó de fronteira de terra pode ter um valor de coeficiente pré-determinado. Seguem algumas recomendações:

 Fronteiras de terra com efluxo (tais como locais de captação de água, seções de vertedouros, entre outros) devem ter c<sub>A</sub> = 1.

- Para descobrir se a pluma toca ou não um trecho da terra, basta especificar  $c_A > 0$  nos nós desse trecho. Caso não deseje ter perda significativa de massa, basta usar, por exemplo,  $c_A = 0,0001$ .
- Em simulações de derrame de óleo geralmente são usados os seguintes valores:
  - Costões rochosos:  $c_A = 0,05$ ;
  - Praias de areias finas:  $c_A = 0,2$ ;
  - Praias de areias médias:  $c_A = 0,3$ ;
  - Praias de areias grossas:  $c_A = 0,4$ ;
  - Áreas vegetadas:  $c_A = 0,5$ ;
  - Manguezais:  $c_A = 0.6$ .

O modelo não considera saturação do meio absorvedor, ou seja, o contorno terrestre, por mais que esteja saturado ainda vai absorver partículas de poluentes.

### 6. CENÁRIOS SIMULADOS

Com a finalidade de analisar o comportamento de um derrame de pequeno porte, foram elaborados oito cenários hidrodinâmicos distintos para serem simulados. Primeiramente foram determinadas características base para os diferentes cenários, como as condições iniciais, e de contorno. Em referência às condições de contorno, os dados de elevação (filtrados) foram inseridos como valores de elevação para o contorno aberto, ao invés de fazer uso das constantes harmônicas. Através desse método, a região do Porto de Tubarão apresentou resultados de elevação satisfatórios para a implementação do modelo lagrangeano. Em conjunto com essas características base, as condições variantes de cada cenário foram as condições do vento. Foram escolhidas quatro direções diferentes de vento, cada qual com duas intensidades. É importante esclarecer que as direções de vento usadas neste estudo são nomeadas de acordo com a convenção meteorológica, ou seja, o vento é chamado de acordo com a sua origem. Por exemplo, se o vento vem do norte, ele é originado do norte e sua nomeação será vento norte.

Para a geração de resultados mais adequados e realistas possíveis, foi feita uma análise de dados da estação meteorológica do Aeroporto Eurico Salles, disponibilizados no Banco de Dados Meteorológicos (BDM) pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Os dados são referentes aos anos de 2010 e 2011. A rosa dos ventos criada a partir desses dados está ilustrada na Figura 12.



Figura 12: rosa dos ventos da estação meteorológica do aeroporto feita a partir dos dados dos anos de 2010 e 2011.

Com relação a escolha das direções é preciso primeiramente visualizar a região de estudo, tendo em mente a região do Porto de Tubarão, a linha de costa representada na malha e a rosa dos ventos. A partir da Figura 5, na seção 5.2, e tendo em mente a rosa dos ventos (Figura 12), é possível visualizar que determinadas direções de vento são capazes de provocar grande impacto ambiental, pois é esperado que a mancha de óleo seja transportada em direção à linha de costa com mesma direção e sentido que o vento sopra. Isso se deve ao fato do óleo permanecer flutuando na água ao longo do seu percurso. Com a finalidade de escolher direções de vento que possam ser críticas ao meio ambiente (o caso da mancha alcançar a linha de costa), foram escolhidas as

direções SE, E, NEE e NE. Além disso, ao observar a rosa dos ventos é possível perceber que as direções NE e NEE são significativas para a região, tendo grande predominância. Outro fator importante é que o vento de direção SE pode representar uma situação de entrada de Frente Fria na região, pois segundo MATTIUZZI & MACHIORO (2012) essa direção é predominante em eventos como esse.

Com relação a escolha das intensidades do vento, foi realizada uma média dos dados de velocidade para cada direção, sendo que essas médias foram uma das escolhas de velocidade. Essa média foi feita a partir dos dados da estação meteorológica já citada. Já as demais intensidades, representam valores mais intensos de episódios típicos da região, conforme pode ser visto na Figura 12. De forma a se resumir, os cenários estão descritos na Tabela 2 de acordo com as características que os distinguem (direção de vento e intensidade):

Cenário	Direção do vento	Velocidade do vento (m/s)
1	NE	6,3
2	NE	8,4
3	NEE	6,9
4	NEE	7,5
5	E	4,9
6	E	7,2
7	SE	3,6
8	SE	6,0

Tabela 2: Dados de entrada diferenciadores de cada cenário para o modelo hidrodinâmico

