



**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanologia

# **SIMULAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DE CAMPOS**

**ISADORA VIEIRA CARVALHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre.

**Orientador: *Prof. Dra.* ELISA HELENA LEÕES  
FERNANDES**

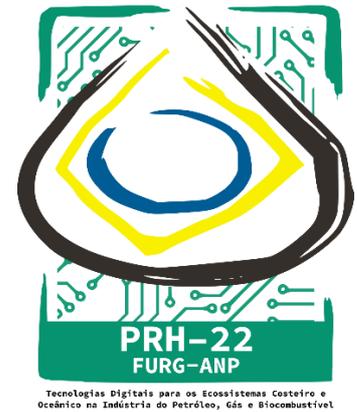
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

**Co-orientador: *Prof. Dr.* LUÍS FELIPE FERREIRA DE MENDONÇA**

Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Fevereiro de 2025



# **SIMULAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DE CAMPOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia,  
como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre

por

**ISADORA VIEIRA CARVALHO**

Rio Grande, RS, Brasil

Fevereiro de 2025

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.

VIEIRA CARVALHO, ISADORA

Simulação de derramamento de óleo: estudo de caso na Bacia de Campos/ Isadora Vieira Carvalho – Rio Grande: FURG, 2025.

96p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande. Mestrado em Oceanologia. Área de Concentração: Física dos Oceanos e Clima; Geologia Marinha e Costeira; Biogeoquímica, Poluição e Ecossistemas Marinhos.

1. Derramamento de óleo. 2. Modelagem numérica. 3. Sensoriamento remoto. I. Simulação de derramamento de óleo: estudo de caso na bacia de campos.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
IO – INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
OCEANOLOGIA



E-mail: [ccpofqg@furg.br](mailto:ccpofqg@furg.br) – home-page: [www.pppo.furg.br](http://www.pppo.furg.br)

**ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 02/2025**

Às quatorze horas do dia seis de fevereiro do ano dois mil e vinte e cinco, por Vídeo conferencia sala: <https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/elisa-helena-leao-fernandes> e Presencial: Auditório João Rocha-FURG/C. Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** intitulada: “SIMULAÇÃO DE DERRAMENTO DE ÓLEO: ESTUDO DE CASO

NA BACIA DE CAMPOS”, da **Acad. Isadora Vieira Carvalho**. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes - Orientadora – (IO/FURG); Prof. Dr. Luís Felipe Ferreira de Mendonça - Coorientador – (UFBA); Prof. Dr. Fabricio Sanguinetti Cruz de Oliveira – (IO/FURG); Profa. Dra. Juliana Costi – (IO/FURG) e Prof. Dr. Angelo Teixeira Lemos (UFSB). Dando início à reunião, a Coordenadora do PPGO, Profa. Dra. Grasiela Lopes Leães Pinho, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que a candidata teria um tempo de 45 a 60 min para explanação do tema, e cada membro da Comissão Examinadora, um tempo máximo de 30 min para perguntas. A seguir, passou à palavra a candidata que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se em reservado para discussão do conceito a ser atribuído a candidata. Foi estabelecido que as sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pela Orientador/Candidata para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente, a Comissão Examinadora considerou a candidata **APROVADA**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA, por mim, Clabisnei Moura de Melo – Secretário PPGO, que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pela Candidata e pela Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanologia.

Elisa Helena  
Leao Fernandes:2025.02.25  
67085148004 14:27:34-03'00'

Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUIS FELIPE FERREIRA DE MENDONÇA  
Data: 25/02/2025 22:09:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

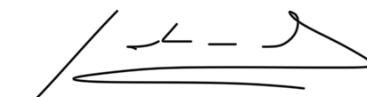
Prof. Dr. Luís Felipe Ferreira de Mendonça

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JULIANA COSTI  
Data: 28/02/2025 14:46:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Juliana Costi

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GRASIELA LOPES LEAES PINHO  
Data: 03/02/2025 16:50:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Grasiela Lopes Leães  
Pinho Coordenadora PPGO

  
Prof. Dr. Fabricio Sanguinetti Cruz de Oliveira

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ANGELO TEIXEIRA LEMOS  
Data: 27/02/2025 13:58:14-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Angelo Teixeira Lemos

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ISADORA VIEIRA CARVALHO  
Data: 27/02/2025 19:25:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Acad. Isadora Vieira Carvalho

# Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/10523-5". A especialização em Tecnologias Digitais Aplicadas à Indústria de Petróleo, Gás e Biocombustíveis proporcionou-me a oportunidade de ingressar no mercado de trabalho na área com a qual sempre sonhei e que está diretamente relacionada ao tema desta dissertação. Minha eterna gratidão ao PRH-22 por viabilizar essa realização.

Meus sinceros agradecimentos ao Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM) e à Telespazio Brasil por disponibilizarem a imagem COSMO-SkyMed, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Elisa e Luís Felipe, por sua orientação, ensinamentos e apoio inestimável durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Aos professores, cujos ensinamentos foram fundamentais para aprimorar meu desempenho e fortalecer minha formação profissional ao longo do curso.

Ao laboratório LOCOSTE, por proporcionar um ambiente de trabalho com todas as ferramentas necessárias para a realização desta pesquisa.

À minha família, por todo o suporte emocional e financeiro ao longo de toda minha vida acadêmica; sem eles, esta conquista não teria sido possível.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, acreditando e torcendo por mim em cada etapa.

# Índice

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>5</b>
<b>Índice .....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Acrônimos e Abreviações.....</b>	<b>10</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>11</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>12</b>
<b>Prefácio.....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo I: Introdução .....</b>	<b>14</b>
<b>Petróleo e vazamentos de óleo no mar .....</b>	<b>14</b>
<b>Tecnologias Digitais - Sensoriamento Remoto .....</b>	<b>19</b>
<b>Tecnologias Digitais - Modelagem Numérica .....</b>	<b>22</b>
<b>Processos envolvidos .....</b>	<b>25</b>
<b>MEDSLIK II .....</b>	<b>32</b>
<b>Capítulo II: Área de estudo .....</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo III: Objetivos.....</b>	<b>44</b>
<b>Capítulo IV: Metodologia .....</b>	<b>46</b>
<b>Testes de sensibilidade .....</b>	<b>47</b>
<b>Cenários e comparação com dados SAR.....</b>	<b>51</b>
<b>Consolidação da metodologia .....</b>	<b>55</b>

<b>Capítulo V: Artigo Científico.....</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo VI: Síntese da discussão &amp; conclusões .....</b>	<b>86</b>
<b>Capítulo VII: Referências .....</b>	<b>90</b>

# Lista de Figuras

<b>Figura 1. a)</b> Retroespalhamento do radar em situação normal. <b>b)</b> Retroespalhamento do radar na presença de óleo (Fonte: Adaptada de Zhang et al. 2014).....	21
<b>Figura 2-</b> Esquema do funcionamento de modelos de dispersão e intemperismo de óleo (Fonte: Adaptada de Keremea et al. 2021).....	23
<b>Figura 3-</b> Ilustração dos processos de intemperismo (Fonte: Autora).....	25
<b>Figura 4-</b> Processo de espalhamento da mancha (Fonte: Adaptada de Fay 1969). ...	28
<b>Figura 5-</b> Processos de intemperismo utilizando a abordagem de Mackay. TK indica a mancha espessa e TN a mancha fina. VTK e VTN são os volumes de óleo na superfície da parte espessa e fina da mancha, e os sufixos indicam evaporação (E), dispersão (D) e espalhamento (S) (De Dominicis et al., 2013a). Fonte: De Domics 2013a.....	36
<b>Figura 6.</b> Solução do modelo MEDSLIK II. ....	39
<b>Figura 7-</b> Área de estudo. A região marítima em cinza representa a Bacia de Campos, a região delimitada por linhas vermelha representa os campos de produção e o triângulo vermelho representa a P-53. ....	42
<b>Figura 8-</b> Imagem SAR do satélite COSMO-SkyMed que captou a mancha de óleo. .	43
<b>Figura 9-</b> Esquema metodologia .....	47

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1-</b> Configuração dos testes de sensibilidade realizados no MEDSLIK II. ....	48
<b>Tabela 2-</b> Valores utilizados nos testes de sensibilidade de grau API.....	49
<b>Tabela 3-</b> Valores utilizados nos testes de taxa de vazamento.....	49
<b>Tabela 5-</b> Valores utilizados nos testes de valores de correção do vento (Fator de Deriva e Ângulo de Deriva). ....	51
<b>Tabela 6-</b> Configurações dos cenários com base no evento da P-53, os valores que diferem entre os cenários são: valores de correção do vento e forçantes hidrodinâmicas.....	53

# Lista de Acrônimos e Abreviações

## A

**ANP** – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

**API** – *American Petroleum Institute* - Instituto Americano de Petróleo

## C

**CENSIPAM** – Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia

## F

**FPU** – *Floating Production Unit* – Unidade de produção flutuante  
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

## G

**GEBCO** – *General Bathymetric Chart of the Oceans* - Carta Batimétrica Geral dos Oceanos

## I

**IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

## S

**SAR** – *Synthetic Aperture Radar* - Radar de Abertura Sintética

## R

**ROMS** – *Regional Ocean Modeling System* - Sistema de Modelagem Oceânica Regional

# Resumo

Derramamentos de óleo no mar representam uma grave ameaça ao meio ambiente, afetando negativamente a vida marinha, os ecossistemas costeiros e causando grandes prejuízos econômicos e sociais. Dada a complexidade envolvida na previsão e mitigação desses eventos, é essencial o uso de tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto e a modelagem numérica. Essas ferramentas desempenham um papel fundamental no monitoramento e na previsão da dispersão do óleo, fornecendo dados cruciais para respostas rápidas e eficazes, além de ajudar a reduzir os impactos ambientais. Este estudo apresenta uma metodologia para detectar e prever derramamentos de óleo ao longo da costa brasileira, utilizando essas tecnologias, bem como realizando testes de sensibilidade aplicados ao modelo MEDSLIK II. Os resultados demonstram que o MEDSLIK II, quando alimentado com diferentes dados hidrodinâmicos, apresenta variações significativas nas previsões da trajetória e dispersão das manchas de óleo, com os dados do produto GLORYS124v1 mostrando um desempenho superior no caso estudado. A sensibilidade do modelo a variáveis como vento e correntes reforça a importância de uma parametrização precisa para obter previsões mais acuradas. A integração entre sensoriamento remoto e modelagem numérica provou ser uma abordagem eficaz para a detecção e previsão de derramamentos de óleo, contribuindo para uma gestão mais eficiente e para uma resposta mais ágil a emergências ambientais na região.

Palavras-Chave: Derramamento de óleo; Modelagem numérica; Sensoriamento remoto.

# Abstract

Oil spills at sea pose a serious threat to the environment, causing damage to marine life, coastal ecosystems, and significant economic and social impacts. Given the complexity involved in predicting and mitigating these events, the use of advanced technologies such as remote sensing and numerical modeling is essential. These tools play a crucial role in monitoring and predicting the dispersion of oil, providing critical data for swift and effective responses while minimizing environmental damage. This study presents a methodology for detecting and predicting oil spills along the Brazilian coastline, utilizing these technologies, as well as conducting sensitivity tests applied to the MEDSLIK II model. The results show that MEDSLIK II, when forced with different hydrodynamic data, exhibits significant variations in predicting the trajectory and dispersion of oil slicks, with the GLORYS124v1 product demonstrating superior performance in the case study. The model's sensitivity to variables such as wind and currents underscores the importance of accurate parametrization for more precise predictions. The integration of remote sensing and numerical modeling has proven to be an effective approach for detecting and predicting oil spills, contributing to more efficient management and a quicker response to environmental emergencies in the region.

Keywords: Oil spill; Numerical modeling; Remote sensing

## Prefácio

Os derramamentos de óleo no mar representam uma ameaça grave ao meio ambiente, afetando a vida marinha, os ecossistemas costeiros e causando impactos econômicos e sociais. Dada a complexidade desses eventos, é essencial o uso de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto e modelagem numérica, para monitorar a dispersão do óleo e possibilitar respostas rápidas e eficazes. Motivado por essa necessidade, o presente trabalho propõe uma metodologia inovadora para a detecção e previsão de derramamentos de óleo ao longo da costa brasileira, com o uso dessas tecnologias. Através de testes de sensibilidade aplicados ao modelo MEDSLIK II, os resultados revelam a importância de uma parametrização precisa e o impacto significativo das variáveis ambientais nas previsões da trajetória e dispersão das manchas de óleo. A integração entre sensoriamento remoto e modelagem numérica não só aprimora a precisão das previsões, mas também fortalece a capacidade de gestão e resposta a emergências ambientais, especialmente em uma região tão vulnerável quanto a costa brasileira.

# **Capítulo I: Introdução**

## **Petróleo e vazamentos de óleo no mar**

O petróleo tem sido, ao longo de mais de um século, um dos pilares fundamentais da economia global [Lalude 2015]. Sua importância vai além de ser uma fonte primária de energia; ele é essencial para a produção de uma ampla gama de produtos, desde plásticos e fertilizantes até medicamentos e materiais de construção [Hajabbasl 2016].

Apesar dos avanços nas energias renováveis e da crescente conscientização sobre as mudanças climáticas, a demanda global pelo petróleo

continua alta. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a demanda mundial por petróleo atingiu aproximadamente 99,7 milhões de barris por dia em 2019. Embora tenha acontecido uma queda em 2020, as projeções indicam uma recuperação e possível aumento nos anos subsequentes.

A crescente exploração e produção de petróleo nas últimas décadas tem sido impulsionada por avanços tecnológicos como a perfuração horizontal e o fraturamento hidráulico. Essas inovações permitiram o acesso a reservas não convencionais, como o petróleo em formações de xisto e em reservatórios de areia compressiva, que anteriormente não eram exploráveis de maneira econômica ou viável [Plata 2019, Muther 2022].

No contexto brasileiro, a descoberta e a exploração do pré-sal têm desempenhado um papel crucial no aumento da produção nacional [Ngene 2016]. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em 2019, a produção média de petróleo no Brasil foi de cerca de 2,8 milhões de Barris por dia, representando um crescimento significativo em relação aos anos anteriores.

Entretanto, a expansão da exploração petrolífera *offshore* tem intensificado as preocupações ambientais. Com o aumento do número de plataformas e do tráfego de navios, o registro de vazamentos de óleo tem se tornado cada vez mais frequente [Yu et al. 2017].

Acidentes com óleo, tanto em plataformas quanto em navios petroleiros, ocorrem principalmente por falhas mecânicas, estruturais, erro humano ou eventos naturais [Brekke & Solberg 2005]. Nas plataformas, problemas como

vazamentos causados por falhas em equipamentos, explosões, falhas de cimentação nos poços ou erros de operação são frequentes [Fingas 2011]. Já nos navios petroleiros, os acidentes mais comuns envolvem colisões ou encalhes, que danificam o casco, resultando em vazamentos [White 2016]. Esses acidentes têm graves impactos ambientais, com o óleo se espalhando no mar, prejudicando ecossistemas marinhos e atividades econômicas. Ao longo da história, vários desses incidentes se destacaram pela magnitude e consequências catastróficas, tanto no mundo quanto no Brasil.

O *Deepwater Horizon*, em 2010, é amplamente considerado o maior derramamento de petróleo marítimo da história. O acidente ocorreu quando a plataforma de perfuração, operada pela BP, explodiu no Golfo do México, liberando cerca de 4,9 milhões de barris de petróleo. Este evento afetou gravemente centenas de quilômetros de costa e ecossistemas marinhos, tendo um impacto ambiental imensurável [White 2012].

Outro incidente histórico foi o desastre do Exxon Valdez, em 1989, no Alasca. Este petroleiro encalhou e derramou cerca de 260 mil barris de petróleo, contaminando mais de 1.300 quilômetros de costa. A fauna local, especialmente aves e mamíferos marinhos, sofreu com o impacto devastador. Este acidente continua sendo uma referência em estudos sobre os efeitos a longo prazo de derramamentos de óleo no meio ambiente [Piatt 1996].

Antes do *Deepwater Horizon*, o maior derramamento foi o do Ixtoc I, em 1979, quando um poço de petróleo da Pemex sofreu um colapso durante uma operação no Golfo do México, liberando cerca de 3,3 milhões de barris de óleo. O petróleo se espalhou até a costa do Texas, causando grande destruição

ambiental [Jernelov 1981].

O Brasil também já enfrentou graves derramamentos de óleo. Em 2000, ocorreu um dos maiores incidentes do país, quando um oleoduto da Petrobras se rompeu na Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, despejando aproximadamente 1,3 milhão de litros de óleo. Esse vazamento teve um grande impacto no ecossistema da baía, prejudicando a fauna, a flora e atividades de pesca artesanal, além de comprometer a saúde da baía por anos [Gabardo 2003].

Outro caso relevante aconteceu em 2019, quando manchas de óleo apareceram ao longo de mais de 3.000 quilômetros da costa brasileira, afetando praias e áreas de preservação ambiental. Foi um dos maiores em extensão na história do Brasil, gerando grandes preocupações ambientais e socioeconômicas [Gonçalves 2020].

Em 2011, o campo de Frade, operado pela Chevron na Bacia de Campos, no Rio de Janeiro, também foi palco de um derramamento significativo. Cerca de 3.700 barris de petróleo vazaram para o oceano, gerando discussões sobre a segurança das operações de perfuração no Brasil e levando a uma maior fiscalização das atividades de extração de petróleo no país [Zacharias 2020].

Os derramamentos de óleo têm consequências ambientais graves. Um dos primeiros impactos observados é a mortalidade da fauna marinha [Fingas 2010]. O óleo pode cobrir animais como aves, mamíferos e peixes, prejudicando sua capacidade de respirar e regular a temperatura [Piatt 1996]. Aves marinhas, por exemplo, perdem a impermeabilidade das penas, levando à hipotermia,

enquanto mamíferos como golfinhos podem ingerir o óleo, resultando em envenenamento e danos internos [Wiens 2004, Conan 1982].

Além disso, o óleo contamina habitats como praias, manguezais e fundos marinhos, causando desequilíbrios ecológicos duradouros [Michel & Rutherford 2014]. Recifes de coral, altamente sensíveis, podem ser cobertos pelo óleo, comprometendo processos vitais como a fotossíntese e a biodiversidade associada [Loya & Rinkevich 1980]. A bioacumulação de substâncias tóxicas também é um efeito de longo prazo, afetando organismos ao longo da cadeia alimentar, incluindo seres humanos que consomem frutos do mar contaminados [Neff 2002].

Além dos efeitos ecológicos, derramamentos de óleo prejudicam economicamente atividades como a pesca e o turismo [Cohen 1993]. A recuperação dos ecossistemas é lenta e, em muitos casos, os danos podem durar décadas, exigindo esforços contínuos de mitigação e prevenção [Peterson 2003].

Esses eventos mostram a importância de fortalecer as regulamentações de segurança e aprimorar a resposta a emergências para minimizar os danos ambientais [Council 2003]. A indústria de petróleo deve investir em tecnologias que previnam acidentes, ao mesmo tempo em que as estratégias de identificação, previsão, mitigação e limpeza de derramamentos devem ser continuamente aprimoradas para proteger os ecossistemas marinhos [Ivshina 2015].

Nesse contexto, o próximo tópico abordará as ferramentas de

sensoriamento remoto e modelagem numérica, na qual desempenham um papel crucial, pois permitem o monitoramento em tempo real dos derramamentos, a previsão da dispersão do óleo e a avaliação dos impactos nos ecossistemas [Singha & Bellerby 2013, Keremea 2021]. A integração dessas tecnologias pode melhorar significativamente a eficiência das respostas a emergências, facilitando a tomada de decisões informadas e a implementação de ações corretivas de maneira mais rápida e eficaz [Keremea 2021].

## **Tecnologias Digitais - Sensoriamento Remoto**

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta fundamental na detecção e monitoramento de derramamentos de óleo no ambiente marinho, oferecendo informações valiosas em tempo real ou quase real para a resposta a emergências [Genovez 2009]. Entre os principais sensores utilizados para esse fim, destacam-se os sensores óticos, sensores de infravermelho térmico e, principalmente, os radares de abertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*), que desempenham um papel crucial devido às suas capacidades exclusivas [Fingas 2014, De Moura 2020].

Sensores óticos e de infravermelho térmico são amplamente utilizados no monitoramento de derramamentos de óleo devido à sua capacidade de detectar contrastes entre o óleo e a água [De Moura 2020]. Os sensores óticos capturam imagens na faixa visível do espectro eletromagnético, o que permite a identificação de manchas de óleo em condições de luz adequadas [Brekke

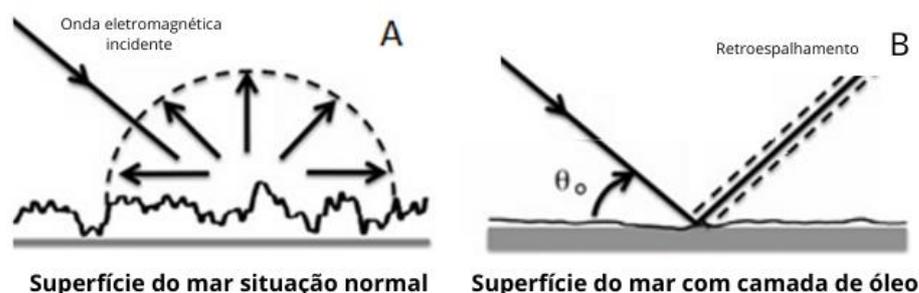
2005]. Por outro lado, sensores de infravermelho térmico são eficazes na detecção de diferenças de temperatura entre o óleo e a água, facilitando a identificação da extensão das manchas de óleo, especialmente à noite ou em águas frias [Fingas 2014].

No entanto, ambos os tipos de sensores têm limitações significativas. Sua eficácia pode ser prejudicada por condições atmosféricas adversas, como nuvens densas, neblina ou chuva, que bloqueiam a visibilidade, além de não serem funcionais durante a noite (no caso de sensores ópticos) [Garcia-Pineda 2013]. Isso limita sua aplicabilidade em emergências que demandam monitoramento contínuo em condições desafiadoras.

