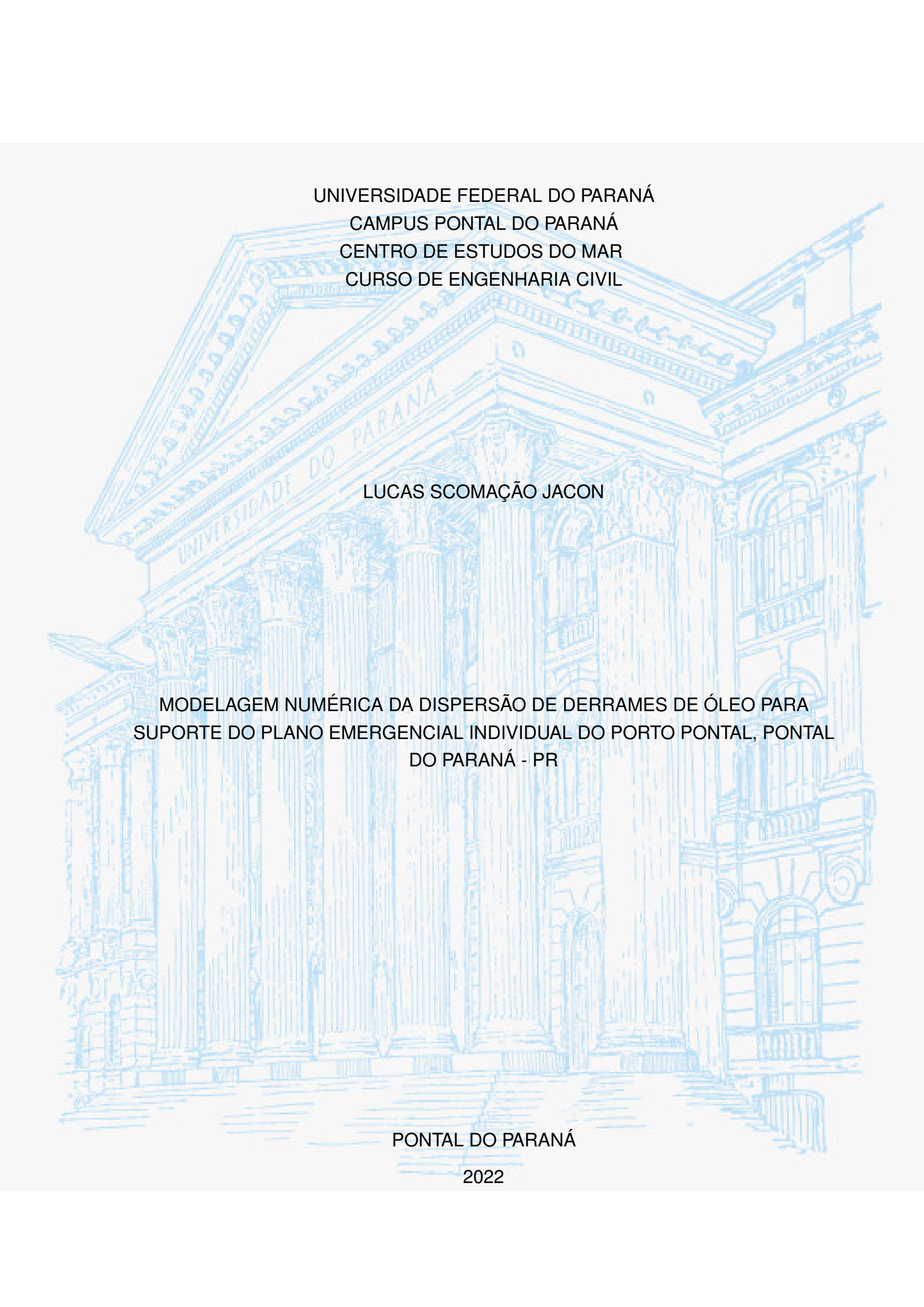




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PONTAL DO PARANÁ
CENTRO DE ESTUDOS DO MAR
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS SCOMAÇÃO JACON

MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE DERRAMES DE ÓLEO PARA
SUPPORTO DO PLANO EMERGENCIAL INDIVIDUAL DO PORTO PONTAL, PONTAL
DO PARANÁ - PR

PONTAL DO PARANÁ

2022

LUCAS SCOMAÇÃO JACON

MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE DERRAMES DE ÓLEO PARA
SUPORTE DO PLANO EMERGENCIAL INDIVIDUAL DO PORTO PONTAL, PONTAL
DO PARANÁ - PR

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná como requisito ao título de obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

PONTAL DO PARANÁ

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Lucas Scomação Jacon

**“MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE DERRAMES DE ÓLEO PARA
SUPORTE DO PLANO EMERGENCIAL INDIVIDUAL DO PORTO PONTAL,
PONTAL DO PARANÁ - PR”**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Prof. Dra. Roberta Brondani Minussi

CPP-CEM - UFPR

Prof. Msc. Robert Martins da Silva

Pontal do Paraná, 09 de setembro de 2022.

Referência: Processo nº 23075.056891/2022-02

SEI nº 4862702

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Eduardo de Paula Kirinus, pela orientação, compreensão, apoio e por ter me proporcionado a oportunidade de realização desta dissertação;

À minha mãe Bianca, ao meu pai Eduardo, por me proporcionarem a felicidade mesmo em momentos de dificuldade e pelo apoio incondicional;

Ao meu irmão Leonardo, por todo apoio que me proporcionou, pela parceria e por estar presente em todos os momentos que mais precisei;

Ao meu irmão Bruno, por ser meu anjo da guarda, sempre cuidando de mim;

Ao meu tio Edson, por ser um segundo pai para mim durante a vida toda, com incontáveis ensinamentos;

Aos meus avós e bisavó, por me darem condições para chegarem onde cheguei, por sempre me incentivarem a tentar ser o melhor que posso ser;

À minha namorada, Maria Letícia, pelo apoio, amor, cuidado e pela compreensão seja qual fosse o momento;

À minha família, como um todo, pelas felicidades e momentos que vivemos;

Aos meus amigos Matheus Oliveira, Mateus Lima, Samuel Pontes, Lucas Scapin, Leonardo Farias, Matheus Chiarelli, Michel Colodel, Laura Odonnell, Matheus Guilherme, Vinicius Canet, João Victor Oliveira, Raphaela Salomão e Maria Carolina Lopes, por sempre estarem comigo e pelas incontáveis vezes em que precisei de suas ajudas, sendo sempre atendido com afeto, dedicação e uma incansável disposição;

Aos colegas Luiz Schmidt e Bruno Kobiski, pelo apoio com informações imediatas e solução de dúvidas;

E principalmente à 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;

*O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas
dificuldades que superou no caminho.
(Abraham Lincoln)*

RESUMO

Com o crescimento incessante da necessidade do uso de óleos, seja óleo automotivo, óleo vegetal ou combustíveis de maneira geral, também há um aumento na demanda do transporte, gerando, conseqüentemente, um aumento no risco de acidentes no transporte, seja no marítimo, terrestre ou aéreo. Um derrame de óleo é um acidente ambiental grave que tem um impacto tanto ambiental, quanto sociológico e econômico. Este trabalho se situa no cenário anterior ao derrame de óleo, e tem como objetivo dar um suporte inicial à um estudo futuro mais aprofundado, para a elaboração de um Plano Emergencial Individual. Neste trabalho pode-se analisar e entender o percurso de plumas de óleo hipotéticas ao serem derramadas nas proximidades do que pode se tornar futuramente o Porto Pontal, também conhecido anteriormente como Porto 3P, analisando o comportamento destas plumas de óleo em cenários de eventos extremos. Este trabalho utilizou dois diferentes softwares, o modelo de derrame de óleo ECOS acoplado ao modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, além do BlueKenue para geração e interpolação da malha em elementos finitos. Com o trabalho foi possível analisar a hidrodinâmica do local e também a evolução da trajetória da pluma de óleo resultante do vazamento hipotético, como também verificar quanto às intempéries. O coeficiente de emulsificação estabiliza em 70% para óleos crus e pesados. As áreas atingidas pelas simulações dos derrames hipotéticos são de alto Índice de Sensibilidade Litorânea (ISL) o que gera um grande impacto ambiental e socio-econômico para a população que vive de recursos provenientes das regiões impactadas.

Palavras-chaves: Derrame de óleo, estuário, modelagem computacional, porto de Pontal do Paraná

ABSTRACT

As there is an incessant growth in the need for the use of oils, be it automotive oil, vegetable oil or general fuel oil, there is also an increase in the demand for transportation, generating, consequently, an increase in the risk of accidents in non-transportation, such as non-maritime, land or air. An oil spill is a serious environmental accident that has an environmental, sociological and economic impact. This work is located in the scene prior to the oil spill, and its objective is to give an initial support to a more in-depth future study, for the elaboration of an Individual Emergency Plan. In this work we can analyze and understand the course of hypothetical oil pens that will be spilled in the vicinity of what could become Porto Pontal in the future, also previously known as Porto 3P, analyzing the behavior of these oil pens in scenarios of extreme events. This work used two different softwares, the ECOS oil spill model coupled to the TELEMAC-3D hydrodynamic model, in addition to BlueKenue for the generation and interpolation of damage in finite elements. As the work was possible to analyze the hydrodynamics of the place and also the evolution of the trajectory of the oil pen resulting from the hypothetical deposit, as well as to verify how much weather. The emulsification coefficient stabilizes at 70% for crude and heavy oils. The areas affected by the simulations are two hypothetical spills that have a high Coastal Sensitivity Index (CSI) or that generate a large environmental and socio-economic impact for the population that lives on resources from the impacted regions.

Key-words: Oil spill, estuary, computer modeling, Port of Pontal do Paraná.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Volume de óleo presente no corpo d'água em função do tempo. .	22
FIGURA 2 – Comportamento do óleo sobre uma superfície líquida em função do tempo.	23
FIGURA 3 – Comportamento da pluma de óleo em função da intensidade do vento e das correntes.	25
FIGURA 4 – Processos atuantes sobre o óleo em uma superfície líquida. . . .	29
FIGURA 5 – Trajetória de registro de sobrevoo para monitoramento aéreo visual.	30
FIGURA 6 – Monitoramento orbital de uma mancha de óleo no Circulo Polar Ártico.	31
FIGURA 7 – Configuração estruturais das barreiras de contenção.	33
FIGURA 8 – <i>Skimmer</i> tipo <i>Foilex</i>	34
FIGURA 9 – <i>Skimmer</i> tipo <i>Transrec</i>	34
FIGURA 10 – Processo de Dispersão Química.	35
FIGURA 11 – Localização do Porto Pontal, ou Porto 3P, como conhecido anteriormente.	44
FIGURA 12 – Layout de infraestrutura organizacional hipotético proposto em 2018, do Porto Pontal.	45
FIGURA 13 – O código de cor e característica do litoral de acordo com o valor do ISL.	48
FIGURA 14 – Fluxograma ilustrativo do acoplamento do TELEMAT-3D com o ECOS.	52
FIGURA 15 – Malha de dados de temperatura para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.	55
FIGURA 16 – Malha de dados de salinidade para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.	55
FIGURA 17 – Malha gerada para a área de estudo	58
FIGURA 18 – Condições iniciais e de contorno utilizadas	60
FIGURA 19 – Malha de dados de batimetria para a região da área de estudo. .	61
FIGURA 20 – Malha de dados da variação do nível do mar para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.	63
FIGURA 21 – Malha de dados da variação do nível do mar para região de estudo no ano de 2010.	63
FIGURA 22 – Malha de dados da velocidade máxima de correntes para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010. . . .	64

FIGURA 23 – Malha de dados da velocidade máxima de correntes para região de estudo no ano de 2010.	64
FIGURA 24 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para todo o ano de 2010.	65
FIGURA 25 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para o período da primeira simulação, no dia 25/02/2010.	65
FIGURA 26 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para o período da segunda simulação, no dia 17/03/2010.	66
FIGURA 27 – Campo de dados da velocidade residual para região de estudo no ano de 2010 para um período 365 dias intervalados a cada 6 horas.	67
FIGURA 28 – Malha contendo dados do desvio padrão de velocidades no CEP para o ano de 2010.	67
FIGURA 29 – Domo de óleo no momento do derrame, no dia 25/02/2010, no primeiro momento.	68
FIGURA 30 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após duas horas.	69
FIGURA 31 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após quatro horas.	69
FIGURA 32 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após seis horas.	70
FIGURA 33 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após oito horas.	70
FIGURA 34 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após dez horas.	71
FIGURA 35 – Gráfico de evolução da área superficial da mancha de óleo em função do tempo.	71
FIGURA 36 – Gráfico da evolução da massa específica da mancha de óleo em função do tempo.	72
FIGURA 37 – Gráfico da emulsificação do óleo em função do tempo.	73
FIGURA 38 – Domo de óleo no momento do derrame, no dia 17/03/2010, no primeiro momento.	74
FIGURA 39 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após três horas.	74
FIGURA 40 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após seis horas.	75
FIGURA 41 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após nove horas.	75
FIGURA 42 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após doze horas.	76
FIGURA 43 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após quinze horas.	76
FIGURA 44 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após dezoito horas.	77
FIGURA 45 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e uma horas.	77
FIGURA 46 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e quatro horas.	78
FIGURA 47 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e seis horas.	78
FIGURA 48 – Gráfico de evolução da área superficial da mancha de óleo em função do tempo.	79
FIGURA 49 – Gráfico da evolução da densidade da mancha de óleo em função do tempo.	80

FIGURA 50 – Gráfico da emulsificação do óleo em função do tempo. 80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Relação de derramamentos de óleo no mundo	15
TABELA 2 – Classificação dos tipos de óleo.	21
TABELA 3 – Padrão de visualização aérea convencionada internacionalmente para obter um valor aproximado de óleo na região.	31
TABELA 4 – Características Estruturais das Barreiras de Contenção.	32
TABELA 5 – Classificação dos Tipos de Dispersantes Químicos.	36
TABELA 6 – Condições para Sistemas de Aplicação de Dispersantes Químicos	37
TABELA 7 – Capacidades Legais de Recolhimento de Óleo para Grandes Der- rames de Óleo	40
TABELA 8 – Dados de área total das bacias de drenagem dos principais rios que desembocam nas baías de Paranaguá e Antonina.	47
TABELA 9 – Classificação de ISL da linha de costa do estado do Paraná	49
TABELA 10 – Classificação de ISL da linha de costa do estado do Paraná	49
TABELA 11 – Parâmetros do ECOS para realizar a simulação de óleo.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	17
3	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVO GERAL	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO	20
4.2	PRINCIPAIS PROCESSOS ATUANTES SOBRE O ÓLEO	22
4.2.1	Evaporação	23
4.2.2	Espalhamento	24
4.2.3	Entranhamento	26
4.2.4	Advecção	26
4.2.5	Difusão	27
4.2.6	Interação com a costa	27
4.2.7	Emulsificação	28
4.2.8	Sedimentação	28
4.2.9	Biodegradação	28
4.3	ESTRATÉGIAS DE RESPOSTA AO ACIDENTE	29
4.3.1	Monitoramento da pluma	29
4.3.2	Barreiras de Contenção e Recolhimento (<i>Skimmers</i>)	31
4.3.2.1	Tipos de elementos construtivos e configurações das barreiras de contenção	32
4.3.2.2	<i>Skimmers</i>	33
4.3.3	Dispersão Mecânica	34
4.3.4	Dispersão Química	35
4.3.4.1	Condições Ambientais e parâmetros necessários para aplicação	36
4.3.4.2	Métodos de Aplicação do Dispersante Químico	36
4.3.5	Queima <i>in-situ</i>	37
4.3.6	Proteção e Limpeza de Linhas de Costa	38
4.4	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO À RESPOSTA	39
4.4.1	Tempo Estimado para Início da Resposta (ETA: <i>Estimated Time of Arrival</i>)	39

	12
4.4.2 Janelas de Oportunidade	39
4.4.3 Análise de Benefício Ambiental Líquido	40
4.5 PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL	41
5 ESTUDO DE CASO À REGIÃO DO PORTO PONTAL	44
5.1 ÁREA DE ESTUDO	44
5.1.1 Dinâmica Hídrica	45
5.1.2 Principais Zonas de Sensibilidade Ambiental do CEP e Principais Rios	46
5.1.3 Zonas de Impacto Direto e Indireto	49
6 MATERIAIS E MÉTODOS	51
6.1 MÓDULO HIDRODINÂMICO - TELEMAC-3D	52
6.1.1 Aproximações	53
6.1.1.1 Hidrostática	53
6.1.1.2 Equação de Estado da Água do Mar	53
6.1.1.3 Aproximação de Boussinesq	54
6.1.2 Traçadores	54
6.1.2.1 Modelo de Turbulência	55
6.2 MÓDULO DE DISPERSÃO DO ÓLEO - ECOS	56
6.3 MALHA NUMÉRICA	57
6.3.1 Transformação Sigma	59
6.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO	59
6.4.1 Batimetria	60
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
7.1 ANÁLISE HIDRODINÂMICA	62
7.2 ANÁLISE DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO ÓLEO	68
7.2.1 Simulação do dia 25/02/2010	68
7.2.1.1 Dispersão do Óleo	68
7.2.1.2 Avaliação das propriedades em função do envelhecimento	71
7.2.2 Simulação do dia 17/03/2010	73
7.2.2.1 Avaliação das propriedades em função do envelhecimento	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXO A CARTA SAO DE SANTOS, REFERENTE A REGIÃO DO CEP.	89

1 INTRODUÇÃO

O crescente uso das áreas costeiras para os mais diversos fins econômicos é responsável pelo aumento da poluição por hidrocarbonetos no meio marinho (GURJAR et al., 2015). Como consequência desta exploração, ocorrem os acidentes na extração, transporte e armazenamento dos combustíveis, fato que ocasiona uma intensa degradação ambiental capaz de afetar a população e a sustentabilidade presente na região atingida.

Parte dos derrames de óleo no mar podem ocorrer afastados das áreas costeiras, entretanto, a poluição resultante pode ser transportada para o litoral pelas correntes oceânicas e os pelos ventos superficiais (MARTA-ALMEIDA et al., 2013).

Nas zonas costeiras, as áreas de atividades portuárias, petrolíferas e de operações de manuseio e transporte de combustíveis estão entre as regiões mais suscetíveis à derrames de óleo e são geralmente próximas de zonas sensíveis, como estuários, mangues e marismas (TANSEL, 2014). Estas áreas necessitam ser protegidas de desastres naturais e antrópicos e, para isso, foram criados mecanismos de gestão, como o Plano de Responsabilidade, Planos de Emergência Individual, Planos de Áreas, entre outros.

Planos de Responsabilidade e Planos de Emergência Individual são alguns dos mecanismos idealizados por gestores, para que as indústrias e os/ governos tenham meios de agir frente a um eventual desastre ambiental. Segundo Góis (2008), uma vez que ocorre um derramamento de óleo em ambientes marinhos o dano ambiental é, geralmente, em uma escala catastrófica. Este dano ambiental é geralmente elevado, pois, mesmo um pequeno vazamento de óleo pode vir a se tornar mais impactante. Fatores como o clima, a temperatura da água, as correntes, a época do ano, o tipo de óleo, o tempo de resposta efetivo, além da vulnerabilidade da área, isto é, a biodiversidade presente no local, as comunidades que dependem das atividades do local, etc, podem amplificar os efeitos danosos ao ambiente (SOTO, 2004).

Segundo Burns et al. (1994) apud Marques et al. (2017), a composição do óleo é geralmente composta por diversas cadeias longas, podendo ser composto também por hidrocarbonetos, como por exemplo o benzeno ou o naftaleno. Devido a isso, frente a um derramamento de óleo no meio ambiente, estas substâncias passam por diversos processos, que por sua vez, se tornam compostos tóxicos e consequentemente geram impactos ambientais irreversíveis. Visto isso, o derramamento de óleo se torna um importante tema a ser estudado e discutido afim de minimizar esses impactos.

Ao redor do planeta, diversos eventos de derrame de óleo ocorreram, gerando

impactos severos ao meio ambiente. Um exemplo de catástrofe ambiental é o caso da plataforma *Deepwater Horizon*, situada no Golfo do México, que ocorreu em 20 de abril de 2010. Segundo Pallardy (2021) foi o maior derramamento de óleo da história dos Estados Unidos, com estimativa do governo de aproximadamente 4 milhões e 900 mil barris de petróleo vazados para o golfo. Apenas cerca de 800 mil barris foram recolhidos. De acordo com o autor, a mancha de petróleo se estendeu por uma área de aproximadamente 149 mil km². O grupo petrolífero britânico *British Petroleum* (BP), responsável pelo acidente, declarou que os custos com o derrame já atingiram 3,12 bilhões de dólares. O custo ambiental, por outro lado, é imensurável pois estima-se que cerca de 400 espécies de animais tenham sido afetadas, divididas entre aves, peixes e mamíferos (FAGUNDES et al., 2010).

- *Lakeview Gusher*: O maior derramamento com o equivalente a 9 milhões de barris de óleo derramados no Mar. O derrame ocorreu do dia 14 de março de 1910 até meados de setembro do ano seguinte.
- *Gulf War Oil Spill* (Derramamento de Óleo da Guerra do Golfo): O segundo maior derramamento, com equivalente a 8 milhões de barris derramados. As causas do volume ser tão elevado foram diversas, mas todas são em consequência da disputa pelo petróleo da região. O derramamento durou 9 dias e foi do dia 19 de janeiro até dia 28 de janeiro de 1991.
- *DeepWater Horizon*: Como mencionado acima, o derramamento foi de cerca de 4,9 milhões de barris de óleo. Foi o maior derramamento de óleo no Golfo do México.
- *Ixtoc-I*: Foi o segundo maior derramamento de óleo no Golfo do México, contabilizando cerca de 3,5 milhões de barris de óleo derramados. O derramamento ocorreu do dia 3 de junho de 1979 até o dia 23 de março de 1980.

A tabela 1 mostra os 4 maiores derramamentos de óleo ocorridos na história, sendo eles:

TABELA 1 – Relação de derramamentos de óleo no mundo

Derrame	Localização	Quantidade derramada (Milhares de Barris)	Referência
LakeView Gusher	Kern County, California, USA	9.000	(PATOWARY, 2021)
Derramamento da Guerra do Golfo	Kuwait, Iraque, e Golfo Pérsico	8.000	(GERGES, 1993)
Deepwater Horizon	Golfo do México	4.900	(PALLARDY, 2021)
Ixtoc-I	Golfo do México	3.520	(SOTO et al., 2014)

No Brasil, tem-se um extenso histórico de derramamentos de óleo. Como por exemplo, pode-se citar o acidente que ocorreu na Baía de Guanabara em 2000, e conforme Ciotti et al. (2009), este acidente foi causado pelo vazamento de uma das tubulações da Refinaria Duque de Caxias (Reduc), contabilizando aproximadamente 1,3 milhões de litros de óleo cru. Com relação a este acidente, a empresa Petrobras assumiu a responsabilidade e arcou com os prejuízos.

Mais recentemente, em 2019, tem-se o exemplo do derramamento, também de óleo cru, no nordeste do Brasil, que atingiu 4.334 km de faixa litorânea. Tendo sido identificado dia 30 de agosto de 2019. De acordo com Pena et al. (2020) este desastre é tido como o maior derramamento de óleo da história do Brasil e um dos mais extensos do mundo, atingindo 11 estados até o dia 22 de novembro de 2019.

Conforme novos desastres ocorressem ao decorrer dos anos, acreceu-se a necessidade de entender o comportamento em diferentes cenários, para a mitigação do impacto socio-ambiental. Para isso a modelagem computacional, segundo ROSMAN (2011), se tornou uma ferramenta de grande importância no que se diz respeito aos fatores hidrodinâmicos, previsão e monitoramento da trajetória de derrames, análise dos impactos gerados, análise do transporte de matéria ou até mesmo análise da qualidade da água. Em conformidade com a legislação brasileira, as simulações numéricas de derrames de óleo têm sido utilizadas na definição da área de influência de atividades com suscetibilidade de poluição por hidrocarbonetos, informação essencial para a regulação e normatizações ambientais do setor.

Para a plena utilização de modelos numéricos, existe uma série de etapas a serem seguidas. A primeira etapa a ser seguida na modelagem é compreender o funcionamento da dinâmica do ambiente. Para isso, faz-se necessário a formação de um modelo conceptual do fenômeno de interesse, realizando observações qualitativas e medições quantitativas identificando suas causas, efeitos, e os agentes que interferem na sua ocorrência. A etapa seguinte consiste na tradução do modelo conceitual para um

modelo matemático, ou seja, encontrar as equações diferenciais que regem o problema. (CASEIRO, 2011, p. 4).

O presente trabalho contou com a utilização de softwares de modelagem numérica, sendo utilizado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D para determinação do padrão de circulação e balanço hidrodinâmico da Baía de Paranaguá, no Paraná, com objetivo de simular um vazamento hipotético de óleo no futuro Porto Pontal de Pontal do Paraná, podendo assim determinar o comportamento, trajetória e o impacto da pluma de óleo resultante.

2 JUSTIFICATIVA

O cenário global, à respeito do âmbito ambiental, é preocupante, ações antrópicas geram mudanças em escalas muito superiores, quando comparadas às outras fontes, como o clima. Assim, ainda há um grau de incerteza ao prever os efeitos que serão deixados de herança por desastres ambientais.

No meio marinho, o transporte de cargas é consolidado como o mais relevante, seja por questões econômicas, logísticas ou sociais. Em virtude disso, há a busca constante de ampliação das atividades e isso impacta nas áreas costeiras. De acordo com Gurjar et al. (2015), essa constante ampliação e utilização é responsável pelo aumento da poluição por hidrocarbonetos nessas áreas.

Segundo Pena et al. (2020), Burns et al. (1994) e Marques et al. (2017), o óleo cru é composto por uma variedade de toxinas, que contém desde hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, compostos orgânicos voláteis, sulfeto de hidrogênio, além de metais pesados, tornando sua composição bem complexa. Ainda, conforme Pena et al. (2020), há diversos riscos envolvidos, ainda mais com as frações tóxicas do petróleo, pois estas frações são especialmente danosas a saúde, podendo levar até a morte quando há exposição direta ou até indiretamente.

O conceito de impacto ambiental, segundo a resolução da CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986, é, qualquer alteração de propriedades, resultante de atividades humanas, direta ou indiretamente, sendo elas físicas, químicas e/ou biológicas, causadas por toda e qualquer forma de matéria ou energia, desde que afetem:

- A saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- As atividades sociais e econômicas;
- A biota;
- As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- A qualidade dos recursos ambientais.

Podendo ser considerado impacto ambiental positivo ou negativo.