Com o resultado dos cenários hidrodinâmicos, foi implementado o modelo de transporte lagrangeano, em que uma única situação de vazamento foi simulada. Vale ressaltar que para a implementação desse modelo é necessário definir certas características da fonte e do poluente analisado, tais como localização da fonte, tipo de lançamento, tipo de óleo, entre outros fatores. Os dados utilizados na simulação do transporte lagrangeano estão expostos na Tabela 3:

Lançamento	Instantâneo e Superficial	
Localização (LITM)	Latitude: 369610,52	
Localização (OTM)	Longitude: 7755541,43	
	Tipo: Pesado	
Óleo	°API: 14	
	Massa específica: 972 kg/m <sup>3</sup>	
	Volume: 8m <sup>3</sup>	
	Área: 200m²	
Tamanho da fonte	Espessura: 0,04m	
	Forma: Circular	
	Nº de partículas: 7776	

Tabela 3: Dados de entrada para o modelo de transporte Lagrangeano

A localização apresentada na Tabela 3 é referente ao nó 8005, o qual está localizado próximo a um dos piers do Porto de Tubarão. Esse ponto foi escolhido devido a intensidade de navios que transitam por essa região, fazendo com que exista uma maior chance de ocorrer algum tipo de acidente envolvendo derrame de petróleo. Quanto ao tipo e tamanho da fonte, os óleos pesados são comumente usados como combustível (tanque bunker) para navios de grande porte, como navios de transporte. Adicionalmente, devido as características desse tipo de combustível, normalmente ele recebe a adição de óleo diesel como uma forma de diminuir sua periculosidade ambiental, visto que o diesel, apresenta um elevado índice de evaporação (FORD, 2012). Entretanto, o derrame analisado nos diferentes cenários utilizará apenas o óleo proveniente do tanque bunker, visto que este apresenta uma maior permanência no meio ambiente, devido ao seu baixo

grau API, e por isso, apresenta um maior risco quanto a impactos ambientais. Além disso, SZEWCZYK (2006) associa o volume de 8m<sup>3</sup> como sendo um volume ligado a acidentes de pequeno porte, além de ocorrerem com uma frequência elevada, quando comparados com acidentes de outras magnitudes. Outra informação que deve ser adicionada quanto a caracterização da fonte é o número de partículas, que nesse caso foi de 7776 elementos.

Além dos dados apresentados acima, também é necessária a curva de decaimento do óleo utilizado. Essa curva é necessária devido aos processos físico-químicos que o petróleo sofre, como por exemplo evaporação, espalhamento e emulsificação, conforme apresentado na seção 4.1. Através desses processos, o óleo é degradado e assim, para uma representação mais real do cenário, a utilização de uma curva de decaimento se faz necessária. Para a determinação dessa curva foi utilizado o *software* ADIOS2, que apresenta licença gratuita e interface extremamente intuitiva. Adicionalmente, esse programa foi escolhido, pois seus resultados são internacionalmente aceitos como confiáveis. O resultado obtido (o mesmo para os diferentes cenários) pode ser visto na Figura 13.



Figura 13: Curva de decaimento de óleo.

Analisando o resultado proveniente do ADIOS2 para o tipo de óleo usado na simulação, pode-se perceber que após 360 minutos (ou 6 horas) do lançamento, o percentual remanescente de óleo se mantém praticamente constante em 80%. Esse resultado encontra-se dentro do esperado, visto que o óleo utilizado possui um baixo grau API, indicando que não existem grandes frações voláteis em sua composição. Portanto, é possível afirmar que a simulação estudada é não conservativa, pois há perda de massa.

Outro fator importante que deve ser considerado para simulações envolvendo plumas de óleo é o coeficiente de absorção dos nós de contorno terrestre, conforme apresentado na metodologia. Para a identificação dos valores desses coeficientes foi utilizado o Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima do Espírito Santo, também conhecidas como Cartas SAO (DOUGLAS; CABRAL, 2010). Esse Atlas fornece informações quanto as características dos diversos tipos de segmentos presentes na Baía de Vitória e Espírito Santo ao classificá-la de acordo com o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL). Esse índice varia de 1 a 10, e a Figura 14 apresenta os diferentes tipos de índices e suas respectivas caraterísticas e código de cores que os representam:

	fumer	c	ópie	D	TIDKE DE COSTA	
COR	INDICE	R	G	в	TIPOS DE CUSIA	
	ISL 1	119	38	105	<ul> <li>Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos</li> <li>Falésias em rochas sedimentares, expostas</li> <li>Estruturas artificiais lisas (paredões maritimos artificiais), expostas</li> </ul>	
	ISL 2	174	153	191	<ul> <li>Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos</li> <li>Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plata- forma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)</li> </ul>	
	ISL 3	0	151	212	<ul> <li>Praias dissipativas de areia média a fina, expostas</li> <li>Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach")</li> <li>Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos</li> <li>Campos de dunas expostas</li> </ul>	
	ISL 4	146	209	241	<ul> <li>Praias de areia grossa</li> <li>Praias intermediárias de areia fina a média, expostas</li> <li>Praias de areia fina a média, abrigadas</li> </ul>	
	ISL 5	152	206	201	<ul> <li>Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais</li> <li>Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação</li> <li>Recifes areníticos em franja</li> </ul>	
	ISL 6	o	149	32	<ul> <li>Praias de cascalho (seixos e calhaus)</li> <li>Costa de detritos calcários</li> <li>Depósito de tálus</li> <li>Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos</li> <li>Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)</li> </ul>	
	ISL 7	214	186	0	<ul> <li>Planície de maré arenosa exposta</li> <li>Terraço de baixa-mar</li> </ul>	
	ISL 8	225	232	0	<ul> <li>Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada</li> <li>Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada</li> <li>Escarpas e taludes ingremes de areia, abrigados</li> <li>Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados</li> </ul>	
	ISL 9	248	163	0	<ul> <li>Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas cos- teiras não vegetadas</li> <li>Terraço de baixa-mar lamoso abrigado</li> <li>Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais</li> </ul>	
	ISL 10	214	0	24	<ul> <li>Deltas e barras de rio vegetadas</li> <li>Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas</li> <li>Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado, apicum</li> <li>Marismas</li> <li>Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)</li> </ul>	

Figura 14: O código de cor e característica do litoral de acordo com o valor do ISL.

Fonte: DOUGLAS; CABRAL, 2010

Ao comparar essa figura com a classificação dada pela referência técnica quanto aos valores de coeficiente de absorção ( $c_A$ ) referentes aos diferentes tipos de granulometria presentes, entre outras características (o fato da área ser mangue, costão rochoso, entre outros), é possível aplicar um valor de  $c_A$  para cada ISL apresentado na figura acima. A Tabela 4 faz a conexão entre ISL e  $c_A$ .

Valor de ISL	C <sub>A</sub>	Características em comum
1	0,05	Costões rochosos
2	0,05	Costões rochosos
3	0,25	Areia fina e média (média entre $c_A$ 0,2 e 0,3)
4, 5, 6, 7, 8 e 9	0,4	Areia grossa
10	0,55	Áreas vegetadas e mangues (média entre $c_A$ 0,5 e 0,6)

Tabela 4: Resumo relacionando ISL com  $c_A$ .

Após relacionar o valor de  $c_A$  com o ISL, é possível classificar nó a nó da malha utilizada, observando as classificações das linhas de costa, apresentadas na Figura 15 do mapa da região.



Figura 15: Mapa da região em estudo com a classificação do ISL para cada tipo de segmento da costa.

Fonte: DOUGLAS; CABRAL, 2010

Em posse de todos esses dados é possível, enfim, iniciar a simulação dos cenários. Para melhor análise, os resultados serão apresentados da seguinte forma: Cenários 1 e 2, Cenários 3 e 4, Cenários 5 e 6, e Cenários 7 e 8.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 7.1. CENÁRIOS 1 E 2

Através dos resultados da simulação utilizando-se ventos de NE em ambas as intensidades, é possível perceber que o local de impacto na costa seria a região próxima ao Morro do Moreno localizado em Vila Velha, conforme mostram as Figuras 16 e 17.

Figura 16: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 1 (vento NE de 6,3m/s) após 5 horas e 35 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).





Figura 17: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 2 (vento NE de 8,4m/s) após 3 horas e 54 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).

Apesar das manchas apresentarem resultados similares quanto ao local atingido, níveis de concentração e forma da pluma, o tempo de toque da costa foi bastante alterado pela diferença de intensidade dos ventos. Para o Cenário 1, esse tempo foi de 5 horas e 35 minutos, enquanto que para o Cenário 2, esse tempo diminui para 3 horas e 54 minutos.

Analisando a trajetória da mancha é possível perceber que ela deslocou-se na mesma direção e sentido do vento, além de possuir pouca ou quase nenhuma deformação. A razão para essas duas causas pode estar contida no mesmo fator, o vento. Devido as características do tipo de lançamento, instantâneo e superficial, é esperado que o vento seja um dos fatores determinante para a direção e tempo de propagação da pluma, visto

que a pluma fica em contato direto com esse elemento, e assim, sofre fricção constantemente ao longo de sua trajetória.