Entre as tecnologias de sensoriamento remoto, os dados de radar de abertura sintética (SAR) se destacam como uma das ferramentas mais eficazes na detecção de derramamentos de óleo no mar [Brekke & Solberg 2005]. O radar SAR utiliza ondas de micro-ondas ativas que penetram nuvens, neblina e funcionam tanto durante o dia quanto à noite, tornando-o uma solução robusta e confiável para o monitoramento contínuo em diversas condições climáticas [Espedal & Johannessen 2000]. Atualmente dentre os principais satélites SAR se encontram: Sentinel-1 – Operado pela Agência Espacial Europeia (ESA), RADARSAT-2 – Desenvolvido pela Agência Espacial Canadense e operado pela MDA Corporation, TerraSAR-X – Operado pela *Airbus Defence and Space*, e o Cosmo-SkyMed – Um sistema de satélites da Agência Espacial Italiana (ASI).

Nos dados SAR, as superfícies com óleo aparecem como manchas escuras devido à atenuação das ondas capilares, a qual reduz o coeficiente de retroespalhamento do radar [Fingas & Brown 2014]. Na **Figura 1a** é possível

observar uma situação normal do oceano, onde o vento sopra sobre a superfície do mar e forma as ondas capilares. Já na **Figura 1b** podemos observar que óleo derramado na água cria uma película que suaviza a superfície, diminuindo a dispersão das ondas de radar [Fiscella *et al.* 2000]. Como resultado, as áreas cobertas por óleo aparecem mais escuras nas imagens SAR em comparação com as regiões de água limpa ao redor, facilitando a detecção e monitoramento, mesmo sob condições adversas de luz ou clima [Singha *et al.* 2013, Zhang *et al.* 2014].



**Figura 1. a)** Retroespalhamento do radar em situação normal. **b)** Retroespalhamento do radar na presença de óleo (Fonte: Adaptada de Zhang *et al.* 2014).

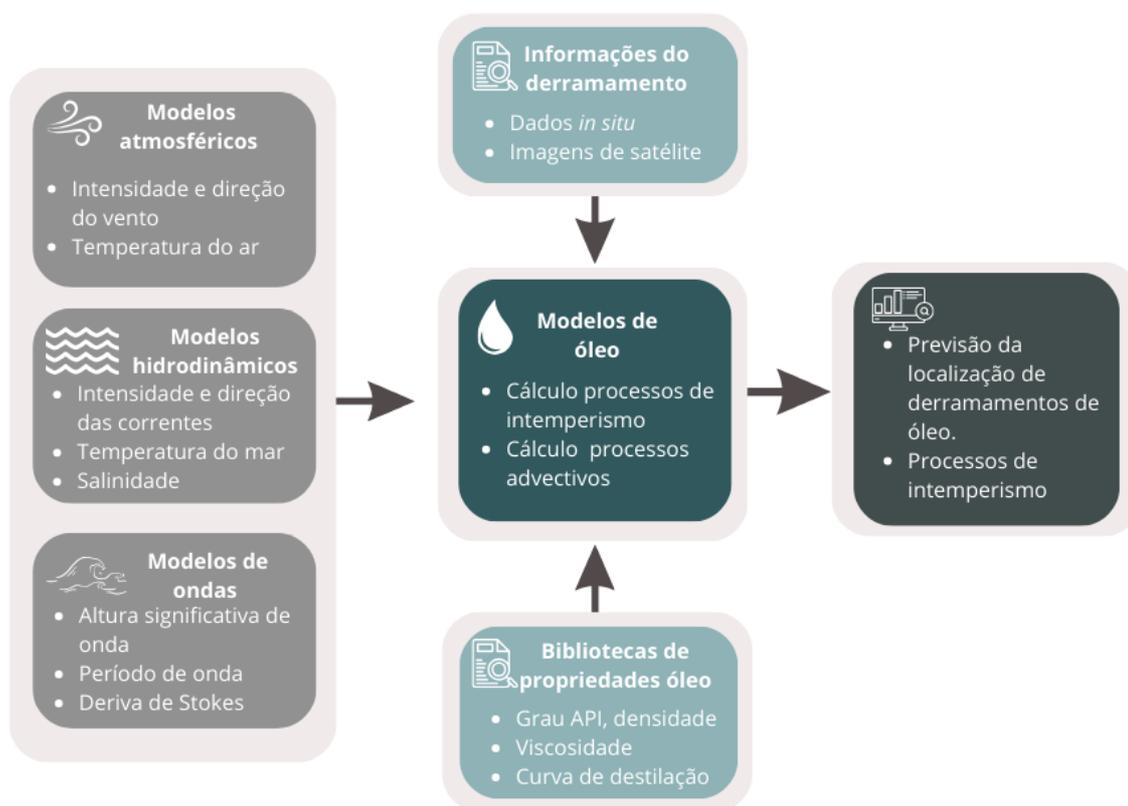
Apesar de sua eficácia na detecção de manchas de óleo, a tecnologia SAR tem algumas limitações, incluindo a possibilidade de gerar falsos positivos [Toupouzelis 2007]. Isso ocorre porque o radar SAR detecta variações na rugosidade da superfície da água, que podem ser causadas não apenas por óleo, mas também por outros fenômenos naturais [Carvalho 2017]. Áreas de calmaria, filmes biológicos ou concentrações de algas também podem suavizar a superfície da água de maneira semelhante ao óleo, reduzindo o retorno das ondas de radar e fazendo com que essas regiões apareçam escuras nas imagens SAR [Alpers *et al.*, 2017]. Como resultado, essas áreas podem ser

erroneamente interpretadas como derramamentos de óleo, exigindo análise adicional ou uso de sensores complementares para confirmar a presença real de óleo.

## **Tecnologias Digitais - Modelagem Numérica**

A modelagem numérica aplicada a derramamentos de óleo é uma ferramenta essencial para prever o comportamento e a dispersão do óleo no ambiente marinho, auxiliando em ações de resposta rápida e mitigação de impactos ambientais [Webler & Lord 2010].

A **Figura 2** apresenta um esquema do funcionamento geral dos modelos de dispersão de óleo. Esses modelos simulam a trajetória do óleo derramado e os processos de intemperismo ao longo do tempo, utilizando como dados de entrada informações de modelos atmosféricos, hidrodinâmicos e de ondas. Além disso, esses modelos contêm bibliotecas com informações específicas sobre o óleo, necessárias para calcular os processos de intemperismo. Informações adicionais, como dados sobre o derramamento e imagens de satélite, também podem ser integradas para melhorar a precisão dos resultados. Por fim, esses modelos fornecem previsões sobre o destino das manchas de óleo e dados sobre os processos de intemperismo ocorridos ao longo da simulação [Zafirakou 2018].



**Figura 2-** Esquema do funcionamento de modelos de dispersão e intemperismo de óleo (Fonte: Adaptada de Keremea et al. 2021).

Embora existam alguns modelos eulerianos para estudar manchas de óleo, os modelos lagrangianos são os mais adequados e utilizados [Zodiatis 2017]. Os modelos lagrangianos discretizam as manchas de óleo como um grande número de partículas advectadas pelo resultado da fusão de ventos, ondas e correntes e também transportadas por dispersão. A abordagem lagrangiana é mais eficaz, pois permite rastrear diretamente as trajetórias das partículas de óleo ao longo do tempo, proporcionando uma representação mais precisa do transporte e dispersão do óleo. Ela captura melhor os efeitos locais, como a interação com a superfície do mar (incluindo a deriva de Stokes), além de poder modelar com mais precisão a fragmentação e agregação das partículas de óleo, processos que são mais difíceis de simular de forma adequada com a

abordagem euleriana [Zodiatis 2017].

A precisão na determinação da posição da partícula estará diretamente ligada à exatidão da sua posição inicial, à eficácia dos modelos meteoceanográficos acoplados em fornecer previsões confiáveis e à forma como os processos relacionados à mancha são representados [Nagheeby & Kolahdoozan 2010].

Alguns dos modelos de óleo utilizados atualmente são o OILMAP [Howlett *et al.* 1993], o OSCAR [Reed *et al.* 1995], o MOHID [Carracedo 2006], o OILTRANS [Berry 2012], o MEDSLIK II [De Dominics 2013a, De Dominics 2013b], GNOME [Beegle-Krause 2001], OpenOil, SIMAP [Maccay 2016], e o Easy Coupling Oil System (ECOS) [Stringari 2013, Vasconcelos 2019]. Além disso os modelos hidrodinâmicos TELEMAC-2D e TELEMAC-3D possuem modelos internos de dispersão e intemperismo do óleo [Abousadi *et al.* 2020, Marques 2020].

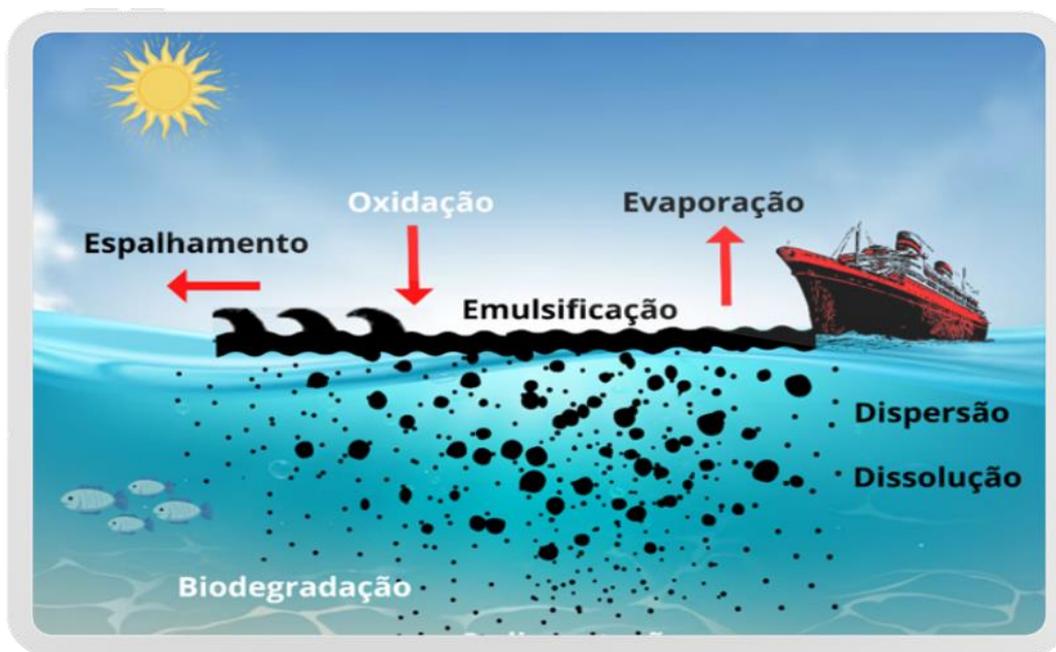
O objetivo geral é fornecer previsões precisas sobre a extensão, o deslocamento e a concentração do óleo, ajudando a otimizar operações de limpeza e proteção de áreas sensíveis [Zodiatis 2017].

A escolha adequada dos modelos de correntes, vento e ondas é crucial para forçar os modelos de óleo, pois as condições do oceano representam componentes fundamentais que influenciam a propagação do petróleo no ambiente marinho [Nagheeby & Kolahdoozan 2010]. Assim, é essencial combinar modelos meteorológicos, hidrodinâmicos e de ondas com modelos de derramamento de petróleo. Essa integração permite prever com maior precisão

o destino e a degradação do petróleo derramado [Zafirakou 2018].

## Processos envolvidos

O óleo ao ser liberado no ambiente, sofre uma série de processos que determinam sua trajetória e permanência (**Figura 3**). Os modelos de dispersão de óleo baseiam-se em um conjunto de equações matemáticas que simulam os processos físicos, químicos e biológicos associados a um derramamento [Szewczyk 2016]. O principal desafio na modelagem consiste em representar de forma precisa todos esses processos de transformação [Mishra 2015].



**Figura 3-** Ilustração dos processos de intemperismo (Fonte: Autora).

O comportamento de um derramamento de óleo no mar depende de um conjunto de processos associados ao seu intemperismo. Os processos de intemperismo, ocorrem a uma taxa variável, a depender das características do óleo e das forçantes ambientais, tais como: ventos, correntes, ondas,

temperatura da água do mar e radiação solar incidente [Mishra 2015, Keremea 2023].

Imediatamente após a introdução do petróleo no oceano, a advecção e espalhamento fazem com que haja um rápido aumento na área exposta do óleo, que posteriormente passará por processos de intemperismo incluindo a evaporação, dissolução, dispersão, emulsificação e sedimentação. Deve-se deixar claro que as escalas de tempos em que os fenômenos acontecem dependem do volume derramado.

A seguir será apresentado com mais detalhes os processos envolvidos em um derramamento de óleo e sua relação com a modelagem numérica.

## **Advecção**

A advecção é um processo físico responsável pelo transporte de manchas de óleo, impulsionado por correntes marítimas, ondas e vento. Esse mecanismo é o principal determinante do movimento do óleo ao longo do tempo, resultando da soma dos vetores de transporte gerados pela ação das correntes e dos ventos sobre a mancha.

Nos modelos de simulação de derramamento de óleo, utilizam-se constantes ou parâmetros variáveis para correlacionar a velocidade da corrente e do vento à velocidade superficial do óleo, conhecidos como fator de deriva. Na maioria dos modelos de transporte de óleo, o fator de deriva associado às correntes superficiais é considerado com valor igual a 1

Já em relação ao fator de deriva do vento, na bibliografia os valores utilizados variam entre 2 e 5.2% [Chen *et al.* 2007]. No entanto, a maioria dos

trabalhos consideram que 3% da velocidade do vento é transmitida a velocidade da mancha de óleo [Wang 2008, Guo & Wang 2009].

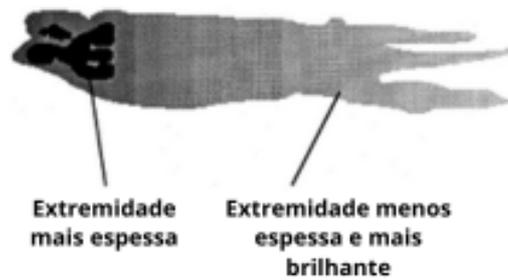
No estudo realizado por Reed *et al.* [1994], foi observado que o uso de um fator de deriva de 3% para ventos abaixo de 6 m/s proporciona bons resultados nas simulações de derramamentos de óleo. No entanto, com o aumento da velocidade do vento, o óleo tende a se dispersar mais na coluna de água, o que pode reduzir sua influência no transporte da mancha.

Outro aspecto a ser considerado na deriva do óleo induzida pelo vento é a deflexão do ângulo entre a direção do vento e o movimento que ele causa no óleo. Esse ângulo de deflexão pode variar entre 0° e 25° para a direita ou esquerda da direção do vento, dependendo do hemisfério (norte ou sul, respectivamente), com uma média de 15° [Asce, 1996].

## **Espalhamento**

O espalhamento refere-se ao movimento horizontal da mancha de óleo sobre si mesma, impulsionado por forças inerciais, gravitacionais e viscosas, o que aumenta sua área de cobertura [Lehr 2001].

Logo após o derramamento, o óleo começa a se espalhar, mas não de forma uniforme. Na maioria dos casos, a mancha rapidamente adquire um formato semelhante ao de um cometa, onde uma pequena área mais escura é seguida por uma grande porção brilhante (**Figura 4**). A região mais escura contém a maior parte do volume de óleo derramado, enquanto a camada fina e brilhante não representa mais de 10% do volume total [Fay 1969].



**Figura 4-** Processo de espalhamento da mancha (Fonte: Adaptada de Fay 1969).

O estudo realizado por Fay [1969] estabeleceu a base para o entendimento do processo de espalhamento do óleo na água. Fay dividiu o processo em três fases distintas, dependendo das forças que impulsionam e retardam o movimento. Inicialmente, as forças inerciais e gravitacionais predominam, pois a mancha ainda apresenta grande espessura. Com a redução dessa espessura, as forças viscosas passam a ter maior relevância em comparação às inerciais, estabelecendo um equilíbrio entre forças viscosas e gravitacionais. Após algum tempo, a mancha se espalha de forma muito dispersa sobre a superfície da água, tornando-se pouco coesa e difícil de representar.

Na modelagem, é comum considerar apenas a fase gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento, uma vez que a primeira fase dura um curto período e, na fase final, a espessura da mancha é tão fina que o vento frequentemente a fragmenta em pequenas manchas.

## **Evaporação**

Dentre os processos de intemperismo ocorrentes em derrames de óleo, a evaporação é o mais importante em termos de balanço de massa. Dentro de alguns dias, por exemplo, óleos leves e óleos médios podem perder até 75% e

40% do seu volume inicial, respectivamente. Já para óleos mais pesados, essa perda não ultrapassa 10% do seu volume [Asce, 1996].

Há dificuldade em modelar a evaporação devido a composição do óleo, que consiste de mistura de centenas de compostos, na qual a composição varia de acordo com a fonte do petróleo e com o tempo em que o óleo está exposto [Machay & Matsugu 1973]. Dessa forma muitos dos trabalhos descritos na literatura focam sobre a calibração das equações desenvolvidas para evaporação da água [Wang & Fingas 1995].

## **Dissolução**

A dissolução é o processo pelo qual hidrocarbonetos solúveis se quebram em partículas minúsculas, misturando-se na água e formando uma solução líquida homogênea [Reed 1999]. Esse processo nem sempre é incluído em modelos numéricos, pois seu impacto no balanço geral de massa do óleo é pequeno. Normalmente, menos de 1% do óleo que permanece na superfície chega a se dissolver [Council 2003].

No entanto, a dissolução pode ter grande relevância sob o ponto de vista toxicológico, pois os compostos mais solúveis também tendem a ser os mais tóxicos. Mesmo em baixas concentrações, esses componentes podem causar sérios efeitos nos sistemas biológicos [French Mccay 2002].

## **Dispersão vertical**

A dispersão vertical, ou simplesmente dispersão, é o processo físico no

qual gotículas de óleo são transportadas da superfície do mar para dentro da coluna d'água. Essas gotículas variam em tamanho e são influenciadas pela turbulência natural da água [Reed 1999].

Os primeiros modelos de dispersão consideravam uma taxa constante de dispersão, aplicando uma porcentagem fixa da mancha de óleo ao longo do dia, com base nas condições do mar. Essas taxas, no entanto, eram geralmente superestimadas [Asce, 1996].

Hoje, a maioria dos modelos modernos utiliza as equações desenvolvidas por Delvigne e Sweeney [1988], que trazem maior precisão ao representar o processo de dispersão.

## **Sedimentação**

A sedimentação ocorre quando o óleo adere a partículas sólidas na coluna d'água, resultando no aumento de sua densidade e, eventualmente, fazendo com que essas partículas desçam até o fundo do mar [Lehr 2001].

A relevância desse processo para a remoção do óleo varia conforme a quantidade de sedimentos presentes no corpo d'água. Este é um fenômeno complexo, cuja contabilização é desafiadora, influenciado por fatores como o tipo e tamanho do material suspenso, a salinidade da água e o teor de enxofre no óleo [Lehr 2001].

## **Oxidação**

A oxidação é um processo químico no qual as moléculas de hidrocarbonetos reagem com o oxigênio, ocorrendo fragmentação ou combinação dessas moléculas, frequentemente catalisado pela exposição à luz solar. Esse processo contribui para a degradação do óleo, gerando compostos solúveis e interagindo com outros mecanismos, como a dissolução, dispersão e emulsificação [Wang & Stout 2010].

Vários fatores podem influenciar a oxidação, acelerando ou retardando sua taxa. Os sais minerais dissolvidos na água, por exemplo, aceleram a oxidação, enquanto metais traço atuam como catalisadores. Por outro lado, compostos de enxofre na mistura reduzem essa taxa, e a radiação ultravioleta também facilita a oxidação. No entanto, a velocidade desse processo é bastante lenta em comparação com outros mecanismos, resultando em menor influência no comportamento geral da mancha de óleo [Wang & Stout 2010].

## **Emulsificação**

A emulsificação é um processo físico-químico que ocorre quando o óleo em contato com a água do mar forma uma mistura estável, em que pequenas gotículas de água ficam suspensas dentro da massa de óleo, criando uma emulsão conhecida como "mousse". Esse processo é influenciado por fatores ambientais, como a temperatura, a turbulência da água, a composição do óleo e o tempo de exposição.

O processo de emulsificação do óleo em contato com a água do mar

acontece em três fases distintas. Na fase inicial, pequenas quantidades de água começam a se misturar ao óleo, formando uma emulsão instável e de baixa viscosidade. Apesar de ainda conter pouca água, o óleo passa a modificar suas características físicas e a formar essa primeira emulsão [Fingas & Fieldhouse 2004].

Com o aumento do conteúdo de água, o processo entra na segunda fase, conhecida como estabilização parcial. Nesta fase, a emulsão se torna mais estável, e a viscosidade do óleo aumenta. Isso ocorre porque as gotículas de água passam a se dispersar de maneira mais uniforme na massa de óleo, tornando a emulsão mais resistente à separação e à dispersão.

Na última fase, chamada de emulsão estável, a incorporação de água atinge um ponto de saturação, levando à formação de uma emulsão altamente estável. Esta emulsão é capaz de se manter inalterada por longos períodos, tornando-se resistente aos processos naturais de degradação e remoção. A emulsão estável é, portanto, um desafio significativo para a mitigação dos impactos do derramamento, pois ela dificulta o tratamento e a dispersão natural do óleo no ambiente [Delvigne 1988].

## **MEDSLIK II**

Neste estudo, o modelo escolhido para simular a dispersão de óleo é o MEDSLIK-II, um modelo lagrangiano desenvolvido por De Dominicis *et al.* (2013). O MEDSLIK-II simula o transporte e os processos de transformação do óleo após um derramamento, integrando-se a modelos eulerianos de circulação.

Essa integração permite que ele se adapte a diferentes condições ambientais, como vento, temperatura da superfície do mar, correntes e características específicas do óleo derramado, incluindo localização, quantidade e tipo. O modelo calcula a movimentação e dispersão do óleo através de advecção e difusão, convertendo a mancha de óleo em um conjunto de partículas que se movem sob a influência de correntes, vento, ondas e difusão turbulenta. Além disso, incorpora processos de intemperismo, como evaporação, emulsificação e dispersão.