Além disso, pela área escolhida ser uma região estuarina, a biodiversidade no local é muito ampla e sensível. Conforme NOERNBERG et al. (2008) áreas sensíveis correspondem aquelas com maiores riscos, tanto biológico como socioeconômico, sendo que medidas de resposta bem sucedidas podem resultar em significativa redução da contaminação. Os impactos de um derramamento podem ser minimizados se os

locais mais sensíveis ao contato com o óleo, como por exemplo os manguezais, puderem ser protegidos.

Nesse contexto estão inseridas as Cartas de Sensibilidade Ambiental a derramamentos de Óleo – Cartas SAO – que definem as áreas ecologicamente sensíveis ao óleo e áreas vistas como zonas de sacrifício em caso de contaminação inevitável.

Conforme ROSMAN et al. (2003), modelos de dispersão de contaminantes são uma alternativa para uma avaliação precisa das consequências geradas por derramamento de óleos, por este motivo a utilização desta prática é fundamental na análise de cenários ambientais. Com essa análise é possível aplicar na prática medidas mais eficientes para conter o espalhamento e então mitigar o impacto que seria causado. O uso de ferramentas de simulação da realidade torna possível combinar diferentes variáveis, com diferentes intensidades e estimar, com um grau de precisão decente, resultados para poder entender previamente à um desastre qual estratégia de resposta ao derrame será a que melhor mitigará os danos.

Simulações numéricas ganham cada vez mais relevância para o planejamento de operações de proteção e para avaliação das respostas à serem tomadas. A avaliação da trajetória de um derrame e o entendimento da localização final da mancha é de extrema importância, tanto para combate à poluição, quanto para recuperação do petróleo derramado. A ciência da evolução da mancha também é fundamental para estimar quais são os riscos potenciais atrelados à essa mancha, ou seja, onde a mancha irá atingir e qual será o impacto socioeconômico. Também, ter o conhecimento da trajetória seguida por um eventual derrame também é muito relevante para planejamento das rotas de navios tanque, pontos de carga e descarga de óleos e rotas de óleo dutos. Modelos numéricos que estimam trajetórias de derrames, deveriam fazer parte de todo e qualquer plano de contingência no combate à poluição (SOTO, 2004).

Tendo impacto ambiental direto, a proposta do trabalho busca esclarecer, prever e ter um entendimento do comportamento de um vazamento hipotético de óleo, além de modelar a trajetória da pluma de óleo visando a criação de medidas para reduzir o impacto, além de ampliar as possibilidades de tomada de decisão de órgãos competentes na proteção de áreas mais sensíveis, como a em questão.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir com o conhecimento do padrão hidrodinâmico e do comportamento de plumas de óleo na Baía de Paranaguá.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a hidrodinâmica da Baía de Paranaguá considerando como forçantes o vento e a maré;

Avaliar a trajetória das plumas de óleo proveniente de derrames hipotéticos próximos ao local de implantação futura do Porto Pontal, de Pontal do Paraná, diante de diversos cenários com diferentes características meteoro-oceanográficas;

Identificar as possíveis regiões na costa da Baía de Paranaguá a serem atingidas por um derrame no Porto Pontal e o tempo de chegada;

Verificar os impactos ambientais diretos e indiretos ocasionados por um derrame hipotético próximo ao Porto Pontal.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO PETRÓLEO

O petróleo é um composto complexo com uma variedade alta de moléculas, sendo essas, o carbono, oxigênio, enxofre, vanádio, níquel e sais minerais. Mesmo assim, o petróleo é formado majoritariamente por hidrocarbonetos de diferentes categorias (SZEWCZYK, 2006; FINGAS, 2017).

Estes hidrocarbonetos são categorizados dependendo da composição química, podendo ser alcanos, alcenos, aromáticos, asfaltenos e naftenos. Os alcanos são os principais constituintes do petróleo, apresentando estabilidade e diversas ligações simples entre os carbonos. Porém, os naftalenos são os compostos com maior probabilidade de dispersarem pela característica de insolubilidade em água, já que o mesmo apresenta estrutura química anelar (JOKUTY, 2001; FINGAS, 2017).

Pelo petróleo possuir partes voláteis, ao existir um derrame inicial a tendência do petróleo é ter sua densidade aumentada em função do tempo. Ao discorrer um determinado período de tempo, a pluma resultante desse derrame acumula energia o suficiente para começar o processo de evaporação e com isso partes menos pesadas tendem a evaporar mais facilmente, restando apenas partes mais pesadas aumentando ainda mais a densidade deste óleo, conseqüentemente irá ocorrer uma inversão de densidades e isso fará o óleo afundar da camada superficial da água salgada. Sendo assim, o tempo decorrido de um derrame é um fator a ser observado para se obter a massa específica atual do óleo derramado (SOTO, 2004).

Quando o assunto é derramamento de petróleo deve-se ter em mente que a quantidade de carbono e as suas ramificações possuem influência direta na evaporação, dispersão e emulsificação dos hidrocarbonetos, possibilitando assim que o derramamento se prolongue e afete diversas áreas. Além disso, a densidade e o grau de API (American Petroleum Institute) são objetos de grande importância para a medição das características e persistências do óleo no meio ambiente (LOBO et al., 2015).

De modo geral os óleos derivados de petróleo apresentam massa específica menor do que a água. Contudo, óleos muito intemperizados sofrem um aumento de massa específica, sendo influenciados diretamente pela temperatura e aumento da emulsificação Lehr et al. (2002).

O modelo ECOS utiliza a equação 4.1 descrita pelos autores BUCHANAN I. E HURFORD (1988)

$$\rho_t = F_{vv}\rho_w + \rho_0(1 - F_{vv})(1 + C_{DE}F_v)[1 - C_{DT}(T - T_0)] \quad (4.1)$$

Onde, ρ_t é a massa específica em cada passo de tempo, ρ_w é massa específica referencial da água do mar, ρ_0 é a massa específica referencial do óleo, T é a temperatura e T_0 é uma temperatura de referência para o óleo (20 °C). C_{DE} e C_{DT} são coeficientes empíricos adotados de acordo com Lehr et al. (2002) que assume valores de 0,18 e 0,0008, respectivamente.

Geralmente, a densidade do petróleo é expressa em grau de API, dada pela equação 4.2:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{Densidade(15^{\circ}C)} - 131,5 \quad (4.2)$$

Atendendo a essa tipificação do óleo, entende-se que caso o grau de API seja baixo, a composição química será mais pesada e, também, será mais persistente. Portanto, os óleos mais persistentes ao meio ambiente são os óleos crus e os menos persistentes são os óleos leves (SZEWCZYK, 2006).

A Tabela 2 ilustra os grupos de óleo segundo a equação 4.2.

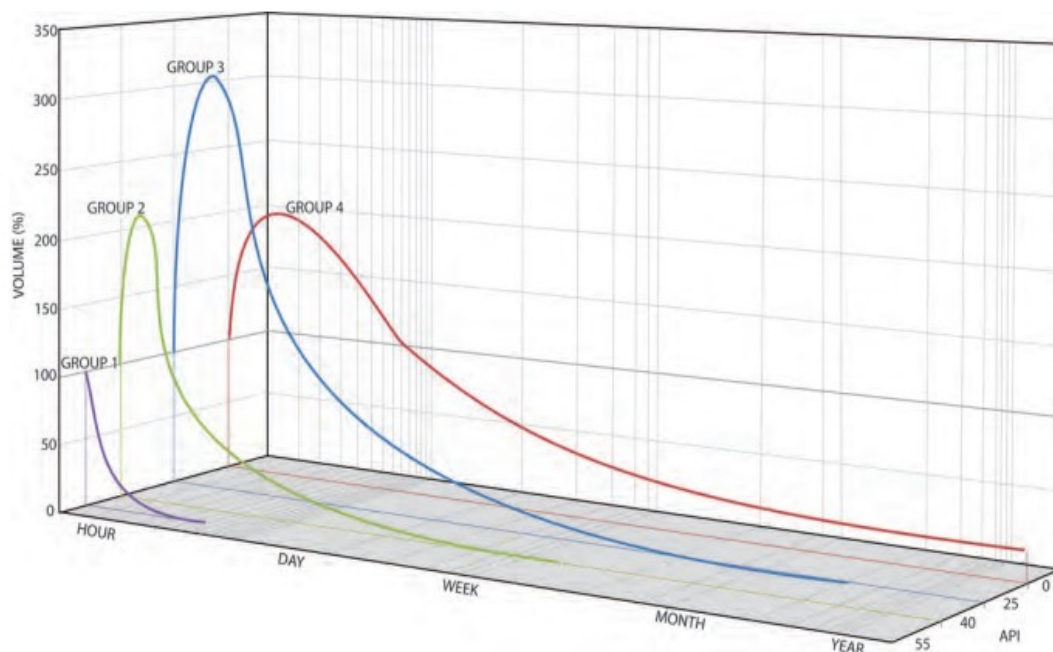
TABELA 2 – Classificação dos tipos de óleo.

Grupo	Densidade	API	Composição	Meia Vida	Persistência
I	<0,8	>45	Leve	~ 24 h	1 - 2 dias
II	0,8 à 0,85	35 à 45	Leve	~ 48 h	3 - 4 dias
III	0,85 à 0,95	17,5 à 35	Pesado	~ 72 h	5 - 7 dias
IV	>0,95	<17,5	Pesado	~ 168 h	>7 dias

Fonte: ITOPF - Acesso em 19/07/2022

A Figura 1 ilustra o volume de óleo e a emulsão de água-no-óleo que permanece na superfície da água, ilustrados como uma porcentagem do volume original do derrame, para um óleo típico de cada um dos grupos de API. As curvas representam um comportamento médio estimado para cada grupo. No entanto, o comportamento de um determinado petróleo bruto pode diferir do padrão geral, dependendo de suas propriedades e das condições ambientais no momento do derramamento.

FIGURA 1 – Volume de óleo presente no corpo d'água em função do tempo.

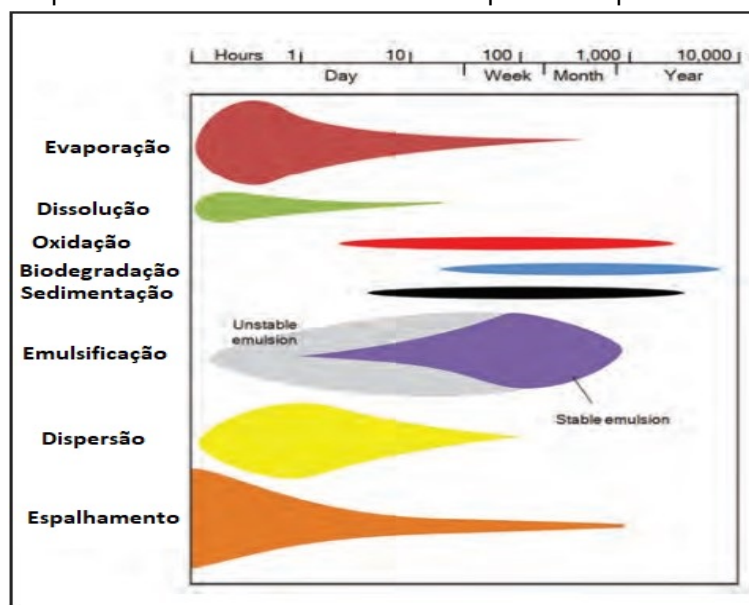


Fonte: ITOPF, 2014. - Acesso em 19/07/2022

4.2 PRINCIPAIS PROCESSOS ATUANTES SOBRE O ÓLEO

Conforme Ferreira (2006), existem 7 processos atuantes que se destacam num derrame de óleo, estes são a evaporação, o espalhamento, o entranhamento, a advecção e a difusão, a interação com a costa e a emulsificação. A seguir, apresenta-se uma descrição sobre cada um destes processos. Cada um dos processos afeta o óleo de maneira particular. A evaporação e o espalhamento são mais relevantes em momentos iniciais do derrame. Enquanto a emulsificação, por exemplo, é mais relevante após um período de tempo desde o início do derramamento. A Figura 2 apresenta a forma em que cada um dos processos é afetado, em função do tempo e de sua relevância para cada momento.

FIGURA 2 – Comportamento do óleo sobre uma superfície líquida em função do tempo.



Fonte: Adaptada de ITOPI, 2014. - Acesso em 21/07/2022

4.2.1 Evaporação

Segundo o dicionário Oxford Languages (2022), a evaporação consiste no fenômeno em que os átomos ganham energia em função do aumento natural, ou artificial, da temperatura e gradativamente mudam seu estado físico, de um estado líquido para um gasoso. Isso causa uma redução no volume da pluma de óleo na superfície do mar, mas como dito na seção 4.1, o óleo é formado por diversos componentes. Por toda essa heterogeneidade, os componentes mais leves se desprendem da pluma com a evaporação, resultando em uma pluma com peso molecular mais elevado (LEHR et al., 2002). Ainda, segundo Lehr et al. (2002), a taxa de evaporação, por conta da heterogeneidade de componentes, decresce com o envelhecimento de uma pluma de óleo. Conforme Ferreira (2006), a taxa de evaporação varia conforme o óleo vai evaporando, pois, sua composição é alterada, afetando a sua densidade e viscosidade, isso acontece pois, a taxa de evaporação depende da área da pluma de óleo na superfície, da espessura dessa pluma, do coeficiente de transporte da massa e também da pressão de vapor.

A evaporação representa uma das maiores perdas de massa durante um derrame de óleo, o modelo ECOS utiliza do algoritmo de Stiver et al. (1984) em função da temperatura, volume de óleo, área atingida, intensidade do vento e grau API.

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_e}{V_0} A_s \exp\left(A - \frac{B}{T}(T_0 + T_g F_e)\right) \quad (4.3)$$

$$T_0 = 532,98 - 3,12895(API) \quad (4.4)$$

$$T_g = 985,62 - 13,597(API) \quad (4.5)$$

$$K_e = 0,0025x(W)^{0,78} \quad (4.6)$$

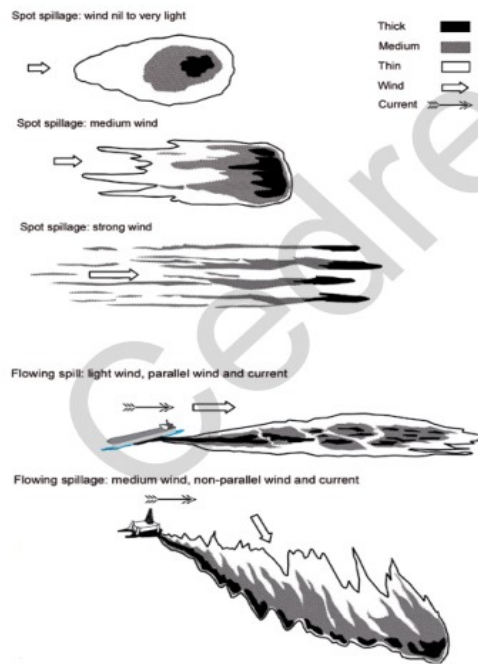
sendo, K_e o coeficiente de influência do vento, A_s a área atingida pelo óleo, V o volume do derrame e A e B os coeficientes adimensionais e empíricos utilizados de acordo com Stiver et al. (1984).

4.2.2 Espalhamento

Segundo Lehr et al. (2002) apud Ferreira (2006), logo após ao óleo entrar em contato com o corpo d'água, da-se início ao espalhamento, em decorrência das ações das correntes de superfície e do vento, provocando o estiramento da pluma, assim reduzindo a espessura da camada de óleo na direção do vento. Em sua maioria, uma concentração elevada de óleo permanece onde ocorreu o derrame e, uma pequena parte desse volume vai sendo deslocada pelo espalhamento, para uma região com uma camada menos espessa, porém abrangendo uma área muito mais elevada

Ainda segundo Ferreira (2006), o espalhamento determina a extensão dita em área superficial da pluma. Como ilustrado na Figura 3, o primeiro, o segundo e o terceiro cenário são o espalhamento em função apenas do vento, respectivamente fraco, médio e forte. Já o quarto e quinto cenário, são referentes aos ventos aliados às correntes de superfície. O quarto cenário é a combinação de um vento fraco e a corrente superficial, ambos paralelos à pluma, já o quinto cenário é a combinação de um vento mediano, não paralelo com a corrente superficial. Quanto a pluma, quanto mais escura, maior é a espessura da mancha na região.

FIGURA 3 – Comportamento da pluma de óleo em função da intensidade do vento e das correntes.



Fonte: Cedre, 2010. - Acesso em 01/08/2022

O modelo ECOS utiliza a equação de Proctor et al. (1994), este fenômeno é calculado em três etapas: primeiro são calculados os coeficientes de espalhamento D_x e D_y para as direções x e y utilizando a equação 4.7, o segundo passo é o raio de ação de espalhamento $[+U_r, -U_r][+V_r, -V_r]$, sendo calculado pelas equações 4.8 e 4.9 e finalmente, as velocidades de espalhamento U_{s_i} e V_{s_i} são calculadas pelas equações 4.10 e 4.11.

Sendo definidos os coeficientes de espalhamento, são determinados os máximos raios de espalhamento, de forma que podem ser estimadas as velocidades.

$$D_x = D_y = \frac{\pi k_2^2}{16} \left(\frac{\Delta g V^2}{v^{[2]}[w]} \right)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{-1}{2}} \quad (4.7)$$

Nesta equação, V é o volume total do derrame, t é o tempo decorrido desde o início do derramamento e k_2 é a constante adimensional empírica com valor de 0,725 (FAY, 1969).

$$U_r = \sqrt{\frac{2D_x}{\Delta t}} \quad (4.8)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{2D_y}{\Delta t}} \quad (4.9)$$

As velocidades da partículas auxiliam para a estimativa das velocidades de espalhamento e são determinadas através das equações proposta por Proctor et al. (1994), descritas na Eq. 4.10 e 4.11. Onde, R_1 e R_2 números aleatórios distribuídos entre o intervalo uniformemente de 0 e 1.

$$U_{s_i} = R_1 \cos(2\pi R_2) U_r \quad (4.10)$$

$$V_{s_i} = R_1 \cos(2\pi R_2) V_r \quad (4.11)$$

4.2.3 Entranhamento

Segundo Ferreira (2006), o entranhamento do óleo depende da turbulência. A fonte primária para esse processo é a quebra de ondas resultante da ação do vento. O entranhamento tem relação também com o tamanho das gotas de óleo, pois se estas forem pequenas, são naturalmente forçadas pela turbulência natural da água e assim não retornam para a superfície.

4.2.4 Advecção

Advecção está associada ao transporte de óleo de um local para outro devido as forças do vento, da onda, da maré e fluxos gerados pelo gradiente de densidade da pluma (FERREIRA, 2006). A resultante dessas forças determina a direção, o sentido e a intensidade em que essa pluma irá se locomover.

As equações utilizadas pelo modelo para calcular a advecção são descritos pelas equações 4.12, 4.13 e 4.14.

$$U_i = k_c U_c + k_w U_v \quad (4.12)$$

$$V_i = k_c V_c + k_w V_v \quad (4.13)$$

$$W_i = k_c W_c + w_i \quad (4.14)$$

Onde, i representa o índice para cada partícula e varia de 1 ao número máximo de traçadores 40.000. U_i , V_i e W_i são as componentes meridional, zonal e vertical da velocidade das partículas, respectivamente. U_c , V_c e W_c são as componentes de transporte pelas correntes. U_v , V_v são as componentes de transporte pelo vento e k_c e k_w são os coeficientes de transporte pela corrente e pelo vento, respectivamente.

O modelo utiliza a equação proposta por (FRANCH-MACCAY, 2004) no cálculo da componente de flutuabilidade da partícula w_i , dado pela equação 4.15

$$w_i = \frac{d_i^2 g (1 - \frac{\rho_0}{\rho_w})}{18 v_w} \quad (4.15)$$

4.2.5 Difusão

Conforme definido por Ferreira (2006), a difusão ocorre devido à energia turbulenta das forçantes presentes no corpo d'água (vento, ondas, marés e correntes marítimas), essa difusão é determinada a partir de um processo empírico de coeficientes de difusão horizontal e vertical. Difusão está sendo definida como a representação de um processo físico deste transporte.

O modelo ECOS utiliza um modelo de comprimento de mistura modificado para o óleo descrito em AL-RABEH et al. (1989). Inicialmente é definida a máxima distância (Δ_S) que uma partícula pode viajar durante um passo de tempo (Δ_t). A seguir, as componentes de velocidade ao longo de x e y são calculadas pelas Eq. 4.17 e Eq. 4.18, respectivamente.

$$\Delta_S = R_1 \sqrt{(0,0012 \Delta_t)} \quad (4.16)$$

$$U_{di} = \Delta_S \cos(2\pi R_2) \quad (4.17)$$

$$V_{di} = \Delta_S \cos(2\pi R_2) \quad (4.18)$$

Após todas as propriedades das contribuintes no transporte terem sido calculadas, a posição final de cada traçador é integrado no tempo usando o método de Euler.

4.2.6 Interação com a costa

Nem todo óleo será evaporado, será recolhido ou irá se dispersar, essa parcela restante pode ser depositada na linha de costa das regiões mais próximas. Segundo Ferreira (2006), a destinação do óleo proveniente de um derrame depende das características desse óleo, do tipo de sedimento encontrado na linha de costa, da largura e também da inclinação desta linha de costa, além das ondas, marés, correntes e do vento. Essa interação óleo x linha de costa irá ser finalizada quando houver uma saturação e a capacidade de retenção for atingida, após isso o óleo excedente será transportado novamente ao corpo d'água.

4.2.7 Emulsificação

Emulsificação ocorre quando, em consequência da turbulência da água ao redor da pluma, pequenas gotas de água se misturem à essa pluma, gerando uma emulsão de água-óleo (LEHR et al., 2002). Esse processo aumenta significativamente o volume de óleo dependendo do grupo de API do óleo (ITOPF-HANDBOOK, 2020/21). Ainda segundo Lehr et al. (2002), a quantidade de água e tamanho das gotas de água irão afetar a viscosidade e a estabilidade da emulsão em função do tempo. Uma emulsão completa, pode conter de 80 a 90% de água em sua composição.

O algoritmo atualmente implementado no ECOS utiliza o trabalho de Mackay et al. (1980) para o cálculo da emulsificação. Basicamente, o processo é governado por uma equação diferencial de primeira ordem como função da intensidade do vento.

$$\frac{F_{wv}}{dt} = K_w(1 + W)^2 \left(1 - \frac{F_{wv}^i}{F_{wv}^f}\right) \quad (4.19)$$

$$F_{wv}^i = 0,0; F_{wv}^f = 0,08; K_w = 2 \times 10^6$$

Porém, em Fingas (2017) e seus trabalhos anteriores, afirmou que são necessários mais estudos para melhor compreender o processo de emulsificação.

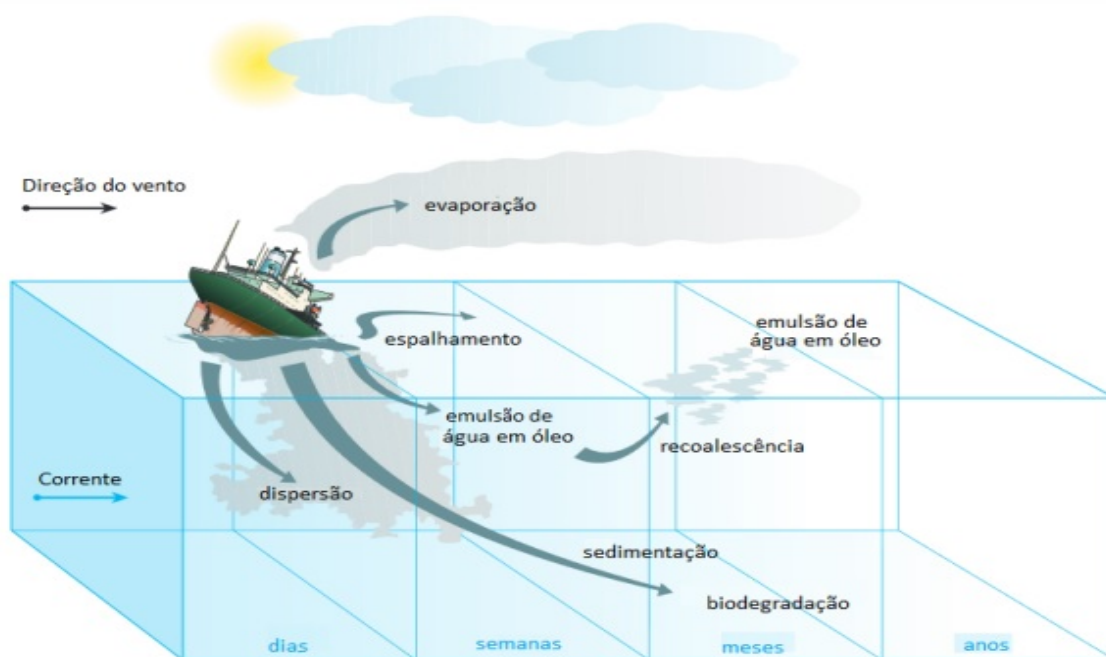
4.2.8 Sedimentação

Ao longo do tempo em contato com a água, o óleo tem sua massa específica aumentada, com sua massa específica pode ocorrer o afundamento da partes da pluma de óleo proveniente do derrame, com isso ocorre outro processo, a sedimentação, conforme ilustrado na Figura 4 abaixo.

4.2.9 Biodegradação

Biodegradação irá ocorrer quando o óleo entrar em contato com a fauna ou com a flora marinha, ocasionando uma intoxicação grave direta ou indiretamente, seja por absorção ou por digestão, proveniente desse óleo afundado. Isso pode trazer consequências à comunidades que utilizem a região do derrame como fonte financeira e de alimentação.

FIGURA 4 – Processos atuantes sobre o óleo em uma superfície líquida.