O local afetado por esse acidente de pequeno porte na Baía do Espírito Santo (sob as condições dos Cenários 1 e 2) corresponde a área de costa de Vila Velha e do canal de acesso ao Porto de Vitória. Esses resultados estão apresentados nas Figuras 18 e 19, as quais mostram resultados de absorção da pluma pela linha de costa no instante em que todas as partículas tinham sido absorvidas.

Figura 18: Região afetada no Cenário 1 (vento NE de 6,3m/s) após 15h de simulação e localização da fonte (estrela verde).





Figura 19: Região afetada no Cenário 2 (vento NE de 8,4m/s) após 10h de simulação e localização da fonte (estrela verde).

A região marcada de azul, nas Figuras 18 e 19, corresponde a linha de costa que absorveu parte da pluma de contaminante. Assim, é possível notar que para o cenário de ventos mais brandos, a pluma chegou a atingir uma porção maior do canal de acesso do que no cenário de ventos mais intensos. Esse resultado pode ter ocorrido em virtude do tempo que a mancha de óleo ficou em movimento na água, visto que para o Cenário 2, a pluma foi rapidamente absorvida, quando comparada com o Cenário 1. Adicionalmente, devido ao fato da pluma ter alcançado o canal durante o período de maré enchente, as correntes superficiais têm grande influência no transporte. Assim, devido a circulação hidrodinâmica dentro do canal, a pluma foi carregada mais para o seu interior, chegando a atingir o 38º Batalhão de Infantaria, o Terminal Aquaviário da Prainha e o Comando da Marinha Brasileira. Esse resultado está de acordo com o encontrado por PARREIRA

(2008), FONTANA (2003) e CONCEIÇÃO FILHO (2003), que indicaram o vento e a maré como sendo os principais fatores para a dispersão de uma pluma de óleo nessa região.

Essa região afetada apresenta uma circulação mediana de pessoas, e pouca ou quase nenhuma atividade de lazer devido a circulação de navios de grande porte. Sendo assim, esse incidente de pequeno porte comprometeria a segurança, em sua maior parte, dos pescadores locais, como também da fauna e flora dessa região. Por essas e outras razões, locais onde exista a possibilidade de ocorrência de acidentes envolvendo derrame de óleo devem possuir medidas de contingência tais como as exigidas pela legislação CONAMA 398/08. Legislação essa que dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração.

## 7.2. CENÁRIOS 3 E 4

Através dos resultados da simulação utilizando-se ventos de NEE, com intensidades de 6,9 e 7,5m/s, é possível perceber que os locais de impacto na costa seriam as regiões da Ilha do Boi e o canal de acesso ao Porto de Vitória, conforme as Figuras 20 e 21.



Figura 20: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 3 (vento NEE de 6,9m/s) após 5 horas e 16 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).

Figura 21: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 4 (vento NEE de 7,5m/s) após 4 horas e 42 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).



Antes das considerações sobre os resultados é preciso se atentar às diferentes legendas usadas entre os Cenários 1 e 2, e os Cenários 3 e 4. Diferentes cenários com diferentes padrões de vento apresentaram plumas consequentemente com concentrações diferentes. Plumas com concentrações diferentes, ao serem representadas por uma mesma legenda, acabam tendo informação em demasia ou menos informação do que deveriam ter. Sendo assim, o uso de uma mesma legenda em todas as figuras de isolinhas de concentração foi comprometido, apesar de permitir uma comparação global entre plumas. Logo, a alternativa usada neste estudo foi de apresentar uma mesma legenda de concentração aos pares dos cenários de mesma direção de vento.

Apesar das manchas apresentarem resultados similares quanto ao local atingido e forma da pluma, o tempo de toque da costa foi bastante alterado pela intensidade dos ventos. Para o Cenário 3 (com ventos menos intensos), esse tempo foi de 5 horas e 16 minutos, enquanto que para o Cenário 4 (com vento mais intensos), esse tempo diminui para 4 horas e 42 minutos.