Em seguida, serão abordadas as equações diferenciais parciais e os esquemas de diferenças finitas usados para prever as mudanças e o transporte da mancha de óleo no mar. A equação geral que descreve a concentração de óleo considera a taxa de variação local e os efeitos de advecção e difusão sobre as partículas, além das transformações físicas e químicas. A mancha de óleo é tratada como um sistema contínuo de partículas, com sua concentração dividida em duas partes: uma que representa o óleo afetado pelo intemperismo e outra que considera os efeitos de advecção e difusão. Para modelar essas transformações, o óleo é discretizado em partículas cuja concentração é calculada com base na soma das partículas e suas propriedades ao longo do tempo.

O modelo emprega um esquema de avanço de Euler para resolver numericamente as equações de transporte e intemperismo. A movimentação de cada partícula é determinada por interpolação, considerando os campos de velocidade e condições do modelo euleriano oceanográfico ou meteorológico. No caso de um derramamento contínuo, o óleo é lançado em sub-derrames para

simular a progressão de um evento de vazamento; já para um derramamento instantâneo, todas as partículas são liberadas ao mesmo tempo no local do derramamento.

A equação geral (Equação 1) para a concentração de um traçador,  $C(x,t)$  com unidades de massa sobre volume, misturado no ambiente marinho, é dada por

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (U \nabla C) = \nabla \cdot (K \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (1)$$

Onde  $\frac{\partial}{\partial t}$  representa a taxa local de variação no tempo,  $U$  é uma distribuição tridimensional dos componentes horizontais da corrente oceânica  $u$  e  $v$ ,  $K$  é um tensor de difusividade turbulenta que parametriza os processos em subescala de grade, e  $r_j(x, C(x, t), t)$  representa as  $M$  taxas de transformação que modificam a concentração do traçador por meio de processos de transformação física e química.

Assumindo que a mancha é composta de partículas de óleo que se movem como parcelas de água, e considerando que os processos físicos e químicos agem sobre toda a mancha em vez de nas propriedades de partículas individuais, a equação do traçador ativo pode ser dividida em duas equações componentes:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - (U \nabla C_1) + \nabla \cdot (K \nabla C_1) \quad (3)$$

Onde  $c_1$  é a solução da concentração de óleo devida apenas aos processos de intemperismo, enquanto a taxa final de mudança de  $c$  é determinada pela advecção-difusão agindo sobre  $c_1$ .

A segunda equação descreve a evolução temporal da concentração da mancha de óleo devido aos processos de transformação atuando sobre o volume total da mancha de óleo. Portanto, é necessário definir variáveis de estado da mancha de óleo.

Além disso, para resolver a equação de governança usando o formalismo de partículas Lagrangianas, é necessário discretizar a mancha de óleo em partículas com variáveis de estado associadas, algumas das quais são deduzidas das variáveis de estado da mancha de óleo.

Quatro variáveis de estado estruturais são definidas, **Cs**, **Cd**, **Cc**, **Cb**, descrevendo, respectivamente, a concentração de óleo na superfície, na subsuperfície, adsorvido nas costas e sedimentado no fundo.

No modelo, a concentração  $C_1$  representa a concentração de óleo na superfície  $C_s$  e a concentração de óleo dispersa na coluna d'água  $C_d$ . Portanto, a equação de intemperismo do óleo compreende o seguinte:

$$\frac{dC_S}{dt} = \frac{\rho}{A} \frac{dV_S}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dC_D}{dt} = \frac{\rho}{A} \frac{dV_D}{dt} \quad (5)$$

onde  $A$  é a área unitária,  $V_s$  é o volume de óleo na superfície,  $V_d$  é o

volume de óleo disperso, e  $\rho$  é a densidade da água do mar.

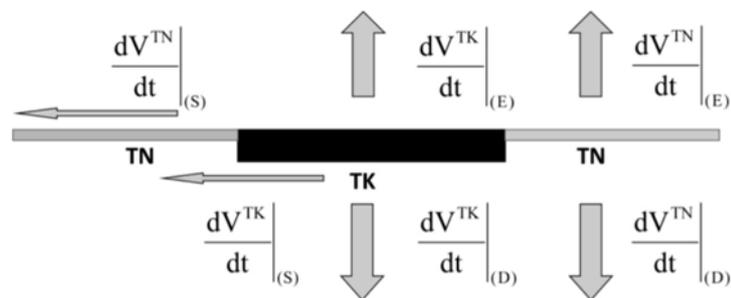
Quanto ao óleo superficial que chega próximo às costas e é adsorvido, a concentração de óleo encalhado é dada por:

$$C_c(x, t) = \frac{\rho}{L_c} V_c, \quad (6)$$

Onde  $L_c$  é um segmento da linha costeira e  $V_c$  é o volume de óleo adsorvido, calculado a partir das variáveis de estado das partículas de óleo.

Na versão atual do modelo, a concentração de óleo no fundo  $C_b$  não é calculada, sendo simplesmente representada por um número de partículas de óleo que chegaram ao fundo.

O intemperismo que afeta o óleo na superfície do mar envolve três processos principais: a evaporação, que ocorre logo no início e afeta principalmente as frações mais voláteis do óleo; a dispersão, que move as frações restantes para abaixo da superfície da água; e o espalhamento, que promove a dispersão mecânica do óleo na superfície devido à ação das forças gravitacionais. (Figura 7).



**Figura 5-** Processos de intemperismo utilizando a abordagem de Mackay. *TK* indica a mancha espessa e *TN* a mancha fina. *VTK* e *VTN* são os volumes de óleo na superfície da parte espessa e fina da mancha, e os sufixos indicam evaporação (E), dispersão (D) e espalhamento (S) (De Dominicis et al., 2013a). Fonte: De Domicis 2013a.

Assim, os processos de intemperismo são considerados separadamente para a mancha espessa e a mancha fina, com as equações prognósticas sendo:

$$\frac{dV^{TK}}{dt} = \frac{dV^{TK}}{dt} \Big|_{(E)} + \frac{dV^{TK}}{dt} \Big|_{(D)} + \frac{dV^{TK}}{dt} \Big|_{(S)} \quad (7)$$

$$\frac{dV^{TN}}{dt} = \frac{dV^{TN}}{dt} \Big|_{(E)} + \frac{dV^{TN}}{dt} \Big|_{(D)} + \frac{dV^{TN}}{dt} \Big|_{(S)} \quad (8),$$

onde os sufixos indicam evaporação (E), dispersão (D) e espalhamento (S).

Todas as variáveis de estado da mancha de óleo são definidas apenas na posição geográfica central da mancha (Centro de Gravidade, daqui em diante GC), que é atualizada após cada passo de tempo. A parametrização dos processos de intemperismo é detalhada em De Dominicis *et al.* [2013a]. Inicialmente, o modelo resolve a equação de intemperismo e, em seguida, usa a solução da concentração de óleo  $C1$  para resolver a equação de advecção-difusão.

Para resolver a última com um formalismo de partículas Lagrangianas, a mancha de óleo é inicialmente discretizada em  $NTOT$  partículas com variáveis de estado associadas, e então a concentração de óleo é calculada ao reunir as partículas com suas propriedades associadas.

O campo de corrente horizontal usado no modelo Lagrangiano é considerado como a soma de diferentes componentes:

$$\begin{cases} \sigma = 0, & d\mathbf{x}_k(t) = [\mathbf{U}_C(x_k, y_k, 0, t) + \mathbf{U}_W(x_k, y_k, 0, t) + \\ & + \mathbf{U}_S(x_k, y_k, 0, t) + \mathbf{U}_D(x_k, y_k, 0, t)]dt + d\mathbf{x}'_k(t), \\ \sigma = 1, & d\mathbf{x}_k(t) = \mathbf{U}_C(x_k, y_k, z_k, t)dt + d\mathbf{x}'_k(t) \end{cases} \quad (9)$$

Onde  $dt$  é o passo de tempo discreto do modelo,  $x=(x,y)$  é um vetor de posição horizontal,  $\sigma$  é o índice de status da partícula que identifica se ela está na superfície do mar ( $\sigma =0$ ) ou dispersa na coluna d'água ( $\sigma =1$ ),  $Uc$  é o campo de velocidade da corrente oceânica,  $Uw$  é o termo de correção de velocidade local devido ao vento (termo de deriva do vento),  $Us$  é o termo de corrente de onda, que representa a velocidade devido às correntes induzidas por ondas ou o arrasto superficial de Stokes,  $Ud$  é a correção de arrasto do vento devido à parte emergente dos objetos na superfície, e  $dx'_k$  é o deslocamento devido à difusão turbulenta Lagrangiana. A partícula só se dispersa por processos de transformação e não por difusão vertical ou advecção.

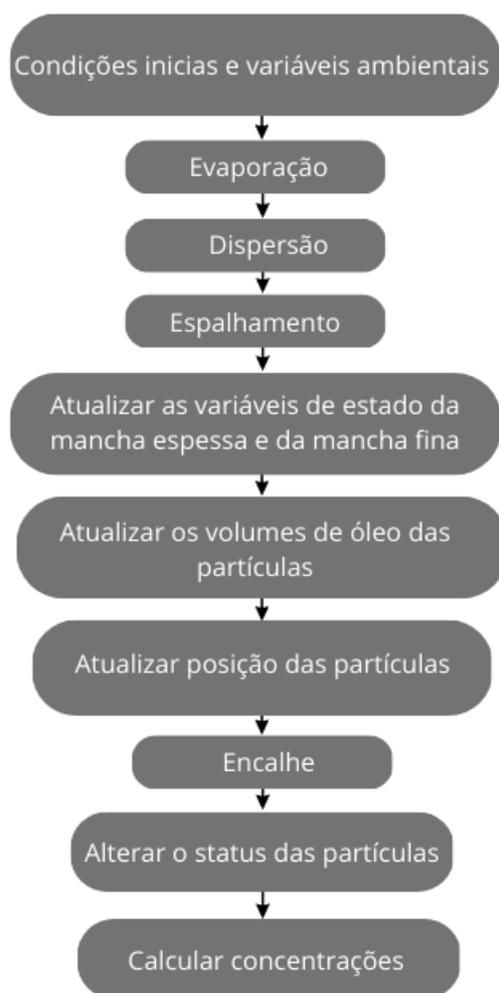
No modelo, a difusão turbulenta é considerada, no momento, apenas para o movimento browniano parametrizado por um esquema de passeio aleatório, como segue:

$$dx'_k(t) = \sqrt{6Kdt}Z, \quad (10)$$

onde  $K$  é o tensor diagonal de difusão turbulenta e  $Z$  é um vetor de números aleatórios independentes distribuídos uniformemente. Normalmente,  $K$  é considerado isotrópico e igual a  $2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Para solucionar de maneira consistente as equações de intemperismo e de advecção-difusão, é indispensável o uso de um algoritmo que integre as variáveis de estado da mancha de óleo e das partículas. A solução da equação de transporte utiliza um esquema de avanço de Euler, onde o campo de velocidade Lagrangiana é interpolado linearmente no tempo e bilinearmente no espaço horizontal, considerando os pontos mais próximos do modelo Euleriano.

A profundidade da partícula é ajustada por interpolação linear entre os níveis do modelo. O esquema da metodologia de solução sequencial adotada pelo modelo é apresentado de forma esquemática na **Figura 6**.



**Figura 6.** Solução do modelo MEDSLIK II.

Inicialmente, considera-se as condições iniciais e variáveis ambientais, como as características do óleo (composição e volume) e os fatores ambientais (vento, correntes e temperatura da água), que influenciam diretamente nos processos subsequentes. O primeiro processo destacado é a evaporação, que ocorre rapidamente e afeta as frações mais leves e voláteis do óleo, reduzindo seu volume na superfície. Em seguida, acontece a dispersão, que se refere ao

transporte de frações remanescentes do óleo para abaixo da superfície da água, formando partículas dispersas. Outro processo importante é o espalhamento, no qual o óleo se desloca lateralmente na superfície da água, impulsionado por forças gravitacionais e condições externas, aumentando a extensão da mancha de óleo.

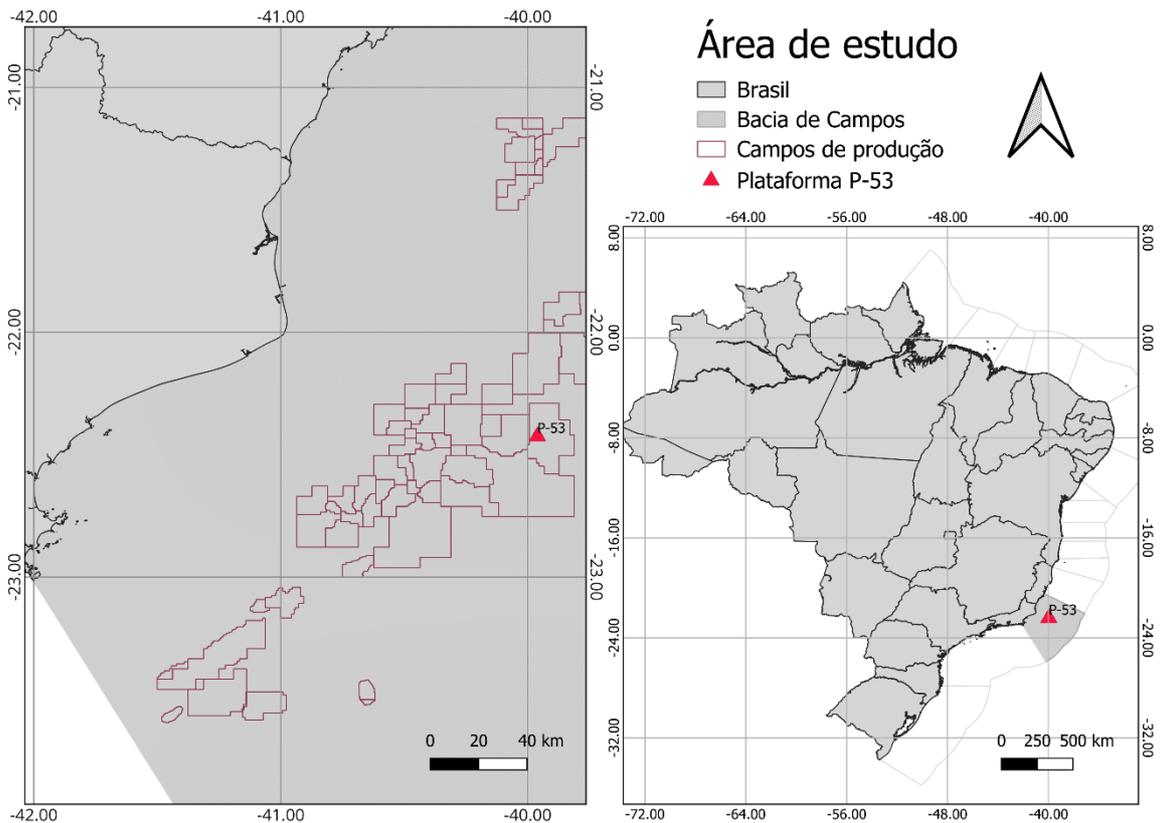
Após esses processos, é necessário atualizar as variáveis de estado da mancha espessa e da mancha fina, considerando as alterações ocorridas nas propriedades e distribuição do óleo. Também se realiza a atualização dos volumes de óleo das partículas, levando em conta o impacto do intemperismo (como evaporação e dispersão) sobre as partículas.

Posteriormente, é feita a atualização da posição das partículas, calculando o deslocamento das partículas de óleo de acordo com as condições ambientais e o transporte pelas correntes. Uma etapa importante é o encalhe, que ocorre quando o óleo atinge áreas costeiras ou superfícies submersas. Em seguida, realiza-se a alteração do status das partículas, classificando-as conforme sua localização e condição, seja na superfície, dispersas ou encalhadas.

Por fim, é realizada a cálculo das concentrações de óleo, tanto na superfície quanto na coluna de água, considerando todas as alterações provocadas pelos processos anteriores e pelas condições ambientais. Esse fluxo permite compreender e modelar o comportamento do óleo após um derramamento, sendo essencial para o monitoramento e a tomada de decisões em situações de emergência ambiental

## Capítulo II: Área de estudo

A área de estudo deste projeto é a Bacia de Campos (**Figura 7**), uma das mais importantes regiões de exploração de petróleo e gás no Brasil, localizada na costa do estado do Rio de Janeiro e estendendo-se até o Espírito Santo. É uma bacia sedimentar *offshore* com profundidades que variam de rasas a ultraprofundas, com campos de petróleo que se encontram a mais de 1.000 metros de profundidade. Sua exploração começou nos anos 1970 e, desde então, tornou-se essencial para a produção nacional de petróleo, responsável por uma parcela significativa do petróleo brasileiro extraído.

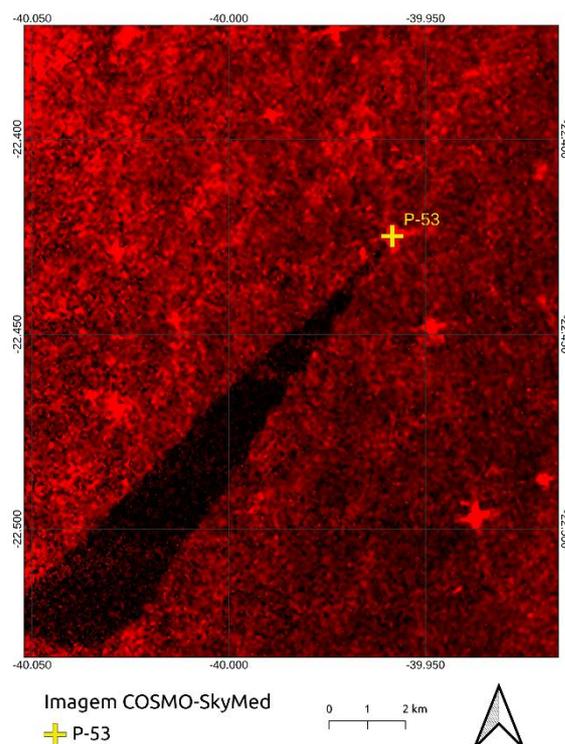


**Figura 7-** Área de estudo. A região marítima em cinza representa a Bacia de Campos, a região delimitada por linhas vermelha representa os campos de produção e o triângulo vermelho representa a P-53.

A Bacia de Campos possui diversos campos petrolíferos, como Marlim, Roncador e Albacora, que são alguns dos maiores em termos de volume de produção. Ao longo das últimas décadas, a tecnologia avançada permitiu explorar reservas mais profundas e em águas mais desafiadoras, o que foi fundamental para ampliar a capacidade de produção da região. A área está repleta de plataformas de exploração e produção, oleodutos submarinos e infraestrutura de suporte para a indústria.

Além da relevância econômica, a Bacia de Campos também apresenta desafios ambientais. Com o alto volume de operações de extração e transporte de petróleo, há um risco potencial de derramamento de óleo, o que requer monitoramento rigoroso e medidas preventivas para proteger o ecossistema marinho.

O estudo de caso será o derramamento de óleo do tipo *Floating and Production Unit* (FPU) ocorrido na Bacia de Campos na plataforma P-53, operada pela Petrobras no campo de Marlim Leste, a uma distância de 120 Km da costa. O vazamento se iniciou no dia 24/03/2019, e segundo investigações o óleo começou a ser despejado no mar na madrugada do dia 25/03/2019. Imagens SAR de acesso restrito do satélite COSMO-SkyMed captaram uma mancha de 11,5 x 1,5 km horas após o ocorrido, como podemos observar na **Figura 8**. Há um relatório de investigação sobre o incidente da FPU P-53, elaborado pela comissão de investigação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP). Esse documento reúne diversas informações essenciais para este trabalho.



**Figura 8-** Imagem SAR do satélite COSMO-SkyMed que captou a mancha de óleo.

# Capítulo III: Objetivos

## Objetivo Geral

Propor uma metodologia para a detecção e previsão do destino de derramamentos de óleo na costa brasileira, utilizando ferramentas do sensoriamento remoto e da modelagem numérica.

## Objetivos específicos

- Avaliar a sensibilidade do modelo MEDSLIK II em relação aos principais parâmetros físicos.
- Definir quais as forçantes físicas melhor representam o estudo de caso através da comparação das saídas do modelo com dados do satélite COSMO-Skymed.

- Consolidação da metodologia proposta para aplicações acadêmicas e científicas.

## Capítulo IV: Metodologia

Este trabalho é estruturado em três etapas principais (**Figura 9**) . A primeira etapa envolve a realização de testes de sensibilidade com o modelo MEDSLIK II, com o objetivo de avaliar como diferentes variáveis e condições influenciam seus resultados. Na segunda etapa, será realizada uma simulação do caso de estudo, aplicando dois modelos de correntes tridimensionais para analisar e comparar os resultados com dados SAR. Como mencionado anteriormente, o caso de estudo selecionado é o vazamento de óleo ocorrido na

plataforma P-53, operada pela Petrobras no campo de Marlim Leste, na Bacia de Campos. Por fim, o trabalho busca consolidar uma metodologia para a detecção e previsão de manchas de óleo ao longo da costa brasileira.

As etapas da metodologia serão apresentadas em tópicos, divididos em: testes de sensibilidade, cenários e comparação com dados SAR e concretização da metodologia.

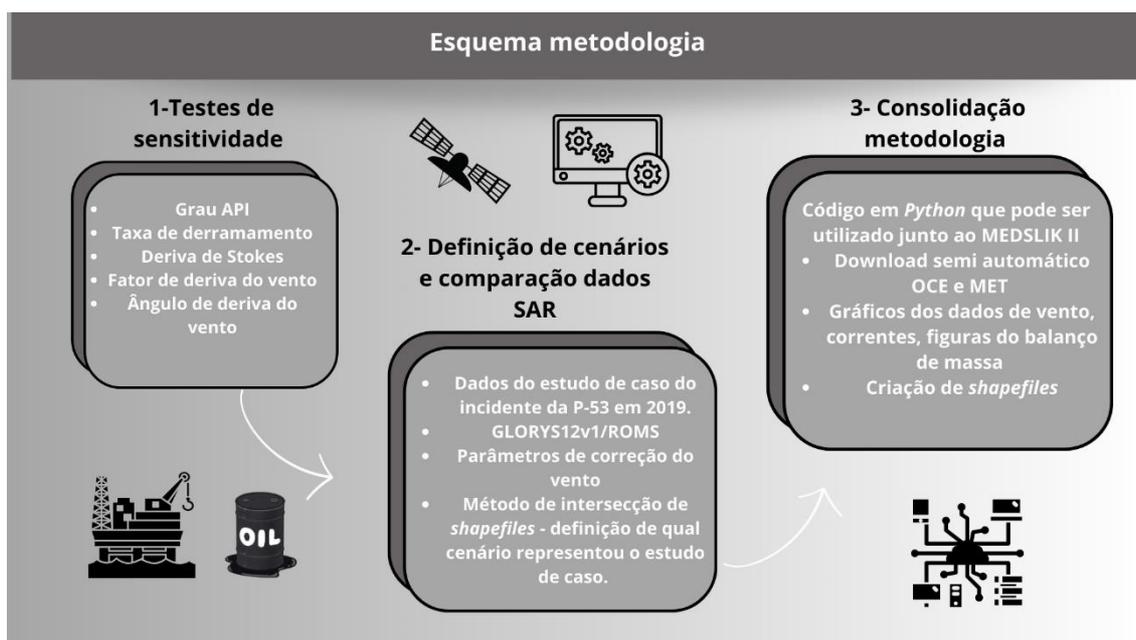


Figura 9- Esquema metodologia

## Testes de sensibilidade

A partir das informações do estudo de caso da plataforma P-53 na Bacia de Campos, foram realizados diversos testes com o modelo MEDSLIK II, focando nas principais variáveis do modelo. A **Tabela 1** mostra a configuração detalhada das simulações executadas.