Fonte: IPIECA et al.(2015)

4.3 ESTRATÉGIAS DE RESPOSTA AO ACIDENTE

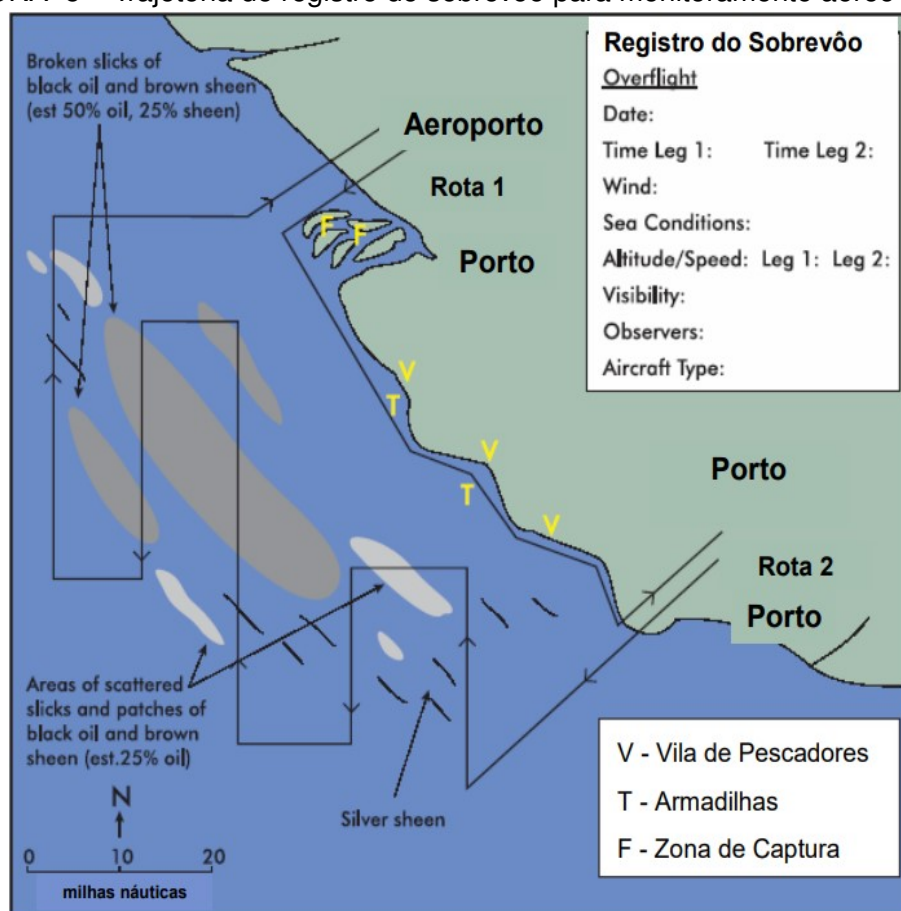
Toda e qualquer rota de navios-tanque, utilizado para transporte de cargas de granel líquido para as refinarias ou para centros consumidores, contem riscos da ocorrência de um derrame de óleo bruto, portanto há sempre a necessidade de um planejamento prévio, uma estratégia de contenção e recursos à disposição em caso da real ocorrência desses produtos no corpo d'água. Além de também existir a necessidade da programação para realizar operações de limpeza da linha de costa, em um cenário onde as técnicas foram insuficientes ou ineficientes, ou até se não puderem ser utilizadas (FERREIRA, 2006; NORDVIK, 1995).

4.3.1 Monitoramento da pluma

Monitoramento da pluma, também denominado não-resposta, apesar de anti intuitivo, não significa realmente não tomar nenhuma providência sobre o desastre ambiental. Apenas significa a não interferência artificial no desenvolvimento da mancha de óleo, porém, é uma estratégia tomada após análises prévias do deslocamento e espalhamento da pluma, como também de suas alterações. Para este procedimento ser o escolhido, primeiramente será constatado, à partir de simulações, equipamentos aéreos ou até equipamentos orbitais, que a trajetória da pluma não afetará nenhuma área ambientalmente sensível, que é descrita segundo a carta SAO da região (FERREIRA, 2006).

Recursos aéreos auxiliam na confiabilidade do monitoramento da pluma. Segundo Ferreira (2006) a altitude à ser sobrevoada é determinada pela visibilidade, porém, em tempo claro, a altitude de 500m (1.500 pés) é comprovadamente a altitude ótima para observar a área sem perder qualquer qualidade visual. Ainda, para se confirmar vestígios de óleo ou analisar a aparência deste, deve-se sobrevoar à meia altura (ACQUAPLAN, 2013) apud (FERREIRA, 2006). A Figura 5 é possível observar a trajetória de sobrevoio para monitoramento de uma mancha de óleo.

FIGURA 5 – Trajetória de registro de sobrevoio para monitoramento aéreo visual.



Fonte: Adaptação por José Paulo Ferreira de ITOPF, 2004.

Na Figura 6, observa-se uma imagem de satélite da Agência Espacial Europeia (ESA), da movimentação de um derrame de óleo Diesel no rio Ambarnaya, no Circulo Polar Ártico.

FIGURA 6 – Monitoramento orbital de uma mancha de óleo no Circulo Polar Ártico.



Fonte: ESA, 2020 - Acesso em 08/08/2022.

Ainda, para se obter um parâmetro visual de medição, a Tabela 3.

TABELA 3 – Padrão de visualização aérea convencionalmente internacionalmente para obter um valor aproximado de óleo na região.

Tipo de Óleo	Aparência	Espessura da camada (mm)	Volume aproximado (m ³ /km ²)
Óleo brilhante	Prateado	>0,0001	0,1
Óleo brilhante	Iridescente / Arco-íris	>0,0003	0,3
Óleo cru ou <i>Bunker</i>	Marrom a preto	>0,1	100
Emulsão Água-no-Óleo	Marrom/Laranja	>1	1000

Fonte: Adaptada de ITOPF

4.3.2 Barreiras de Contenção e Recolhimento (*Skimmers*)

Barreiras de contenção possuem finalidade de conter derrames de petróleo, podendo ser usadas para bloquear, concentrar ou direcionar a pluma de óleo, evitando a contaminação de locais estratégicos de interesse ecológico ou sócio-econômicos (SZEWCZYK, 2006).

Segundo Ferreira (2006) e Szewczyk (2006), a essa estratégia seria a ideal num âmbito ambiental, podendo ser adotada sempre que as condições climáticas e oceanográficas estivessem propícias à isso, mas, há uma série de complicações na utilização desta abordagem. Para o sistema de barreiras de contenção irem contra a tendência típica do óleo que é de se espalhar pela influência das forças presentes no meio marítimo. Conforme Ferrão (2005) os sistemas disponíveis para contenção da pluma são lentos, em virtude disso, em mar aberto e principalmente em áreas agitadas a proporção capturada por essa alternativa pode não ser maior do que 15% do volume total, isso deve-se porque nessas regiões a pluma pode espalhar-se rapidamente por extensões quilométricas.

As limitações para aplicar essa estratégia tem de serem avaliadas previamente para que não haja riscos à integridade operacional e pessoal. Conforme Ferrão (2005), a eficiência dessa alternativa é muito dependente das condições meteorológicas.

4.3.2.1 Tipos de elementos construtivos e configurações das barreiras de contenção

Apesar das diferentes aplicabilidades das barreiras de contenção e dos tipos existentes destas barreiras, os elementos construtivos e materiais utilizados são geralmente os mesmos, sendo eles:

- Flutuador de material flutuante ou por ar;
- Elemento de tensão longitudinal para prover força e resistir às ações do vento (corrente ou cabo de aço);
- Saia subsuperficial para prevenção de escape de óleo por baixo em casos de manchas mais espessas;
- Borda-livre para prevenir o *splash out* que é o escape do óleo pela parte de cima.

Abaixo na Tabela 4 estão presentes as caracterizações das barreiras de contenção em função do local de uso.

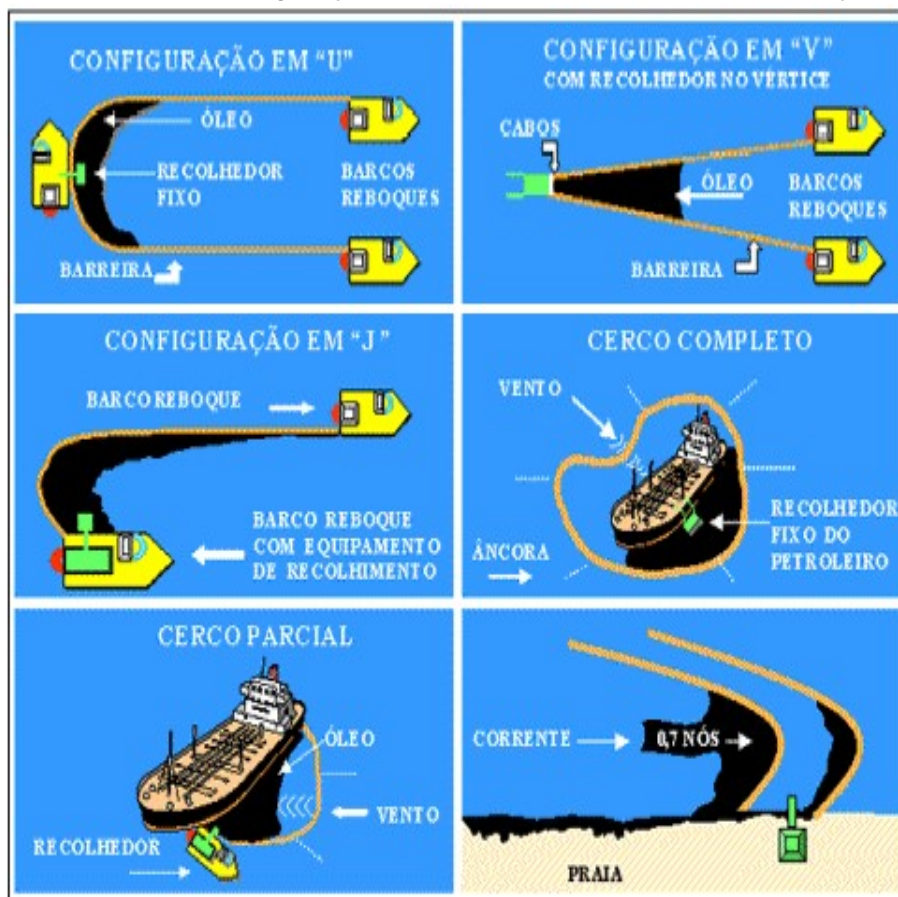
TABELA 4 – Características Estruturais das Barreiras de Contenção.

Local de uso	Tipo	Borda Livre (cm)	Saia (cm)	Carga (t)	Vento (nós)	Corrente (nós)	Volume (m ³ /km ²)
Águas interiores	Leve	12 a 25	20 a 45	1 a 3	≤ 15	0,7 a 1,0	1,0 a 1,5
Águas abrigadas	Fixa	25 a 40	40 a 65	3 a 8	≤ 5	0,7 a 1,0	1,5 a 3,0
Oceânicas	Pesada	40 a 115	65 a 125	15 a 35	≤ 30	0,1 a 1,5	3,0 a 6,0

Fonte: Adaptada de Cetesb - Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br> - Acesso em 29/07/2022

Com relação as configurações nas quais a barreira irá ser feita, está associada à disponibilidade de recursos e das condições climáticas e oceanográficas. Porém, abaixo na Figura 7 estão listadas as configurações mais usuais.

FIGURA 7 – Configuração estruturais das barreiras de contenção.



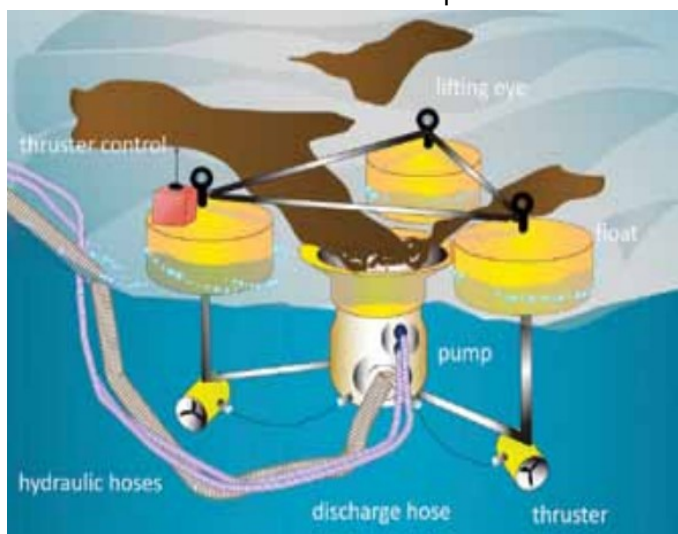
Fonte: FERRÃO, C. M . Derramamentos de óleo no mar por navios petroleiros. Rio de Janeiro. 2005.

4.3.2.2 *Skimmers*

Skimmers são dispositivos de sucção que flutuam na superfície do líquido e retiram o óleo. Os *Skimmers* mais comuns são classificados em dois grupos, conforme (FERREIRA, 2006):

- Tipo A - *Skimmer* tipo *Foilex* (Vertedouro): Recolhedores mais simples que removem o óleo diretamente da superfície por meio de um vertedouro, porém recolhem uma grande quantidade de água juntamente ao óleo.
- Tipo B - *Skimmer* tipo *Transrec* (Aderência): Recolhedores mais complexos que utilizam o princípio da aderência de óleo em discos de metal ou plástico, cintas ou cordas oleofílicas.

FIGURA 8 – Skimmer tipo Foilex.



Fonte: ITOPF TIP 5 - *Use of Skimmers in Oil Pollution Response* - Acesso em 25/07/2022

FIGURA 9 – Skimmer tipo Transrec.



Fonte: ITOPF TIP 5 - *Use of Skimmers in Oil Pollution Response* - Acesso em 25/07/2022

4.3.3 Dispersão Mecânica

Quando há um derrame de óleo, a tendência é que se forme uma mancha na superfície porque sua densidade é geralmente menor que a da água do mar. A força química que resiste à mistura água-no-óleo é chamada de "tensão interfacial" e varia conforme o óleo analisado. Existirá uma dispersão natural do óleo quando a energia turbulenta na área for suficiente para superar a resistência mecânica proveniente da

viscosidade. Num cenário onde o mar não tenha diluído totalmente as gotas de óleo, estas podem reemergir na superfície e com isso formar uma nova pluma de óleo (FERREIRA, 2006).

Levando em consideração o grau de complexidade de operação do método de dispersão mecânica, muitas vezes é a preferível para ser utilizada na contenção da evolução e movimentação da mancha de óleo. Porém, deve-se analisar a eficácia levando em consideração que este método é dependente das condições climáticas, propriedades do óleo derramado, do volume de óleo presente na região como também da energia de turbulência, provenientes das forçantes marítimas, disponível no local durante as operações (ITOPF-HANDBOOK, 2014/15)

Para a utilização da dispersão mecânica como estratégia de contenção também deve-se avaliar a distância no que se diz referente à zonas de sensibilidade ambiental, pois, num cenário de proximidade destas regiões, deve-se utilizar esse modelo de dispersão apenas quando combinado à formas de controle da mancha ou de proteção dessas áreas (ITOPF-HANDBOOK, 2014/15; FERREIRA, 2006).

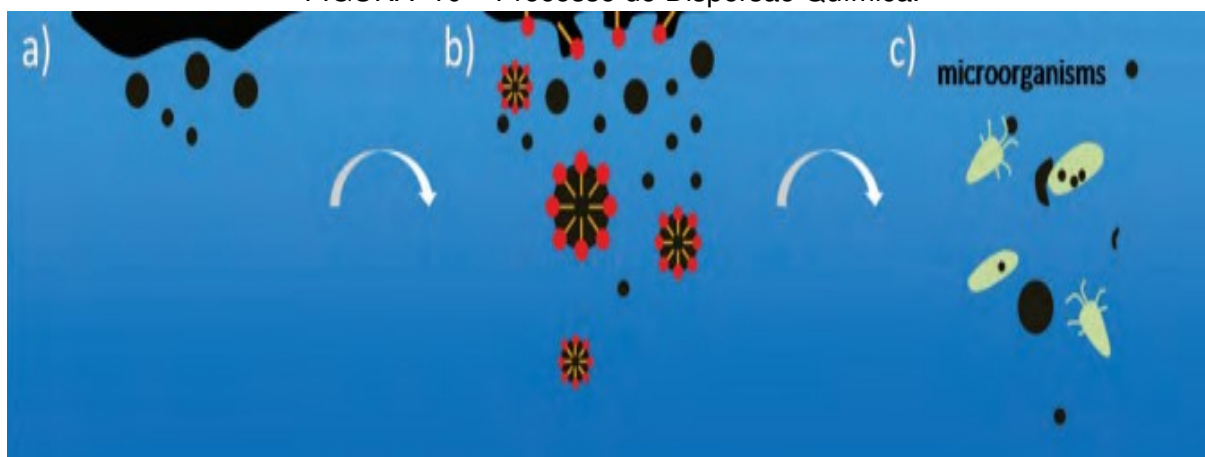
4.3.4 Dispersão Química

Os dispersantes químicos são regulamentado segundo o Anexo da Resolução CONAMA (2000) durante a utilização destes em derrames de óleo no mar. Além desta resolução, o ITOPF-Handbook (2014/15), por meio do TIP nº 4, serve para consulta no que se diz respeito à utilização deste método.

Segundo Szewczyk (2006) e Ferrão (2005), dispersantes químicos tem como finalidade emulsionar o petróleo na água para facilitar a biodegradação pela biota marinha. Esses dispersantes tem em sua composição, surfactantes, que por sua vez são integrantes ativos na fórmula.

A Figura 10 ilustra o processo que ocorre ao utilizar esse método.

FIGURA 10 – Processo de Dispersão Química.



Fonte: Adaptado de ITOPF TIP 4, 2014 - Acesso em 01/08/2022

- a) Dispersante contendo os surfactantes e solventes são inseridos no óleo.
- b) As moléculas de surfactantes se transportam para interface água-no-óleo e reduzem a tensão superficial permitindo que haja desprendimento de gotículas da pluma original.
- c) As gotículas são dispersada pelas forças de energia turbulenta naturalmente e então passam pelo processo de degradação natural.

4.3.4.1 Condições Ambientais e parâmetros necessários para aplicação

Mesmo que o uso de dispersantes seja uma saída considerada controversa, pelo contaminante não eliminar o problema do derramamento de óleo apenas mitigar o impacto ambiental global do acidente (FERREIRA, 2006), em alguns casos não há outra alternativa. Para a utilização destes dispersantes deve ser utilizado apenas em casos onde o prejuízo ambiental por utilizar o dispersante químico for menor quando em comparação ao derrame. Além disso, para ser utilizado, deve-se obedecer todos os critérios dispostos na legislação, conforme CONAMA (2000) e ainda estar associado ao registro junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, conforme Ferreira (2006) e Ferrão (2005).

O modo de aplicação varia segundo o tipo de dispersante, sendo os tipos convencional e concentrado (Tabela 5).

TABELA 5 – Classificação dos Tipos de Dispersantes Químicos.

Dispersante	Tipo	Modo de Aplicação	Solvente
Convencional	1	Não diluído por barcos e/ou aeronaves	Hidrocarbonetos não aromáticos
Concentrados	2	Não diluído por barcos e/ou aeronaves	Oxigenados (glicol, éteres) e hidrocarbonetos não aromáticos
	3	Diluído por barcos e/ou aeronaves	-

Fonte: FERRÃO, C. M . Derramamentos de óleo no mar por navios petroleiros. Rio de Janeiro. 2005.

Os dispersantes em modo geral são pouco eficientes sobre óleos viscosos, já que nesse caso há uma tendência do óleo se espalhar antes mesmo dos solventes penetrarem na mancha. Logo, em virtude disso, para ocorrer a efetiva dispersão o ambiente deve ter energia turbulenta o suficiente para permitir a redução da tensão superficial, seja ela proveniente de forças naturais ou artificiais.

4.3.4.2 Métodos de Aplicação do Dispersante Químico

Para a aplicação dessa estratégia, deve-se analisar os parâmetros do vazamento para que seja aplicado com o método mais correto para o tipo de vazamento, os parâmetros a serem analisados são:

- Tipo de óleo a ser disperso,
- Volume de óleo a ser disperso,
- Grau de intemperização do óleo no mar no instante da aplicação,
- Tipo de dispersante a ser utilizado,
- Características climáticas e meteorológicas durante a aplicação,
- Características oceanográficas durante a aplicação,
- Equipamentos disponíveis para a aplicação.

A Tabela 6 orienta conforme as condições na região do derrame, qual deve ser o método escolhido para aplicação de dispersantes químicos.

TABELA 6 – Condições para Sistemas de Aplicação de Dispersantes Químicos

Sistemas de Aplicação	Condições Ambientais Limites para Operações Efetivas e Seguras				
	Escala Beaufort	Velocidade do Vento		Altura das Ondas	
		(nós)	(m/s)	(pés)	(m)
Embarcação	3 - 5	7 - 21	3,6 - 10,8	1 - 9	0,3 - 2,7
Avião Monomotor	5	17 - 21	8,7 - 10,8	6 - 9	1,8 - 2,7
Helicóptero	5 - 6	17 - 27	8,7 - 13,9	6 - 17	1,8 - 5,2
Avião de Grande Porte	7	30 - 35	15,4 - 18,0	17 - 23	5,2 - 7,0

Fonte: FERRÃO, C. M. . Derramamentos de óleo no mar por navios petroleiros. Rio de Janeiro. 2005.

4.3.5 Queima *in-situ*

Como o nome sugere, a queima-no-local é o nome dado à estratégia de queima da mancha de óleo no mar, sendo no local do derrame ou próximo ao local de origem. É um método simples de execução, mas com um impacto ambiental diretamente ligado à ignição do óleo e a emissão de uma grande quantidade de moléculas provenientes da fumaça gerada pela queima, além da possibilidade de afundamento do resíduo resultante que é denso e viscoso. Outros parâmetros impeditivos são a manutenção da combustão da mancha e questões de segurança pessoal e operacional. (FERREIRA, 2006). Outros critérios a serem revisados são:

- Tipo de barreira a ser utilizada para conter o fogo,
- Distância da mancha à embarcação avariada,

- Existência ou não-existência de uma comunidade próxima do local do derrame,
- Toxicidade da fumaça resultante da queima do combustível,
- Resíduos gerados provenientes da estratégia,
- Condições climáticas e oceanográficas.

Segundo Ferreira (2006) é preciso que quatro condições sejam atendidas para poder iniciar uma queima *in-situ*, elas são:

- A camada de óleo tem de estar com a espessura entre 1 a 2mm, pelo menos,
- O dispositivo que irá iniciar a ignição deve ser quente o bastante para provocar a ignição da pluma de óleo,
- A parcela de água emulsionada no óleo não pode ser superior a 50%,
- A velocidade do vento deve ser inferior à 10m/s (20nós) e a altura de ondas deve ser inferior à 1m (3 pés).

4.3.6 Proteção e Limpeza de Linhas de Costa

Levando em conta as dificuldades da remoção de óleo no mar, as ações tomadas diretamente na área do derrame não são suficientes e o óleo se espalha pela área de costa, resultando na contaminação da linha de costa. Essa contaminação gera um cenário cujo impacto ambiental e socio-econômico é mais elevado, se compararmos isoladamente ao impacto *offshore*. Tendo esse fato como premissa, foram criadas estratégias de limpeza de costa que devem ser utilizadas em conjunto com as ações na área do derrame para poder mitigar um pouco mais o impacto gerado (FERRÃO, 2005).

Para a proteção da linha de costa também é possível utilizar das técnicas listadas anteriormente, com o intuito de que a pluma não chegue a ter contato com a área costeira, ou para que esta fique contida em uma área próxima da área costeira. Materiais absorventes pode ser utilizados para reduzir o volume de óleo presente na água quando outras técnicas forem dificultosas para serem realizadas (FERREIRA, 2006).

Na linha de costa podem ser utilizados métodos como limpeza manual, limpeza mecânica, limpeza por material absorvente. A maioria do material depositado na linha de costa pode ser removido pela técnica de limpeza manual, e esta é até preferível para ser utilizada, pois deve-se ter o cuidado de não remover em excesso a camada de areia para que o óleo não alcance camadas profundas dificultando ainda mais o

recolhimento. Já para materiais absorventes, estes são aplicados nas regiões onde os óleos estão líquidos e por sua vez absorvem uma grande quantidade. O uso de absorventes próprios para este caso é indicado, pois estes não absorvem água, flutuam e podem ser reaproveitados (FERREIRA, 2006; FERRÃO, 2005).

4.4 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO À RESPOSTA

Há três parâmetros principais para avaliação da resposta durante um acidente ambiental de derrame de óleo, nesta seção será comentado brevemente sobre cada um desses três parâmetros e sobre suas classificações.

4.4.1 Tempo Estimado para Início da Resposta (ETA: *Estimated Time of Arrival*)

Nem todos os portos, sejam eles privados ou públicos, possuem um plano de resposta emergencial, ou ainda pior, embarcações designadas como embarcações não tem exclusividade para ser utilizada como resposta de emergência (FERREIRA, 2006). Para estimar o tempo de resposta deve-se ter como parâmetro, todos os tempos totais para que as embarcações convocadas e envolvidas possam finalizar ou interromper a atividade que está desempenhando no momento da emergência, além do tempo decorrido para ir até o local. Assim que chegarem ao destino, ainda deve-se levar em conta o tempo para início de sua resposta. Todo esse conjunto de ações denomina-se Esforço de Mobilização, conforme Ferreira (2006). Uma estrutura de resposta, seja ela de pequeno, médio ou grande porte, pode ser classificada quanto ao tipo de resposta como:

- Semi-dedicada
- Exclusivamente dedicada

4.4.2 Janelas de Oportunidade

As respostas são avaliadas quanto à dois fatores, no ponto de vista técnico e no ponto de vista legal (FERREIRA, 2006).

Conforme Nordvik (1995), as janelas de oportunidade no ponto de vista técnico, devem ser compostas por ações rápidas, eficientes, estratégicas e no caso de existir um afastamento grande o bastante de zonas ambientalmente sensíveis, limitar as ações à apenas monitoramento. Deve levar-se em consideração os fatores limitantes para o uso de respostas ativas, sendo eles, fatores relacionados à intemperização do óleo, ou seja, suas constantes mudanças de propriedades desde o momento do derrame na água, e os fatores limitantes na operacionalidade, nos equipamentos, no transporte

e na disponibilidade de recursos, além de fatores ambientais como velocidade dos ventos, correntes, visibilidade, ondas e temperatura do mar.

No que se diz respeito às janelas de oportunidade da classificação das janelas legais, a resolução do CONAMA define os tempos máximos para o início da resposta. Os parâmetros definidos pela resolução (CONAMA, 2001) são de acordo com a criticidade da situação. Em manchas de óleo em situações críticas é recomendado a utilização da biorremediação ou dispersantes químicos. Em caso de manchas medianas, a utilização de barreiras de contenção e no cenário de pequenos derrames, prevê a utilização de dispersante mecânico.

A resolução estabelece a equação 4.20 para verificarmos a capacidade de recolhimento:

$$CEDRO = 24h \times Capacidade\ Nominal \times 20\% \quad (4.20)$$

Com a equação 4.20 é obtida a Tabela 7 e com a Tabela é obtido a quantidade de formações com *Skimmers* para recolher grandes quantidades de óleo.

TABELA 7 – Capacidades Legais de Recolhimento de Óleo para Grandes Derrames de Óleo

ETA (h)	Capacidade de Recolhimento por Tempo de Chegada (m³/dia)	CEDRO (m³)	Número de Formações Necessárias com <i>Skimmers</i> de 200m³/h
12h	1.600 (12h)	1.600	2 Formações
36h	1.600 (12h) + 1600 (36h)	3200	4 Formações
60h	1.600 (12h) + 1600 (36h) + 3200 (60h)	6.400	7 Formações

Fonte: CONAMA (2011).