Analisando a trajetória da mancha, para ambos os cenários, é possível perceber que ela deslocou-se na mesma direção e sentido do vento, apesar de existir um pequeno deslocamento para a esquerda na trajetória da pluma. Esse resultado pode ter ocorrido em virtude do formato da linha de costa dessa região, o que fez com que a corrente superficial ocasionada pela maré enchente a deslocasse para a esquerda devido à localização da entrada do canal de acesso do Porto de Vitória. A mancha de óleo, ao chegar a essa posição (entrada do canal), é sugada para o interior do canal, fazendo com que a pluma fosse desviada, conforme constatado. Esse resultado condiz com o apresentado por FONTANA (2003) que analisou um caso similar.

Entretanto, ao se observar a região que sofre impacto de toque na linha de costa, percebe-se que os Cenários 3 e 4 apresentaram um maior adentramento no canal de acesso do Porto de Vitória, chegando a atingir uma região de mangue. Esses resultados podem ser observados nas Figuras 22 e 23, as quais mostram resultados de absorção da pluma pela linha de costa no instante em que todas as partículas tinham sido absorvidas.

Figura 22: Região afetada no Cenário 3 (vento NEE de 6,9m/s) após 18h de simulação e localização da fonte (estrela verde).



Figura 23: Região afetada no Cenário 4 (vento NEE de 7,5m/s) após 16h de simulação e localização da fonte (estrela verde).



Observando as Figuras 22 e 23, é possível notar a semelhança entre os resultados. Isso ocorreu devido a pequena variação entre as intensidades de vento e velocidades superficiais geradas pelo modelo hidrodinâmico.

O local afetado por esse acidente corresponde a entrada do canal de acesso ao Porto de Vitória, e também uma pequena parte da Ilha do Boi. Por se tratar de uma área residencial, a circulação de pessoas nessa região é considerada elevada, juntamente com o fato dessa região possuir uma praia que é utilizada por parte da população de Vitória. Vale ressaltar que, além de afetar as pessoas que ali circulam, um acidente nessas condições também afetaria a fauna e flora aquática, principalmente na área de mangue afetada, onde os danos podem ser severos devido à grande biodiversidade que esse tipo de ecossistema abriga. Vale ressaltar que, assim como nos Cenários 1 e 2 apresentados anteriormente, os resultados apresentados para os Cenários 3 e 4 condizem com os resultados discutidos por PARREIRA (2008), FONTANA (2003) e CONCEIÇÃO FILHO (2003), conforme apresentado no tópico anterior.

### 7.3. CENÁRIOS 5 E 6

Através dos resultados da simulação utilizando-se ventos de E, em ambas as intensidades, é possível perceber que o local de maior impacto é a Ilha do Frade, juntamente com o canal da passagem conforme as Figuras 24 e 25.



Figura 24: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 5 (vento E de 4,9m/s) após 8 horas e 31 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).





Apesar das manchas apresentarem resultados similares quanto ao local atingido, níveis de concentração e forma da pluma, o tempo de toque da costa foi bastante alterado pela intensidade dos ventos. Para o Cenário 3 (com ventos menos intensos), esse tempo foi de 8 horas e 31 minutos, enquanto que para o Cenário 4 (com vento mais intensos), esse tempo diminui para 4 horas e 57 minutos.

Analisando a trajetória da mancha é possível perceber que ela deslocou-se na mesma direção e sentido do vento, além de possuir pouca ou quase nenhuma deformação ao longo de sua trajetória, de modo similar aos Cenários 1, 2, 3 e 4. Entretanto é possível notar uma leve diferença entre a posição da mancha nos Cenários 5 e 6. Essa pequena mudança fez com que diferentes regiões fossem atingidas, mostrando que leves alterações na trajetória podem resultar em grandes diferenças no resultado final. As áreas

afetadas nos cenários com ventos E, de intensidades 4,93 e 7,4 m/s, estão apresentados nas Figuras 26 e 27 respectivamente, as quais mostram resultados de absorção da pluma pela linha de costa no instante em que todas as partículas tinham sido absorvidas.

Figura 26: Região afetada no Cenário 5 (vento E de 4,9m/s) após 20h de simulação e localização da fonte (estrela verde).





Figura 27: Região afetada no Cenário 6 (vento E de 7,2m/s) após 14h de simulação e localização da fonte (estrela verde).

Conforme pode ser visualizado nas Figuras 26 e 27, as regiões afetadas são o canal da passagem e a Praia de Camburi (Cenário 5) e a Ilha do Frade e o late Clube (Cenário 6). Assim como nos cenários anteriores, o vento e a maré são os principais fatores que determinaram a direção do movimento da pluma, juntamente com a circulação hidrodinâmica resultante do formato da área afetada.