**Tabela 1-** Configuração dos testes de sensibilidade realizados no MEDSLIK II.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Período	25/03/2019 até 05/04/2019
Data e hora	25/03/2019 00:00
Ponto derrame	22°25'29"S 30° 57'21"W P-53
Tempo de simulação (h)	240
Número de partículas	100.000
Grade	100
<b>Tipo de óleo/API</b>	<b>Leve / Médio / Pesado</b>
<b>Taxa de derramamento (t/h)</b>	<b>1.5 / 2.5 / 20.5</b>
<b>Deriva de Stokes</b>	<b>Com / Sem</b>
<b>Fator de deriva vento</b>	<b>Sem / 1 / 1.5 / 2 / 3</b>
<b>Ângulo de deriva do vento</b>	<b>Sem / -12 / -25</b>
Forçante hidrodinâmica/Resolução espacial	GLORYS12V1 / 8km
Forçante atmosférica	ERA 5

As simulações iniciais foram realizadas utilizando a configuração padrão do modelo, com dados do GLORYS12V1 fornecidos pelo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* para as correntes tridimensionais e produtos ERA5, produzidos pelo *Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo* (ECMWF), como forçantes meteorológicas para o período do vazamento na plataforma P-53. As variáveis ajustadas são detalhadas nas próximas seções.

## **Sensibilidade do grau API, taxa e tempo do vazamento**

O Grau API é uma escala criada pelo *American Petroleum Institute* para medir a densidade relativa dos líquidos derivados do petróleo. Essa medida é usada para classificar os tipos de petróleo com base em sua densidade, influenciando a forma como ele é processado e comercializado. A densidade do óleo é calculada a partir do grau API com a fórmula:  $^{\circ}\text{API} = (141,5 / \rho) - 131,5$ , onde  $\rho$  representa a densidade relativa do petróleo em relação à água a uma temperatura de 60 °F (15,56 °C). Em termos práticos, quanto mais denso o óleo, menor será seu grau API, o que indica um petróleo mais pesado.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamenta essa classificação no Regulamento Técnico de Reservas de Petróleo e Gás Natural, dividindo o petróleo em três categorias: petróleo leve ( $^{\circ}\text{API} \geq 31,1$ ), petróleo médio ( $22,3 \leq ^{\circ}\text{API} < 31,1$ ) e petróleo pesado ( $10 < ^{\circ}\text{API} < 22$ ). Neste estudo, foram realizadas simulações utilizando os três tipos de óleo, conforme essa classificação, com suas características específicas descritas na

## Tabela 2

**Tabela 2-** Valores utilizados nos testes de sensibilidade de grau API.

Nome óleo	Grau API	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade residual	Pressão de vapor do óleo
MEREY	17.4 (Pesado)	0.950	0.966	0.229
SYLVESTRE	28.4 (Médio)	0.885	0.928	0.366
ANACO	41.5 (Leve)	0.818	0.883	0.439

Com a configuração padrão do modelo e um tipo de óleo com grau API médio, também foram realizadas simulações variando as taxas de vazamento. No modelo MEDSLIK II, a taxa de vazamento é expressa em toneladas por hora. A **Tabela 3** mostra as diferentes taxas testadas, juntamente com o volume correspondente de óleo.

**Tabela 3-** Valores utilizados nos testes de taxa de vazamento.

Taxa (t/h)	Tempo de vazamento	Quantidade total (t)
1,5	48	72
2,5	48	120
20,5	48	984

## Sensitividade do fator deriva de Stokes e parâmetros de correção do vento

Os modelos de dispersão de óleo utilizam parâmetros que podem ser fixos ou variáveis para correlacionar a velocidade da corrente e do vento com a velocidade de deslocamento da mancha de óleo, conhecidos como fatores de

deriva. Esses fatores são essenciais para representar o movimento da mancha na superfície do mar, influenciado pelas forças ambientais.

A velocidade de deriva de Stokes, especificamente, é a diferença entre a velocidade média do fluxo lagrangiano de partículas fluidas e a velocidade média do fluxo euleriano do fluido em uma posição fixa. Essa média geralmente é calculada ao longo de um período de onda, o que ajuda a representar o efeito das ondas no transporte de óleo. Na modelagem de derramamentos de óleo, a deriva de Stokes é um fator essencial, pois contribui para o deslocamento da mancha na direção da propagação das ondas, adicionando um componente de transporte além das correntes oceânicas e influenciando a dispersão e a previsão do movimento do óleo.

No modelo MEDSLIK-II, o cálculo da deriva de Stokes é realizado com base em uma abordagem de espectro de onda discreto, utilizando o espectro de ondas experimental JONSWAP para parametrizar a deriva em termos de velocidade do vento. Para este estudo, foram realizadas duas simulações: uma com o valor 01, permitindo que o modelo calcule a velocidade induzida pela onda através de uma formulação empírica; e outra com o valor 00, desativando o cálculo de correção da deriva de Stokes.

De acordo com estudos anteriores de Council 2003 e Reed 1999 aproximadamente 3% da velocidade do vento seja transmitida ao transporte da mancha de óleo na superfície. A pesquisa de Reed *et al.* [1994] também reforça que o fator de deriva de 3% é adequado para ventos de até 6 m/s, já que em velocidades superiores o impacto do vento no transporte da mancha diminui. Nessas condições, o óleo tende a se dispersar mais na coluna d'água, reduzindo sua movimentação em resposta ao vento superficial.

Além do fator de deriva, outro aspecto importante a ser considerado é o ângulo de deflexão entre a direção do vento e o movimento induzido na mancha de óleo. Esse desvio pode variar entre 0° e 25°, dependendo do hemisfério — à direita no hemisfério norte e à esquerda no hemisfério sul, com um desvio médio próximo de 15° . Esse fator de corencial para representar com maior precisão o comportamento da mancha sob a influência de ventos em diferentes condições.

Neste trabalho, os valores testados para o fator e ângulo de deriva estão apresentados na **Tabela 4**. Primeiramente, foi realizada uma simulação sem as correções desses parâmetros. Em seguida, foram realizados testes adicionais, ajustando os valores entre os limites mínimo e máximo encontrados na literatura para avaliar o impacto dessas variações no comportamento da mancha.

**Tabela 4-** Valores utilizados nos testes de valores de correção do vento (Fator de Deriva e Ângulo de Deriva).

Fator de deriva	Ângulo de deriva
0	0
3%	-25
1.5%	-12
3%	0
1%	0
2%	0

## Cenários e comparação com dados SAR

Após realizar os testes de sensibilidade das principais variáveis do modelo, foram definidos quatro cenários, conforme descrito na

**Tabela 5.** Nessas simulações, foram usadas duas forçantes hidrodinâmicas distintas — GLORYS12V1 e ROMS — e aplicados diferentes valores de correção do vento, visando identificar o cenário que melhor representa o caso estudado. A avaliação de cada cenário foi realizada por meio da comparação das saídas do modelo com os dados do satélite COSMO-SkyMed.

**Tabela 5-** Configurações dos cenários com base no evento da P-53, os valores que diferem entre os cenários são: valores de correção do vento e forçantes hidrodinâmicas.

<b>Parâmetros</b>	<b>Simulação 1</b>	<b>Simulação 2</b>	<b>Simulação 3</b>	<b>Simulação 4</b>
Período	25/03/2019 até 31/03/2019	25/03/2019 até 31/03/2019	25/03/2019 até 31/03/2019	25/03/2019 até 31/03/2019
Data e hora	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00
Tempo de simulação (h)	140	140	140	140
Ponto derrame	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W
Tipo de óleo/API	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4
Taxa de derramamento (t/h)	00027.97	00027.97	00027.97	00027.97
Volume	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>
Duração (h)	48	48	48	48
Deriva de Stokes	1	1	1	1
<b>Fator de deriva vento</b>	<b>0</b>	<b>3%</b>	<b>0</b>	<b>3%</b>
<b>Ângulo de deriva</b>	<b>0</b>	<b>-25</b>	<b>0</b>	<b>-25</b>
<b>Forçante hidrodinâmica/Resolução espacial</b>	<b>GLORYS12V1 / 8km</b>	<b>GLORYS12V1 / 8km</b>	<b>ROMS / 5km</b>	<b>ROMS / 5km</b>
Forçante atmosférica	ERA 5	ERA 5	ERA 5	ERA 5

O GLORYS12V1, desenvolvido pelo Mercator Ocean International, oferece dados de alta resolução para o oceano global, incluindo variáveis como temperatura, salinidade, correntes, nível do mar, profundidade da camada mista e parâmetros de gelo. Os dados são fornecidos em arquivos NETCDF em uma grade regular com resolução de 1/12° (cerca de 9 km) e em 50 níveis verticais, sendo disponibilizados em médias mensais e diárias (Coppernicus Marine Service, 2024).

O Regional Ocean Modeling System (ROMS), por sua vez, é um modelo avançado projetado para simular a dinâmica oceânica em escala regional. ROMS utiliza uma malha curvilínea adaptativa, que permite ajustar a resolução espacial e o número de camadas verticais conforme a complexidade do ambiente, abrangendo de poucos metros a vários quilômetros. Este modelo resolve as equações de Navier-Stokes para simular correntes, ondas e

influências externas como vento e pressão atmosférica, proporcionando simulações detalhadas das condições físicas do oceano em diferentes profundidades (Shchepetkin e McWilliams, 2005).

Para as simulações deste estudo, o modelo ROMS foi configurado em um domínio regional, utilizando uma grade regular com resolução espacial de 5 km ( $1/21^\circ$ ). Na direção vertical, foram definidos 21 níveis, com maior detalhamento nas camadas superficiais e próximas ao fundo oceânico. Esse refinamento seguiu os parâmetros de estiramento vertical, estabelecidos em 4,5 para a superfície ( $\theta_s$ ) e 0,45 para o fundo ( $\theta_b$ ), permitindo uma melhor resolução nessas regiões.

A batimetria da grade foi extraída dos dados topográficos do GEBCO 2023, disponibilizados pela International Hydrographic Organization (IHO) e pela Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), com resolução espacial de 15 segundos de grau em latitude e longitude. As condições iniciais e de contorno para o ROMS foram obtidas a partir da reanálise oceânica diária fornecida pelo Global Ocean Physics Reanalysis (Glorys), disponível no Copernicus Marine Open Data. Esse conjunto de dados fornece informações diárias de temperatura, salinidade, elevação do nível do mar e velocidades, com uma resolução global de  $0,083^\circ \times 0,083^\circ$  e 50 níveis verticais, abrangendo profundidades de 5.500 m até a superfície.

Para estabilização do modelo, foi adotado um período de spin-up de cinco anos antes do início da simulação, garantindo a calibração e o adequado ajuste inicial. O domínio do ROMS possui fronteiras abertas ao norte, sul, leste e oeste, e as condições de contorno tridimensionais para temperatura, salinidade e velocidades seguem uma abordagem mista, incluindo a condição radiacional de

Orlanski (Marchesiello et al., 2001). Para a superfície livre, o campo bidimensional da elevação foi especificado conforme o método de Flather (1976). Além disso, foi implementado o esquema de fechamento turbulento Generic Length Scale (Warner et al., 2005).

Na abordagem de derramamentos de óleo, a integração entre modelagem numérica e sensoriamento remoto é particularmente eficaz. Dados de satélite, como imagens SAR, são amplamente utilizados para validar os resultados das simulações numéricas, e, quando disponíveis nas primeiras horas do evento, essas imagens auxiliam na definição das condições iniciais inseridas no modelo numérico. Estudos anteriores demonstram como essa combinação de ferramentas permite obter resultados mais precisos.

Neste estudo, as saídas das simulações foram validadas com dados SAR. Os arquivos NETCDF gerados pelo modelo MEDSLIK II foram convertidos em arquivos *shapefile* por meio de um código em *Python*. Esses *shapefiles* foram então importados para o software QGIS e sobrepostos a um *shapefile* criado a partir da feição de mancha detectada nas imagens SAR. Utilizando a ferramenta de intersecção de *shapefiles* do QGIS, foi calculada a área de intersecção entre as simulações e a mancha SAR, possibilitando uma avaliação precisa do alinhamento entre os resultados modelados e os dados observados.

## **Consolidação da metodologia**

A última etapa da metodologia consistiu no desenvolvimento de um código em *Python* para integrar e automatizar as modelagens de óleo realizadas com o MEDSLIK II. Esse código facilita o processo ao automatizar o *download* dos dados de correntes e ventos necessários para as simulações e também gera

plots desses dados, auxiliando na interpretação dos resultados. Além disso, o código produz gráficos detalhados do balanço de massa das simulações e gera arquivos shapefile para análises espaciais.

## **Capítulo V: Artigo Científico**

O manuscrito descrito a seguir, de autoria de Isadora Vieira Carvalho, Luis Felipe de Mendonça e Elisa Helena Leão, é intitulado “Method for identification and simulation of oil spill dispersion in coastal regions” e foi submetido para publicação no periódico “Marine Pollution Bulletin”.

**Article title**

Method for identification and simulation of oil spill dispersion in coastal regions

**Authors**

Isadora Vieira Carvalho <sup>a</sup>, Luís Felipe Ferreira de Mendonça <sup>b</sup>, Elisa Helena Leão Fernandes <sup>c</sup>

**Affiliations**

<sup>a</sup> Federal University of Rio Grande (FURG). Address: Avenida Itália Carreiros km 8, Rio Grande - Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil, e-mail: [isadoravieiracarvalho18@gmail.com](mailto:isadoravieiracarvalho18@gmail.com)

<sup>b</sup> Federal University of Bahia (UFBA). Address: Avenida Milton Santos, s/nº - Ondina, Salvador, Bahia, Brazil, e-mail: [lfelipem@msn.com](mailto:lfelipem@msn.com)

<sup>c</sup> Federal University of Rio Grande (FURG). Address: Avenida Itália Carreiros km 8, Rio Grande - Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil, e-mail: [fernandes.elisa@gmail.com](mailto:fernandes.elisa@gmail.com)

**Corresponding author**

Federal University of Rio Grande (FURG). Address: Avenida Itália Carreiros km 8, Rio Grande - Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil, e-mail: [isadoravieiracarvalho18@gmail.com](mailto:isadoravieiracarvalho18@gmail.com), telephone: 55 (53) 981499488.

**Abstract**

Oil spills at sea pose a serious threat to the environment, affecting marine life and ecosystems while causing economic and social consequences. Predicting and managing these spills requires advanced tools like remote sensing and numerical modeling. This study presents a methodology for detecting and forecasting oil spills along the Brazilian coast using remote sensing data (SAR images) and the MEDSLIK II model. The results show that MEDSLIK II, when coupled with different hydrodynamic data, predicts the trajectory and dispersion of oil slicks, with GLORYS124v1 products performing the best in the case study. The model's sensitivity to wind and currents emphasizes the need for accurate parameterization. The combination of remote sensing and numerical modeling is effective in detecting and forecasting oil spills, aiding more efficient management and response to environmental emergencies.

**Keywords:** Numerical modeling, Remote sensing, MEDSLIK II, SAR images, oil spill, GLORYS12V1.

# 1. Introduction

Currently, oil is among the main sources of energy worldwide (Ogunbiyi et al., 2023), and recent technological advancements have allowed the exploration of ocean reserves to lead to the growth of the global oil and natural gas production industry (Ngene et al., 2016). However, accidents involving oil spills cause severe damage to the marine ecosystem (Zhang et al., 2019; Fingas and Brown, 2017) economic losses, and negative impacts on coastal communities (Zhang et al., 2019), making them a significant global concern. Oil leaks at sea can occur due to ruptures of tanks and underwater pipelines, failures in the operation of offshore exploratory platforms, and transportation by oil tankers (Pisano et al., 2016; Brekke and Solberg, 2005; De Moura et al., 2020). The type of impact on the marine environment depends on environmental conditions (wind and currents), the type of oil, the volume, and the affected ecosystem (Fingas, 2002). Environmental impacts worsen when they reach the coast (Asif et al., 2022), where coastal ecosystems with high biodiversity and sensitive environments such as mangroves, marshes, beaches, and coral reefs are highly vulnerable to spills (Asce, 1996).

The behavior of oil in the sea depends on a set of physical, chemical, and biological processes associated with its weathering (Mohriak et al., 1990; Spaulding, 2017). Weathering processes occur at a variable rate, depending on the characteristics of the oil and environmental forcings, such as winds, currents, waves, sea temperature, salinity, and incident solar radiation. According to Keramea et al., (2021), the initial processes of a spill are spreading, evaporation, dispersion, emulsification, and dissolution; while those occurring over a longer period include oxidation, sedimentation, and biodegradation.

Given the high risk to marine and coastal ecosystems, rapid identification and response methods for oil spill emergencies are a global demand (De Moura et al., 2020). For this, it is essential to use tools that assist in the identification and determination of oil slick trajectories, such as remote sensing products and numerical simulations. In studies that address the use of these tools (Reed et al 1999; Liu et al., 2011; Fingas, 2016), it is possible to identify their efficiency in the discussed theme, as most oil accidents occur in remote areas, making it difficult to identify and observe the trajectory of the slicks (Fustes et al., 2014; Abascal et al., 2017).

Currently, remote sensing products enable the identification of oil spills in hard-to-reach areas, as well as monitoring large regions in a short time frame (Shinga et al., 2013; Zhang et al., 2014). According to Vasconcelos et al., (2020), microwave sensors, such as Synthetic Aperture Radar (SAR), are frequently used for oil spill detection. In SAR data, oil-covered surfaces appear as dark patches due to the attenuation of capillary waves, which reduces the radar backscatter coefficient (Fingas and Brown, 2014). However, other phenomena can produce the same pattern on the water's surface, resulting in dark patches in SAR images, referred to as false positives (lookalikes) (Brekke and Solberg, 2005, Marghany, 2001). Common examples of false positives include rain cells, wind calm zones, and biogenic substances (Topouzelis et al., 2017; Fingas and Brown, 2014; Zhang et al., 2014; Pisano, 2016, Zhang, 2019). Although SAR data are the most widely used in this field, they have limitations, such as relatively narrow swath width, low revisit frequency, and challenges in distinguishing between oil spills and targets with similar signatures, the latter being one of the greatest challenges in the field (Brekke and Solberg, 2005). Currently, techniques using optical sensor data are also playing an important role in oil detection

(Zhao et al., 2014). Research in the area shows progress in detecting spills and identifying spectral response characteristics of the targets (Lu et al., 2013).

Numerical simulations, on the other hand, have assisted in the process of mapping oil dispersion in coastal and oceanic environments, as they allow the prediction of the oil spill's trajectory and the forecasting of rapid response actions (Huang, 1983). Oil prediction models are driven by information on currents, winds, waves, and sea surface temperature, which are the key components influencing the spread of oil in the marine environment (Spaulding, 2017; Zoadis et al., 2021).

Once the forcing factors are defined, oil models provide predictions about the fate of the spill and the weathering processes the oil undergoes. Information on the intensity and direction of ocean currents, temperature, and other water column properties is provided by three-dimensional ocean circulation models (Keremea et al., 2021). The most commonly used models today include the Global Ocean Physics Analysis and Forecast 1/12° (GLO-MP) and the Global Ocean Physics Analysis and Forecasting 1/4° (GLO-CPL), operated by the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), which provide global data and three-dimensional forecasts (CMEMS, 2024). The Navy Coastal Ocean Model (NCOM) is used by the U.S. Navy for operational oceanic predictions (Bilskie, 2016). The Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) is operated by various institutions, including the U.S. Navy and research centers, and is applied in regional and global simulations (Chassignet et al., 2006). Finally, the South Atlantic Bight and Gulf of Mexico (SABGOM), based on the Regional Ocean Modeling System (ROMS), is operated by regional centers for studies in the South Atlantic and the Gulf of Mexico (Hyun and He, 2010).

Wind intensity and direction data, along with other air properties, are provided by meteorological models. Among the most important, the Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), operated by NOAA/NCEP, is widely used in global studies (NOAA, 2024). The Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS) is provided by the U.S. Navy (NOAA, 2024). The Global Forecast System (GFS), also from NCEP, is widely used due to its broad coverage of global scales (NOAA, 2024). At the regional level, the Weather Research and Forecasting Model (WRF) is operated by NCAR/NCEP for mesoscale forecasts, while the North American Mesoscale Forecast System (NAM) and the North American Regional Reanalysis (NARR) are operated by NOAA/NCEP for regional analysis (Skamarock et al., 2019; NOAA, 2024). Finally, the ERA5 model from ECMWF stands out in global and regional simulations related to oil spills (CMEMS, 2024).

Stokes drift and wave information are provided by wave models. The WAVE Model (WAM), operated by ECMWF, is widely used for global forecasts (Group, 1988). The WAVE Reanalysis (WAVERY), based on the Météo-France Wave Model (MFWAM), provides global wave reanalyses (CMEMS, 2024). Additionally, MFWAM, also based on WAM, is used for regional and global forecasts. These models play crucial roles in analyzing and forecasting wave conditions at different scales (Zhang et al., 2020).