4.4.3 Análise de Benefício Ambiental Líquido

Ao ocorrer um vazamento de óleo, toda tomada de decisão é urgente para que possa haver a maior mitigação possível dos danos ambientais e socioeconômicos (BAKER et al., 2000). Ainda segundo Baker et al. (2000), deve-se considerar a causa ocorrência do derrame, a disponibilidade de resposta e os impactos, seja do óleo, seja das ações de repostas. Segundo Ferreira (2006), as decisões tendem a ser melhor tomadas a partir do momento em que o planejamento do contingente de equipamentos à serem utilizados, inclui os detalhes dos aspectos ambientais e socioeconômicos, além da possibilidade de consultas emergenciais.

Será considerado contribuição, toda ação que teve influência na interceptação ou recolhimento do óleo, impedindo o alastramento para zonas sensíveis e vulneráveis. Quando se avalia um quantitativo de óleo interceptado e referência ao valor total derramado, obtém-se a contribuição estratégica (FERREIRA, 2006).

4.5 PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL

O IBAMA (2016) define Plano de Emergência Individual (PEI) como um documento ou conjunto de documentos que contém as informações e descreve os procedimentos de resposta da instalação a um incidente de poluição por óleo, em águas sob jurisdição nacional, decorrente de suas atividades. Estas instalações podem ser:

- Portos organizados;
- Instalações portuárias
- Terminais;
- Dutos;
- Sondas terrestres;
- Plataformas e suas instalações de apoio;
- Refinarias;
- Estaleiros;
- Marinas;
- Clubes náuticos;
- Instalações similares

O conteúdo mínimo de um PEI é regulamentado segundo a Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008, que orienta sua elaboração e informa ações necessárias para incidentes que ocorram sob jurisdição nacional.

Segundo o IBAMA (2016), o Plano de Emergência Individual deve garantir no ato de sua aprovação, a capacidade da instalação para executar, de imediato, as ações de respostas previstas para atendimento aos incidentes de poluição por óleo, nos seus diversos tipos, com emprego de recursos próprios, humanos e materiais, que poderão ser complementados com recursos adicionais de terceiros, por meio de acordos previamente firmados.

As ações de respostas são estabelecidas a partir da definição dos cenários de derrame de óleo e simulação da dispersão das manchas no corpo hídrico, são levantadas as características socioambientais dos ambientes com potencial para serem afetados, com vista ao estabelecimento das táticas e técnicas de atuação emergencial. Da mesma maneira, o PEI define o dimensionamento dos recursos humanos e materiais para intervenção, a organização e fluxo de comunicação, as medidas de recuperação

de áreas atingidas, política de treinamentos das equipes e os mecanismos de gestão e atualização do próprio plano.

Ainda segundo IBAMA (2016), a apresentação do PEI ocorre por meio do licenciamento ambiental. Sua aprovação ocorre quando há a concessão da Licença de Operação (LO), da Licença Prévia de Perfuração (LPper) e, quando necessário, da Licença Prévia de Produção para Pesquisa (LPpro). Os planos são avaliados pelos órgãos estaduais de meio ambiente e pelo Ibama, tendo em vista o foco do empreendimento em questão.

O conteúdo de um PEI deve ser composto por:

- Identificação da Instalação;
- Possíveis cenários acidentais;
- Informações e procedimentos para resposta a acidentes;
- Encerramento das operações;
- Informações referenciais;
- Mapas e cartas náuticas;

Segundo Plano de Emergência Individual dos Portos do Paraná, ACQUAPLAN (2013), o PEI deverá ser revisto a cada dois anos ou nas seguintes situações:

- Uma análise de relatório de incidente ou exercício simulado assim o indicar;
- Novas atividades forem incorporadas no processo de construção do Porto;
- Uma Avaliação de Risco assim o recomendar;
- Outras situações, a critério do órgão ambiental competente, desde que justificado tecnicamente.

As alterações inseridas deverão ser divulgadas para todas as instituições que receberam o plano original. Todos os documentos que sustentem as revisões deverão ser mantidos em arquivo específico por um período mínimo de quatro anos. Caso a revisão implique em alteração nos procedimentos e na sua capacidade de resposta, o plano deverá ser revisto e as alterações deverão ser submetidas à aprovação do órgão ambiental competente.

De acordo com o anexo II da Resolução (CONAMA, 2008), os seguintes exercícios deverão ser executados pela equipe do PEI:

- Exercício de Comunicações;
- Exercício de Planejamento;
- Exercício de Mobilização de Recursos;
- Exercício Completo de Resposta.

Além destes, poderão ser executados exercícios específicos de lançamento de barreiras a partir da praia.

5 ESTUDO DE CASO À REGIÃO DO PORTO PONTAL

5.1 ÁREA DE ESTUDO

O trabalho teve como foco a análise do comportamento da pluma de óleo resultante de um vazamento hipotético nas proximidades do local proposto para construção do Porto Pontal, em Pontal do Sul, (Figura 11). A proposta de layout de infraestrutura é representado na figura 12.

FIGURA 11 – Localização do Porto Pontal, ou Porto 3P, como conhecido anteriormente.



Fonte: Relatório de Implantação: Porto 3P, 2018.

FIGURA 12 – Layout de infraestrutura organizacional hipotético proposto em 2018, do Porto Pontal.



Fonte: Relatório de Implantação: Porto 3P, 2018.

A proposta do porto consiste na construção no interior Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), que por sua vez, localiza-se na porção Centro-Norte da planície costeira paranaense. A área de estudo localizada-se, inicialmente, nas coordenadas 25°32'37"de latitude Sul e 48°23'12"de longitude oeste. A área de estudo, o CEP, contém 3 ilhas principais: a Ilha do Mel, o Superagui e a Ilha das Peças. Também contém 3 principais baías: Baía de Paranaguá, Baía de Antonina e Baía de Laranjeiras. O CEP possui duas passagens para o oceano, uma ao norte da Ilha do Mel e outra ao Sul da Ilha do Mel. O CEP é classificado como parcialmente misturado do tipo b, segundo classificação de salinidade feita por (MIRANDA, 2002).

No que se diz respeito a Ilha do Mel, segundo a Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Turismo (SEDEST) em (SEDEST, 2020), esta funciona como uma proteção natural ao interior do complexo estuarino, reduzindo o clima de ondas oceânicas e assim tornando o CEP um berço para os ecossistemas presentes na região.

5.1.1 Dinâmica Hídrica

Segundo SOTO (2004), a circulação hídrica do CEP é regida pelo aporte sazonal de água doce, são ainda, somadas as influência exercidas pela configuração estuarina e seus mecanismos e zonas adjacentes.

Conforme Camargo et al. (1996) apud SOTO (2004), a maré predominante é classificada como semi diurna com desigualdades diurnas, sua amplitude média é 1,7 m para situações de sizígia e 1,8 m para quadraturas.

Nos setores Leste-Oeste, o Complexo Estuarino de Paranaguá, sofre maior influência do aporte de água doce proveniente da bacia de drenagem, quando comparado ao setor Norte-Sul, por conta disso as respostas, quando referente aos processos de intrusão salina, aporte de sedimentos fluviais, formação de zona de máxima turbidez e ainda a estratificação da coluna de água, são mais rápidas e mais intensas (NOERNBERG et al., 2008).

5.1.2 Principais Zonas de Sensibilidade Ambiental do CEP e Principais Rios

A região do CEP possui uma zona de drenagem cuja área é de aproximadamente 1.700 Km^2 . Também possui diversas sub bacias de grande relevância, sendo elas, a sub bacia de Antonina e a sub bacia do Nhundiaquara. As nascentes dos rios pertencentes à essas sub bacias, estão localizadas na Serra do Mar, numa altitude variável, da ordem de até 2.000m. Os principais rios, que por sua vez, estão a uma altitude de pelo menos 1.000 m, possuem cursos perenes (Bigarella et al. (1978) apud SOTO (2004)).

A tabela 8 traz dados de aporte de água, provinda dos rios que constituem o CEP, para a baía de Paranaguá. Nota-se que o rio Cachoeira e o Nhundiaquara constituem grande parte do aporte de água para a baía.

TABELA 8 – Dados de área total das bacias de drenagem dos principais rios que desembocam nas baías de Paranaguá e Antonina.

Rio	Área total (km²)
Cachoeira	415,13
Nhun diaquara	223,93
Sagrado	136,03
Marumbi	107,93
Pinto	80,61
Faisqueira	58,17
Sapetanduva	43,91
Nunes	36,94
Cacatu	36,36
Jacareí	34,29
Rio do Cedro	31,46
Cupiúva	26,08
Xaxim	25,54
São Joãozinho	24,22
Passa Sete	20,79
Rio do Meio	19,8
Piedade	18,07
Moura	9,72
Curitibaíba	9,14
Rio da Venda	9,04

Fonte: Adaptada de (MANTOVANELLI, 2002) apud (SOTO, 2004).

Segundo (NOERNBERG et al., 2008), foram classificados os locais de maior índice de sensibilidade ambiental do litoral utilizando a tabela do Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima do Espírito Santo, (GHERARDI DOUGLAS et al., 2010), a supracitada tabela em questão está abaixo contida na figura 13. Os maiores ISL (Índice de Sensibilidade do Litoral), foram os mangues e marismas, estes apresentam ISL-10 e somam-se mais de 80% da costa paranaense. Seguindo com a classificação, o segundo maior ISL foram os costões rochosos e enrocamentos, com classificação ISL-8. Logo após, as praias arenosas expostas, cuja classificação foi ISL-4. A tabela 9, apresenta as demais informações sobre a extensão do ISL e a tabela 10 apresenta dados de recursos biológicos presentes no litoral paranaense.

FIGURA 13 – O código de cor e característica do litoral de acordo com o valor do ISL.

Cor	Índice	Código			Tipos de Costa
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	- Costões rochosos, lisos de alta declividade, expostos
					- Falésias em rochas sedimentares, expostas
					- Estruturas artificiais lisas, expostas
	ISL 2	174	153	191	- Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos
					- Terraços ou substratos de declividade média, expostos
	ISL 3	0	151	212	- Praia dissipativas de areia média a fina, expostas
					- Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de resacas
					- Escarpas e taludes íngrimes, expostos
					- Campos de dunas expostas
	ISL 4	146	209	241	- Praias de areia grossa
					- Praias intermediárias de areia fina a média, expostas
					- Praias de areia fina a média, abrigadas
	ISL 5	152	206	201	- Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais
					- Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação
					- Recifes areníticos em franja
	ISL 6	0	149	32	- Praias de cascalho
					- Costas de detritos calcários
					- Depósito de tálus
					- Enrocamentos expostos
					- Plataforma ou terraço exumado, recoberto por concreções lateríticas
	ISL 7	214	186	0	- Planície de maré arenosa exposta
					- Terraço de baixa-mar
	ISL 8	225	232	0	- Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada
					- Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada
					- Escarpa e taludes íngrimes de areia, abrigados
					- Enrocamentos e outras estruturas artificiais não lisas abrigados
	ISL 9	248	163	0	- Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas
					- Terraço de baixa-mar lamoso abrigado
					- Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
	ISL 10	214	0	24	- Deltas e barras de rio vegetadas
					- Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas
					- Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado, apicum
					- Marismas
					- Manguezal

Fonte: Adaptada de (GHERARDI DOUGLAS et al., 2010)

TABELA 9 – Classificação de ISL da linha de costa do estado do Paraná

ISL	Nº de Segmentos	Extensão Total (m)	% do Total
1	1	0,58	0,03%
2	13	8,2	0,49%
3	20	103,5	6,18%
4	29	56,1	3,35%
5	0	0	0
6	15	11,94	0,71%
7	1	0,89	0,05%
8	109	146,6	8,75
9	2	2	0,12%
10	234	1345,2	80,31%
Total	424	1675	100,00%

Fonte: (NOERNBERG et al., 2008)

TABELA 10 – Classificação de ISL da linha de costa do estado do Paraná

Classe de Recurso	Nº das Espécies Relacionadas	Nº de Referência Bibliográfica	Nº de Espécies Ameaçadas de Extinção
Aves	393	25	05
Peixes	2406	56	-
Mamíferos Terrestres	27	02	-
Mamíferos Aquáticos	10	09	05
Répteis / Anfíbios	16	07	04
Invertebrado	1006	152	-
Total	3858	251	14

Fonte: (NOERNBERG et al., 2008)

5.1.3 Zonas de Impacto Direto e Indireto

A correta definição das zonas que são classificadas como de impacto direto e indireto dos derrames de óleo propostos são de extrema importância ambiental. Os efeitos diretos em caso de vazamentos de óleo chegarem as encostas, e as consequências crônicas de uma contaminação na água, poderiam influenciar na ocorrência das espécies na área estuarina, no potencial pesqueiro da região, assim como na saúde, na segurança e no bem estar da população, pois o petróleo possui em suas composições, componentes altamente tóxicos aos seres vivos, e também possui a capacidade de causar bioacumulação nas diferentes cadeias alimentares, ocasionando uma notável perda de biodiversidade ao tratar-se de uma área estuarina (GHERARDI DOUGLAS et al., 2007). Sendo assim, as regiões de impacto direto e indireto serão correlacionadas com as informações sobre as regiões de maior ou menor sensibilidade disponibilizada pelo Ministério do Meio Ambiente, nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (Cartas SAO) como na Figura A.

Segundo (GHERARDI DOUGLAS et al., 2007), as cartas SAO operacionais destinam-se ao planejamento de contingência em nível local e a orientar a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo em pontos específicos da costa. Referem-se, portanto, a derramamentos localizados, devendo ser elaboradas em escalas grandes, representando com o detalhe necessário os locais de alto risco e/ou sensibilidade existentes na área mapeada. Ademais, constam das cartas SAO operacionais as seguintes informações principais, relacionadas à sensibilidade ambiental ao óleo da região mapeada contida no anexo A.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

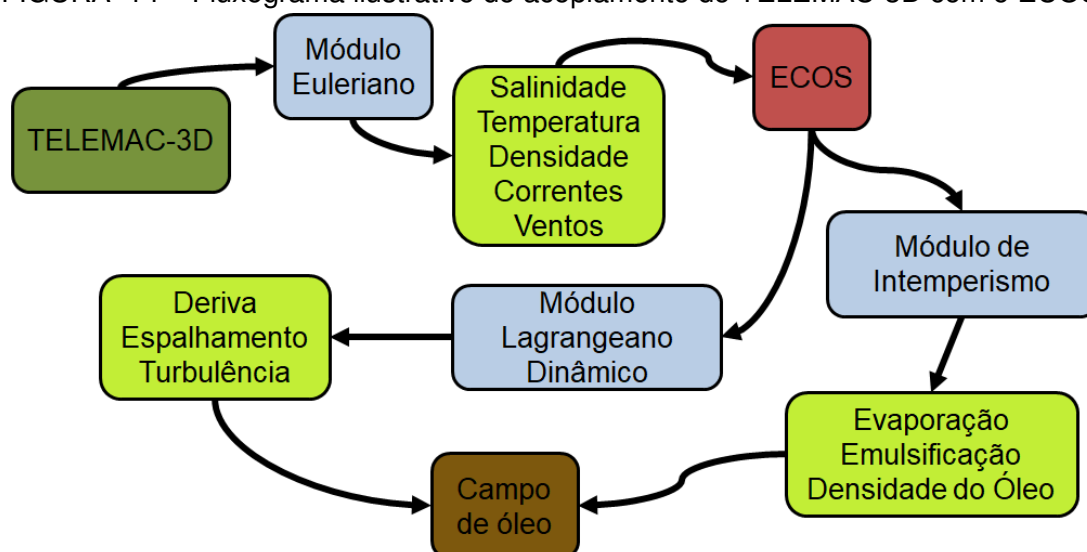
Neste trabalho, foi utilizado a modelagem numérica tridimensional para o estudo e análise do espalhamento da pluma de óleo hipotética, derramada em Pontal do Paraná, na região da provável construção do Porto Pontal. Foi necessário, para tal, realizar simulações das condições hidrodinâmicas utilizando o módulo TELEMAC-3D, fornecendo para este módulo as informações físicas do local e uma malha estruturada, que serve, por sua vez, como domínio do modelo. Os dados de saída do modelo são, velocidade de corrente, salinidade, alteração de maré e temperatura da água. Também foi utilizado o modelo ECOS (Easy Coupling Oil System) para a simulação da trajetória percorrida pela pluma de óleo.

A malha computacional foi gerada pelo software BlueKenue. Os elementos pertencentes do domínio tem uma variação de tamanho, partindo de 20.000 m na região oceânica, para até 10 m na região intra estuarina.

Os modelos foram acoplados internamente (Figura 14), de uma forma que o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D estimou o campo de velocidades através das trocas de quantidade de movimento com a atmosfera, com dados advindos das condições iniciais e de contorno implementadas. Em seguida, o módulo ECOS utilizou as informações geradas pelo TELEMAC-3D para calcular a deriva do óleo pelo módulo ECOS Drift Module e a evolução das propriedades intrínsecas do óleo no ambiente ECOS Weathering Module, conseguindo dessa maneira estimar a evolução das propriedades do óleo frente ao campo hidrodinâmico presente na simulação (MARQUES et al., 2017).

O fluxograma ilustrado na figura 14 apresenta as etapas do sistema de módulos, em ordem de funcionamento. O acoplamento dos dois modelos foi feito através da linguagem de programação FORTRAN95.

FIGURA 14 – Fluxograma ilustrativo do acoplamento do TELEMAC-3D com o ECOS.



Fonte: O Autor, 2022.

Para que o TELEMAC-3D realize as simulações referentes ao domínio escolhido, é necessário fornecer dados das condições físicas, tanto do ambiente, quanto do entorno desse ambiente, desse modo será interpretado como condições iniciais e condições de contorno, respectivamente. Para as partes que não são corpos de água, ou seja, corpos sólidos, deve-se entrar com dados de batimetria da região de estudo.

Para que o modelo simule as condições hidrodinâmicas, o TELEMAC-3D utiliza bancos de dados distintos, sendo eles o HYCOM para dados oceanográficos (velocidade de corrente, temperatura e salinidade da água do mar), dados meteorológicos do ERA5 (velocidade dos ventos, temperatura do ar e pressão atmosférica), dados de maré astronômica do Finite Element Solution (FES) e também dados da Agência Nacional de Águas (ANA) para contabilizar dados dos rios que influenciam na área de estudo desejada.

6.1 MÓDULO HIDRODINÂMICO - TELEMAC-3D

O TELEMAC-3D é um modelo de código aberto, que avalia a circulação ao longo da região costeira do Brasil. O sistema de modelagem numérica utilizado foi desenvolvido dentro do consórcio open TELEMAC-Mascaret. O modelo utiliza a técnica da análise numérica tridimensional por elementos finitos em paralelo com os níveis verticais sigma para resolução das equações de Navier-Stokes, mantendo a densidade constante e utilizando a aproximação de Boussinesq para resolução das equações de conservação da quantidade de movimento e massa. (HERVOUET, 2007). Uma descrição completa sobre o modelo e a técnica dos elementos finitos aplicadas ao TELEMAC-3D podem ser encontradas em (HERVOUET, 2007), porém nesta seção

serão apresentadas as informações mais importantes sobre a descrição matemática do modelo, obtidas do livro deste autor.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

Equações de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla^2(\nu u) + F_x \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla^2(\nu v) + F_y \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nabla^2(\nu w) + F_z \quad (6.4)$$

Onde, U, V e W são as componentes do vetor de velocidade $\vec{V}$, x, y e z são as direções do plano cartesiano, t o tempo, ν o coeficiente cinemático de viscosidade, p a pressão, g a aceleração da gravidade, ρ massa específica e F_x , F_y e F_z os termos fonte, respectivamente. As componentes dos termos fonte contemplados pelos termos F_x , F_y e F_z são: a fricção com o fundo, a influência do vento e as trocas de calor.

6.1.1 Aproximações

6.1.1.1 Hidrostática

Aproximação hidrostática é obtida por se desconsiderar a difusão, os termos fonte e a aceleração na equação de movimento na vertical.

Equação da Pressão Hidrostática:

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (H - h) + \rho_0 g \int_h^H \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (6.5)$$

Onde, o p_{atm} representa a contribuição do campo de pressão atmosférica, o segundo termo no lado direito se refere ao peso da coluna de água e o terceiro termo representa a contribuição da distribuição de massa ao longo da coluna de água para o campo de pressão.

6.1.1.2 Equação de Estado da Água do Mar

O modelo TELEMAC-3D, considera as variações no campo de massa específica de acordo com uma equação de estado, que é função dos traçadores ativos considerados. Conforme a equação 6.6.

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_t T(T - T_0)^2) + \alpha_s S \quad (6.6)$$

Onde, T_0 é a temperatura de referencia (4 °C) e α_t é o coeficiente de expansão térmica, α_s é o coeficiente de contração salina e a massa específica de referência ρ_0 é igual a 1.025 kg m^{-3} .

6.1.1.3 Aproximação de Boussinesq

A aproximação de Boussinesq considera que as variações da massa específica podem ser desprezadas quando são pequenas comparadas com o valor de referência, a não ser que a massa específica esteja acompanhada da aceleração da gravidade.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_h^H \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \right) \quad (6.7)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_h^H \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \right) \quad (6.8)$$

Os primeiros termos do lado direito da 6.7 e 6.8 representam os gradientes da pressão atmosférica sobre a superfície livre e são incorporados no modelo como termos fonte. As variações barotrópicas, que são resultado do gradiente de pressão causado pela elevação da superfície livre, são representados pelo segundo termo do lado direito das equações, e são incorporados diretamente nas equações do movimento.

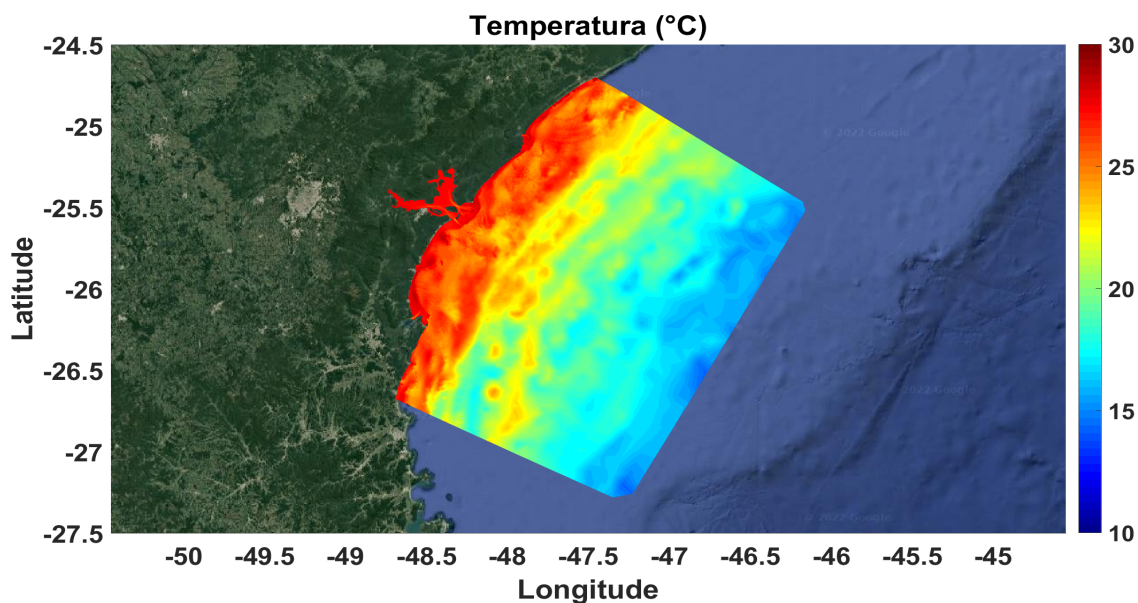
Por fim, os termos de variações baroclínicas, que representam as variações do campo de massa específica devido às variações associadas aos traçadores, são inseridos como termos fonte nas equações de conservação de quantidade de movimento.

6.1.2 Traçadores

Como traçador pode-se considerar qualquer substância transportada junto com a massa de água. Traçadores podem ser classificados de duas formas diferentes, ativos e inativos. Os traçadores ativos modificam diretamente o campo de massa específica da água, já os inativos, não. Os traçadores ativos considerados no trabalho foram a temperatura e a salinidade da água do mar. Conforme a figura 14, as variações de massa específica da água alteram a massa específica do óleo, o contrário não ocorre, pelo acoplamento dos módulos serem unidirecional.

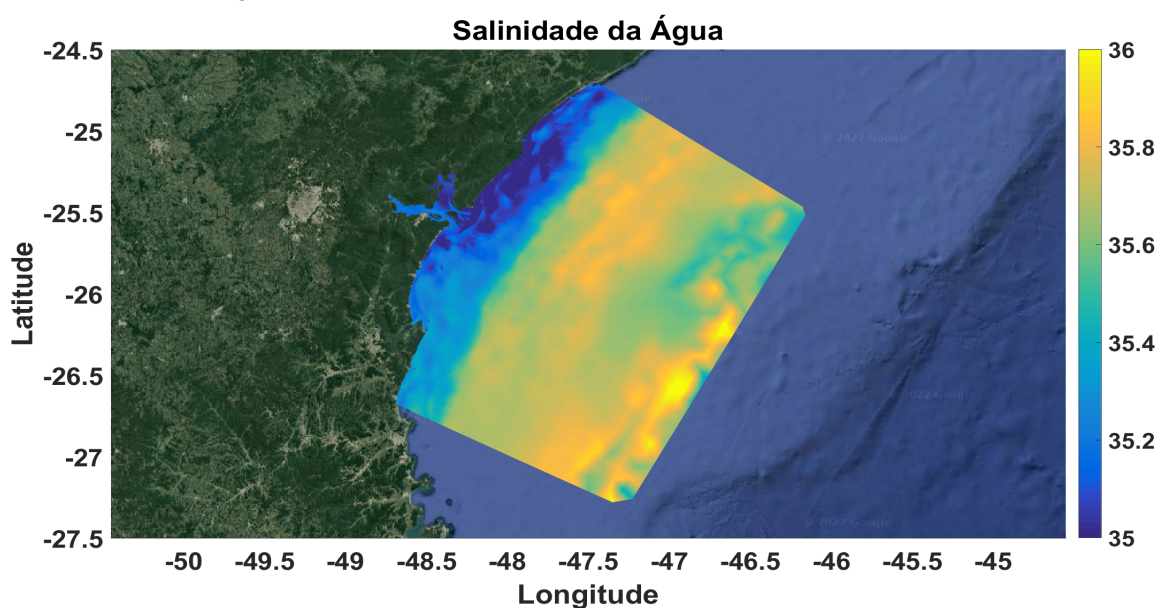
A figura 15 ilustra os dados de temperatura da água extraídos e implantados na malha e a figura 16 é referente aos dados de salinidade que foram implantados na malha.

FIGURA 15 – Malha de dados de temperatura para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.



Fonte: O Autor, 2022.

FIGURA 16 – Malha de dados de salinidade para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.



Fonte: O Autor, 2022.