Os locais afetados por esse acidente correspondem a uma área residencial, onde a circulação de pessoas é considera elevada. O mesmo pode ser observado na área do late Clube, onde o transito de embarcações pode acabar por alterar esse comportamento previsto pelo SisBaHia. Adicionalmente, por se tratar de uma região onde a população realiza atividades recreativas, esse tipo de incidente afetaria a balneabilidade da Praia

de Camburi, além do fato de atingir negativamente os pescadores locais que utilizam o canal da passagem como área de atracagem.

## 7.4. CENÁRIOS 7 E 8

Através dos resultados da simulação utilizando-se ventos de SE com 3,6 e 6 m/s, é possível perceber que o local de impacto na costa seria o centro da Praia de Camburi, conforme as Figuras 28 e 29.

Figura 28: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 7 (vento SE de 3,6m/s) após 10 horas e 28 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).





Figura 29: Isolinhas de concentração de óleo (em kg/m<sup>3</sup>) resultantes do Cenário 8 (vento SE de 6,0m/s) após 6 horas e 37 minutos de simulação e localização da fonte (estrela verde).

Apesar das manchas apresentarem resultados similares quanto ao local atingido, níveis de concentração e forma da pluma, o tempo de toque da costa foi bastante alterado pela intensidade dos ventos. Para o Cenário 7, esse tempo foi de 10 horas e 28 minutos, enquanto que para o Cenário 8, esse tempo diminui para 6 horas e 37 minutos.

Analisando a trajetória da mancha é possível perceber que ela deslocou-se na mesma direção e sentido do vento, assim como nos cenários anteriores. As áreas atingidas pelas plumas nos Cenários 7 e 8 estão apresentadas nas Figuras 30 e 31, as quais mostram resultados de absorção da pluma pela linha de costa no instante em que todas as partículas tinham sido absorvidas.



Figura 30: Região afetada no Cenário 7 (vento SE de 3,6m/s) após 27h de simulação e localização da fonte (estrela verde).

Figura 31: Região afetada no Cenário 8 (vento SE de 6,0m/s) após 18h de simulação e localização da fonte (estrela verde).



Avaliando as Figuras 30 e 31, é possível perceber que a região afetada pela pluma nos cenários com ventos SE é quase idêntica. Isso pode ter ocorrido devido a trajetória da pluma ter se localizado no centro da Baía do Espírito Santo, e assim, devido a batimetria da baía, as correntes superficiais se mantiveram paralelas a costa. Portanto, é possível determinar que o vento e a circulação hidrodinâmica superficial foram as principais determinantes para a trajetória da pluma, assim como nos cenários anteriores.

O local afetado por esse acidente de pequeno porte na Baía do Espírito Santo corresponde a uma área com grande circulação de pessoas que praticam esportes desde caminhadas, até atividades com contato direto com o mar, tais como windsuf, kitesurf e pesca. Vale ressaltar que, além de afetar as pessoas que ali circulam, um acidente nessas condições também afetaria a fauna e flora aquática.

### 7.5. RESUMO DOS RESULTADOS

De forma a se resumir os resultados encontrados nos diversos cenários apresentados, a Tabela 5 foi construída.

Cenário	Direção do vento	Velocidade do vento	Tempo de toque
1	NE	6,3	5h e 35min
2	NE	8,4	3h e 54min
3	NEE	6,9	5h e 16min
4	NEE	7,5	4h e 42min
5	E	4,9	8h e 31min
6	E	7,2	4h e 57min
7	SE	3,6	10h e 28min

#### Tabela 5: Resumo dos resultados encontrados

Cenário	Direção do vento	Velocidade do vento	Tempo de toque
8	SE	6.0	6h e 37min

Como pode ser visto na Tabela 5, o cenário que apresentou o menor tempo de toque na costa foi o Cenário 2, e o maior tempo de toque foi o Cenário 7. Vale ressaltar que as principais forçantes que atuaram na trajetória da pluma foram o vento e a maré. Esse resultado fica evidente quando analisamos os Cenários 1, 2, 3 e 4, onde devido ao local de lançamento, o vento é, a primeira instância, o principal fator para a determinação da direção do movimento da pluma. Isso se deve ao fato da fonte ser localizada próxima ao centro da Baía do Espírito Santo, e por isso, as correntes superficiais não sofrem grande influência da geometria da baía, pois a profundidade do local é maior, diminuído a atuação da tensão de cisalhamento do fundo na camada superficial. Entretanto, ao se aproximar do canal de acesso do Porto de Vitória, durante o período de enchente, as correntes superficiais transportam a pluma para dentro do canal, e portanto, se tornam forçante principal para a determinação da trajetória.