In general, the results produced by numerical oil spill dispersion models are essential for developing studies to manage activities in the Oil, Gas, and Biofuels Industry, as well as for supporting the creation of Contingency Plans in the event of an oil spill. Some of the oil spill dispersion models currently in use include OILMAP (Howlett et al., 2021), OSCAR (Reed et al., 1995), MOHID (Carracedo et al., 2006), OILTRANS (Berry et al., 2012), MEDSLIK II (De Dominics

et al., 2013a; 2013b), GNOME (Beegle-Krause, 2001), OpenOil (GITHUB, 2024), SIMAP (Mccay et al., 2016), and ECOSTELEMAC (Stringari et al., 2013).

Among the major regions subject to oil spills in Brazil, the Campos Basin, with an area of approximately 100,000 km<sup>2</sup>, is the most prolific area in the western South Atlantic (Mohiak et al., 1990). Commercial oil production in this region began in 1970, and since then, the Campos Basin has played an important role in the technological development of the Oil, Gas, and Biofuels sector (Petrobras, 2024). Currently, the Campos Basin is the global leader in technology for deepwater and ultra-deepwater exploration and production, with 280 producing wells and 25 operational platforms (Petrobras, 2024). Given the large number of platforms in operation and the intense ship traffic in this region, the likelihood of oil spills occurring is higher, creating a need for digital technologies to help identify and forecast oil spill trajectories in this study area.

Numerous studies have explored numerical modeling and remote sensing in the Campos Basin, employing various models and methodologies. For example, in Marta-Almeida (2013), the GNOME model was used for oil spill tracking, and the ROMS model for ocean forecasting, applied to three distinct regions: Galicia, southeastern Brazil, and the Texas-Louisiana shelf. In De Oliveira (2018), a three-dimensional oil spill model based on the Eulerian approach was described, applied to a case study in the Campos Basin to simulate the oil's trajectory and dispersion in the water. Torres (2020) investigated the behavior of oil after a spill in the Campos Basin, simulating both oil dispersion and the effectiveness of chemical dispersants. Finally, De Moura (2022) presented research on the automatic detection of oil spills in the Campos Basin using deep learning techniques and remote sensing. The study included the development of a Brazilian dataset, a comparison of segmentation models, and time series analysis to identify more vulnerable areas.

This study proposes a methodology for detecting and predicting the fate of oil spills along the Brazilian coast using remote sensing products and numerical simulations. In this context, the behavior of the MEDSLIK II model using hydrodynamic forcing at different spatial scales will be evaluated, along with the model's sensitivity to key physical variables. The selected case study was the oil spill accident on the P-53 platform in March 2019.

## 2. Materials and Methods

The methodology is organized into three stages: first, sensitivity tests were conducted using the MEDSLIK II model to evaluate how different variables and conditions affect its results. Next, a case study simulation was performed using various three-dimensional current models to analyze the quality of the predictions and compare the results with SAR (Synthetic Aperture Radar) data. Finally, the study aimed to establish a methodology for detecting and forecasting oil spills along the Brazilian coast.

The case study selected for this work was the oil spill that occurred at the P-53 platform, a Floating Production Unit (FPU) operated by Petrobras in the Marlim Leste field in the Campos Basin, located 120 km off the coast (Figure 1). According to the investigation report prepared by the Operational Safety and Environment Superintendence (ANP/SSM) and the Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA), the incident began with a process disturbance on the P-53 platform on the afternoon of March 24, 2019. Synthetic Aperture Radar

(SAR) images from the COSMO-SkyMed satellite constellation show that the spill, which involved 122 m<sup>3</sup> of oil, started in the early hours of March 25, 2019.

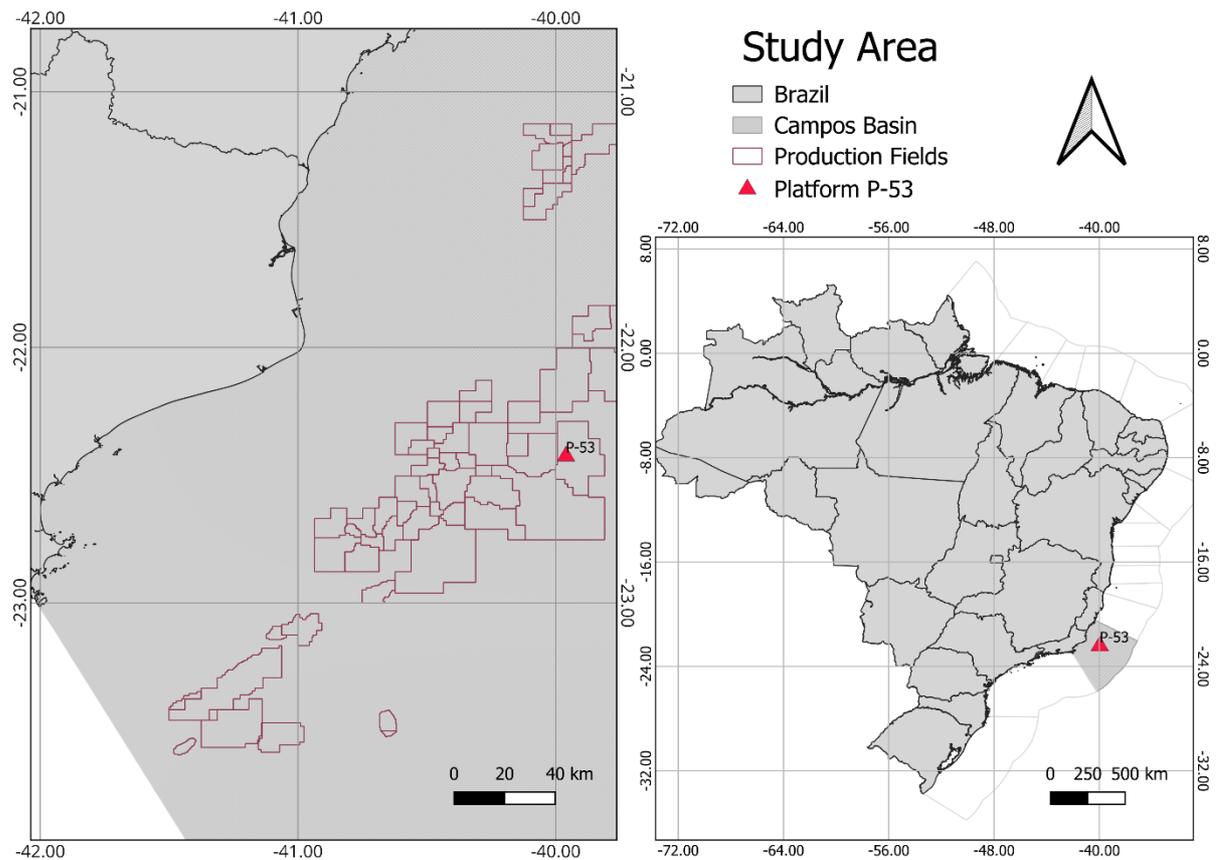


Figure 1. Study Area. The gray maritime region represents the Campos Basin, the region outlined in red represents the production fields, and the red triangle represents the P-53 platform.

For the oil dispersion simulation, the Lagrangian model MEDSLIK II, as described by De Dominicis et al., (2013a, 2013b), was used. This model can be coupled with various Eulerian circulation models. MEDSLIK II requires inputs such as wind fields, sea surface temperature, three-dimensional currents, and oil spill data, including location, time, spill age, quantity, and oil type.

The model calculates advection-diffusion processes using a Lagrangian approach, discretizing an oil slick into a set of initially adjacent particles, each of which subsequently moves due to currents, winds, waves, and turbulent diffusion, causing displacement and spreading of the slick. Surface oil transformation processes are computed using parameterizations that simulate weathering processes such as evaporation, emulsification, and dispersion (De Dominicis et al., 2013a; 2013b). Finally, the model outputs the evolution of the oil's properties, its position each hour, and its trajectory over the following days. Additionally, it simulates particle adhesion to the coast and assesses the probability of oil being transported offshore.

In this study, the GLORYS12V1 products from Mercator Ocean International, with an 8 km spatial resolution, and subsequently, the products from the Regional Ocean Modeling System (ROMS), with a 5 km spatial resolution, were tested as hydrodynamic forcing. Hourly ERA5 products were used as meteorological forcing. The computational domain's bathymetry was sourced from the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), and the global coastline information was derived from the Global Self-consistent Hierarchical High-resolution

Geography Database (GHSSH) provided by the National Centers for Environmental Information (NOAA).

## 2.1) Sensitivity Tests

Based on information from the P-53 platform case study in the Campos Basin, several tests were conducted using the MEDSLIK II model, focusing on its key variables. Table 1 provides a detailed configuration of the simulations performed.

Table 1. Configuration of the sensitivity tests conducted in MEDSLIK II.

Parameters	Values
<b>Period</b>	25/03/2019 to 05/04/2019
<b>Date and time</b>	25/03/2019 00:00
<b>Simulation time (h)</b>	240
<b>Spill location</b>	22°25'29"S 30° 57'21"W P-53
<b>Number of particles</b>	100.000
<b>Grid</b>	100
<b>Oil type/API</b>	<b>Light / Medium / Heavy</b>
<b>Spill rate (t/h)</b>	<b>1.5 / 2.5 / 20.5</b>
<b>Stokes drift</b>	<b>0 / 1</b>
<b>Wind drift factor</b>	<b>0 / 1 / 1.5 / 2 / 3</b>
<b>Wind drift angle</b>	<b>0 / -12 / -25</b>
<b>Hydrodynamic forcing/Spatial resolution</b>	GLORYS12V1 / 8km
<b>Atmospheric forcing</b>	ERA 5

Initially, the simulations were conducted using the default configuration parameters of the model, employing GLORYS12V1 data for three-dimensional currents and ERA5 products for meteorological forcing during the P-53 platform spill period. The modified variables are detailed in the following sections: Section 2.1.1 describes the tests conducted with variables from the MEDSLIK II model's conf. 1 file, while Section 2.1.2 addresses the tests with variables from the conf. 2 file.

### 2.1.1) Sensitivity of API gravity and spill rate

The API Gravity is a scale developed by the American Petroleum Institute to measure the density of petroleum-derived liquids. The density of oil can be calculated from the API Gravity using the formula:  $^{\circ}\text{API} = (141.5 / \rho) - 131.5$ , where  $\rho$  represents the relative density of the oil compared to water at 60 °F (15.56 °C). In practice, the higher the oil's density, the lower its API Gravity will be. In Brazil, the Technical Regulation for Petroleum and Natural Gas Reserves, from the National Petroleum, Natural Gas and Biofuels Agency (ANP), classifies oil as follows: light oil ( $^{\circ}\text{API} \geq 31.1$ ), medium oil ( $22.3 \leq ^{\circ}\text{API} < 31.1$ ), and heavy oil ( $10 < ^{\circ}\text{API} < 22$ ). In this study, simulations were conducted with the three types of oil according to this classification, and their characteristics are detailed in Table 2.

Table 2. Values used in API gravity sensitivity tests.

<b>Oil</b>	<b>API Gravity</b>	<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Residual Density</b>	<b>Pressão de vapor do óleo</b>
<b>MEREY</b>	17.4 (Heavy)	0.950	0.966	0.229
<b>SYLVESTRE</b>	28.4 (Medium)	0.885	0.928	0.366
<b>ANACO</b>	41.5 (Light)	0.818	0.883	0.439

Using the model's default configuration and a medium API gravity oil type, simulations were also conducted by varying the spill rates. In the MEDSLIK II model, the unit used for the spill rate is tons per hour. Table 3 presents the different rates tested, as well as the respective oil volume.

Table 3. Values used in spill rate tests.

<b>Rate (t/h)</b>	<b>Spill duration</b>	<b>Total amount (t)</b>
<b>1.50</b>	48	72
<b>2.50</b>	48	120
<b>20.50</b>	48	984

### 2.1.2) Sensitivity to the Stokes drift factor and wind correction parameters

The oil dispersion model uses variable parameters to relate the current and wind speeds to the surface speed of the oil slick, known as drift factors (Cekirge and Palmer et al., 2001). The Stokes drift velocity is the difference between the average Lagrangian flow velocity of fluid particles and the average Eulerian flow velocity of the fluid at a fixed position (the average is typically obtained over a wave period) (De Dominics et al., 2013a). In MEDSLIK-II, the Stokes drift calculation is based on a discrete wave spectrum approach (De Dominics et al., 2013b). The model uses the experimental JONSWAP wave spectrum in terms of wind speed and seeks the Stokes drift parametrization. Two simulations were conducted: one using a value of 01, which allows the model to use the wave-induced velocity calculated through an empirical formulation (De Dominics et al., 2013a), and another simulation using a value of 00, meaning no Stokes drift correction calculation (Table 4).

Table 4. Values related to Stokes drift.

<b>Stokes drift factor</b>	<b>Aplication</b>
<b>0</b>	No
<b>1</b>	Yes

According to Guo and Wang, 2009; Wang et al., 2005, it is considered that 3% of the wind speed is transmitted to the transport of the oil slick. Reed et al. (1994) suggests that the 3% drift factor applied to models is ideal for wind speeds of up to 6 m/s. They also indicate that with speeds above this threshold, the wind has less influence on the transport of the slick, as the oil becomes more dispersive in the water column. Another correction factor to consider when analyzing wind-induced oil drift is the deflection angle between the direction of the wind and the direction of movement induced by the oil. This deviation angle can range from 0° to 25°,

to the right in the Northern Hemisphere or to the left of the wind in the Southern Hemisphere, with the average value typically being 15° (Asce,1996).

The values tested in this study are shown in Table 5. Initially, simulations were conducted without the drift factor and angle corrections, and then several tests were performed varying the values between the maximum and minimum considered in the literature.

Table 5. Valores utilizados nos testes de valores de correção do vento (Fator de Deriva e Ângulo de Deriva).

<b>Wind drift factor</b>	<b>Wind drift angle</b>
<b>0</b>	0
<b>3%</b>	-25
<b>1.5%</b>	-12
<b>3%</b>	0
<b>1%</b>	0
<b>2%</b>	0

## 2.2) Scenarios and comparison with SAR data

After conducting sensitivity tests on the model's main variables, four scenarios were defined, as described in Table 6. In these simulations, two distinct hydrodynamic forcings, GLORYS12V1 and ROMS, were employed, along with different wind correction values, with the aim of identifying the scenario that best represents the case study. The evaluation was carried out by comparing the model outputs with data obtained from the COSMO-SkyMed satellite.

Table 6. Scenario configurations based on the P-53 oil spill event. The values that differ between the scenarios are: wind correction values and hydrodynamic forcings.

<b>Parameters</b>	<b>Simulation 1</b>	<b>Simulation 2</b>	<b>Simulation 3</b>	<b>Simulation 4</b>
<b>Period</b>	25/03/2019 to 31/03/2019	25/03/2019 to 31/03/2019	25/03/2019 to 31/03/2019	25/03/2019 to 31/03/2019
<b>Date and time</b>	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00	25/03/2019 00:00
<b>Simulation time (h)</b>	140	140	140	140
<b>Spill location</b>	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W	22°25'29"S 30° 57'21"W
<b>Oil type/API</b>	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4	Sylvestre/28.4
<b>Spill rate (t/h)</b>	00027.97	00027.97	00027.97	00027.97
<b>Volume</b>	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>	122 m <sup>3</sup>
<b>Duration (h)</b>	48	48	48	48
<b>Stokes drift factor</b>	1	1	1	1
<b>Wind drift factor</b>	0	3%	0	3%
<b>Wind drift angle</b>	0	-25	0	-25
<b>Hydrodynamic forcing/Spatial resolution</b>	<b>GLORYS12V1 / 8km</b>	<b>GLORYS12V1 / 8km</b>	<b>ROMS / 5km</b>	<b>ROMS / 5km</b>
<b>Atmospheric forcing</b>	ERA 5	ERA 5	ERA 5	ERA 5

The GLORYS12V1 products, implemented by Mercator Ocean International, cover the global ocean, including monthly and daily mean files for temperature, salinity, currents, sea level, mixed layer depth, and ice parameters. The global ocean output files are in NETCDF format and are displayed on a standard regular grid of 1/12° (approximately 9 km) and in 50 standard vertical levels (CMEMS, 2024).

The Regional Ocean Modeling System (ROMS) is an advanced numerical model designed to simulate ocean dynamics on a regional scale with high accuracy. Using an adaptive curvilinear grid, ROMS adjusts spatial resolution and the number of vertical layers according to the study's needs, ranging from a few meters to several kilometers. The model solves the Navier-Stokes equations to simulate currents, waves, and external influences such as wind and atmospheric pressure, allowing detailed simulations of physical properties at different depths. ROMS is versatile and applicable to current forecasts, pollution modeling, and ecological studies (Haidvogel et al., 2008).

In the context of oil spill modeling, numerical modeling and remote sensing complement each other effectively. Satellite data, such as SAR images, can be used to validate the results of numerical simulations (De Padova et al., 2017). Moreover, when satellite data is available in the early hours of an event, the images can help define the initial conditions to be input into the numerical model (Azevedo et al., 2011). Studies such as (De Souza et al., 2024; Cheng, 2014;

Azevedo et al., 2011) demonstrate the synergistic use of these tools to achieve more accurate results.

In this work, the simulation outputs were compared with SAR data. From the NETCDF files generated by MEDSLIK II, shapefiles were created through a Python script. These shapefiles were imported into the QGIS software and overlaid onto another shapefile, generated from the dark spot feature detected in the SAR images. Using the QGIS shapefile intersection tool, it was possible to calculate the intersection area between the simulations and the SAR feature.

Finally, a Python script was created to integrate with the oil spill modeling performed with MEDSLIK II, automating the download of current and wind data, as well as generating graphs of these data to facilitate result interpretation. Additionally, the script also produces mass balance graphs of the simulations and generates shapefiles.

## 3. Results

### 3.1) Sensitivity Tests

#### 3.1.1) API Gravity and spill rate

Figures 2a, 2b, and 2c illustrate the final distribution of the oil slick after 240 hours of simulation for different API grades, while Figures 3a, 3b, and 3c present the corresponding mass balance graphs. The results indicate that although the API grade does not significantly influence the advective processes of the slick, evidenced by the fact that the drift follows the same hydrodynamic pattern, it plays a considerable role in the oil's evaporation rate.

The graphs in Figures 3a, 3b, and 3 show that oils with a higher API grade, which are lighter, exhibit higher evaporation rates. These same graphs also reveal that the reduction in the amount of oil on the surface occurs more rapidly for lighter oils, whereas for heavier oils, this reduction is more gradual, resulting in a considerably lower final percentage of residual oil on the surface. Furthermore, the lower evaporation rates of heavier oils are associated with greater dispersion into the water column.

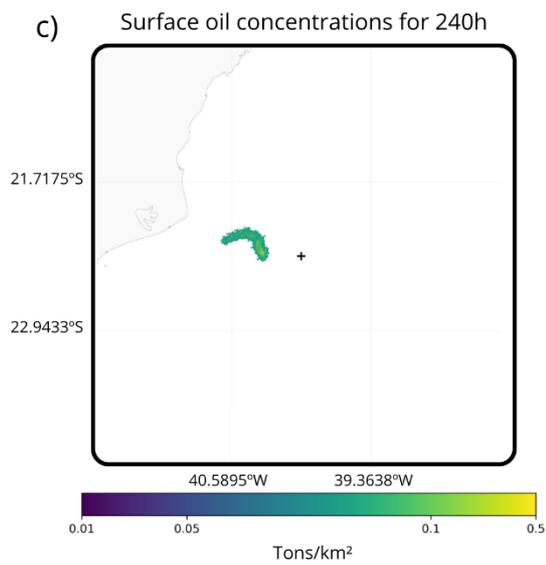
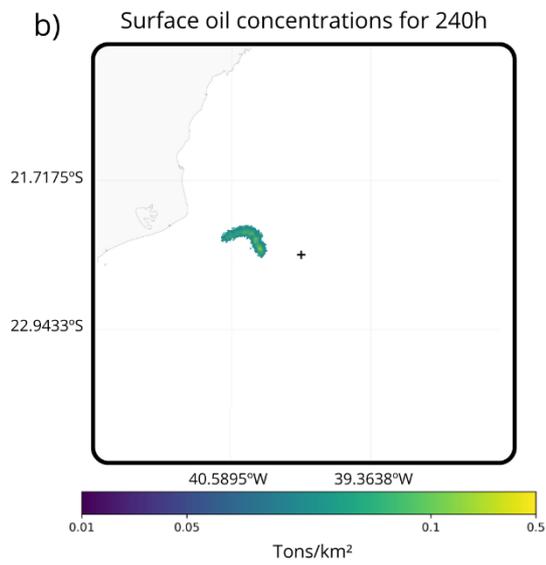
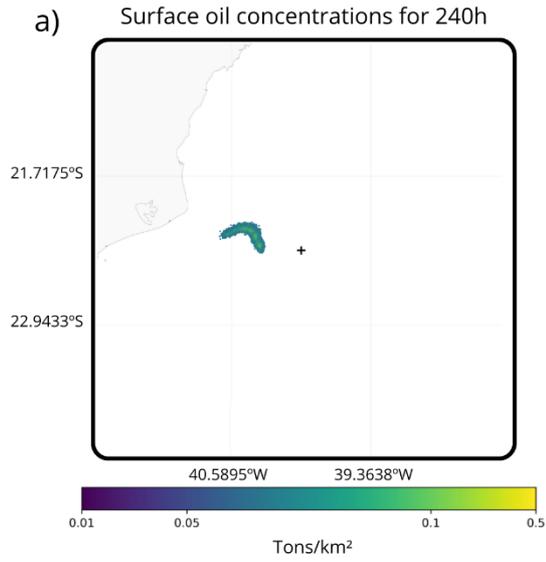


Figure 2. Last instant of the API gravity simulation: a) light, b) medium, c) heavy