6.1.2.1 Modelo de Turbulência

O módulo de turbulência utilizado no trabalho é o $k - \epsilon$. Este modelo resulta do acoplamento das equações do balanço para k (energia turbulenta) e ϵ (dissipação turbulenta) representados nas equações 6.9 e 6.10.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P - G - \epsilon \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P + (1 - C_{3\epsilon})G] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6.10)$$

onde, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido, $\epsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}$, representa a dissipação da energia cinética turbulenta, $P = \nu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ representa o termo de produção da energia turbulenta, $G = -\frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ é o termo fonte devido as forças gravitacionais. Sendo Pr_t o Número de Prandtl e ν_t a verificação da igualdade: $\nu_t = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon}$. Os valores: C_η , Pr_t , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k , σ_ϵ são constantes do modelo $k - \epsilon$.

6.2 MÓDULO DE DISPERSÃO DO ÓLEO - ECOS

O ECOS é um modelo amplamente utilizado para simulações de óleo, este modelo leva em consideração parâmetros como:

- Advecção
- Espalhamento
- Difusão turbulenta
- Evolução da dispersão e trajeto final
- Evaporação
- Emulsificação
- Densidade
- Gravidade API

As equações utilizadas para determinados fenômenos foram previamente descritos nas seções 4.1 e 4.2.

As simulações dos derrames do óleo ocorrem em datas distintas. A simulação 1, ocorreu no dia 25/02/2010, exatamente às 01h, já a simulação 2, ocorreu no dia 17/03/2010, também às 1h. A escolha das datas foi resultado da análise de dominância e manutenção das forçantes hidrodinâmicas e do vento, além dos eventos extremos que ocorreram. Tanto o início, quanto o fim da simulação de dispersão do óleo, estavam

configurados no padrão de variáveis do modelo ECOS, sendo elas, SPILLINI e SPILLFIN. Essas variáveis representam os passos de tempo do TELEMAT-3D, percorridos antes do início e ao final da simulação. A tabela 11, mostra os dados que precisam ser informados ao ECOS para realizar a simulação do óleo, ambas simulações utilizaram os mesmos parâmetros, apenas em datas diferentes.

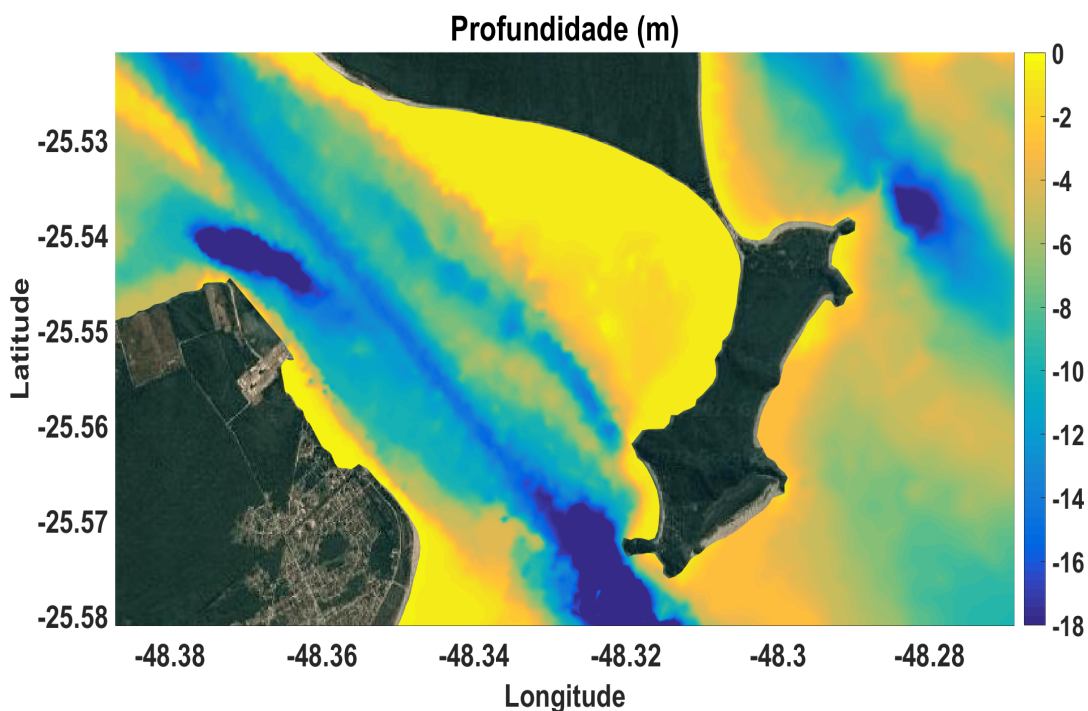
TABELA 11 – Parâmetros do ECOS para realizar a simulação de óleo.

Variável	Significado	Valor
SPILLINI	Passo de tempo do início do vazamento	960
SPILLFIN	Passo de tempo de final do vazamento	3840
XINICIAL	Coordenada latitude do nó escolhido	25° 35'34,73' S
YINICIAL	Coordenada longitude do nó escolhido	48° 24'06,94' O
ZINICIAL	Profundidade inicial do vazamento (m)	0
WWD	Densidade de referência da água (kg/m ³)	1025
V_I	Volume inicial de óleo derramado (m ³)	20
γ_0	Densidade inicial do óleo (kg/m ³)	856
	Coeficiente de atrito com o fundo	$4 \cdot 10^{-2}$
	Coeficiente de influência do vento	$5 \cdot 10^{-6}$

6.3 MALHA NUMÉRICA

Inicialmente, foi realizada uma simulação de 10 anos, com exportação de dados intervaladas a cada 3 horas. Sendo, o início da simulação, no dia 01 de janeiro de 2010 e finalizando no dia 31 de dezembro de 2019. Com uma malha numérica de meso escala contendo a extensão costeira de todo o estado do Paraná. A malha teve 83.210 pontos. Os resultados foram analisados frente a hidrodinâmica do local, conforme a Figura 17. Com os resultados da simulação hidrodinâmica foi possível reproduzir os principais ciclos de variabilidade sazonal da região de estudo (LOPES et al., 2019). Esta etapa serviu para validação de dados e dos resultados hidrodinâmicos (PAULA KIRINUS et al., 2018; MARQUES et al., 2017; LOPES et al., 2019), também serviu de parâmetro para escolha do período em que será simulado o derrame do óleo.

FIGURA 17 – Malha gerada para a área de estudo



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 17 é a malha regional resultante, criada pelo método de elementos finitos da área de estudo. A escala de cores representa a batimetria utilizada nas malhas que está variando de 0 a -18 metros de profundidade.

A segunda etapa consistiu na simulação hidrodinâmica de um período de 365 dias. Escolhido o período conforme os dados que foram extraídos da primeira etapa, os dados extraídos dessa etapa foram eventos extremos de vazante e enchente e momentos de longas durações com predominância de ventos em uma direção. Após a análise dos dados, foi escolhido dias com eventos de interesse, para que fossem utilizados na terceira etapa.

E então, a terceira etapa, foi a utilização do modelo de dispersão do óleo. As simulações foram feitas durante 7 dias no máximo. A simulação foi feita apenas nos dias com eventos de interesse, para verificação da evolução e da dispersão da mancha em eventos extremos. A exportação de dados teve passo de 1 hora.

Foi escolhido um óleo cru, com massa específica de 856 Kg/m^3 , e volume hipotético de vazamento foi de 20 m^3 . A localização do ponto escolhido para o derrame do óleo, foi no local proposto para implantação futura do Porto Pontal, cujas coordenadas do ponto são, $25^\circ 35' 34,73'' \text{ S}$ e $48^\circ 24' 06,94'' \text{ O}$.

6.3.1 Transformação Sigma

A transformação sigma está representada na relação 6.11.

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (6.11)$$

onde, z_f representa a profundidade local medida na malha e z_s a elevação da superfície livre. Esta transformação é realizada nas equações do movimento e de concentração de traçadores para que seja feita a troca de um sistema de coordenadas (x, y, z) para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo.

Foram utilizados 11 níveis sigma para a geração das condições iniciais e de contorno.

6.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Além de condições iniciais pré-definidas através do uso de parâmetros e campos de propriedades, o modelo numérico também tem como necessidade, as condições de contorno para realizar a solução das fórmulas citadas na sessão 6.1.

O modelo utiliza três parâmetros como condições de contorno:

- Contornos da descarga fluvial, prescritas por séries temporais de descarga fluvial;
- Contornos de fronteira oceânica, prescritas pelas séries temporais das marés astronômicas, das velocidades de correntes, da salinidade e da temperatura;
- Contornos sólidos, referente ao fim do domínio da malha, basicamente na região costeira

Os dados utilizados como condições iniciais e de contorno foram extraídos de diferentes fontes para o domínio do modelo, e depois interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

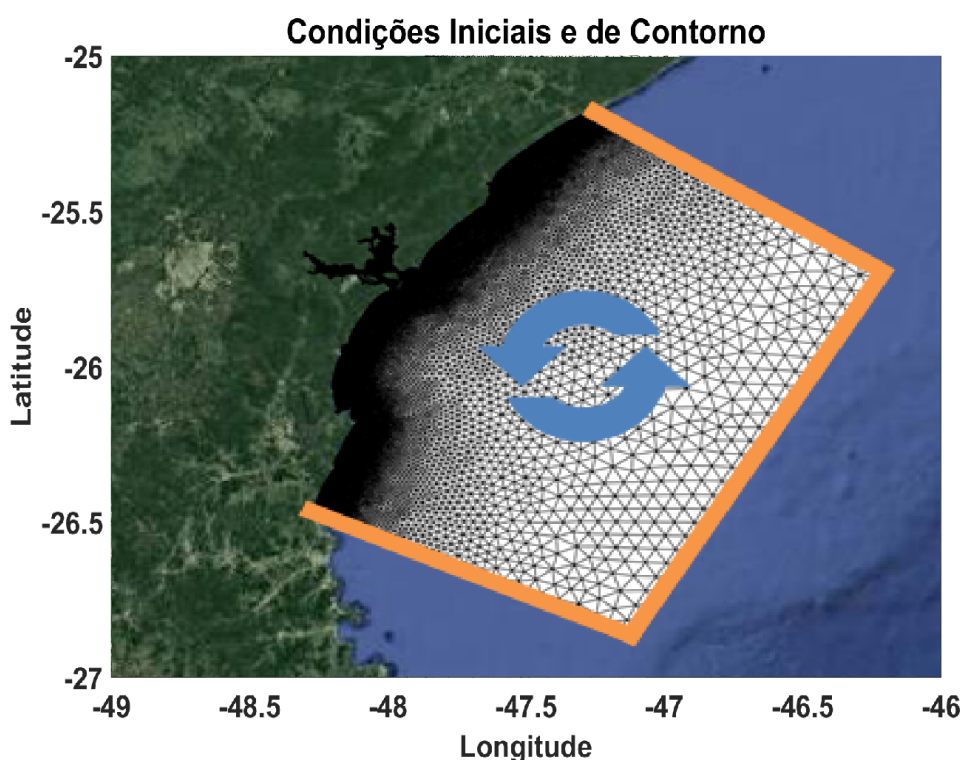
A partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), foram obtidos os dados oceanográficos, representados pelas componentes da velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar representados em laranja na figura 18. Para este modelo de reanálise, foi calculada a média diária do ano de 2010, formando um ano de médias diárias. A resolução espacial dos dados que estão sendo utilizados no trabalho é de $0,13^\circ$ de latitude e longitude, com escala temporal é de 24 h.

Os dados meteorológicos representam as condições superficiais, utilizando o banco de dados do ERA5 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts), representados por velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica, na figura 18, representado em azul. A resolução espacial dos dados utilizados no trabalho é de $0,125^\circ$, com escala temporal de 6 h. Neste caso também foram utilizadas as médias na escala temporal, formando um ano de médias interpolados.

Desta forma, os resultados obtidos formam um conjunto de condições de contorno anuais com dados médios diários (vazão de afluentes e do modelo HYCOM) e médias 6 h x 6 h (ERA5). Com o uso deste banco de dados, é possível reproduzir os principais ciclos de variabilidade sazonal da região de estudo. A partir destes conjuntos de dados, foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes do modelo numérico 18.

FIGURA 18 – Condições iniciais e de contorno utilizadas



Fonte: Adaptada de Google Maps, 2022.

6.4.1 Batimetria

Os dados de batimetria foram gerados a partir de duas fontes de dados, primeiramente da digitalização das seguintes cartas Náuticas:

1. Carta Náutica N° 23200, de Santos a Paranaguá,
2. Carta Náutica N° 23300, De Paranaguá a Imbituba,
3. Carta Náutica N° 1820, Proximidades da Barra de Paranaguá,

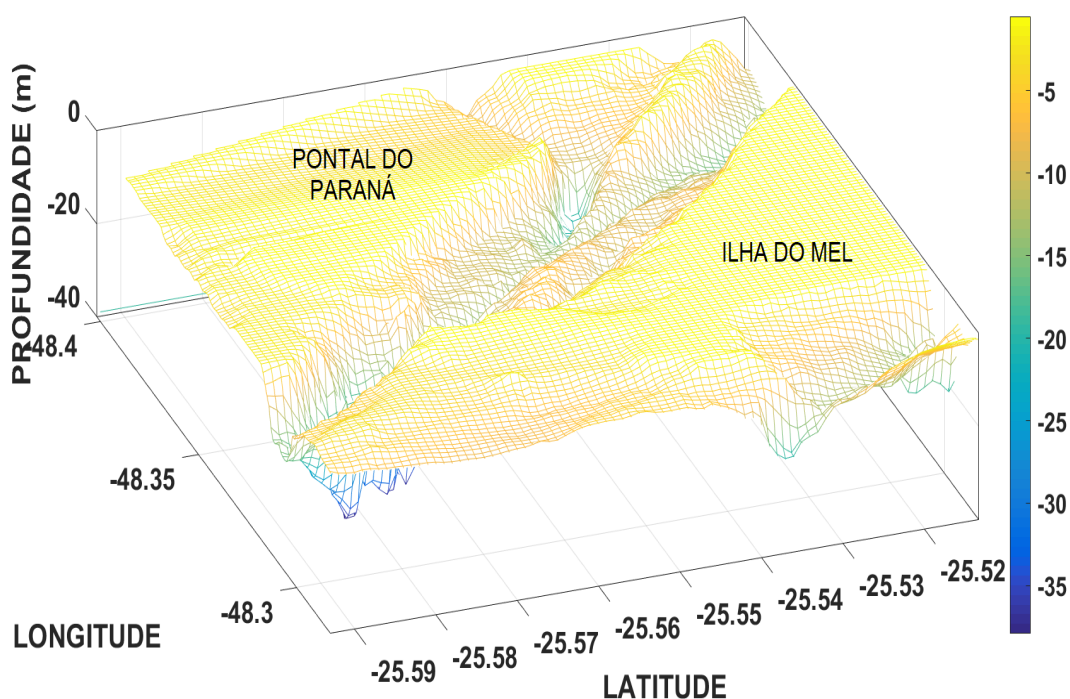
4. Carta Náutica N° 1821, Barra de Paranaguá,
5. Carta Náutica N° 1822, Portos de Paranaguá e Antonina.

E também extraídos do banco de dados da GBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans).¹.

Os dados batimétricos foram compostos principalmente pelos dados oficiais das cartas náuticas digitalizadas, isto é, a base de dados é principalmente formada pela digitalização das cartas náuticas acima, e então, refinados com os dados do GEBCO com intuito de efetuar uma melhor delimitação das componentes da linha de costa e da própria linha de costa. Os dados foram também interpolados por uma interpolação multilinear proveniente do Software BlueKenue, para após isso serem inseridos para a malha.

A figura 19 ilustra os dados batimétricos gerados, para a área de estudo.

FIGURA 19 – Malha de dados de batimetria para a região da área de estudo.



Fonte: O Autor, 2022.

¹ <https://www.gebco.net/>

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma análise mais detalhada do caso do derrame hipotético do trabalho, os resultados da simulação de dispersão de óleo serão apresentados em conjunto com as variáveis hidrodinâmicas.

Durante a análise de resultados, foi observado que o modelo apresenta fatores limitantes. Um fator limitante acontece quando o óleo encosta em uma linha de costa. Conforme as partículas encostam na beira da praia, o modelo interrompe os cálculos dessa partícula individual. Esse fator faz com que não haja novas informações do que iria acontecer com essa partícula. Outro fator limitante observado, conforme Souza et al. (2019), foi observado na geração do gráfico de evaporação, que ultrapassou os limites estabelecidos pelo IPIECA et al. (2015), de 40% para óleos crus.

Segundo Szewczyk (2006), Ferreira (2006) e Fingas (2017), uma vez que a partícula do óleo encosta na linha praial, esta pode continuar nesse ambiente por períodos longos, chegando em casos de permanecer até por anos, sob influência dos processos das intempéries presentes nesse local.

7.1 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

A figura 20 ilustra a variação média do nível do mar para toda a malha de dados. Enquanto a variação para a região oceânica é relativamente baixa, ficando entre 20 a 40 cm, a variação na região costeira e no interior do estuário, apresentam variações maiores, com valores de 60 cm até 1 m. Das regiões internas, a região costeira de Paranaguá teve uma variação média mais baixa quando comparada às demais regiões. E a região de estudo, conforme a figura 21 tem uma variação maior, entre 70 e 60 cm.

FIGURA 20 – Malha de dados da variação do nível do mar para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.

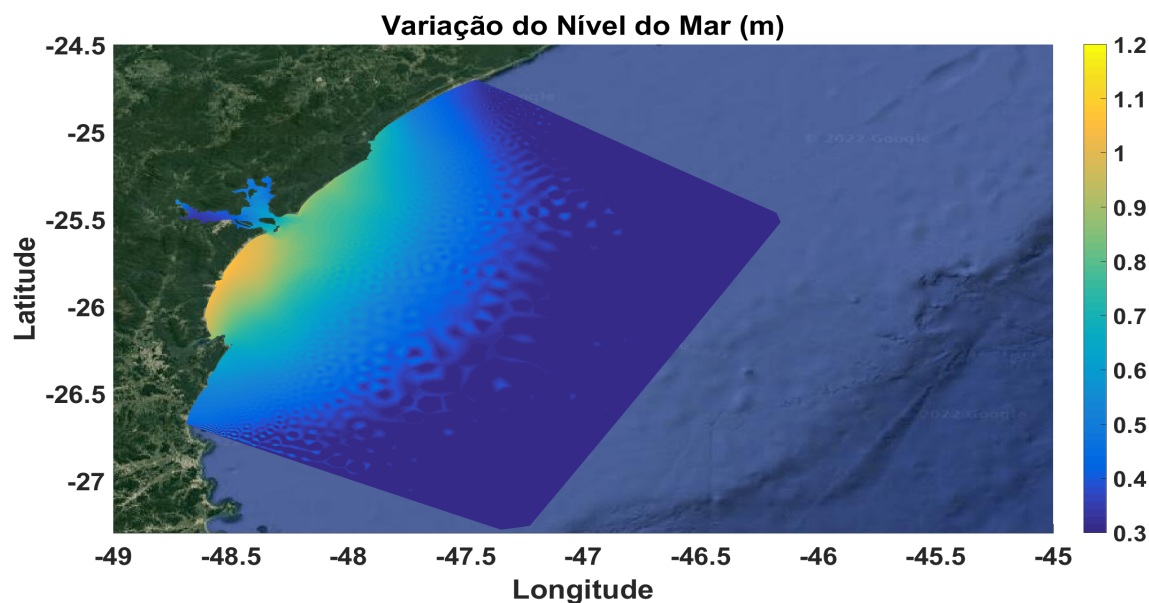
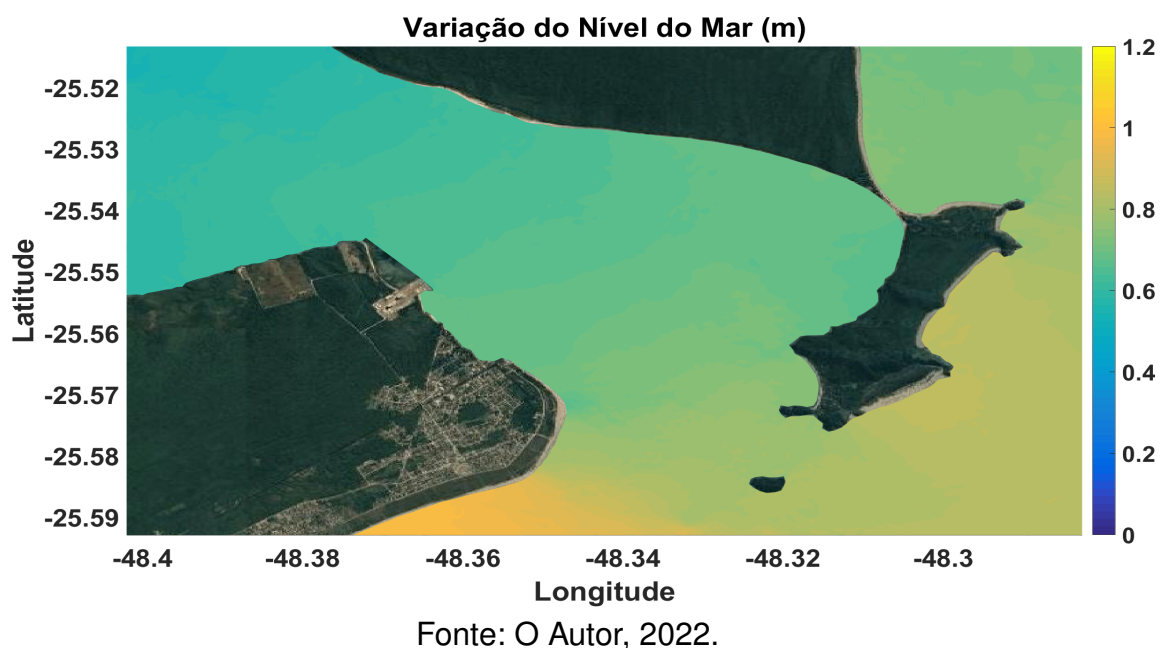
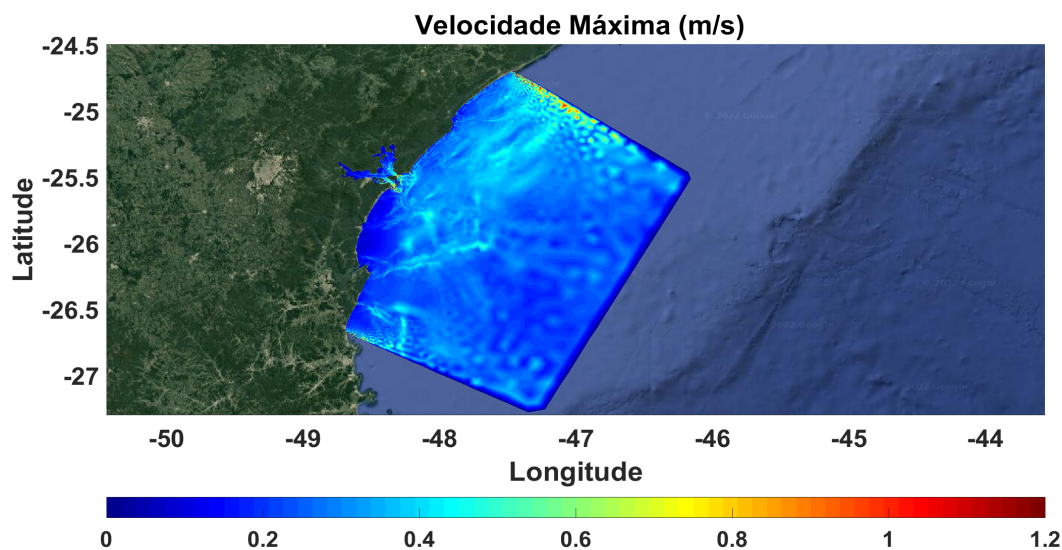


FIGURA 21 – Malha de dados da variação do nível do mar para região de estudo no ano de 2010.



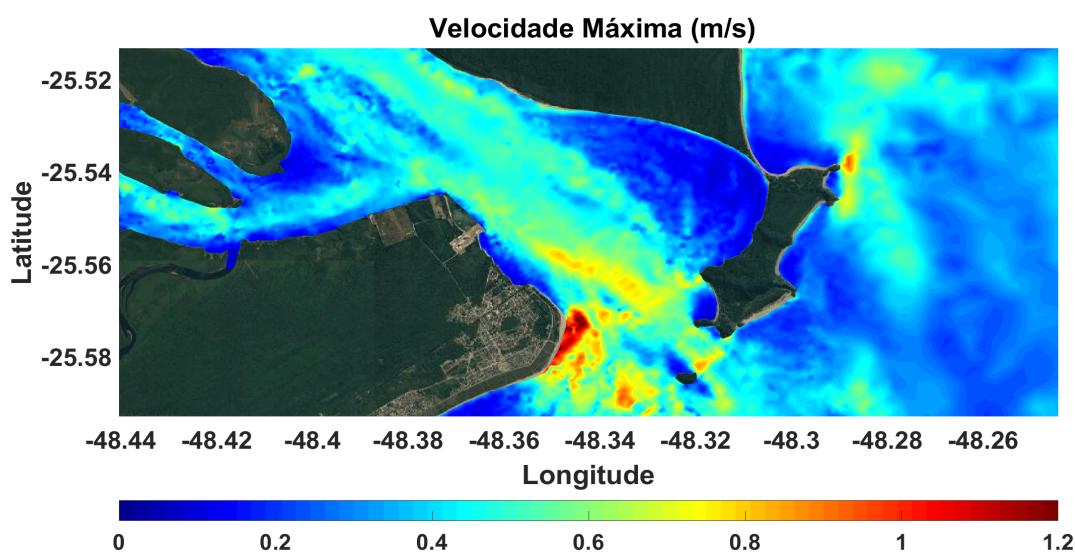
Os valores de maior variação do nível médio do mar em ambos lados da entrada do Complexo Estuarino de Paranaguá, podem ser correlacionados aos valores de intensidade de correntes. Estes valores são em torno de 0,5 e 0,75 m/s nos locais com maior variação do nível do mar, conforme a figura 23, como na região de estudo, e são em torno de 0,05 e 0,25 m/s, na região de Paranaguá, como visto na figura 22.

FIGURA 22 – Malha de dados da velocidade máxima de correntes para região de todo Complexo Estuarino de Paranaguá no ano de 2010.



Fonte: O Autor, 2022.