Outro ponto importante que deve ser ressaltado é que em todos os cenários a pluma sofre influência da maré de enchente, antes do toque na costa, com exceção dos cenários 2 e 4. Na Figura 32, o ponto preto representa o tempo de lançamento do contaminante, enquanto os pontos vermelhos representam os cenários com o tempo de toque mais rápido e mais lento, os Cenários 2 e 7, respectivamente. Apesar das plumas nos Cenários 2 e 4 não sofrerem a influência da maré de enchente antes do toque na costa, elas ainda sofrem influência dessa maré quando ainda se encontram próximas da entrada do canal de acesso ao Porto de Vitória (posição da mancha quando a maré vazante vira maré de enchente). Sendo assim, a pluma é "sugada" para dentro do canal devido a mudança na hidrodinâmica da região onde está situada.



Figura 32: Elevações medidas no Porto de Tubarão.

# 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como esperado, os fatores que mais contribuíram para o transporte do óleo derramado foram o vento e a maré. Isso se deve ao fato de que o poluente permanece, ao longo de toda sua trajetória, na camada superior da lâmina d'água, sendo assim, o cisalhamento do vento age diretamente nele, como também a camada superficial da coluna d'água que age como uma esteira transportando a pluma. Dessa forma, ambos contribuem fortemente para a determinação da trajetória da pluma.

Fato esse que pode ser constatado pelo resultado obtido nos diferentes tempos de alcance da pluma de contaminantes até o litoral, variando de 3 horas e 54 minutos até 10 horas e 28 minutos. Desse modo, a mancha alcançou o litoral mais rápido quando ventos de maior intensidade eram testados, em comparação a rapidez de alcance da mancha ao litoral quando a velocidade dos ventos era média. Além disso, também deve destacar que a pluma se movimentava, na medida do possível (quando não havia barreiras ou limites na malha), na mesma direção que o vento apontava quando em ambientes abertos, pois tanto o vento como a camada superficial apontavam para a mesma direção. Entretanto, ao se dirigir aos canais da passagem e de acesso ao Porto de Vitória, a pluma era direcionada de acordo com a direção da camada superficial.

Apesar de se obter resultados bem padronizados e parecidos, também existem resultados peculiares, tais como os fornecidos pelos Cenários 1 e 2, onde devido a diferença nas velocidades de vento, e o tempo em que a pluma ficou em contato com a água, a mancha pode ser transportada por mais tempo. Por esse motivo, no cenário com vento menos intenso, onde a pluma pode ser transportada por mais tempo, ela conseguiu atingir uma região mais próxima ao Porto de Vitória, resultado diferente do obtido no cenário com ventos mais intensos.

Como desejado, todos os cenários foram críticos, os quais produziram resultados que causariam grande impacto tanto no contorno da Baía do Espírito Santo como no contorno da Baía de Vitória. Impactos esses que trariam malefícios à fauna, à flora, aos pescadores locais, aos moradores, aos transeuntes, e às pessoas que utilizam a área para atividades

recreativas. Portanto é de extrema importância que medidas de contingência, como as exigidas pelo CONAMA 398/08, sejam postas em prática para sua execução nos casos onde ocorra algum acidente dessa natureza.

Dados de modelagem devem ser interpretados com cautela, pois os apresentam com simplificações que muitas vezes não representam situações reais. Sendo assim, deve-se tomar certos cuidados ao se depositar confiança nesse tipo de resultado. No entanto, esses resultados podem ser de grande ajuda na tomada de decisão ou até mesmo servir como diretrizes de planejamento.

A fim de aprimorar esse trabalho, algumas recomendações podem ser feitas. Primeiramente, devido a simplificação utilizada no modelo hidrodinâmico para a representação do vento, uniforme e constante, os resultados hidrodinâmicos foram influenciados. Assim, a utilização de dados de vento mais próximos da realidade, por exemplo, a utilização de um campo de vento com intensidades e direções distintas para cada ponto. Outro fator que pode ser melhorado é a calibração do nível d'água localizadas na Baía de Vitória, e a segunda poderia ser alcançada com os resultados de experimentos em campo. Dessa forma, o resultado hidrodinâmico seria aprimorado, tornando-se mais próximo da realidade. E por fim, poderiam ser analisados cenários com derramamentos de grande e médio porte a fim de enriquecer a análise do comportamento desses poluentes, e assim fazer a modelagem de estratégias de combate ao óleo derramado, tais como as realizadas por FERREIRA (2006)

#### BIBLIOGRAFIA

BARROS FILHO, G. C. Identificação dos Processos Físicos na Hidrodinâmica das águas do Entorno da Ilha de Vitória-ES. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

BATES, P. D., HORRITT, M. S. Modelling wetting and drying processes in hydraulic models. In: Bates, P. D., Lane, S. N., Ferguson, R. I., **Computational fluid dynamics: Applications in environmental hydraulics**, John Wiley and Sons, 2005, cap. 6, pp. 121–146.