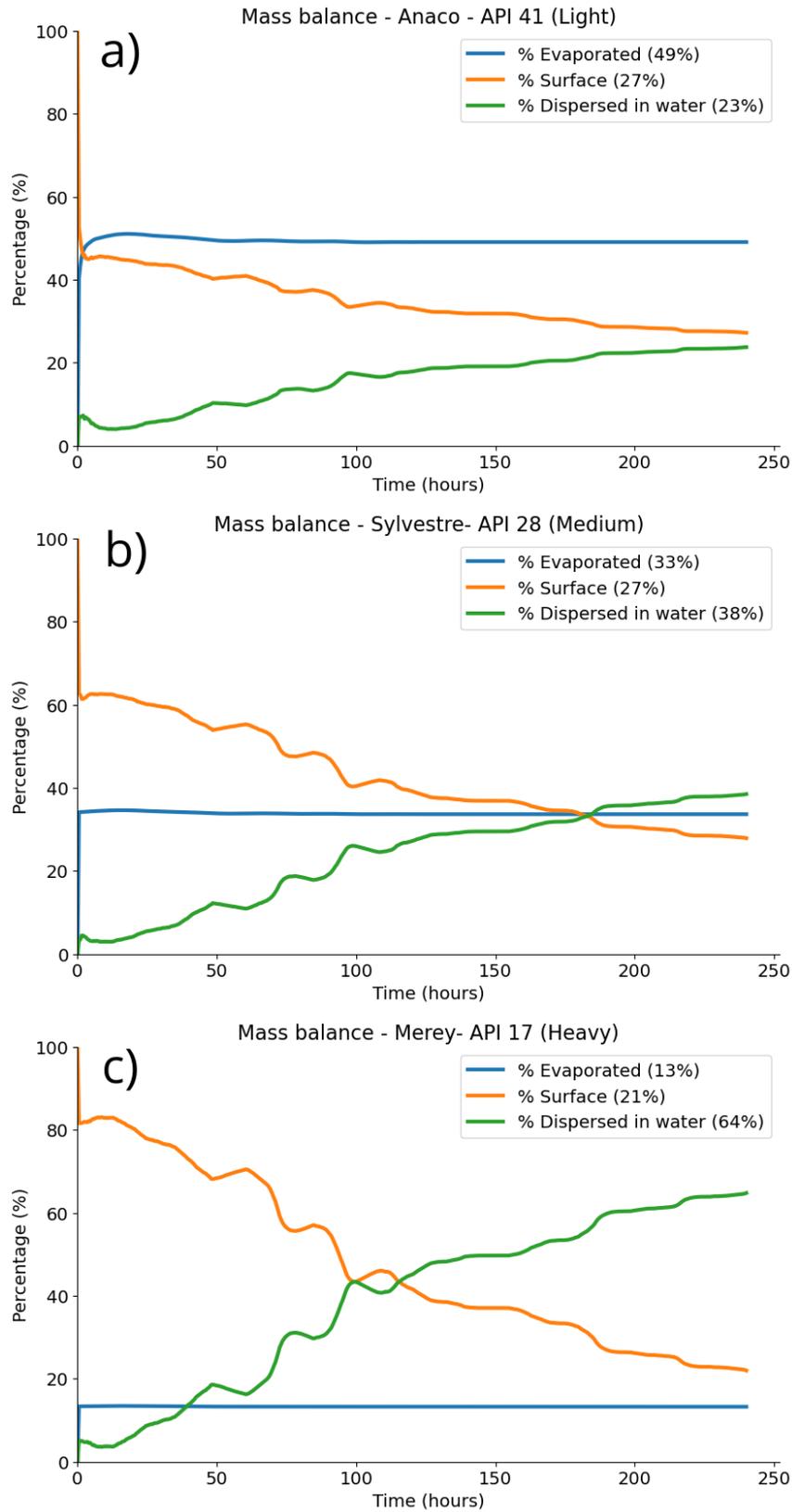


Figure 3. Last instant of the API gravity simulation: a) light, b) medium, c) heavy. Mass balance of the simulation using API gravity: d) light, e) medium, f) heavy. In the mass balance figures, the blue line represents the % evaporated, the orange line represents the % on the surface, and the green line represents the percentage dispersed in the water column.

Figures 4a, 4b, and 4c display the trajectories of simulations conducted with different leakage rates, showing that variations in the leakage rate did not impact the final location of the oil slicks, which remained consistent across all simulations. It is important to note that the number of Lagrangian particles used in the model was not adjusted to account for these variations in the leakage rate.

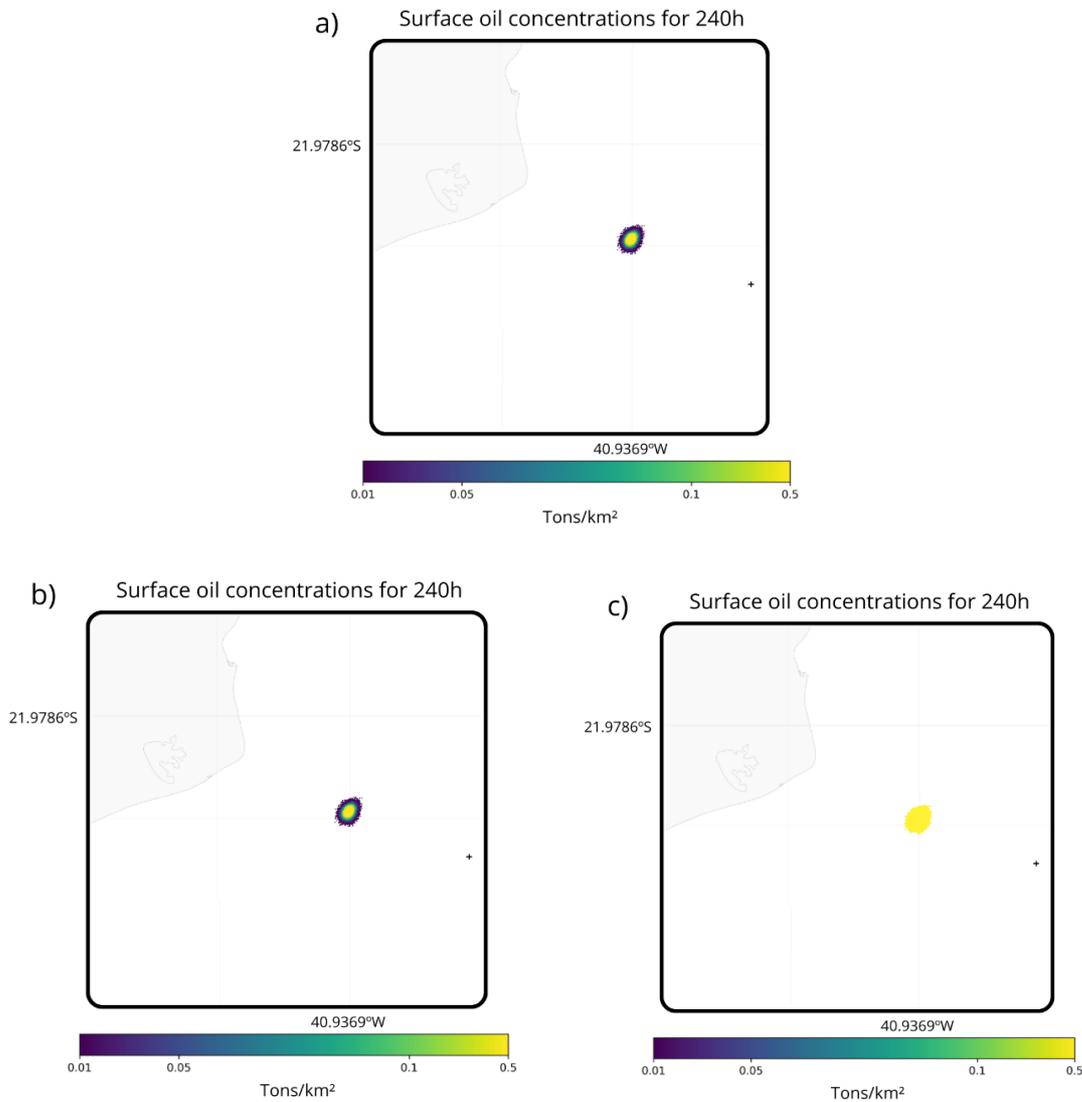


Figure 4. Last instant of the simulation with rate. a) 1.50 t/h, b) 2.50 t/h, c) 20.5 t/h.

### 3.1.3) Stokes drift factor and wind correction parameters

Figure 5 illustrates the difference in the final location of the oil slicks in simulations with and without the calculation of Stokes drift (SDC). The results indicate that the additional force generated by Stokes drift has a significant influence on the trajectory of the oil slick, particularly in coastal areas.

## Surface oil concentrations for 240h

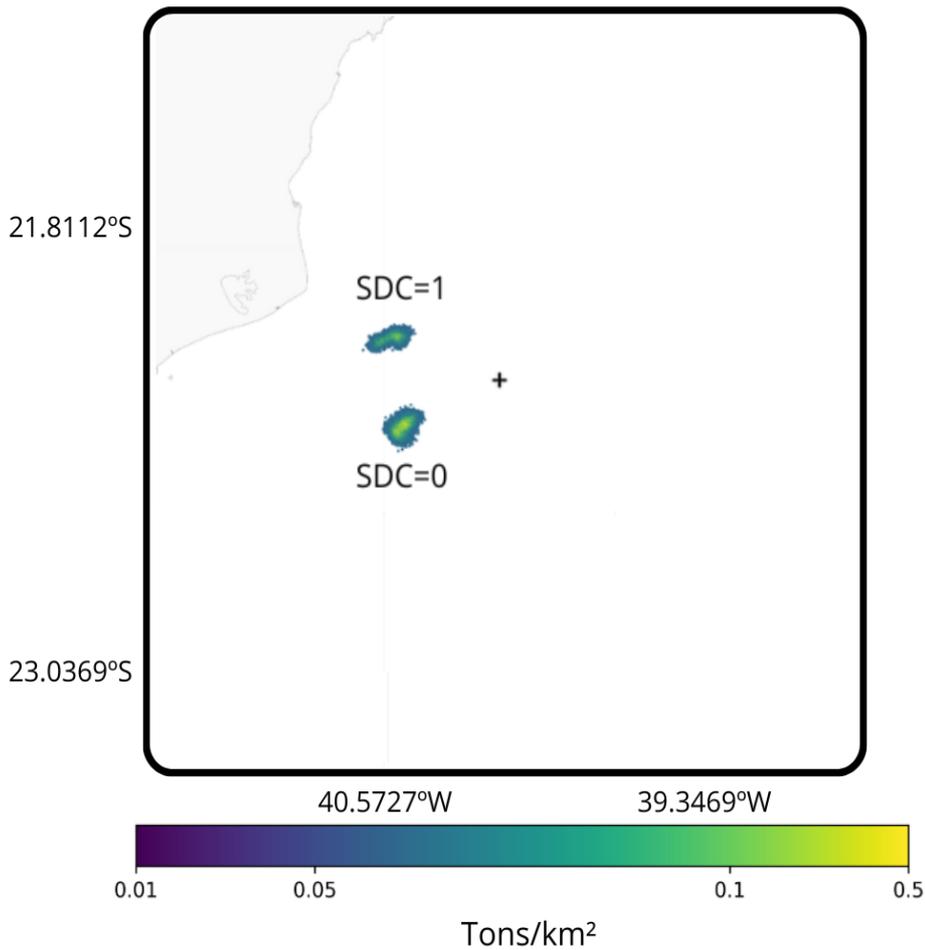


Figure 5. Last instant of the simulations using Stokes Drift Factor (SDC) = 0 and SDC = 1.

A distance of 31.33 kilometers was observed between the geometric centers of the slicks at the final moment of the simulations with and without Stokes drift. The simulation incorporating the calculation of Stokes drift (SDC=01) provided a better representation of the studied case.

Figure 6 presents the time series of wind data at the location where the spill began. It is possible to observe that southeast (SE) and south (S) winds predominate, with intensities ranging from 2 m/s to 12 m/s and an average speed of 6 m/s, characterizing moderate winds.

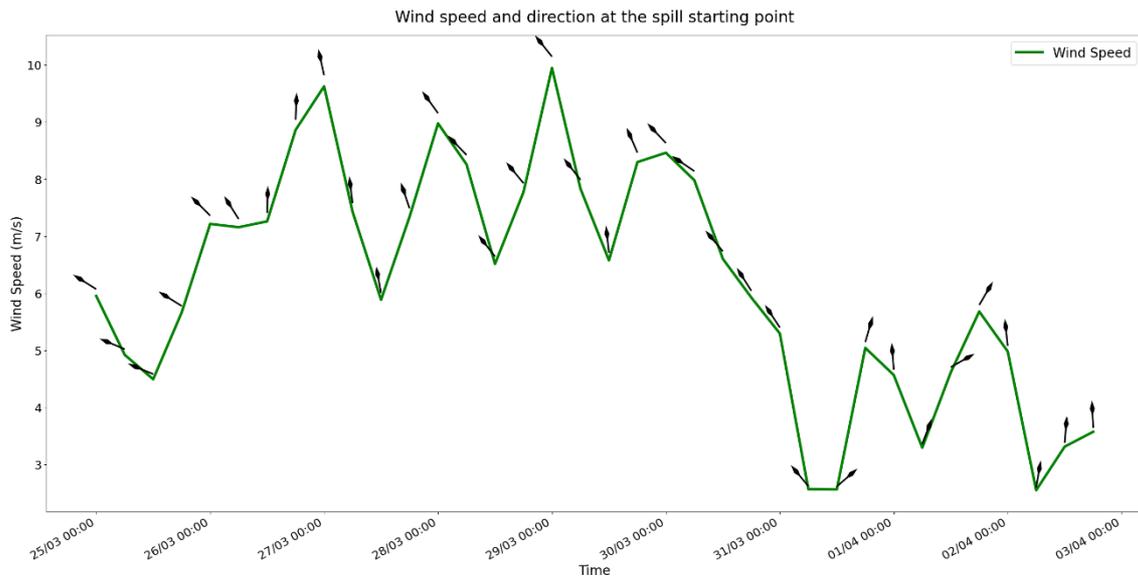


Figure 6. Wind speed and direction at the spill starting point.

Figure 7 illustrates the final moment (240 hours) of the modeling for all tested values of drift factor (DF) and drift angle (DA). It can be observed that increasing the drift factor results in a higher velocity of the oil slick, aligning with the predominant wind direction. When negative correction values for the drift angle are applied, the slick deflects to the left.

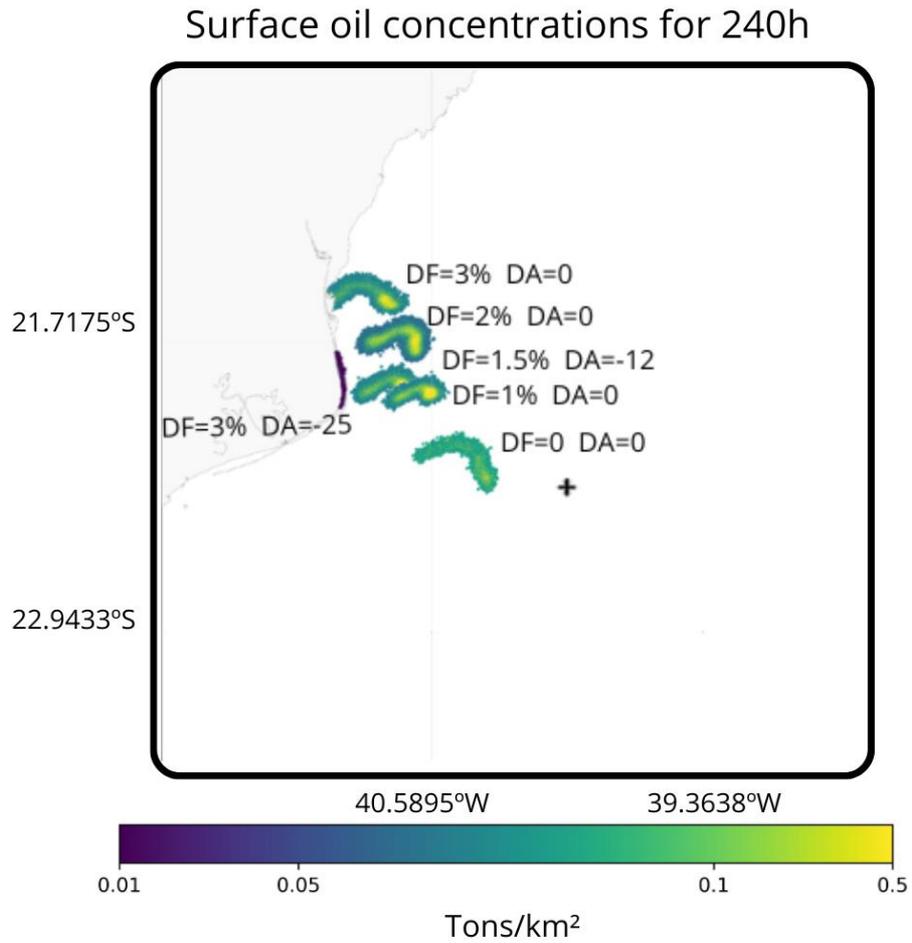


Figure 7. Last instant of the simulations using different values of Drift Factor (DF) and Drift Angle (DA).

### 3.2) Scenarios and comparison with SAR data

Figures 8a, 8b, 8c, and 6d show the trajectories of oil slicks simulated with the MEDSLIK II model using different hydrodynamic forcings: GLORYS12V1 and ROMS, both with and without wind correction, respectively.

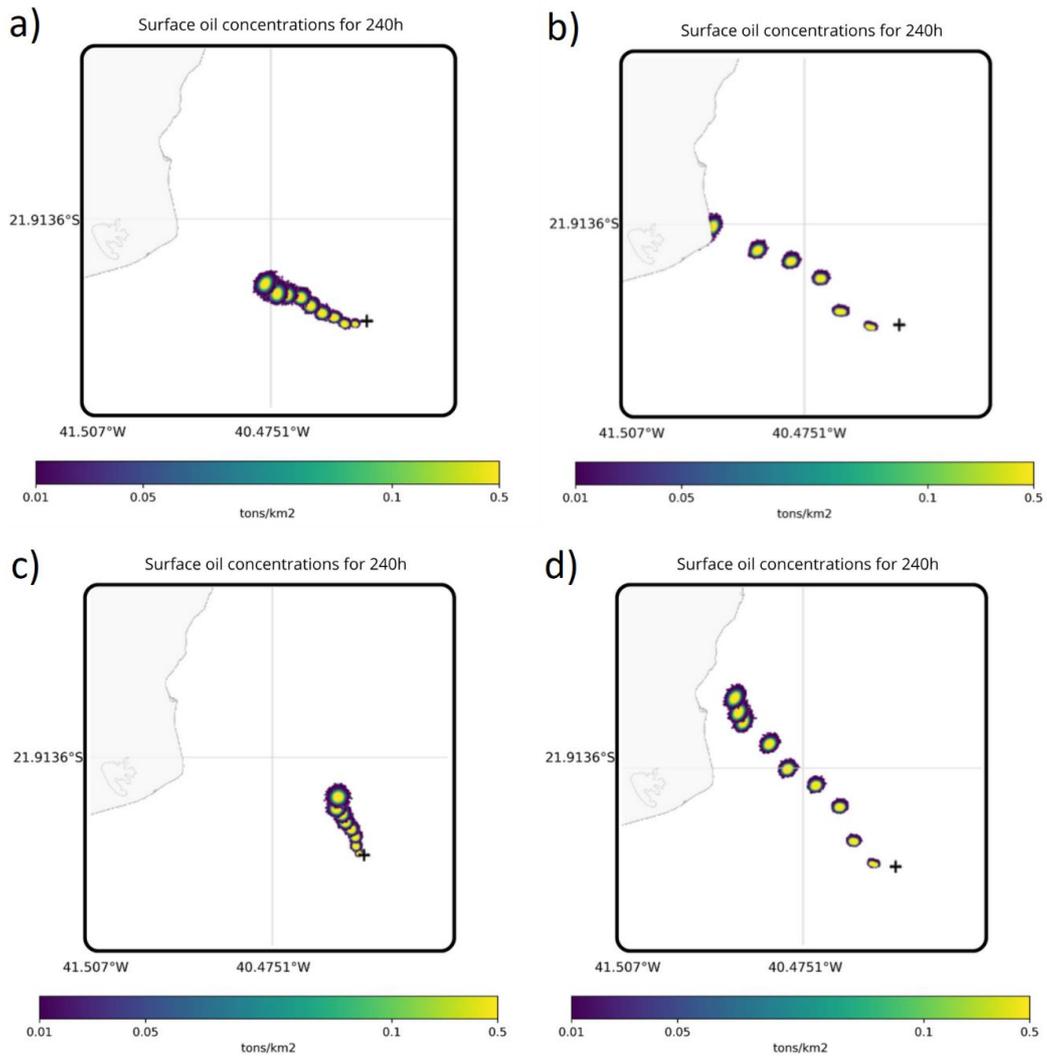


Figure 8. GLORYS12v1 a) without and b) with wind corrections. ROMS c) without and d) with wind corrections.

Figure 9 shows the time series of currents from the GLORYS 12v1 data at the initial spill point, where southwest (SW) currents predominate, with speeds ranging between 0.3 and 0.5 m/s. Figure 10 displays the time series of currents from the ROMS data, where south (S) and southeast (SE) currents prevail, also with speeds between 0.3 and 0.5 m/s.