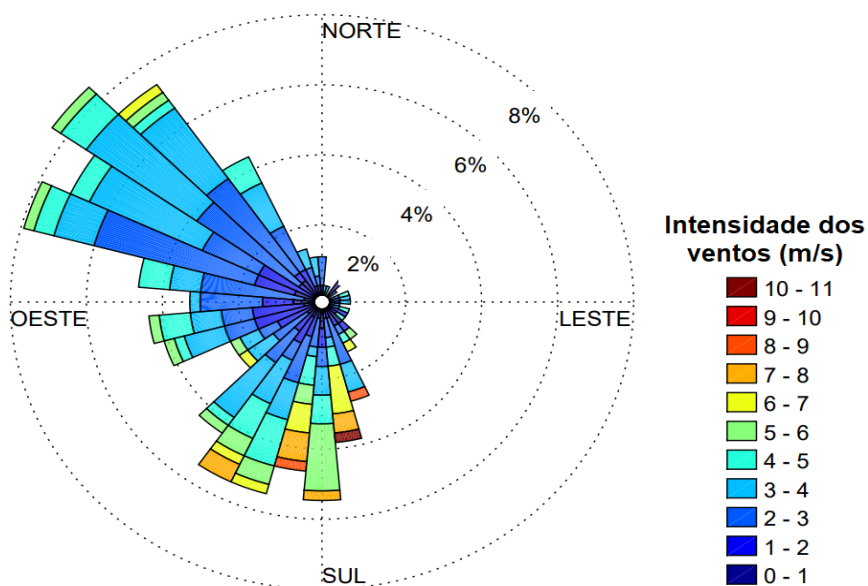
FIGURA 23 – Malha de dados da velocidade máxima de correntes para região de estudo no ano de 2010.



Fonte: O Autor, 2022.

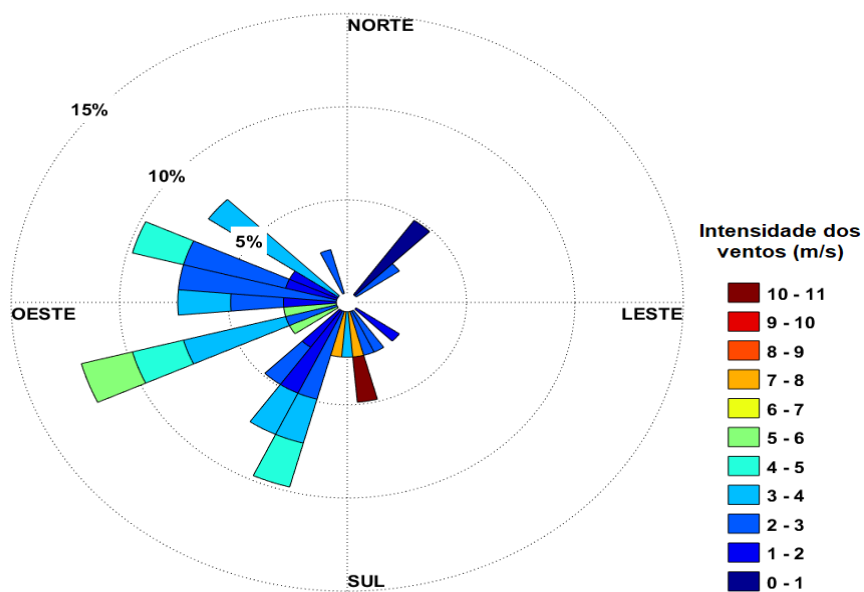
Correntes mais intensas são, por sua vez, forçadas por ventos mais intensos. A figura 24 ilustra a direção e o sentido dominante dos ventos no ano de 2010. A figura 25 e a figura 26 são respectivamente rosas dos ventos dos dias escolhidos para o derrame do óleo, acompanhado dos valores de intensidade. As rosas dos ventos das figuras 25 e 26 são formadas por 42 dias de dados, sendo 20 dias antes, o dia do início do derrame e 20 dias depois.

FIGURA 24 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para todo o ano de 2010.



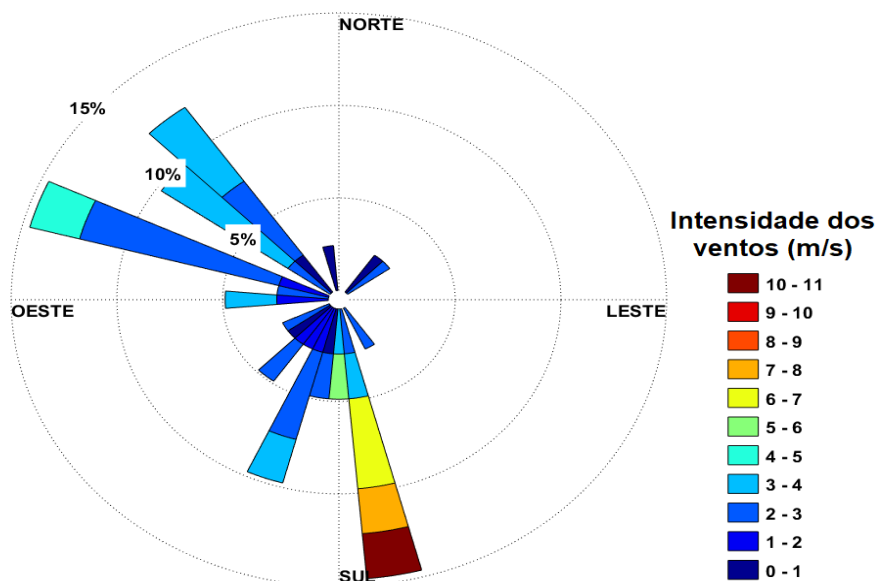
Fonte: O Autor, 2022.

FIGURA 25 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para o período da primeira simulação, no dia 25/02/2010.



Fonte: O Autor, 2022.

FIGURA 26 – Rosa dos ventos com dados de intensidade, direção e sentido dos ventos para o período da segunda simulação, no dia 17/03/2010.

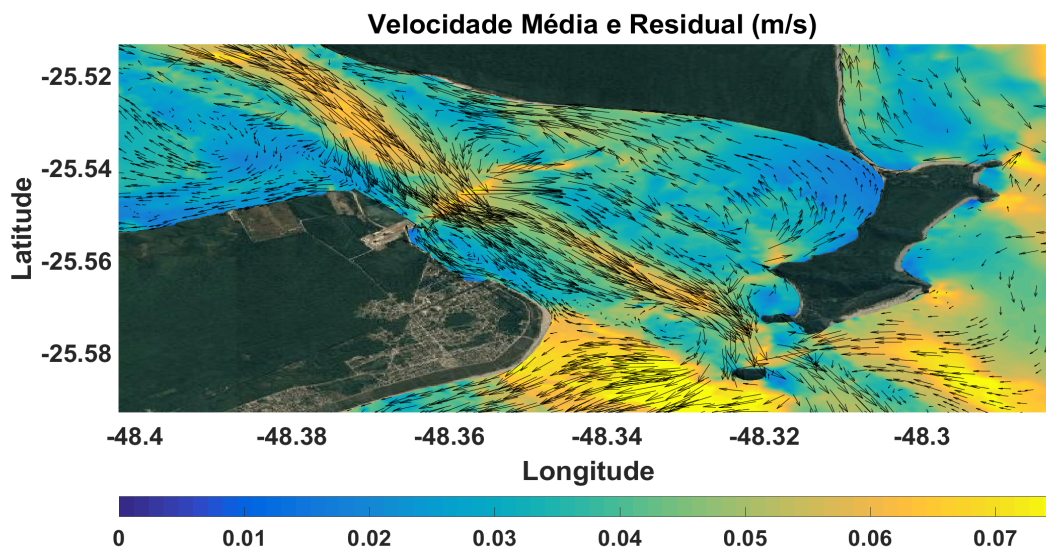


Fonte: O Autor, 2022.

As rosas dos ventos apresentam, para cada período, o perfil de velocidades, direção e sentido. Para o panorama geral do ano de 2010, os maiores valores de intensidade do vento são para direção sudeste, de intensidade entre 10 a 11 m/s, com alinhamento maior para o sul, e isso vale para ambas simulações. Já no que se diz respeito à direção e ao sentido, no período das simulações, há uma certa diferença da dominância, sendo que para o cenário do ano todo e para o período da segunda simulação, há uma maior predominância para noroeste, já para a primeira simulação, há uma predominância para sudoeste.

Observando os resultados hidrodinâmicos gerados, o padrão de elevação do nível do mar acompanhou tanto o padrão de oscilação de intensidade de correntes, quanto o padrão de oscilação de intensidade dos ventos. Para verificar o campo de velocidade residual na superfície da água obtida com base no comportamento das velocidades de corrente, foi analisado o período de 365 dias com intervalos de 6 horas. A figura 27 apresenta as velocidades residuais para a área de estudo no período mencionado.

FIGURA 27 – Campo de dados da velocidade residual para região de estudo no ano de 2010 para um período 365 dias intervalados a cada 6 horas.

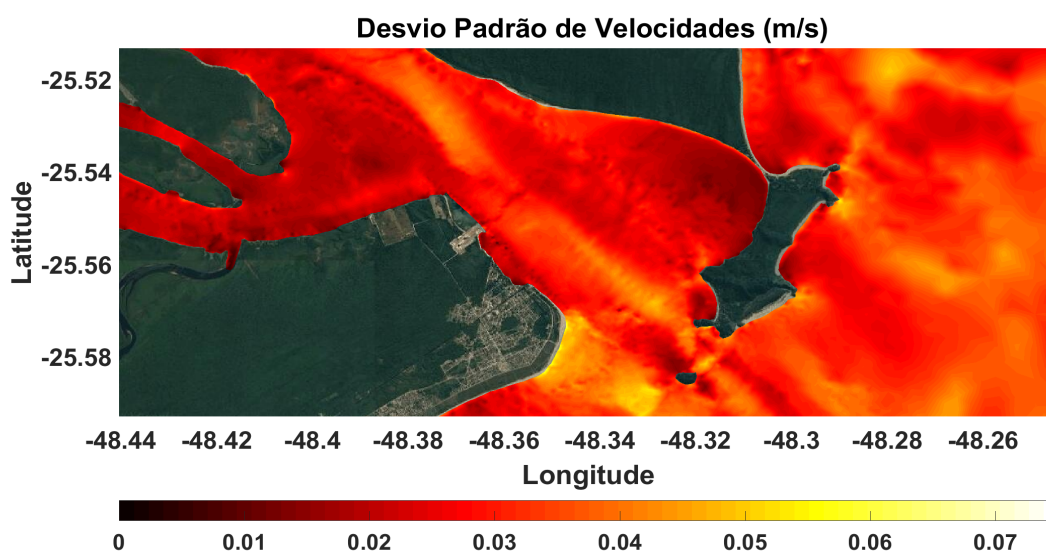


Fonte: O Autor, 2022.

A direção predominante verificada pelo campo de velocidade residual de correntes é a de saída em direção ao oceano, com intensidade residual variando entre 0,04 até 0,08 m/s.

A figura 28 apresenta o quadro de desvio padrão de velocidades de corrente para o Complexo Estuarino de Paranaguá. Na região da área de estudo o valor do desvio padrão foi de aproximadamente 0.03 no meio do canal e, nas regiões mais próximas da Ilha do Mel os valores foram mais reduzidos, na classe de 0.01.

FIGURA 28 – Malha contendo dados do desvio padrão de velocidades no CEP para o ano de 2010.



Fonte: O Autor, 2022.

7.2 ANÁLISE DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO ÓLEO

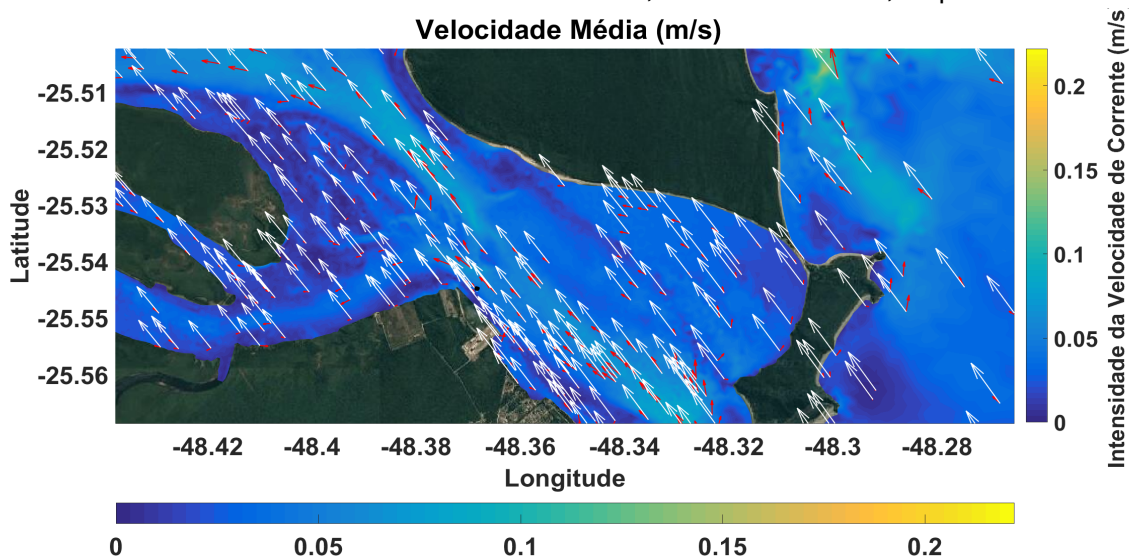
Procedendo para a introdução do poluente na região de estudo, obteve-se o movimento de dispersão da pluma de óleo em diferentes intervalos para cada simulação. Nesta seção serão apresentados resultados da evolução do transporte e propriedades de envelhecimento do óleo. Além do aumento de densidade do óleo que gera o afundamento de partículas.

7.2.1 Simulação do dia 25/02/2010

7.2.1.1 Dispersão do Óleo

A simulação do dia 25/02/2010 teve duração de aproximadamente 10 horas. Verifica-se a evolução da trajetória da pluma de óleo, da figura 29 até a figura 34. Durante o derrame, nota-se a mudança no sentido em que a corrente (vetores vermelhos) está, já que nas primeiras horas de derrame, estava no sentido de vazante, em direção ao oceano, passadas 6 horas desde o início, a corrente mostra-se em sentido de enchente, para dentro do CEP. Nota-se também que a velocidade máxima das correntes é atingida em ambas situações, de vazante e de enchente, tornando o vento a principal forçante na evolução do transporte da pluma. A direção do vento (vetores brancos), por sua vez, está para Norte, em direção à Ilha do Mel, mais especificamente, em direção à Praia do Limoeiro.

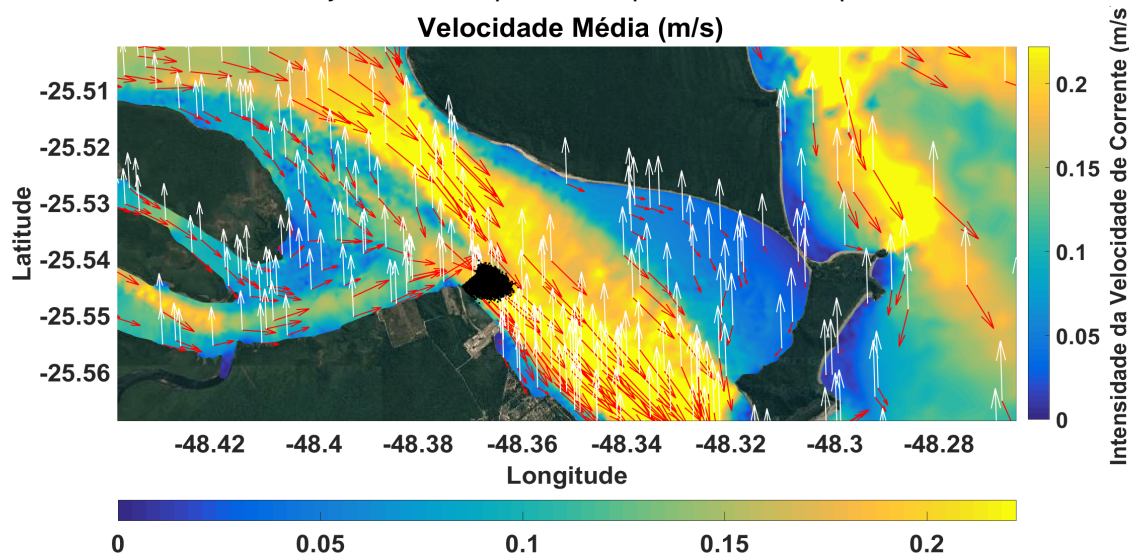
FIGURA 29 – Domo de óleo no momento do derrame, no dia 25/02/2010, no primeiro momento.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 29 ilustra o cenário inicial da pluma de óleo, com volume inicial de 20 m³,

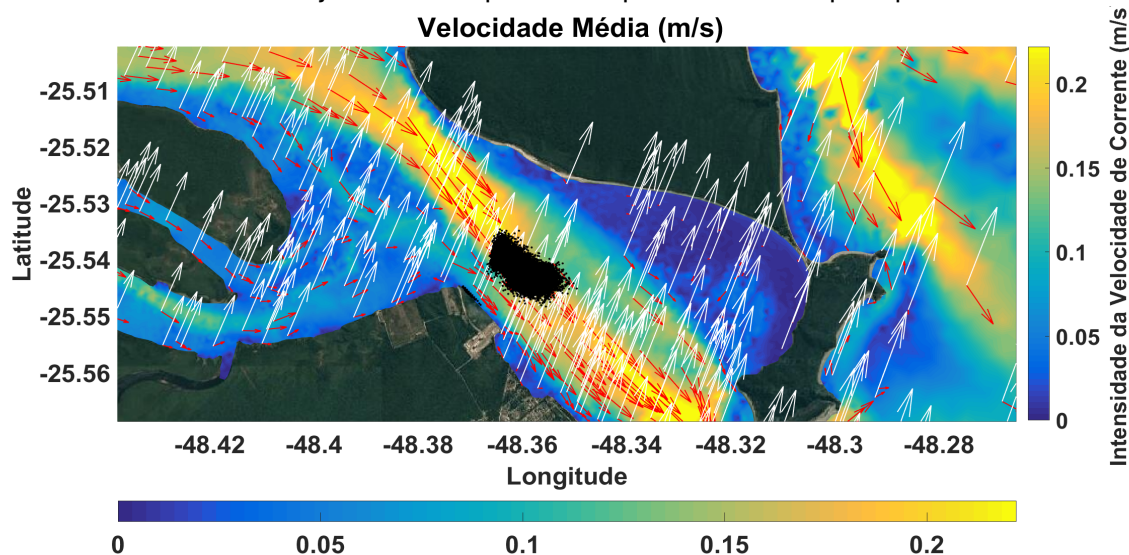
FIGURA 30 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após duas horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 30 ilustra o cenário após duas horas do início do vazamento, onde a mancha teve seu diâmetro aumentado e começa a sofrer influência da mudança de corrente,

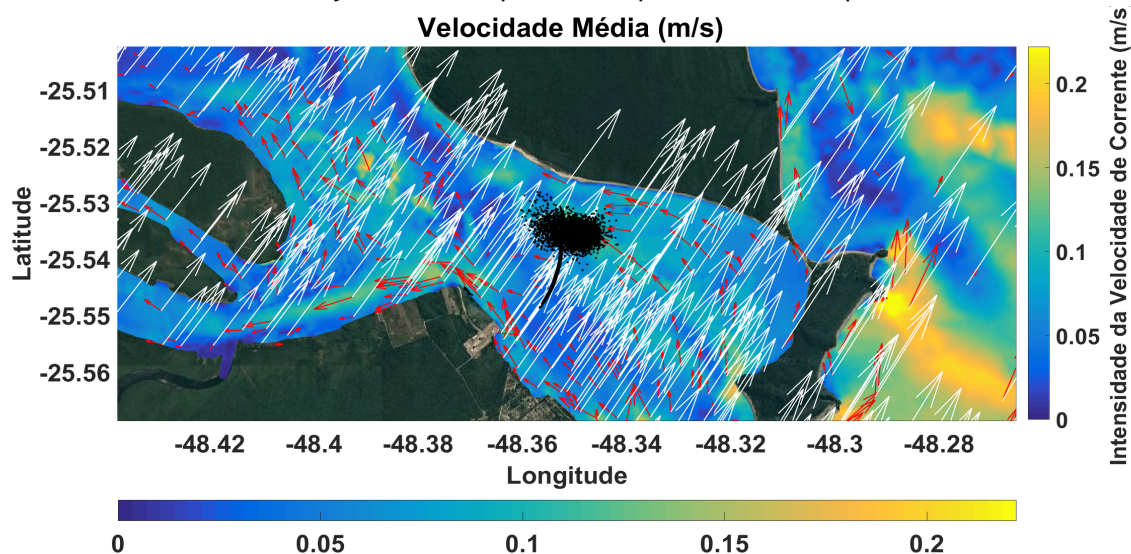
FIGURA 31 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após quatro horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 31 ilustra a mancha já com 4 horas após o início do derrame. Neste momento a mancha se encontra no centro do canal.

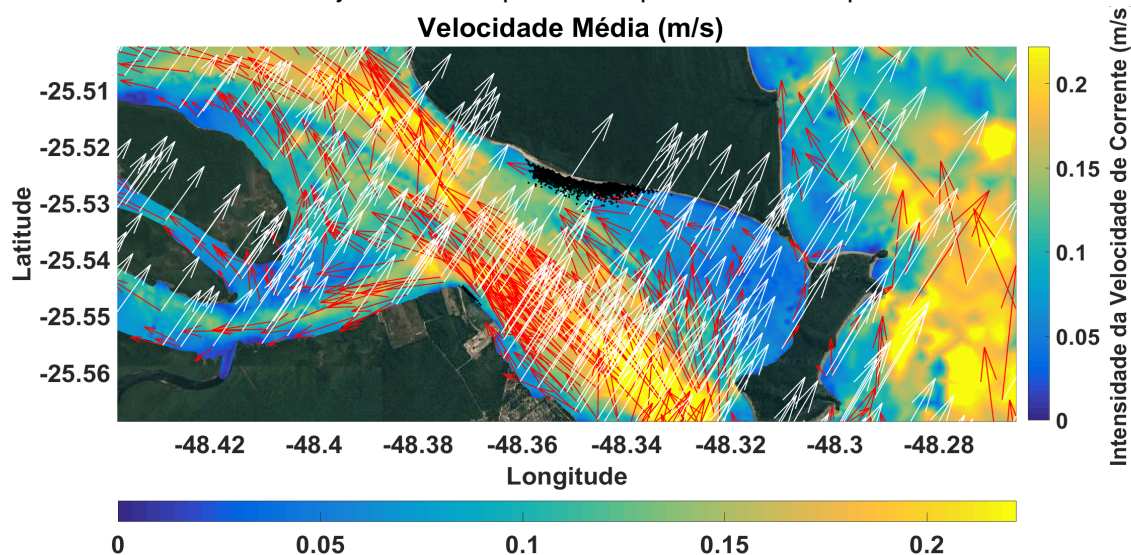
FIGURA 32 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após seis horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 32 ilustra a mancha já com 6 horas após o início do derrame. Neste momento a mancha é transportada, sob influência do vento, em direção à Ilha do Mel.

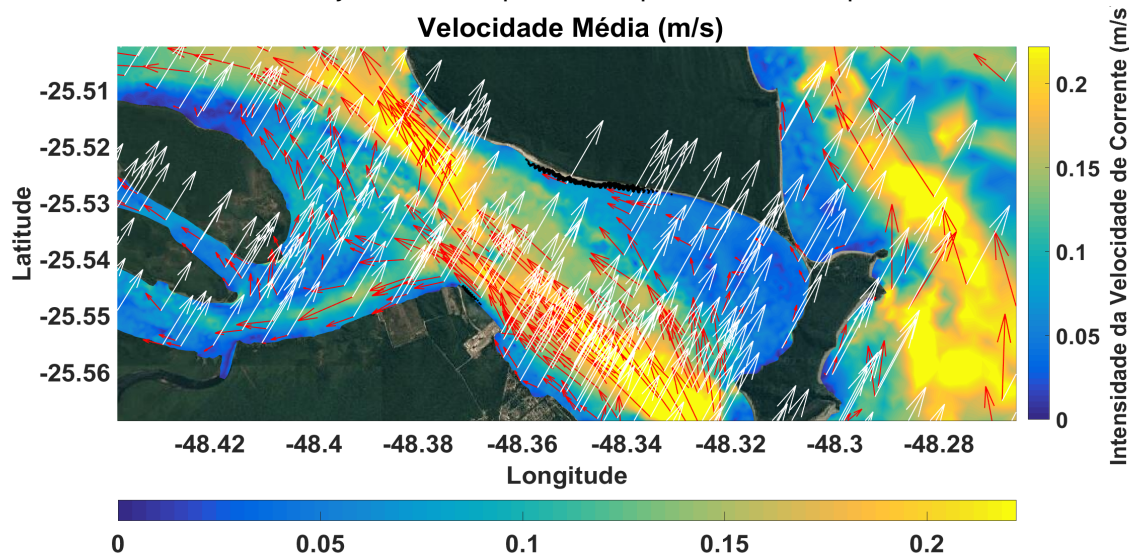
FIGURA 33 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após oito horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 33 ilustra a mancha já com 8 horas após o início do derrame. Neste momento a mancha já está em contato parcial com a Praia do Limoeiro na Ilha do Mel.

FIGURA 34 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após dez horas.



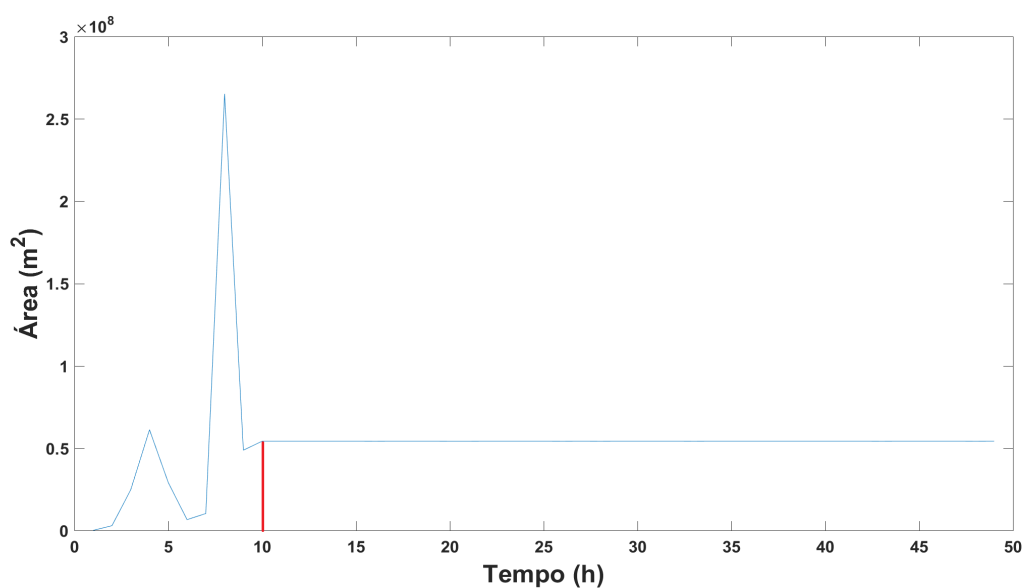
Fonte: O Autor, 2022.