CONCEIÇÃO FILHO, C. A. Estudo do movimento de manchas de óleo a partir de pontos do canal de acesso ao Porto de Vitória e estimativa de risco de aporte ao manguezal do Rio Aribiri na Baía de Vitória – ES. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

CORREA JUNIOR, Y. Estudo de variação de parâmetros de qualidade de água em pontos da região do estuário do rio Santa Maria da Vitória. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

DOEFFER, J. W. **Oil spill response in the marine environment.** Pergamon Press, 1992.

DOUGLAS, F. M. G., CABRAL, A. P. C. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima do Espírito Santo. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, Brasília, 2010.

FALCONER, R. A. Flow and water quality modelling in coastal and inland water. **Journal** of Hydraulic Research, v.30, n.04, pp. 437-452, 1992.

FERREIRA, J. P. Análise de estratégias de resposta a derramamento de óleo pesado no litoral do Espírito Santo utilizando modelagem computacional. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

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

FORD, M. **A master guide to: using fuel oil onboard ships**. Charles Taylor & CO. Limited, Londres, Inglaterra, 2012.

ITOPF. **Technical Information Papers (TIP's)**. 2002. Disponível em: <a href="http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/">http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/</a> complete-setof-technical-information-papers/>, acessado em 10 de junho de 2015.

JOKUTY, P. Properties of crude oil and oil products (not just another pretty database). **International Oil Spill Conference Proceedings**, vol. 2001, no. 2, pp. 975-981, 2001.

MARCHIORO, E. A Incidência de Frentes Frias no Município de Vitória (ES). Acta Geográfica, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, v. 6, pp. 49-60, 2012.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M. As flutuações de nível do mar durante o Quaternário superior e a evolução geológica de "deltas brasileiros". Boletim IG - USP. Publicação especial 15. São Paulo. USP. 186p. 1993.

MARVILA, F. C. Modelagem do esgoto doméstico lançado no canal da passagem e na Baía de Vitória sobre a balneabilidade da Baía do Espírito Santo. Projeto de Graduação em Engenharia Ambiental, Vitória, Brasil, 2014.

MATTIUZZI, H. V., MARCHIORO, E. O comportamento dos Ventos em Vitória (ES):a Gestão e Interpretação dos Dados Climatológicos. Revista Geonorte, Edição Especial, v. 2, nº 4, pp. 983-993, 2012.
MENEZES, G. S. C. **Modelagem de correntes residuais na baía do Espírito Santo**. Monografia de Graduação em Oceanografia, UFES, Vitória, 2005.

PARREIRA, V. X. Modelagem da trajetória da pluma de óleo para derramamentos na região do Porto de Tubarão. Monografia de Graduação em Oceanografia, UFES, Vitória, 2008.

REED, M., EKROL, N., RYE, H. & TURNER, L. Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Analysis in Support of Environmental Impact Assessment Offshore Namibia. Spill Science & Technology Bulletin, v. 5, nº 1, pp. 29- 38, 1999.

RIGO, D. & SARMENTO, R., **Determinação do Tombo da Maré no Canal da Passagem** - **Relatório Final, Laboratório de Hidráulica**, UFES, Vitória, Brasil. 1993.

RIGO, D., Análise do escoamento em Regiões Estuarinas com Manguezais – Medições e Modelagem na Baía de Vitória, ES, Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

SALDANHA, J. C. S. Análise da influência do Rio Santa Maria da Vitória na Baía de Vitória, através da modelagem computacional: uma contribuição ao processo de enquadramento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, UFES, Vitória, Brasil, 2007.

SFRENDRECH, D. M. Estudo de modelagem hidrodinâmica com alagamento e secamento em região de macromaré. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

SOTO, Y. J. M. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-

**Paranaguá-PR**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recurso Hídricos e Ambiental, UFP, Curitiba, Brasil, 2004.

SZEWCZYK, S. B. O. **Processos envolvidos em um derramamento de óleo no mar**. Tese de Doutorado do Curso de Oceanografia Física, FURG, Rio Grande, Brasil, 2006.