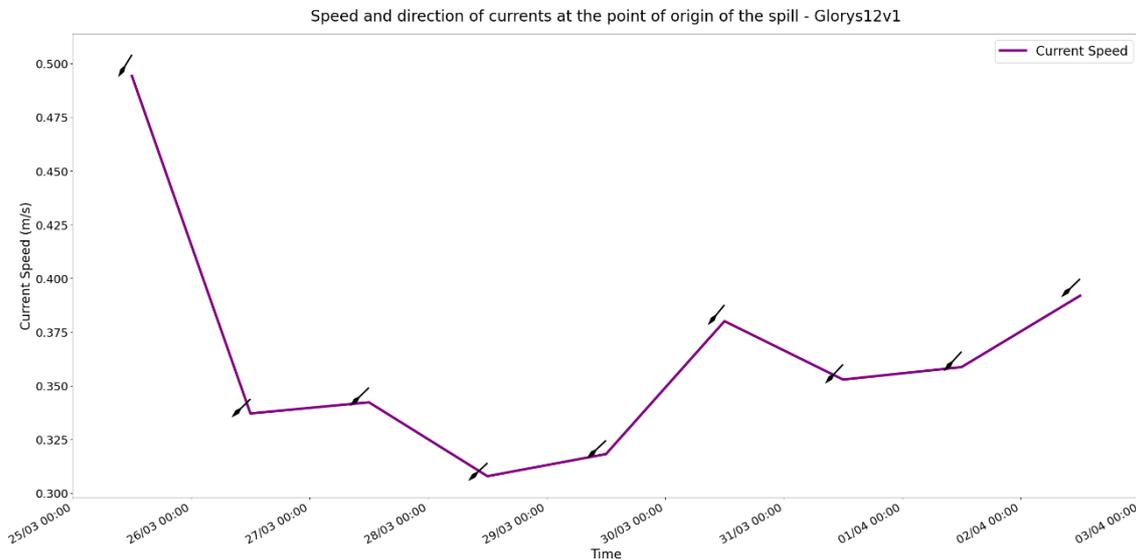


Figure 9. Speed and direction of currents at the point of origin of the spill - Glorys12v1

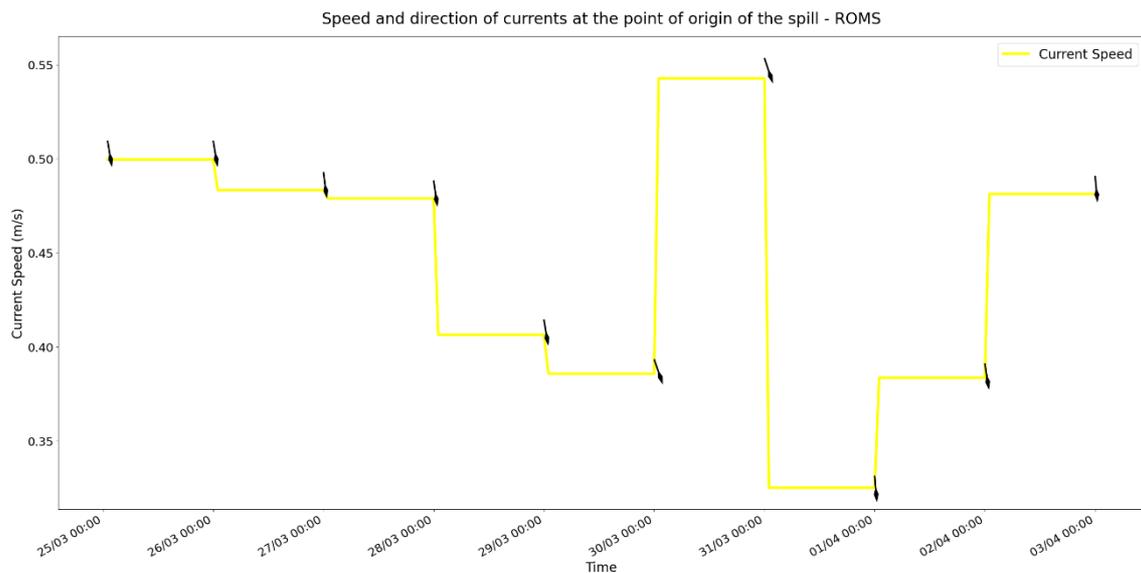


Figure 10. Speed and direction of currents at the point of origin of the spill - ROMS

To determine which scenario best represented the event, the calculated trajectories of the features were compared with an image from the COSMO-SkyMed satellite.

The analysis revealed that the total area of the oil slick was 22.1 km<sup>2</sup>. Among the different simulations performed, the GLORYS12V1 model with wind corrections showed the largest intersection area with the slick, totaling 8.3 km<sup>2</sup>. The GLORYS12V1 model without wind corrections had a slightly smaller intersection area of 7.5 km<sup>2</sup>. Simulations using the ROMS model showed a significantly smaller intersection area, with 3.4 km<sup>2</sup> when wind corrections were applied and only 2.2 km<sup>2</sup> without wind corrections.

These results indicate that the scenario using the GLORYS12V1 model with wind corrections best represented the studied oil spill event, achieving the largest intersection area with the actual slick and reaching the coastline, as reported by IBAMA.

## 4. Discussion

### 4.1) Sensitivity Tests

#### 4.1.1) API Gravity and and spill rate

As observed in the study, while the API gravity does not significantly influence the advective processes of the oil slick, which follow the same hydrodynamic patterns, it plays a substantial role in the oil's evaporation rate. Previous research supports this conclusion, emphasizing that variations in API gravity primarily affect evaporation, regarded as the main transformation process of oil after its release on the surface (De Dominics et al., 2013a; 2013b).

It was also noted that oils with higher API gravity, characterized as lighter, exhibit higher evaporation rates. In the MEDSLIK II model, evaporation is calculated using Mackay's algorithm (Mackay et al., 1980), which is based on the oil's vapor pressure (Poil). Vapor pressure increases with API gravity (De Dominics et al., 2013a; 2013b), explaining why oils with higher API gravity have elevated vapor pressure values, resulting in faster evaporation rates (Torres et al.; 2020).

Lighter oils, with higher API gravity, experience a quicker reduction in the amount of oil on the surface, while heavier oils, with lower API gravity, show a more gradual decrease, leading to a lower final percentage of surface oil (Torres et al.; 2020). This difference in evaporative behavior directly impacts the oil's dispersion in the water column, with heavier oils tending to disperse more deeply. This phenomenon aligns with Mackay et al. (1980), who use an empirical formula to calculate oil dispersion, accounting for differences between larger and smaller droplets. Smaller droplets, which rise more slowly, are more likely to remain dispersed within the water column, significantly influencing oil spill dynamics (De Dominics et al., 2013a).

Studies reveal that API gravity has a significant impact on oil spill modeling (84). Variations in this parameter directly affect the evaporation and dispersion rates of the oil, impacting the accuracy of models used to predict spill behavior (Mishra and Kumar, 2015). This influence underscores the importance of properly adjusting API gravity-related parameters to ensure more accurate and representative modeling of the dynamics involved.

As observed, variations in the oil leakage rates did not affect the final location of the oil slicks. Being a Lagrangian dispersion model, it primarily considers ocean currents, which, in many cases, are the main factor determining the dispersion and final location of the oil. Once the currents are established, they can direct the oil in a similar manner regardless of the quantity spilled. Even when the leakage rate varies, the released oil may quickly disperse over a larger area, but environmental conditions (such as wind and currents) predominantly influence how this dispersion occurs. Consequently, the final location of the slicks can be similar, as the movement of the oil is more impacted by external factors than by the initial volume spilled.

In the presented case study, various oil leakage rates (low, medium, and high) were applied to simulate different spill scenarios. However, the number of Lagrangian particles used in the model was not adjusted based on these variations in the leakage rate. This decision may

have impacted the accuracy of the simulations, as noted by De Dominicis et al. (2013), who emphasize that the relationship between the number of particles and the leakage rate is crucial for correctly representing oil dispersion. An inadequate number of particles can compromise the model's ability to capture variations in oil concentration and slick evolution, especially in scenarios with high leakage rates where a larger number of particles is necessary for realistic representation.

We believe that adjusting the number of particles according to the oil leakage rate is an aspect that warrants attention in future studies. This approach could enhance the accuracy of simulations and enable a better assessment of oil slick behavior under varying leakage conditions. Considering this additional variable could provide valuable insights into the dynamics of oil spills and their interactions with the marine environment.

#### 4.1.3) Stokes drift factor and wind correction parameters

Stokes drift is an important phenomenon in oil spill modeling, particularly in simulations that aim to predict the transport and dispersion of oil on the ocean's surface (Reed, 1994). In our study, we considered Stokes drift to be crucial for simulation accuracy, as it describes the movement of particles on the sea surface due to waves, and is essential for understanding the dispersion and trajectory of oil slicks, especially in interaction with ocean currents, which improves the precision of spill modeling (Yang, 2021).

In this study, it was observed that including the additional force provided by Stokes drift significantly influences the trajectory of the oil slick, particularly in coastal regions where the interaction between waves and seabed topography can intensify the drift effect (Al-Rabeh et al., 1993).

The inclusion or exclusion of Stokes drift in simulations can lead to considerable differences in results, affecting the prediction of where the oil slick will move over time. Modeling studies that incorporate this component tend to provide more realistic predictions in scenarios where waves play a dominant role in transporting the oil, particularly in coastal areas with strong wave activity or during adverse weather conditions (Reed, 1999; Daniel, 2003, Wang et al., 2019; Paris et al., 2013; Carrateli et al., 2011).

Both wind factors, drift and angle, are directly related to wind speed. As described by Reed et al., (1994), a drift factor of 3% is ideal for winds of up to 6 m/s, which is the value that best represents the case study. The equation described by Al-Rabeh et al. (1993) demonstrates that wind deflection decreases as wind speed increases. For speeds above 15 m/s, oil transport tends to be parallel to the wind direction.

The application of different values for drift correction and wind angle resulted in significant variations in the trajectories of oil spills. In the case study, the actual drift value of 3% and a drift angle of -25 represented the event most accurately, confirming the effectiveness of wind correction in numerical oil dispersion models.

Considering wind correction factors in oil dispersion models is crucial for the accuracy of simulations. Deng et al., (2016) emphasize the importance of wind drift correction and reinforce the need for precise adjustments to accurately simulate the behavior of oil spills. Sebastião and Soares Guedes (2006) demonstrate how considering the effects of wind and waves is fundamental for modeling oil trajectories in coastal areas, while Zhao et al., (2018) highlight the influence of these parameters, showing how proper correction of wind and

currents affects the accuracy of oil spill simulations. These studies illustrate that the precise inclusion of wind correction factors is vital for improving the accuracy and reliability of oil dispersion models.

In Dominicis et al., (2013), the importance of wind corrections in oil spill simulations using MEDSLIK II is underscored. The validation study shows that adjusting these parameters is essential for accurately simulating spill trajectories, especially when using lower-resolution hydrodynamic models. A 1% correction of wind intensity proved nearly equivalent to considering Stokes drift velocity, highlighting the importance of these corrections for improving simulation accuracy in marine environments. High-resolution models may reduce the need for such corrections, but they remain crucial for lower-resolution models and in coastal areas where wave effects are relevant.

## 4.2) Scenarios and comparison with SAR data

In deep water simulations, wind is considered the primary force influencing surface dynamics, having a more pronounced effect on the results of the high-resolution ROMS model compared to the global GLORYS12V1 model. This suggests that the regional model, by better capturing the local interactions between wind and water, more clearly reveals how wind forces affect ocean circulation, temperature, and vertical mixing.

In the GLORYS12V1 data, a more intense transport was observed over the shelf, resulting in the oil slick being displaced toward the coast when wind corrections were applied. In contrast, in the ROMS data, transport over the shelf was less intense, suppressing the influence of oceanic transport and increasing the predominance of wind force. As a result, the wind displaced the slick to a position further north, moving away from the desired coastal point.

The scenario using the GLORYS12V1 model with wind corrections demonstrated the best performance in the case study, contrary to the expectation that a higher-resolution hydrodynamic forcing, like that of ROMS, would perform better. This is believed to be due to the pre-existing ROMS simulation used, which did not have an ideal spin-up time, compromising the accuracy of the results. Overall, the importance of wind corrections was evident in both scenarios, reinforcing the need for their application to improve the accuracy of oil dispersion simulations.

## 5. Conclusion

The present study demonstrated the complexity and importance of adjusting modeling variables in MEDSLIK II to improve the quality of oil spill simulations. The sensitivity tests conducted, focusing on parameters such as the API gravity of the oil, leakage rate, and hydrodynamic and meteorological forcings, highlighted the influence of these variables on the behavior of oil slicks.

Firstly, the analysis of API gravity revealed that, although it does not affect advective processes, it has a significant impact on the evaporation and dispersion rates of oil in the water column. Oils with a higher API gravity, being lighter, exhibited higher evaporation rates, quickly reducing the amount of oil on the surface, while heavier oils tend to disperse more in the water column.

On the other hand, simulations with different leakage rates indicated that the final location of the slicks was not altered, but the concentration of oil on the surface varied according to the applied rate. However, there was a need to adjust the number of Lagrangian particles in the model based on these variations, an aspect that may have compromised the accuracy of the simulations in scenarios with high leakage rates.

Finally, the comparison of simulations with SAR data highlighted the importance of testing different hydrodynamic forcings to identify which best represents the behavior of the spill. The proposed methodology, involving the integration of numerical data and remote sensing, proved effective for the detection and prediction of oil slicks, establishing itself as an important tool for environmental management along the Brazilian coast.

The methodology consolidation in this study involved integrating remote sensing products, numerical modeling, and geoprocessing software to compare simulations performed with the MEDSLIK II model. The method demonstrated efficiency in the comparative analysis between numerical model outputs and satellite imagery. We developed a Python code that can be used alongside MEDSLIK II in future research. This code generates output figures for mass balance, creates shapefiles of feature trajectories, and plots current and wind data, facilitating the interpretation of results. It will be available at <https://github.com/isadoracarvalho/OilTools.git>

## 6. CRediT Author statement

**Isadora Carvalho:** Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Writing - Original Draft, Visualization and Project administration. **Luís Felipe Mendonça:** Conceptualization, Writing - Review & Editing, Supervision and Project administration **Elisa Fernandes:** Conceptualization, Resources, Writing - Review & Editing, Supervision and Project administration.

## 7. Acknowledgements

I would like to express my gratitude to the Human Resources Program of the ANP for the Oil, Natural Gas, and Biofuels Sector - PRH-ANP, funded by the São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brazil, under process number 2024/10523-5. I would also like to thank my advisors, Elisa and Luís Felipe, for their guidance and teachings throughout the development of this research project.

## 8. Declaration of conflicts of interest

The authors declare that they have no known financial interests or personal relationships that could have influenced the work reported in this paper.

## 9. References

1. ABASCAL, Ana J. et al. Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: A northwest European continental shelf case study. **Marine pollution bulletin**, v. 119, n. 1, p. 336-350, 2017.
2. ALPERS, Werner; HOLT, Benjamin; ZENG, Kan. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. **Remote sensing of environment**, v. 201, p. 133-147, 2017.
3. AL-RABEH, Ala et al. On mathematical and empirical models for surface oil spill transport in the Gulf. **Marine pollution bulletin**, v. 27, p. 71-77, 1993.
4. AÑAZCO, Jaime R.; FRANÇA, Gutemberg B. Modelagem de estruturas convergentes do campo superficial de correntes na Bacia de Campos (RJ): por sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 21, p. 85-104, 2003.
5. ASCE. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 122, n. 11, p. 594-609, 1996.
6. ASIF, Zunaira et al. Environmental impacts and challenges associated with oil spills on shorelines. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 6, p. 762, 2022.
7. AZEVEDO, Alberto et al. Sistema integrado de modelação de derrames de hidrocarbonetos no meio marinho. 2011.

8. BEEGLE-KRAUSE, J. General environment of NOAA oil spill modeling (GNOME): a new spill trajectory model. In: **International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute**, p. 865-871, 2001. [Google Scholar](#) [[CrossRef](#)]
9. BERRY, Alan; DABROWSKI, Tomasz; LYONS, Kieran. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine pollution bulletin**, v. 64, n. 11, p. 2489-2501, 2012.
10. BILSKIE, Matthew V. et al. Dynamic simulation and numerical analysis of hurricane storm surge under sea level rise with geomorphologic changes along the northern Gulf of Mexico. **Earth's Future**, v. 4, n. 5, p. 177-193, 2016.
11. BREKKE, Camilla; SOLBERG, Anne HS. Feature extraction for oil spill detection based on SAR images. In: **Image Analysis: 14th Scandinavian Conference, SCIA 2005, Joensuu, Finland, June 19-22, 2005. Proceedings 14**. Springer Berlin Heidelberg, p. 75-84, 2005a.
12. BREKKE, Camilla; SOLBERG, Anne HS. Oil spill detection by satellite remote sensing. **Remote sensing of environment**, v. 95, n. 1, p. 1-13, 2005b.
13. CARRACEDO, P. et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system. **Marine Pollution Bulletin**, v. 53, n. 5-7, p. 350-360, 2006.
14. CARRATELLI, Eugenio Pugliese; DENTALE, Fabio; REALE, Ferdinando. On the effects of wave-induced drift and dispersion in the Deepwater Horizon oil spill. **Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise, Geophysical. Monograph Series**, v. 195, p. 197-204, 2011.
15. CEKIRGE, H. M.; PALMER, S. L. Mathematical modeling of oil spilled into marine waters. In: **Oil Spill Modelling and Processes**. Londres: WITpress, 2001.
16. CHENG, Yongcun et al. Monitoring of oil spill trajectories with COSMO-SkyMed X-band SAR images and model simulation. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 7, p. 2895-2901, 2014.
17. CLEMENTI, Emanuela et al. The new Mediterranean Sea analysis and forecasting system including tides: Description and validation. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2021. p. EGU21-13531.
18. **Copernicus Climate Change Service (CMEMS)**. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Available in: [CMEMS](#) (Access: August 10, 2024).
19. **Copernicus Marine Service (CMEMS)**. Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast atualizado diariamente, Copernicus Marine Service. Available in: [CMEMS](#) (Access: August 10, 2024).
20. **Copernicus Marine Service (CMEMS)**. Mediterranean Sea Physics Analysis and Forecast, Copernicus Marine Service. Available in: [CMEMS](#) (Access: August 10, 2024).
21. **Copernicus Marine Service (CMEMS)**. GLOBAL\_MULTIYEAR\_WAV\_001\_032: Multi-year global wave reanalysis. Available in: [CMEMS](#) (Access: August 20, 2024)

22. DANIEL, Pierre et al. Improvement of drift calculation in Mothy operational oil spill prediction system. In: **International Oil Spill Conference**. American Petroleum Institute, 2003. p. 1067-1072.
23. DE DOMINICIS, Michela et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1851-1869, 2013a.
24. DE DOMINICIS, M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 2: Numerical simulations and validations. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1871-1888, 2013b.
25. DE MOURA, Najla Vilar Aires et al. Deep-water oil-spill monitoring and recurrence analysis in the Brazilian territory using Sentinel-1 time series and deep learning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 107, p. 102695, 2022.
26. DENG, Zengan et al. Bohai Sea oil spill model: a numerical case study. **Marine Geophysical Research**, v. 34, p. 115-125, 2013.
27. DE OLIVEIRA, Bernardo Lopes Almeida; NETTO, Theodoro Antoun; DE FREITAS ASSAD, Luiz Paulo. Three-dimensional oil dispersion model in the Campos Basin, Brazil. **Environmental Technology**, v. 39, n. 3, p. 277-287, 2018. [DOI](#)
28. DE PADOVA, Diana et al. Synergistic use of an oil drift model and remote sensing observations for oil spill monitoring. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 5530-5543, 2017.
29. DE SOUZA JÚNIOR, José Milton Neves et al. Dispersion analysis of the 2017 Persian Gulf oil spill based on remote sensing data and numerical modelling. **Marine Pollution Bulletin**, v. 205, p. 116639, 2024.
30. DOS SANTOS PROTASIO, Lianne et al. Hydrodynamics simulation of a hypothetical oil spill in the Cumuruxatiba Basin (BA) with the MEDSLIK-II model. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 04, p. 2058-2072, 2022.
31. FINGAS, Merv. **The basics of oil spill cleanup**. CRC press, 2002.
32. FINGAS, Merv; BROWN, Carl. Review of oil spill remote sensing. **Marine pollution bulletin**, v. 83, n. 1, p. 9-23, 2014.
33. FINGAS, Mervin (Ed.). **Oil spill science and technology**. Gulf professional publishing, 2016.
34. FINGAS, Merv; BROWN, Carl E. A review of oil spill remote sensing. **sensors**, v. 18, n. 1, p. 91, 2017.
35. FUSTES, Diego et al. A cloud-integrated web platform for marine monitoring using GIS and remote sensing. Application to oil spill detection through SAR images. **Future Generation Computer Systems**, v. 34, p. 155-160, 2014.
36. GITHUB. OpenDrift. Available in: [GITHUB](#) (Access: August 20, 2024).
37. GROUP, The Wamdi. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. **Journal of physical oceanography**, v. 18, n. 12, p. 1775-1810, 1988. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

38. GUO, W. J.; WANG, Y. X. A numerical oil spill model based on a hybrid method. **Marine pollution bulletin**, v. 58, n. 5, p. 726-734, 2009.
39. HAIDVOGEL, D. B. et al. Ocean forecasting with the Regional Ocean Modeling System (ROMS). **Oceanography**, v. 21, n. 1, p. 48-59, 2008.
40. HOWLETT, E.; JAYKO, K.; SPAULDING, M. **Interfacing real-time information with OILMAP**. 1993.
41. HUANG, James C. A review of the state-of-the-art of oil spill fate/behavior models. In: **International Oil Spill Conference**. American Petroleum Institute, 1983. p. 313-322.
42. HYUN, Kyung Hoon; HE, Ruoying. Coastal upwelling in the South Atlantic Bight: A revisit of the 2003 cold event using long term observations and model hindcast solutions. **Journal of Marine Systems**, v. 83, n. 1-2, p. 1-13, 2010. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. KERAMEA, Panagiota et al. Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. **Journal of marine science and engineering**, v. 9, n. 2, p. 181, 2021.
44. LIU, Yonggang et al. Tracking the Deepwater Horizon oil spill: A modeling perspective. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 92, n. 6, p. 45-46, 2011.
45. LU, Yingcheng et al. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories. **Marine Geodesy**, v. 36, n. 3, p. 334-346, 2013.
46. MACKAY, Donald; PATERSON, S.; TRUDEL, K. **A mathematical model of oil spill behaviour**. Environment Canada, Environmental Protection Service, Environmental Impact Control Directorate, Environmental Emergency Branch, Research and Development Division, 1980.
47. MARGHANY, Maged. RADARSAT automatic algorithms for detecting coastal oil spill pollution. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 3, n. 2, p. 191-196, 2001.
48. MARTA-ALMEIDA, Martinho et al. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine pollution bulletin**, v. 71, n. 1-2, p. 139-151, 2013.
49. MCCAY, Deborah French et al. Modeling oil fate and subsurface exposure concentrations from the Deepwater Horizon oil spill. In: **Proceedings of the 39th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Ottawa, ON, Canada**. 2016. p. 7-9. [[Google Scholar](#)]
50. MISHRA, Aditya Kumar; KUMAR, G. Suresh. Weathering of oil spill: modeling and analysis. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 435-442, 2015.
51. MOHRIAK, W. U. et al. Petroleum geology of the Campos Basin, offshore Brazil. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 50, n. 1, p. 119-141, 1990.
52. NGENE, Stanley et al. Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, v. 1, n. 3, p. 64-73, 2016.
53. NOBRE, Paulo et al. The 2019 northeast Brazil oil spill: scenarios. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. suppl 2, p. e20210391, 2022.