Ao final da simulação, temos que a mancha atinge a Praia do Limoeiro 10 horas após o início do derrame, conforme 34.

7.2.1.2 Avaliação das propriedades em função do envelhecimento

Após o contato da pluma de óleo com a água, esta começa a sofrer efeitos de intemperismos e de suas propriedades intrínsecas. Abaixo estão os gráficos de evolução das propriedades do óleo em função do envelhecimento da mancha.

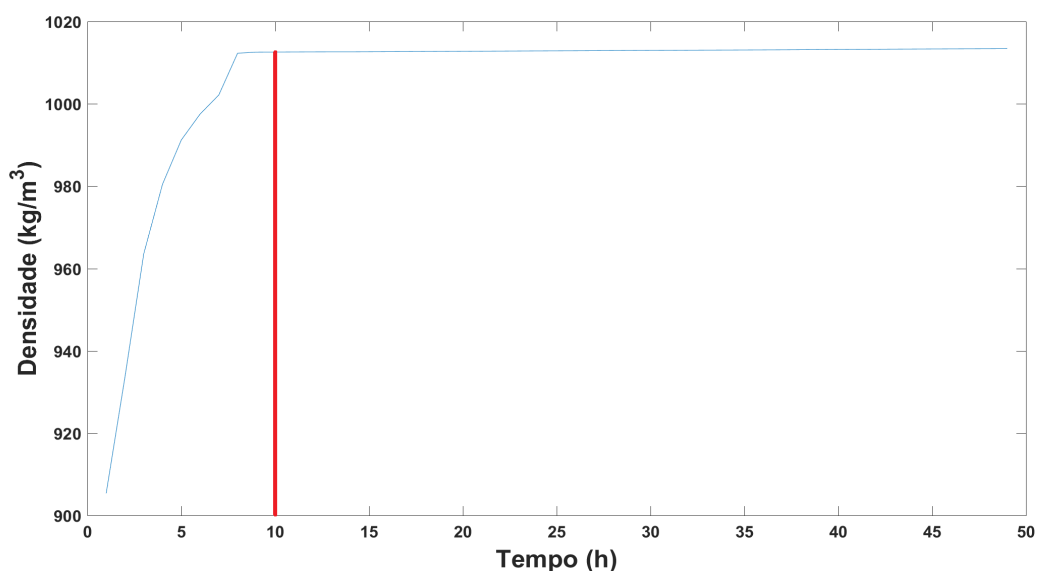
FIGURA 35 – Gráfico de evolução da área superficial da mancha de óleo em função do tempo.



Fonte: O Autor, 2022.

No gráfico da figura 35, estão os dados de evolução da área superficial da pluma de óleo em função do seu envelhecimento. Esse aumento de área é consequência da junção água-no-óleo, ou seja, da emulsificação do óleo e da água. Nota-se que a pluma chegou a ter sua área superficial aumentada em 12.500%.

FIGURA 36 – Gráfico da evolução da massa específica da mancha de óleo em função do tempo.

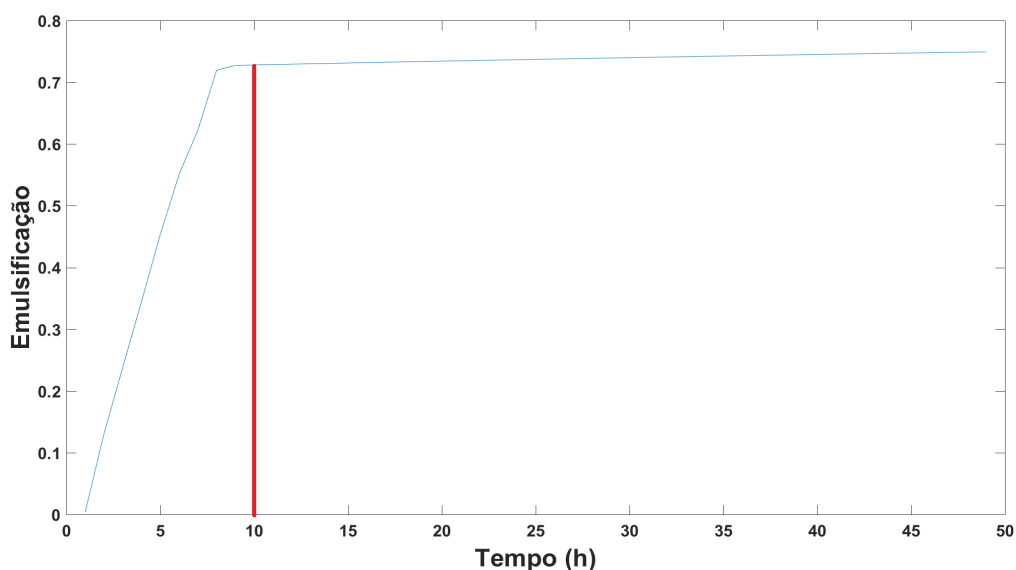


Fonte: O Autor, 2022.

No gráfico da figura 36, segundo a tabela 2, o óleo utilizado no derrame é classificado como óleo pesado da classe III. Este demonstrou características de óleos intermediários, com tanto a emulsificação, quanto a evaporação afetando estas características. O aumento elevado na massa específica do óleo também é uma propriedade afetada pela emulsificação. É possível fazer uma correlação entre a porcentagem de emulsificação do óleo com o aumento da massa específica, já que a massa específica, utilizada nos modelos, para a água foi de 1025 kg/m^3 e a massa específica do óleo foi inicialmente de 856 kg/m^3 para no final aproximadamente 1015 kg/m^3 , um aumento de aproximadamente 18,5%.

Quanto à emulsificação, o modelo obteve um valor de 70%, conforme a figura 37, esse valor é devida a limitação do modelo que ocorre devido à fórmula implementada de (FINGAS, 2017) apud (SOUZA et al., 2019), esta fórmula leva em consideração o valor de emulsificação no instante final de 0,7 como parâmetro para óleos crus e óleos pesados, como é o caso do óleo utilizado em ambas simulações.

FIGURA 37 – Gráfico da emulsificação do óleo em função do tempo.

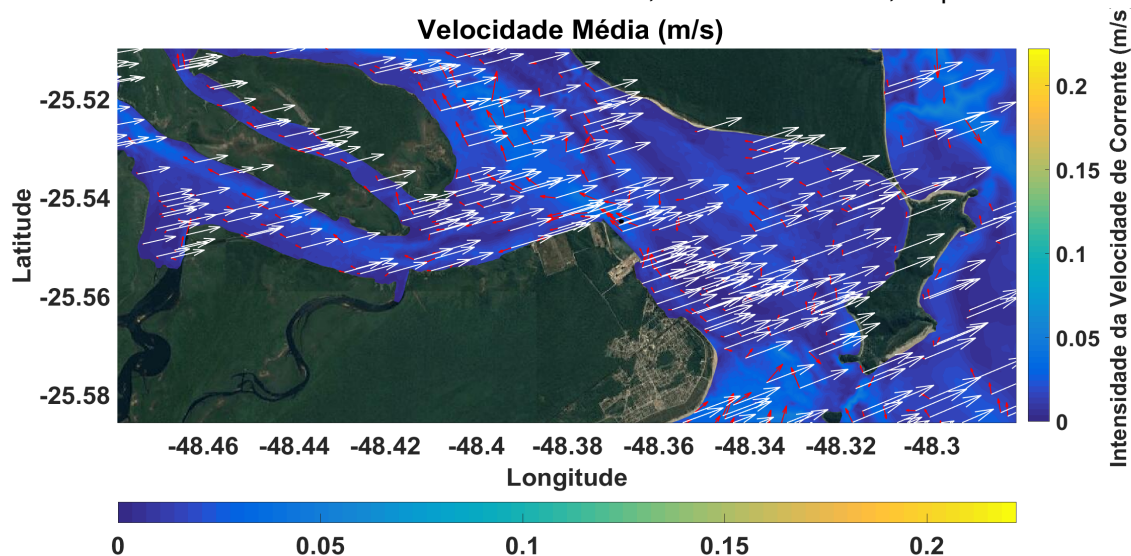


Fonte: O Autor, 2022.

7.2.2 Simulação do dia 17/03/2010

A simulação do dia 17/03/2010 teve duração de aproximadamente 26 horas. Verifica-se a evolução da trajetória da pluma de óleo, da figura 38 até a figura 47. Durante o derrame, nota-se a mudança no sentido em que a corrente (vetores vermelhos) está, já que nas primeiras horas de derrame, estava no sentido de enchente, em direção à região interna do CEP, passadas 9 horas desde o início, a corrente mostra-se em sentido de vazante, ou seja, em direção ao oceano. Nota-se também que a velocidade máxima das correntes é atingida em ambas situações, de vazante e de enchente, tornando o vento a forçante que definirá o percurso que a pluma irá ter durante a evolução do transporte. A direção do vento (vetores brancos), por sua vez, inicia na direção nordeste, em direção à Ilha do Mel, passadas 3 horas e posteriormente 6h, tem sua nova direção apontada para norte, de 9h até 15h a direção dominante é a oeste e após isso, direção sul/sudeste.

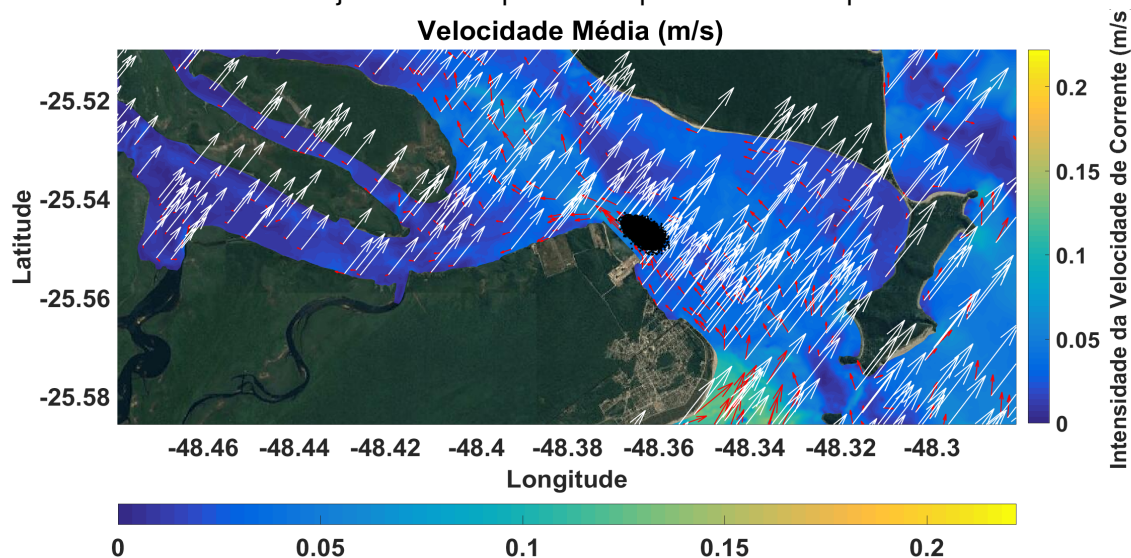
FIGURA 38 – Domo de óleo no momento do derrame, no dia 17/03/2010, no primeiro momento.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 38 ilustra o cenário inicial da pluma de óleo, com volume inicial de 20 m³. A corrente está na direção da região interna do CEP e o vento na direção oeste, ambos com baixas intensidades.

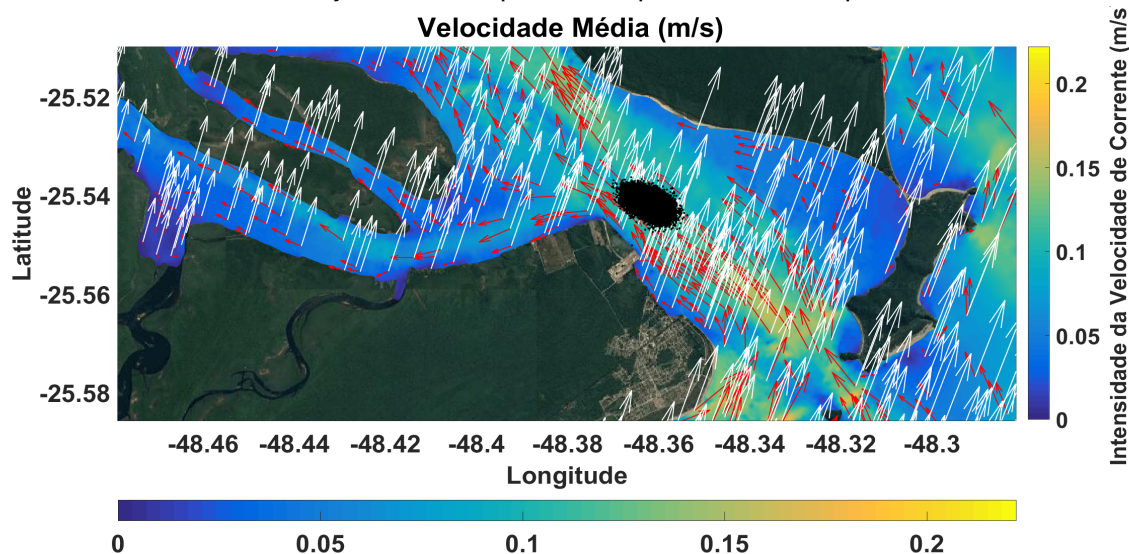
FIGURA 39 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após três horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 39 ilustra o cenário após três horas do início do vazamento, onde a mancha teve seu diâmetro aumentado, o vento intensifica sua velocidade e tem nova direção, a direção nordeste.

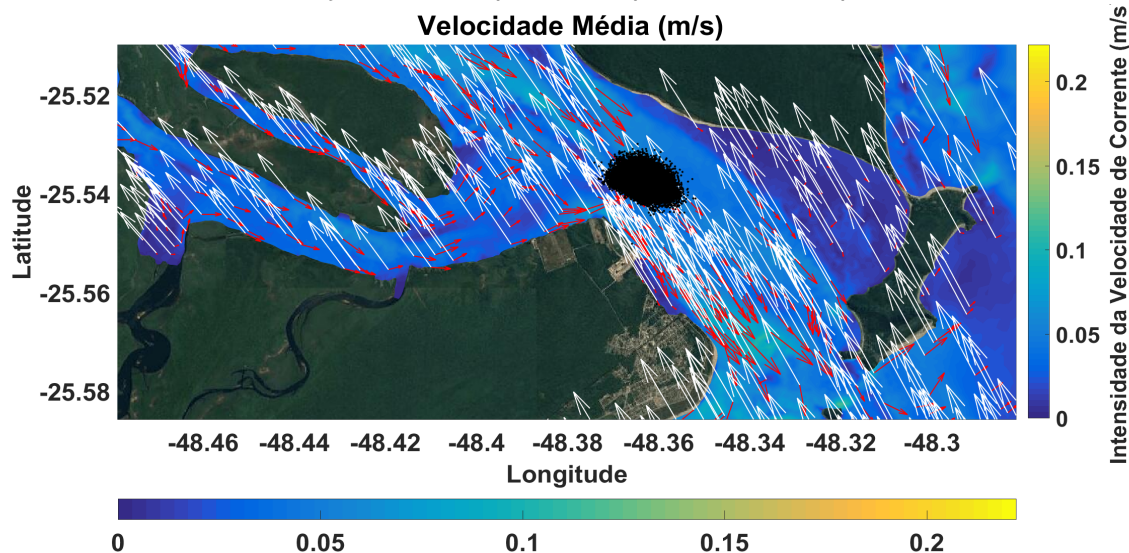
FIGURA 40 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após seis horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 40 ilustra a mancha já com seis horas após o início do derrame. Neste momento a mancha se encontra no centro do canal. Tanto a intensidade da corrente, quanto a intensidade do vento estão elevadas. A corrente ainda está no sentido de enchente e o vento está direcionado para norte/nordeste.

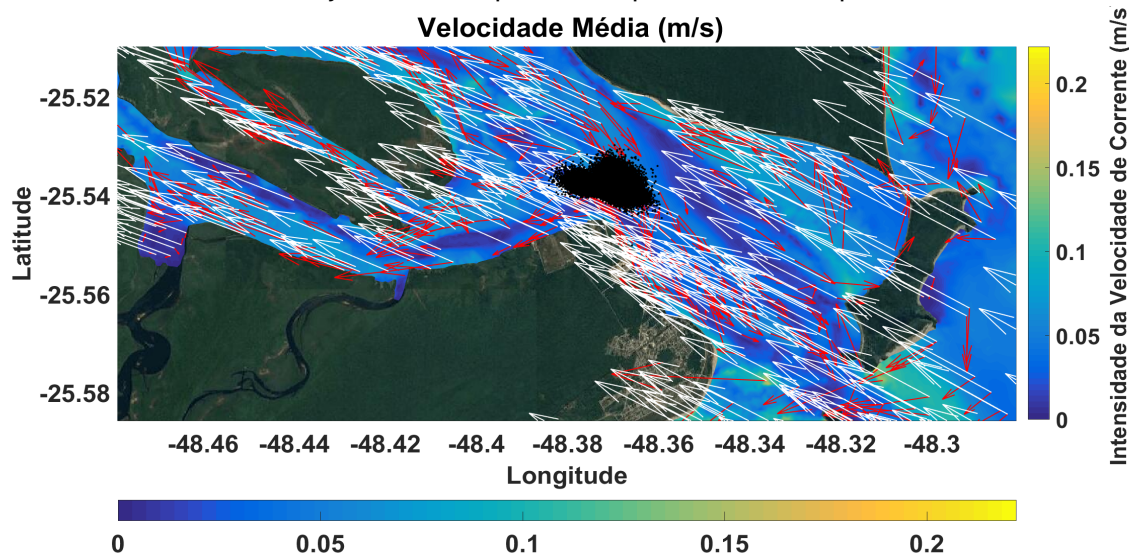
FIGURA 41 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após nove horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 41 ilustra a mancha já com nove horas após o início do derrame. Neste momento a mancha é transportada, sob influência do vento, contra a direção em que a corrente está, porém ambas tem intensidades próximas, logo a mancha permanece no local, sem grandes mudanças na movimentação.

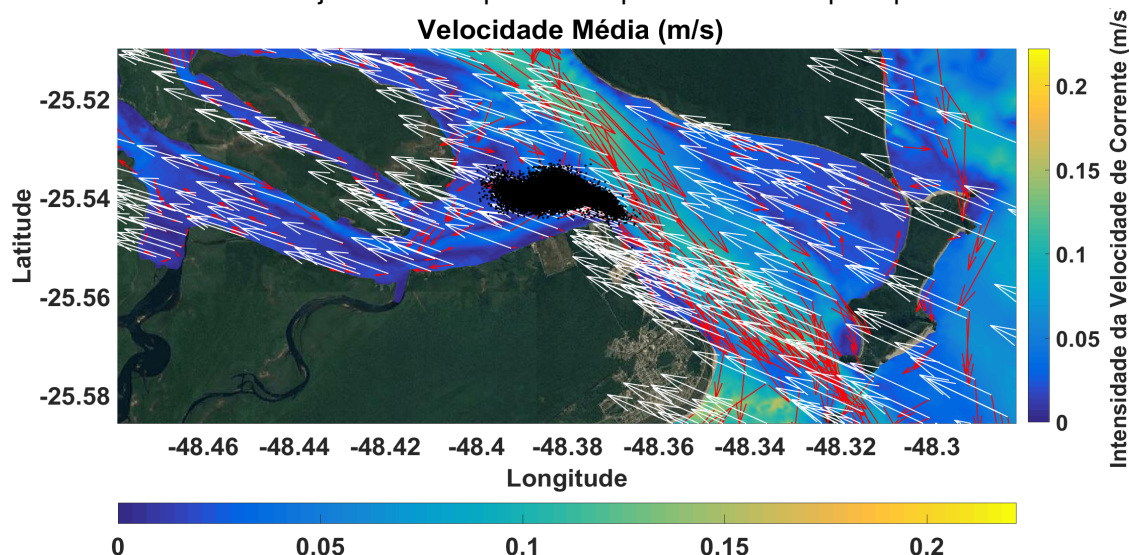
FIGURA 42 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após doze horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 33 ilustra a mancha já com doze horas após o início do derrame. A mancha mostra uma possível dispersão resultante da direção do vento e das correntes que estavam em sentidos opostos. Porém, nesse momento o vento tem direção noroeste e a corrente está com sua intensidade baixa e não oferece grande resistência à movimentação da pluma.

FIGURA 43 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após quinze horas.

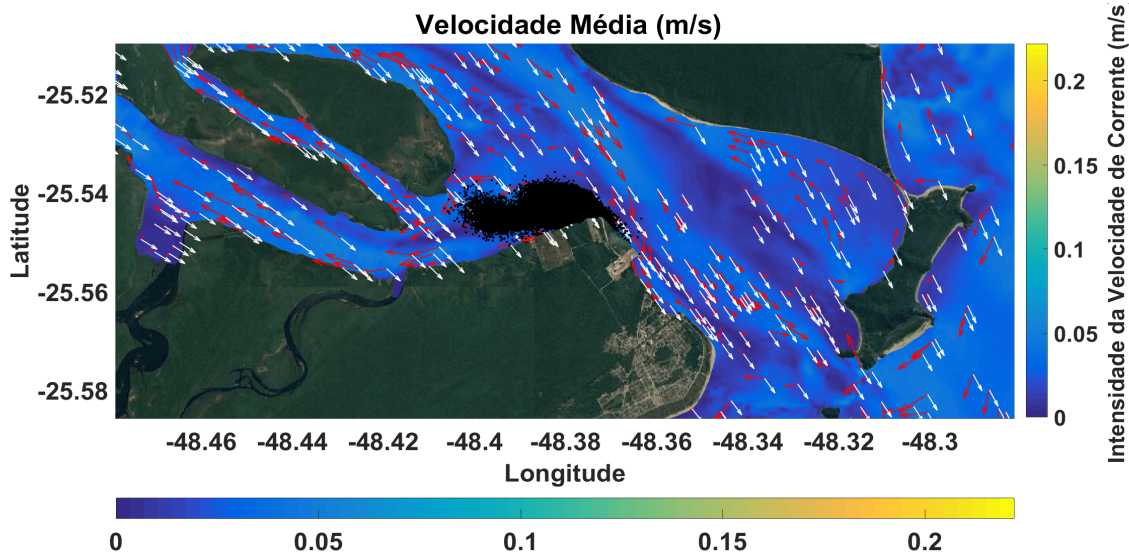


Fonte: O Autor, 2022.

A figura 43 ilustra a mancha já com quinze horas após o início do derrame. Neste momento a mancha é toda removida do canal principal por conta da ação do

vento e a intensidade da corrente oferece baixa resistência ao movimento da pluma na direção do vento.

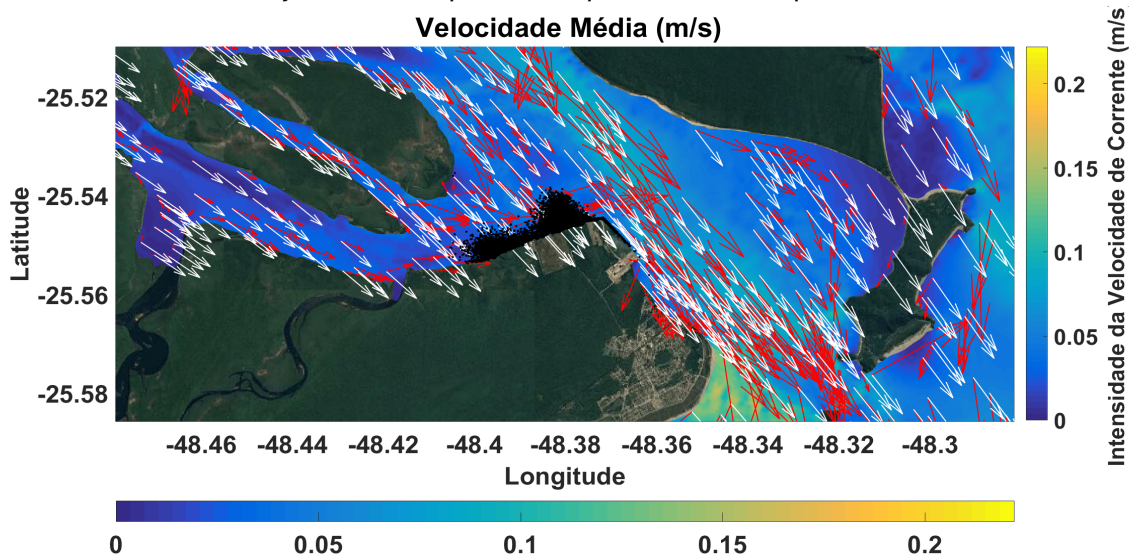
FIGURA 44 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após dezoito horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 44 ilustra a mancha já com dezoito horas após o início do derrame. Neste momento a mancha já está em contato parcial com a Praia do Limoeiro na Ilha do Mel.

FIGURA 45 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e uma horas.

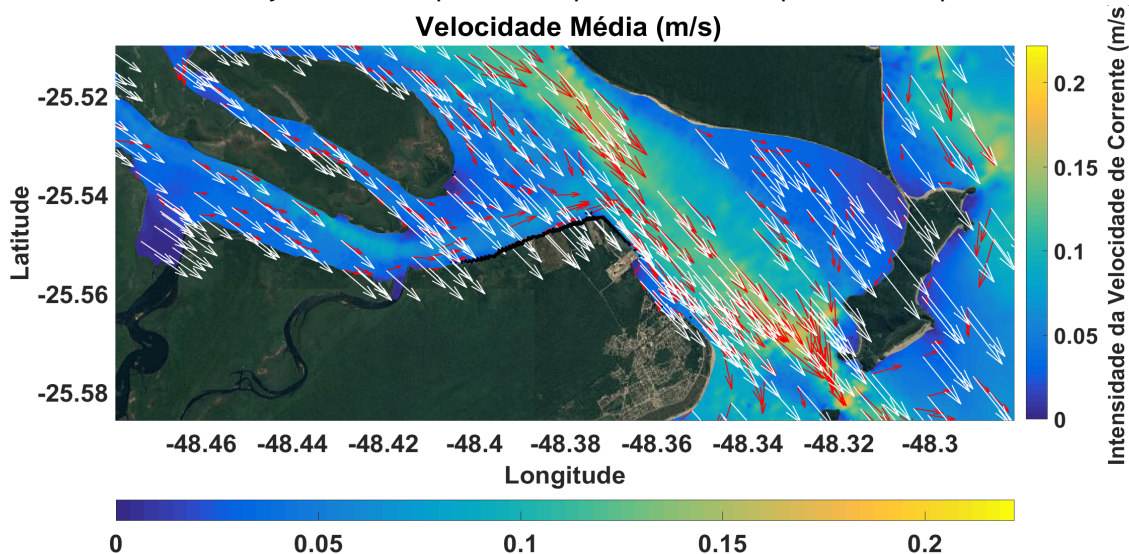


Fonte: O Autor, 2022.