54. **NOAA National Centers for Environmental Information.** Climate Forecast System. Available in: [NOAA](#) (Access: August 20, 2024).
55. **NOAA National Centers for Environmental Information.** Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS). Available in: [NOAA](#). (Access: August 20, 2024).
56. **NOAA. Global Forecast System (GFS).** Available in: [NOAA](#) (Access: August 10, 2024).
57. **NOAA National Centers for Environmental Information.** North American Mesoscale (NAM) Weather and Climate Models. Available in: [NOAA](#) (Access: August 20, 2024).
58. **NOAA National Centers for Environmental Prediction.** NCEP Reanalysis. Available in: [NOAA](#) (Access: August 20, 2024).
59. OGUNBIYI, Oluwaseun et al. Oil spill management to prevent desalination plant shutdown from the perspectives of offshore cleanup, seawater intake and onshore pretreatment. **Desalination**, p. 116780, 2023.
60. PARIS, C. B.; HELGERS, J.; VAN SEBILLE, E.; SRINIVASAN, A. Connectivity modeling system: A probabilistic tool to predict the impact of ocean currents on connectivity of marine populations. **Environmental Modelling & Software**, v. 42, p. 47-54, 2013.
61. PENG, Jialong et al. Risk Assessment of Oil Spills along the Coastline of Jiaozhou Bay Using GIS Techniques and the MEDSLIK-II Model. **Water**, v. 16, n. 7, p. 996, 2024.
62. **PETROBRAS.** Exploração e produção. Available in: [PETROBRAS](#) (Access: August 20, 2024).
63. PISANO, Andrea et al. An oceanographic survey for oil spill monitoring and model forecasting validation using remote sensing and in situ data in the Mediterranean Sea. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 133, p. 132-145, 2016.
64. QUEIROZ, Syumara et al. Simulation of oil spills near a tropical island in the equatorial southwest atlantic. 2019.
65. REED, Mark; TURNER, Chris; ODULO, Anatoly. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 1, n. 2, p. 143-157, 1994.
66. REED, Mark; AAMO, Ole Morten; DALING, Per S. Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, n. 1, p. 67-74, 1995.
67. REED, Mark et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 5, n. 1, p. 3-16, 1999.
68. SEBASTIAO, P.; SOARES, C. Guedes. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in a coastal zone. **Journal of Marine Systems**, v. 63, n. 3-4, p. 257-269, 2006.
69. SEPP NEVES, Antonio Augusto; PINARDI, Nadia; MARTINS, Flavio. IT-OSRA: applying ensemble simulations to estimate the oil spill risk associated to operational and accidental oil spills. **Ocean Dynamics**, v. 66, p. 939-954, 2016.
70. SINGHA, Suman; VESPE, Michele; TRIESCHMANN, Olaf. Automatic Synthetic Aperture Radar based oil spill detection and performance estimation via a semi-automatic operational service benchmark. **Marine pollution bulletin**, v. 73, n. 1, p. 199-209, 2013.

71. STRINGARI, Caio Eadi et al. Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. 2013.
72. SPAULDING, Malcolm L. State of the art review and future directions in oil spill modeling. **Marine pollution bulletin**, v. 115, n. 1-2, p. 7-19, 2017.
73. SKAMAROCK, William C. et al. A description of the advanced research WRF version 4. **NCAR tech. note ncar/tn-556+ str**, v. 145, 2019. [[Google Scholar](#)]
74. TOPOUZELIS, Konstantinos et al. Detection and discrimination between oil spills and look-alike phenomena through neural networks. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 4, p. 264-270, 2007.
75. TORRES, Daniel Henriques Alves et al. Oil spill simulation and analysis of its behavior under the effect of weathering and chemical dispersant: a case study of the Bacia de Campos—Brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 10, p. 521, 2020.
76. VASCONCELOS, Rodrigo N. et al. Oil spill detection and mapping: A 50-year bibliometric analysis. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3647, 2020.
77. WANG, S. D.; SHEN, Y. M.; ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, v. 32, n. 13, p. 1556-1571, 2005.
78. WANG, Z. D. et al. Oil composition and properties for oil spill modelling. 2005.
79. WANG, Kun et al. Numerical simulation of Bohai oil spill in the winter sea ice period. **China Ocean Engineering**, v. 33, n. 2, p. 185-197, 2019.
80. YANG, Yiqiu et al. The influence of Stokes drift on oil spills: Sanchi oil spill case. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 40, p. 30-37, 2021.
81. ZHANG, Yuanzhi; LI, Yu; LIN, Hui. Oil-spill pollution remote sensing by synthetic aperture radar. **Advanced geoscience remote sensing**, v. 2, p. 27-50, 2014.
82. ZHANG, Baiyu et al. Marine oil spills—oil pollution, sources and effects. In: **World seas: an environmental evaluation**. Academic Press, 2019. p. 391-406.
83. ZHANG, Xuedong et al. Evaluation of multi-source forcing datasets for drift trajectory prediction using Lagrangian models in the South China Sea. **Applied Ocean Research**, v. 104, p. 102395, 2020. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
84. ZHAO, Jun et al. Exploring the potential of optical remote sensing for oil spill detection in shallow coastal waters—a case study in the Arabian Gulf. **Optics Express**, v. 22, n. 11, p. 13755-13772, 2014.
85. ZHENG, Xiao. **Marine oil spill simulation and uncertainty analysis—a case study in the Newfoundland offshore area**. 2017. Doctoral Thesis. Memorial University of Newfoundland.
86. ZODIATIS, George et al. Operational oil spill modelling assessments. In: **Marine hydrocarbon spill assessments**. Elsevier, 2021. p. 145-197.

## **Capítulo VI: Síntese da discussão & conclusões**

O estudo destacou a importância de ajustes precisos nas variáveis de modelagem do MEDSLIK II para simular adequadamente derramamentos de óleo. Foram realizados testes de sensibilidade que abordaram fatores como o grau API, a taxa de vazamento, as correções de deriva de Stokes e de vento. Além da aplicação de uma metodologia para comparar os resultados das simulações numéricas com os dados SAR.

Em relação ao grau API, constatou-se que, embora não influencie diretamente os processos advectivos da mancha de óleo, ele desempenha um

papel essencial na evaporação e dispersão na coluna d'água. Óleos mais leves, com maior grau API, apresentaram taxas de evaporação mais altas, reduzindo rapidamente a quantidade de óleo na superfície. Por outro lado, óleos mais pesados, com menor grau API, mostraram maior dispersão em profundidade, influenciando a dinâmica das manchas de óleo.

Quanto à taxa de vazamento, foi observado que, apesar de não alterar a localização final das manchas de óleo, ela impacta a concentração de óleo na superfície. No entanto, a falta de ajuste no número de partículas lagrangianas em função das taxas de vazamento pode ter comprometido a precisão das simulações, especialmente em cenários com alta taxa de vazamento. Esse aspecto requer maior atenção em estudos futuros para melhorar a representação das manchas.

No que diz respeito às correções de deriva de Stokes e vento, ambas se mostraram cruciais para a modelagem. A deriva de Stokes, ao considerar o movimento das partículas induzido por ondas, aprimorou a previsão das trajetórias das manchas, especialmente em regiões costeiras. Já as correções de vento demonstraram ser fundamentais, uma vez que ajustes na intensidade e no ângulo do vento influenciam significativamente os resultados das simulações. Esses fatores são particularmente relevantes em modelos hidrodinâmicos de menor resolução.

A comparação de cenários com dados SAR permitiu avaliar a influência das forçantes hidrodinâmicas sobre as simulações. O modelo GLORYS12V1 apresentou o melhor desempenho no estudo de caso, contradizendo a expectativa de que resoluções mais altas, como no ROMS, seriam superiores. Essa diferença foi atribuída ao tempo de *spin-up* insuficiente no modelo ROMS,

que comprometeu a precisão dos resultados. No relatório do IBAMA sobre o incidente da P-53, consta que foram observadas manchas de óleo nas praias de Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro. Contudo, os resultados apresentados neste trabalho indicam que o óleo atingiu outra região da costa. Essa diferença nos resultados pode ser explicada pelo fato de que, nas simulações realizadas, o vento atuou como o principal fator determinante na trajetória das manchas de óleo.

A análise concluiu que a modelagem de derramamentos de óleo é um processo complexo que exige ajustes em variáveis como o grau API, fatores de correção e as forçantes hidrodinâmicas e meteorológicas para alcançar simulações mais precisas. A integração de dados numéricos com sensoriamento remoto demonstrou ser eficaz na previsão do comportamento de manchas de óleo, consolidando-se como uma ferramenta promissora para a gestão ambiental na costa brasileira.

Por fim, o estudo propôs uma metodologia que integra sensoriamento remoto, modelagem numérica e geoprocessamento. Foi desenvolvido um código em *Python* para ser usado em conjunto com o MEDSLIK II, permitindo gerar visualizações do balanço de massa, shapefiles das trajetórias das manchas e gráficos de correntes e ventos. O código está disponível no GitHub (<https://github.com/isadoracarvalho/OilTools.git>) e pode ser utilizado em futuros trabalhos, oferecendo ferramentas que facilitam a análise e a interpretação dos resultados.

O MEDSLIK II é um modelo de código aberto que, embora eficiente, apresenta algumas limitações, especialmente no processo de configuração da simulação. Esse processo pode ser mais demorado em comparação com

modelos de código fechado, que costumam contar com interfaces gráficas mais sofisticadas. A metodologia adotada pelo MEDSLIK II tem um viés acadêmico, mas ainda assim pode ser aplicada no setor industrial, oferecendo uma solução viável, acessível e de baixo custo para modelagens de emergência. Além disso, as figuras geradas com o OilTools facilitam a interpretação dos resultados.

## Capítulo VII: Referências

ABOUSAIDI, Pooya; GHAEINI-HESSAROEYEH, Mahnaz; FADAEI-KERMANI, Ehsan. Two-dimensional numerical modeling of oil spill fate in coastal waters using Telemac-2D. *Irrigation and Water Engineering*, v. 11, n. 2, p. 251-265, 2020.

**AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE)**. Relatório do Mercado Petrolífero – janeiro de 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/oil-market-report-omr>. Acesso em: 17 de agosto de 2024.

**AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP)**. Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural – dezembro de 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2024/agosto.pdf>. Acesso em: 5 de agosto e 2024.

ALPERS, W.; HOLT, B.; ZENG, K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. *Remote Sensing of Environment*, v. 201, p. 133-147, 2017.

**ASCE TASK COMMITTEE ON MODELING OF OIL SPILLS**. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 122, n. 11, p. 594-609, 1996.

BEEGLE-KRAUSE, J. Ambiente geral de modelagem de óleo NOAA (GNOME): um novo modelo de trajetória de derramamento. Em: Conferência internacional de derramamento de óleo. **Instituto Americano de Petróleo**, 2001. p. 865-871.

BERRY, Alan; DABROWSKI, Tomasz; LYONS, Kieran. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine pollution bulletin**, v. 64, n. 11, p. 2489-2501, 2012.

BREKKE, C.; SOLBERG, A. H. Oil spill detection by satellite remote sensing. **Remote sensing of environment**, v. 95, n. 1, p. 1-13, 2005.

CARRACEDO, P. et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system. **Marine Pollution Bulletin**, v. 53, n. 5-7, p. 350-360, 2006.

CARVALHO, Gustavo de Araujo et al. Oil spills or look-alikes? Classification rank of surface ocean slick signatures in satellite data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3466, 2021.

CHEN, H.; LI, D.; LI, X. Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, v. 19, p. 282-291, 2007.

COHEN, Maurie J. Economic impact of an environmental accident: A time-series analysis of the Exxon Valdez oil spill in southcentral Alaska. **Sociological Spectrum**, v. 13, n. 1, p. 35-63, 1993.

COUNCIL, Natural Resource et al. Oil in the sea III: Inputs, fates, and effects. US: **National Academies Press** (US), 2003.

**COPERNICUS MARINE SERVICE. GLOBAL\_MULTIYEAR\_PHY\_001\_030:**  
Product description. Disponível em:  
[https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_001\\_030/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description). Acesso em: 8 de agosto de 2024.

DE DOMINICIS, Michela et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1851-1869, 2013a.

DE DOMINICIS, M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 2: Numerical simulations and validations. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1871-1888, 2013b.

DE MOURA, Nájla Vilar Aires et al. Revisão Sobre O Uso De Sensoriamento Remoto Na Detecção De Vazamentos De Óleo No Mar. **Caminhos De Geografia**, v. 21, n. 75, p. 214-224, 2020.

DELVIGNE, Gerardus Athenasius Leonardus; SWEENEY, C\_E. Natural dispersion of oil. **Oil and Chemical Pollution**, v. 4, n. 4, p. 281-310, 1988.

ESPEDAL, H. A.; JOHANNESSEN, O. M. Cover: Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR). **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n.11, p. 2141-2144, 2000.

FAY, James A. The spread of oil slicks on a calm sea. In: Oil on the Sea: Proceedings of a symposium on the scientific and engineering aspects of oil pollution of the sea, sponsored by Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution and held at Cambridge, Massachusetts, May 16, 1969. Boston, MA: Springer US, 1969. p. 53-63.

FINGAS, Mervin (Ed.). **Oil spill science and technology**. Gulf professional publishing, 2010.

FINGAS, Merv; BROWN, Carl. Review of oil spill remote sensing. **Marine pollution bulletin**, v. 83, n. 1, p. 9-23, 2014.

FINGAS, Merv; FIELDHOUSE, Ben. Formation of water-in-oil emulsions and application to oil spill modelling. **Journal of hazardous materials**, v. 107, n. 1-2, p. 37-50, 2000.

FISCELLA, B.; GIANCASPRO, A.; NIRCHIO F.; PAVESE, P.; TRIVERO, P. Oil spill detection using marine SAR images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 18, p. 3561-3566, 2000.

FRENCH-MCCAY, Deborah P. Development and application of an oil toxicity and exposure model, OilToxEx. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 21, n. 10, p. 2080-2094, 2002.

GABARDO, I. T. et al. Oil spills in a tropical country—Brazilian case studies. In: International Oil Spill Conference. **American Petroleum Institute**, 2003. p. 1039-1049.

GARCIA-PINEDA, O.; MACDONALD, I.; HU, C.; SVEJKOVSKY, J.; HESS, M.; DUKHOVSKOY, D.; MOREY, S. L. Detection of floating oil anomalies from the Deepwater Horizon oil spill with synthetic aperture radar. **Oceanography**, v. 26, n. 2, p. 124-137, 2013.

GENOVEZ, Patrícia; PALMEIRA, Felipe Leonardo Barbosa; BENTZ, Cristina Maria. Detecção e Monitoramento de Óleo através da Utilização Integrada de Imagens de Satélite, Verificações de Campo e Modelagem de Deriva de Óleo: Uma Abordagem Operacional. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto—SBSR**, Natal-RN, Brasil, v. 25, p. 5235-5242, 2009.

GONÇALVES, Leandra R. et al. The Brazilian Blue Amazon under threat: Why has the oil spill continued for so long?. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, p. e0077, 2020.

GUO, W. J.; WANG, Y. X. A numerical oil spill model based on a hybrid method. **Marine pollution bulletin**, v. 58, n. 5, p. 726-734, 2009.

GUZMÁN, Héctor M.; JACKSON, Jeremy BC; WEIL, Ernesto. Short-term ecological consequences of a major oil spill on Panamanian subtidal reef corals. **Coral reefs**, v. 10, p. 1-12, 1991.

HAJABBASI, Mohammad Ali. Importance of soil physical characteristics for petroleum hydrocarbons phytoremediation: **A review. African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 11, p. 394-405, 2016.

HOWLETT, E.; JAYKO, K.; SPAULDING, M. Interfacing real-time information with OILMAP. 1993.

IVSHINA, Irena B. et al. Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 17, n. 7, p. 1201-1219, 2015.

JERNELÖV, Arne; LINDÉN, Olof. Ixtoc I: a case study of the world's largest oil spill. **Ambio**, p. 299-306, 1981.

KERAMEA, Panagiota et al. Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. **Journal of marine science and engineering**, v. 9, n. 2, p. 181, 2021.

KERAMEA, Panagiota et al. Modes of operation and forcing in oil spill modeling: state-of-art, deficiencies and challenges. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 6, p. 1165, 2023.

LALUDE, G. Importance of oil to the global community. **Global Journal of Human-Social Science**, v. 15, n. 1, 2015.

LEHR, William J. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior. **Advances in Ecological Sciences**, v. 9, p. 51-90, 2001.

MACKAY, D.; PANKSEPP, P. W. The transport and fate of oil spills on the sea surface. In: INTEROCEANIC SCIENTIFIC COMMITTEE. **International oil spill conference**. Vol. 1. 1993. p. 317-324.

MARCHESIELLO, Patrick; MCWILLIAMS, James C.; SHCHEPETKIN, Alexander. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean modelling*, v. 3, n. 1-2, p. 1-20, 2001.

MARQUES, Wiliam Correa et al. Implementação e aplicação de um sistema preditivo e assistencial a derramamentos de óleo na costa brasileira. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2020.

MCCAY, Deborah French et al. Modeling oil fate and subsurface exposure concentrations from the Deepwater Horizon oil spill. In: **Proceedings of the 39th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Ottawa, ON, Canada**. 2016. p. 7-9. [Google Scholar]

MICHEL, Jacqueline; RUTHERFORD, Nicolle. Impacts, recovery rates, and treatment options for spilled oil in marshes. **Marine Pollution Bulletin**, v. 82, n. 1-2, p. 19-25, 2014.

LOYA, Y.; RINKEVICH, B. Effects of oil pollution on coral reef communities. **Mar. Ecol. Prog. Ser**, v. 3, n. 16, p. 180, 1980.

MUTHER, Temoor et al. Unconventional hydrocarbon resources: geological statistics, petrophysical characterization, and field development strategies. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 12, n. 6, p. 1463-1488, 2022.

NAGHEEBY, M.; KOLAHDOOZAN, M. Numerical modeling of two-phase fluid flow and oil slick transport in estuarine water. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 7, p. 771-784, 2010.

NEFF, Jerry M. **Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water**. Elsevier, 2002.

NGENE, Stanley et al. Environmental and economic impacts of crude oil and natural gas production in developing countries. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, v. 1, n. 3, p. 64-73, 2016.

PIATT, John F.; ANDERSON, Paul. Response of Common Murres to the Exxon Valdez Oil Spill and. In: **American fisheries society symposium**. 1996. p. 737.

PETERSON, Charles H. et al. Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. **Science**, v. 302, n. 5653, p. 2082-2086, 2003.

PISANO, A.; DE DOMINICIS, M.; BIAMINO, W.; BIGNAMI, F.; GHERARDI, S.; COLAO, F.; COPPINI, G.; MARULLO, S.; SPROVIERI, M.; TRIVERO, P.; ZAMBIANCHI, E. An oceanographic survey for oil spill monitoring and model forecasting validation using remote sensing and in situ data in the Mediterranean Sea. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 133, p. 132- 145, 2016.

PLATA, Desiree L. et al. More than a decade of hydraulic fracturing and horizontal drilling research. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 21, n. 2, p. 193-194, 2019.

REED, Mark; TURNER, Chris; ODULO, Anatoly. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 1, n. 2, p. 143-157, 1994.

REED, Mark; AAMO, Ole Morten; DALING, Per S. Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, n. 1, p. 67-74, 1995.

REED, Mark et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 5, n. 1, p. 3-16, 1999.

SHCHEPETKIN, Alexander F.; MCWILLIAMS, James C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*, v. 9, n. 4, p. 347-404, 2005.

SINGHA, Suman; BELLERBY, Tim J.; TRIESCHMANN, Olaf. Satellite oil spill detection using artificial neural networks. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**, v. 6, n. 6, p. 2355-2363, 2013.

STRINGARI, Caio Eadi et al. Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. 2013.

SZEWCZYK, Susana Beatrís Oliveira. Processos envolvidos em um derramamento de óleo no mar. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO)**. 2006.

MISHRA, Aditya Kumar; KUMAR, G. Suresh. Weathering of oil spill: modeling and analysis. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 435-442, 2015.

TOPOUZELIS, Konstantinos et al. Detection and discrimination between oil spills and look-alike phenomena through neural networks. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 4, p. 264-270, 2007.

VASCONCELLOS LOPES, Bruno et al. Numerical study of oil spill in the Patos Lagoon under flood and ebb conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 7, n. 1, p. 4, 2019.

WANG, Shou-Dong et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, v. 35, n. 5-6, p. 503-510, 2008.

WANG, Zhendi; FINGAS, Merv. Differentiation of the source of spilled oil and monitoring of the oil weathering process using gas chromatography-mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, v. 712, n. 2, p. 321-343, 1995.

WARNER, John C.; LERCZAK, James A. Modelagem numérica de um estuário: Uma avaliação de habilidade abrangente. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 110, n. C5, 2005.

WEBLER, T.; Lord, F. Planning for the Human Dimensions of Oil Spills and Spill Response. *Environ. Manag.* 2010, 45, 723–738

WHITE, Helen K. et al. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 50, p. 20303-20308, 2012.

WHITE, H. K., et al. (2016). "Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(50), 20303-20308.

WIENS, John A. et al. Changing habitat and habitat use by birds after the Exxon Valdez oil spill, 1989–2001. **Ecological Applications**, v. 14, n. 6, p. 1806-1825, 2004.

YU, F.; SUN, W.; LI, J.; ZHAO, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, G. An improved Otsu method for oil spill detection from SAR images. *Oceanologia*, v. 59, n. 3, p. 311-317, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.03.005>

ZACHARIAS, Daniel Constantino; FORNARO, Adalgiza. Área de exploração de petróleo na costa brasileira: uma visão geral poluição por hidrocarbonetos. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, p. e2569, 2020.

ZAFIRAKOU, Antigoni. Oil spill dispersion forecasting models. **Monitoring of marine pollution**, 2018.

ZHANG, Y.; LI, Y.; LIN, H. Oil-spill pollution remote sensing by synthetic aperture radar. In: *Advanced Geoscience Remote Sensing*. p. 27-50, 2014.

ZODIATIS, George et al. Oil spill forecasting (prediction). 2017.