A figura 45 ilustra a mancha já com vinte e uma horas após o início do derrame. Neste momento a mancha já está em contato parcial com a parte Norte do Porto Pontal,

próximo a Ilha da Cotinga.

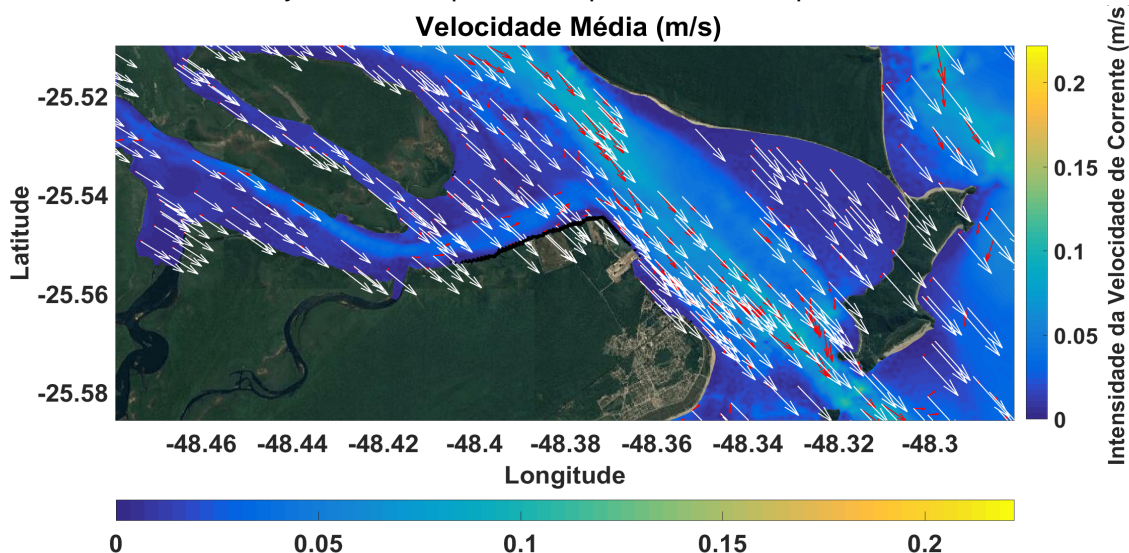
FIGURA 46 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e quatro horas.



Fonte: O Autor, 2022.

A figura 46 ilustra a mancha já com vinte e quatro horas após o início do derrame. Neste momento a mancha aumenta o contato com a parte Norte de Pontal do Sul e do Porto Pontal.

FIGURA 47 – Trajetória de dispersão da pluma de óleo após vinte e seis horas.



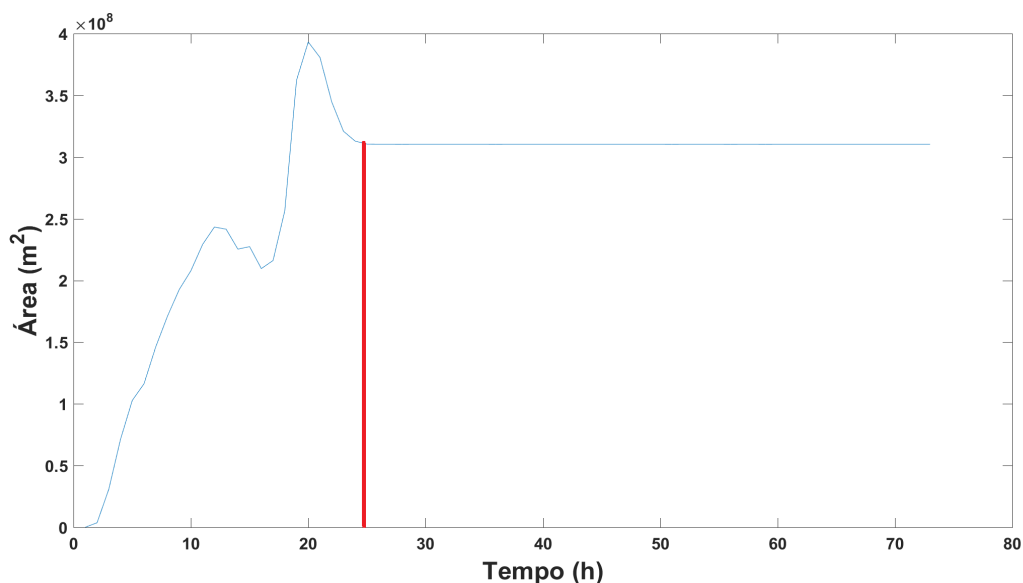
Fonte: O Autor, 2022.

Ao final da simulação, temos que a mancha atinge a parte norte de Pontal do Sul em sua totalidade, 26 horas após o início do derrame, conforme 47.

7.2.2.1 Avaliação das propriedades em função do envelhecimento

No gráfico da figura 48, estão os dados de evolução da área superficial da pluma de óleo em função do seu envelhecimento. Esse aumento de área é consequência da junção água-no-óleo, ou seja, da emulsificação do óleo e da água. Nota-se que a pluma chegou a ter sua área superficial aumentada em 20.000%.

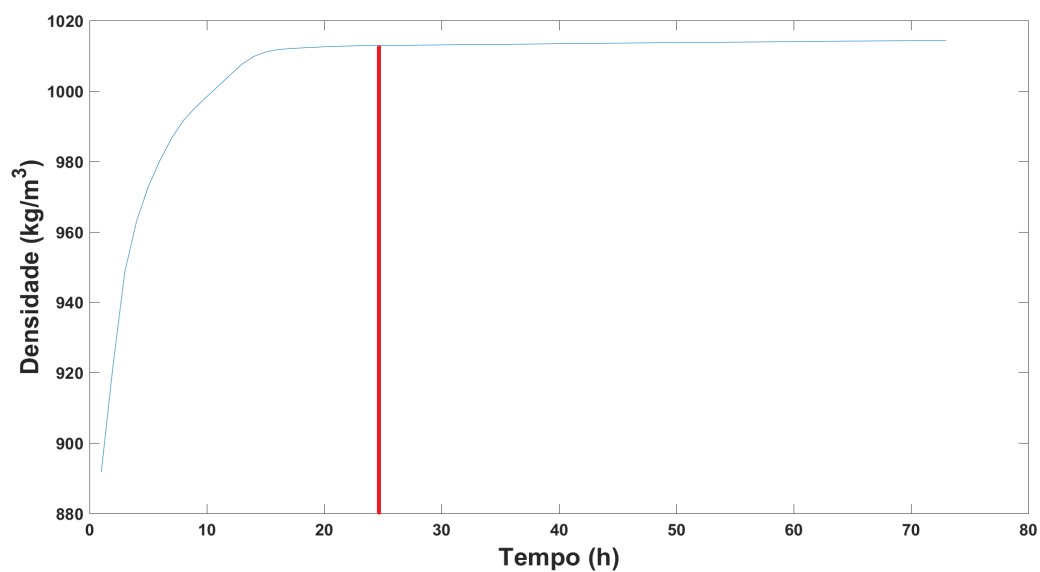
FIGURA 48 – Gráfico de evolução da área superficial da mancha de óleo em função do tempo.



Fonte: O Autor, 2022.

Conforme o gráfico da figura 49, este demonstrou características de óleos intermediários, com tanto a emulsificação, quanto a evaporação afetando estas características, como no caso da simulação 1, já que o óleo tem as mesmas propriedades, a única mudança é o tempo de duração da simulação. O aumento elevado na massa específica do óleo também foi semelhante, a massa específica do óleo foi inicialmente de 856 kg/m³ para no final aproximadamente 1018 kg/m³, um aumento de aproximadamente 19%, essa diferença deve-se exatamente ao fato da simulação ter uma maior duração.

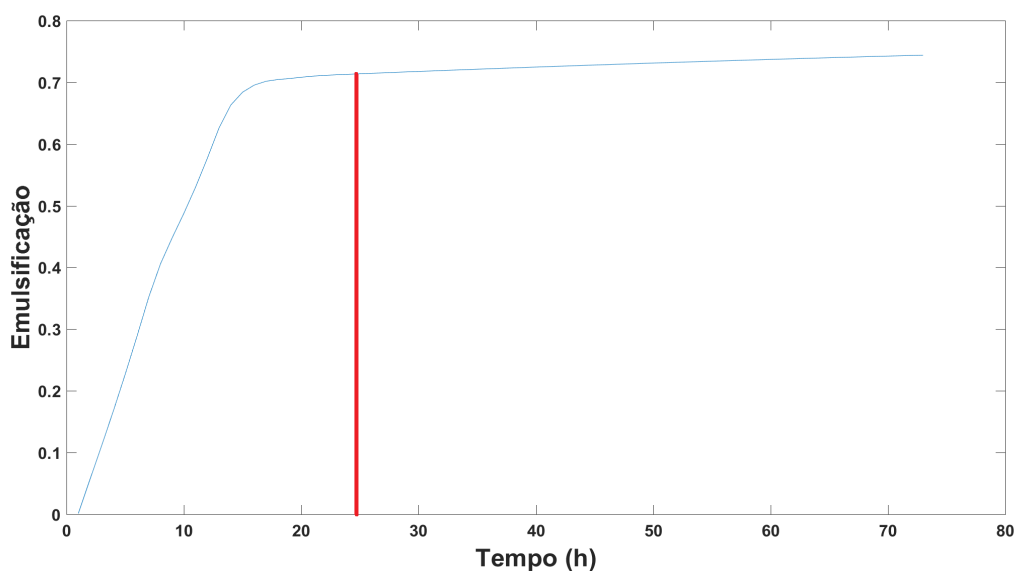
FIGURA 49 – Gráfico da evolução da densidade da mancha de óleo em função do tempo.



Fonte: O Autor, 2022.

Quanto à emulsificação, o modelo obteve um valor de 70%, conforme a figura 50 como é o caso de ambas simulações, por conta do óleo de ambas simulações ser o mesmo e também pelo fator limitante mencionado na 37.

FIGURA 50 – Gráfico da emulsificação do óleo em função do tempo.



Fonte: O Autor, 2022.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de utilizar a modelagem numérica, justificada pela capacidade em simular diversas variáveis, este trabalho utilizou dois diferentes softwares acoplados para tentar simular um derrame de óleo hipotético na localização do futuro Porto Pontal. Essa simulação foi utilizada tanto como base para entender, parcialmente, a hidrodinâmica do local em diferentes momentos, avaliando em momentos de eventos extremos, quanto para avaliar, de maneira inicial, o impacto que um derramamento na localização escolhida iria gerar para as zonas de sensibilidade ambiental na região, por conta do transporte da mancha pelas forças hidrodinâmicas.

Com duas simulações em diferentes momentos, foi possível reproduzir as condições hidrodinâmicas do local e verificar, num sentido preliminar, as possíveis trajetórias que a pluma tomaria, conforme o fluxo e a intensidade das correntes e do vento. Conforme apresentado, as condições, tanto climáticas quanto oceanográficas, influenciam diretamente no comportamento e nas propriedades de envelhecimento da pluma, e ainda, na tomada de decisão para qual ação deverá ser tomada no cenário de um possível futuro vazamento.

A evaporação e a emulsificação são processos importantes na avaliação dos processos, seja em zona oceânica ou em zona costeira e praias. Apesar das limitações do modelo, o ECOS juntamente ao TELEMAR-3D, conseguiram fornecer informações principalmente sobre o deslocamento da mancha e seu espalhamento. Ainda, o coeficiente de estabilização da emulsificação implementado para manter a emulsificação em 70% para óleos crus e pesados, não refletiram em diferenças relevantes no comportamento do óleo avaliado, indicando que há espaço para refinamento do modelo.

A região de estudo é uma região de grande importância para as comunidades que utilizam das atividades marítimas e turismo como fonte de renda e também para a biota marinha e costeira, justamente pela região ser um complexo estuarino e pela entrada desse complexo ser protegida pela Ilha do Mel, gerando um local ideal para épocas de reprodução.

A região da Ilha do Mel atingida na simulação do dia 25/02/2010 é um ponto turístico bem relevante, um derrame de óleo que contamine as águas dessa praia, traria tanto um impacto ambiental negativo, intoxicando as espécies que se abrigam na zona protegida da praia, quanto um impacto socio-econômico, pois tornaria o local impróprio para utilização. A região atingida na simulação do dia 17/03/2010, tem uma zona ambiental de índice de sensibilidade litorânea 10 (NOERNBERG et al., 2008), que é a entrada do manguezal próxima ao Porto Pontal, um derrame de óleo que entre

em contato com essa região geraria um desastre ambiental grave.

O Decreto Federal 4.871 de 06/11/2003, dispõe sobre a instituição dos Planos de Áreas (PA) para o combate à poluição por óleo em áreas de jurisdição nacional. Estes planos tem como objetivo criar uma integração de Planos, para poder contemplar a Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição por óleo (OPRC), estabelecida pela Organização Marítima Internacional (IMO), em 1990.

Para o estudo de cenários hipotéticos existe a necessidade de realizar estudo específico sobre as possíveis fontes poluidoras para definir volumes prováveis de emissão, características do óleo e regime em que o derrame pode ocorrer. Como também, faz necessário a calibração e a realização de um número maior de simulações, em outras datas, com diferentes intensidades das forçantes, tanto para ser possível entender a hidrodinâmica da região como um todo e também poder entender com maior nível de precisão se há outras possíveis trajetórias que a pluma tomaria, quanto para ter-se uma amostragem maior, e, assim, auxiliar na escolha da estratégia que será utilizada para diferentes tipos de derrames.

Assim, conclui-se que o trabalho se mostrou relevante, pois todos os objetivos, sejam eles, geral e específicos foram atingidos.

REFERÊNCIAS

- ACQUAPLAN. - Tecnologia e Consultoria Ambiental Ltda. **Plano de Emergência Individual dos Portos do Paraná (6ª Edição). Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina – APPA**, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 30, 42.
- BAKER, J. M.; LUNEL, T. In **Introduction of Volume 10: Choosing Spill Response Options to Minimize Damage - Net Environmental Benefit Analysis. IPIECA Report Series - Acesso em 08/08/2022**, 2000. Citado 2 vez na página 40.
- BIGARELLA, J.; KLEIN, R. **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional : contribuições à geografia, geologia e ecologia regional.** ., Governo do Paraná, Secretaria de Estado do Planejamento, Associação de Defesa e Educação Ambiental, 1978. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=cXeMHAAACAAJ>>. Citado 1 vez na página 46.
- BUCHANAN I. E HURFORD, N. **Methods for predicting the physical changes in oil spilt at sea. Oil and Chemical Pollution**, v. 4, p. 311–328, 1988. Citado 1 vez na página 20.
- BURNS, K.; GARRITY, S.; JORISSEN, D.; MACPHERSON, J.; STOELTING, M.; J.TIERNEY; L.YELLE-SIMMONS. **The Galeta Oil Spill. II. Unexpected Persistence of Oil Trapped in Mangrove Sediments. Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 38, n. 4, p. 349–364, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 13, 17.
- CAMARGO, R.; MARONE, E.; SILVA DIAS, P. L. **Deteção do sinal de brisa no registro de vento de Pontal do Sul (PR). IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1996. Citado 1 vez na página 46.
- CASEIRO, A. M. **SIMULAÇÃO DE UM EVENTUAL VAZAMENTO DE ÓLEO NO OLEODUTO DA BAÍA DA BABITONGA-SC.** Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Curso de Oceanografia, 2011. Citado 1 vez na página 16.
- CIOTTI, C. S.; SANTOS, V. R. dos; NECKEL, A.; BIANCHINI, G. M.; BRANDLI, E. N. **ACIDENTE ECOLÓGICO NA BAÍA DE GUANABARA: O DIREITO AMBIENTAL E A TRAGÉDIA ENVOLVENDO SUA SUSTENTABILIDADE. III Encontro de Sustentabilidade em Projeto do Vale do Itajaí**, 2009. Citado 1 vez na página 15.
- CONAMA. - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. **Resolução No 269/00. Ministério do Meio Ambiente**, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 35, 36.
- _____. - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. **Resolução No 293/01. Ministério do Meio Ambiente**, 2001. Citado 1 vez na página 40.

CONAMA. - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. **Resolução No 398/08. Ministério do Meio Ambiente**, 2008. Citado 1 vez na página 42.

FAGUNDES, A.; MANDARINO, D. **Oceano em luto. Rio Grande do Sul: Jornal da UFRGS**, 2010. Disponível em: <<http://www.ecoagencia.com.br/?open=noticias&id=VZLSXRVVON1YHZFSTxmWaN2aKVVVB1TP>>. Citado 1 vez na página 14.

FAY, J. **The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. M.I.T. Fluid Mechanics Laboratory**, 1969. Citado 1 vez na página 25.

FERRÃO, C. M. **DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MAR POR NAVIOS PETROLEIROS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO PROGRAMA DE ESPECIALIZAÇÃO EM M.B.E EM MEIO AMBIENTE**, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 32, 35, 36, 38, 39.

FERREIRA, J. P. **ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE RESPOSTA A DERRAMAMENTO DE ÓLEO PESADO NO LITORAL DO ESPÍRITO SANTO UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**, 2006. Citado 28 vezes nas páginas 22–24, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 35–40, 62.

FINGAS, M. **Oil Spill Science and Technology**. In: (2ª Ed). Boston: Gulf Professional Publishing, 2017. ISBN 978-0-12-809413-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809413-6.15001-5>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128094136150015>>. Citado 5 vezes nas páginas 20, 28, 62, 72.

FRANCH-MACCAY, D. **Oil spill impact modeling: Development and validation. Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 23, p. 2441–2456, 2004. Citado 1 vez na página 27.

GERGES, M. A. **On the Impacts of the 1991 Gulf War on the Environment of the Region: General Observations. Marine Pollution Bulletin**, v. 27, p. 305–314, 1993. Citado 0 vez na página 15.

GHERARDI DOUGLAS, F. M.; CABRAL, A. P. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Santos. Ministério do Meio Ambiente: Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental**, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50, 89.

_____. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima do Espírito Santo. Ministério do Meio Ambiente: Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental**, 2010. Citado 1 vez nas páginas 47, 48.

GÓIS, D. M. M. **Estudo Da Circulação Hidrodinâmica E Da Dispersão De Óleo Na Zona Costeira Entre Macau E Galinhos – Rn.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, **Dissertação de mestrado em Engenharia Sanitária**, p. 98, 2008. Citado 1 vez na página 13.

GURJAR, B. R.; SHARMA, R. K.; GHUGE, S. P.; WATE, S. R.; AGRAWAL, R. **Individual and Societal Risk Assessment for a Petroleum Oil Storage Terminal.** **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 19, n. 4, out. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 13, 17.

HERVOUET, J.-M. **Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling With the Finite Element Method.** [S.l.]: Wiley; 1ª edição (29 maio 2007), mai. 2007. P. 341. ISBN 9780470035580. DOI: 10.1002/9780470319628. Citado 2 vez na página 52.

IBAMA. - O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Definição de Plano de Emergência Individual. Ministério do Meio Ambiente, Acesso em 22/07/2022**, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42.

IPIECA; IMO; OGP; CEDRE. Aerial observation of oil spills at sea: Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. **IOGP Report Number 518**, 2015. Disponível em: <www.imo.org>. Citado 1 vez na página 62.

ITOPF-HANDBOOK. **Storm Approaching the Brazillian coast. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF**, 2020/21. Disponível em: <<http://www.itopf.com/%20-%20Acesso%20em%2029/07/2022>>. Citado 1 vez na página 28.

_____. **Technical Information Papers (TIP's): 1 to 8. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF**, 2014/15. Disponível em: <<http://www.itopf.com/%20-%20Acesso%20em%2022/07/2022>>. Citado 3 vez na página 35.

JOKUTY, P. **PROPERTIES OF CRUDE OIL AND OIL PRODUCTS (NOT JUST ANOTHER PRETTY DATABASE).** **International Oil Spill Conference Proceedings**, v. 2001, mar. 2001. DOI: 10.7901/2169-3358-2001-2-975. Citado 1 vez na página 20.

LEHR, W.; JONES, R.; EVANS, M.; SIMECEK-BEATTY, D.; OVERSTREET, R. **Revisions of the ADIOS oil spill model. Environmental Modelling & Software**, v. 17, p. 191–199, 2002. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/envsoft>. Citado 7 vezes nas páginas 20, 21, 23, 24, 28.

LOBO, G. M.; RIGO, D. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM DERRAME DE ÓLEO NA BAÍA DO ESPÍRITO SANTO UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**, 2015. Citado 1 vez na página 20.

LOPES, B. V.; LEAL, T. F.; OLEINIK, P. H.; TROMBETTA, T. B.; JR, O. O. M.; MARQUES, W. C. **Estudo numérico de vazamento de óleo utilizando dados de hidrodinâmica média do estuário da Lagoa dos Patos. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, Biblioteca Central da UNB, v. 5, p. 58–66, 1 jan. 2019. DOI: 10.26512/ripe.v5i1.19072. Citado 2 vez na página 57.

MACKAY, D.; TRUDEL, B.; PATERSON, S.; DIRECTORATE, C.; RESEARCH, C.; DIVISION, D. **A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour. Research and Development Division, Environmental Emergency Branch**, 1980. Citado 1 vez na página 28.

MANTOVANELLI, A. CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA HÍDRICA E DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NA BAÍA DE PARANAGUÁ E EM SUA BACIA DE DRENAGEM. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 51, dez. 2002. DOI: 10.5380/geo.v51i0.4173. Citado 0 vez na página 47.

MARQUES, W. C.; STRINGARI, C. E.; KIRINUS, E. P.; MÖLLER, O. O.; TOLDO, E. E.; ANDRADE, M. M. **Numerical modeling of the Tramandai beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. Applied Ocean Research**, Elsevier Ltd, v. 65, p. 178–191, abr. 2017. ISSN 01411187. DOI: 10.1016/j.apor.2017.04.007. Citado 4 vezes nas páginas 13, 17, 51, 57.

MARTA-ALMEIDA, M.; RUIZ-VILLARREAL, M.; PEREIRA, J.; OTERO, P.; CIRANO, M.; ZHANG, X.; HETLAND, R. D. **Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. Marine Pollution Bulletin**, v. 71, n. 1-2, p. 139–151, jun. 2013. ISSN 0025326X. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.03.022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X13001628>>. Citado 1 vez na página 13.

MIRANDA, L. de. **PRINCÍPIOS DA OCEANOGRAFIA FÍSICA DE ESTUÁRIOS, VOL. 42**. [S.l.]: São Paulo: EDUSP, 2002. P. 441. ISBN 9788531406751. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=cPM7lFE0S1sC>>. Citado 1 vez na página 45.

NOERNBERG, M. A.; ANGELOTTI, R.; CALDEIRA, G. A.; RIBEIRO DE SOUSA, A. F. **DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO LITORAL PARANAENSE À CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO. Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, p. 59, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 17, 46, 47, 49, 81.

NORDVIK, A. B. **The technology windows-of-opportunity for marine oil spill response as related to oil weathering and operations**. [S.l.]: Pergamon, mar. 1995. v. 2, p. 17–46. DOI: 10.1016/1353-2561(95)00013-T. Citado 2 vezes nas páginas 29, 39.

PALLARDY, R. **Deepwater Horizon Oil Spill**. *Encyclopaedia Britannica, Inc.*, p. 1–12, 2021. Citado 1 vez nas páginas 14, 15.

PATOWARY, K. **The Lakeview Gusher: The Mother of Oil Spills**. *Amusing Planet*, **Data de acesso, 24 nov. 2021.**, 2021. Disponível em:

<<https://www.amusingplanet.com/2021/03/the-lakeview-gusher-mother-of-oil-spills.html>>. Citado 0 vez na página 15.

PAULA KIRINUS, E. de; OLEINIK, P. H.; COSTI, J.; MARQUES, W. C. **Long-term simulations for ocean energy off the Brazilian coast**. *Energy*, Pergamon, v. 163, p. 364–382, nov. 2018. ISSN 0360-5442. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.08.080. Citado 1 vez na página 57.

PENA, P. G. L.; NORTHCROSS, A. L.; LIMA, M. A. G. de; DE CÁSSIA FRANCO RÊGO, R. **Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão**. *Cadernos de saude publica*, NLM (Medline), v. 36, n. 2, 2020. ISSN 16784464. DOI: 10.1590/0102-311X00231019. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17.

PROCTOR, R.; ELLIOT, A.; E FIATHER, R. **Forecast and hindcast simulations of the Braer oil spill**. *Marine Pollution Bulletin*, v. 28, p. 219–229, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.

AL-RABEH, A. H.; CEKIRGE, H.; WATER, N. **A stochastic simulation model of oil spill fate and transport**. *Applied Mathematical Modelling*, v. 13, p. 322–329, 1989. Citado 1 vez na página 27.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBahia**. *COPPE – Engenharia Costeira & Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2011. Citado 1 vez na página 15.

ROSMAN, P. C. C.; SCUDELARI, A. C.; FIGUEIREDO, L. R. R. **Estudo da Circulação Hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi devida a Ação do Vento**. *Programa de Engenharia Ocenaica do Rio de Janeiro*, 2003. Citado 1 vez na página 18.

SEDEST. **Estudo de Impacto Ambiental do Porto de Paranaguá**. *Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, Acesso em 18/12/2021*, 2020. Disponível em: <https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-03/rima.pdf>. Citado 1 vez na página 45.

SOTO, L. A.; BOTELLO, A. V.; LICEA-DURÁN, S.; LIZÁRRAGA-PARTIDA, M. L.; YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. **The environmental legacy of the Ixtoc-I oil spill in Campeche Sound, southwestern Gulf of Mexico**. *Frontiers Media S. A*, v. 1, NOV, 2014. ISSN 22967745. DOI: 10.3389/fmars.2014.00057. Citado 0 vez na página 15.

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.** Universidade Federal do Paraná, Dissertação de mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2004. Citado 6 vezes nas páginas 13, 18, 20, 45–47.

SOUZA, B. D. S.; OLEINIK, P. H.; MONTEIRO, C. B.; MARQUES, W. C. **Modelagem e simulação de derrames de dois tipos de petróleo baseado na experiência de Tramandaí/RS.** *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, Biblioteca Central da UNB, v. 5, p. 96–107, 1 jan. 2019. DOI: 10.26512/ripe.v5i1.19242. Citado 2 vezes nas páginas 62, 72.

STIVER, W.; D., M. **Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures.** *Environmental science and technology*, v. 18, p. 834–840, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 23, 24.

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. Disponível em: <<http://www.itopf.com>>. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 31, 32, 35, 62.

TANSEL, B. **Propagation of impacts after oil spills at sea: Categorization and quantification of local vs regional and immediate vs delayed impacts.** *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 7, p. 1–8, mar. 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420913000587>>. Citado 1 vez na página 13.

