



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Mariana Luís Rosa

Derrames de Hidrocarbonetos no Mar
Aplicação da Deriva Inversa para a Otimização da
Parametrização do Modelo OpenDrift

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha



Alfeite
2025



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Mariana Luís Rosa

Derrames de Hidrocarbonetos no Mar
Aplicação da Deriva Inversa para a Otimização da
Parametrização do Modelo OpenDrift

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

Orientação de: CTEN TSN-EIO Rui Pedro Gonçalves de Deus

Co-orientação de: INVA Luísa Andrade e Sousa Lamas

A Aluna Mestranda,

O Orientador,

Mariana Rosa

Rui Deus

Alfeite

2025

Aos meus pais, Maria e Libânio, pelo amor, apoio e exemplo de vida que sempre
me transmitiram.

Aos meus camaradas e amigos, pela amizade, companheirismo e incentivo
constante ao longo desta caminhada.

Agradecimentos

A realização desta dissertação representa o culminar de um percurso exigente, que só foi possível graças ao apoio, incentivo e contributo de várias pessoas e instituições, às quais manifesto o meu profundo reconhecimento.

Em primeiro lugar, expresso a minha sincera gratidão aos meus orientadores, CTEN Gonçalves de Deus e Doutora Luísa Lamas, pela orientação científica rigorosa, pela disponibilidade e pela dedicação demonstrada ao longo de todas as fases deste trabalho. A qualidade das suas sugestões, o acompanhamento próximo e a confiança depositada foram determinantes para o desenvolvimento e a concretização desta investigação.

Ao CGEOMETOC e à Divisão de Oceanografia, agradeço a colaboração prestada, a partilha de conhecimentos e o ambiente de trabalho estimulante, que muito contribuíram para a aquisição de competências e para a consolidação do presente estudo.

À Escola Naval, expresso o meu reconhecimento pela formação sólida proporcionada e pelo apoio institucional ao longo deste percurso académico. Aos meus camaradas de curso, agradeço a camaradagem, a entreaajuda e os momentos partilhados, que marcaram de forma indelével esta etapa da minha vida.

À minha família e aos meus amigos, deixo um agradecimento profundo pelo incentivo constante, pela paciência nos momentos de maior exigência e, sobretudo, pelo apoio incondicional que sempre me transmitiram. O vosso exemplo, compreensão e motivação foram fundamentais para que conseguisse ultrapassar os desafios e alcançar a concretização desta dissertação.

Resumo

Este estudo analisa a origem provável de uma mancha de poluição detetada por satélite a 5 de março de 2022, após o naufrágio do navio *Felicity Ace* ao largo dos Açores. Para tal, foram realizadas simulações de deriva inversa (*backtracking*) com o modelo numérico OpenDrift, utilizando o módulo OpenOil para representar o transporte superficial de hidrocarbonetos.

Foram testadas quatro hipóteses, combinando duas posições iniciais (noroeste e nordeste da mancha) e duas janelas temporais (4 e 9 dias), com diferentes tipos de hidrocarbonetos (Fuel Oil No. 6, Fuel Oil No. 2 e Marine Diesel Oil), fatores de deriva pelo vento (0.0%, 1.5% e 3.0%) e valores de dispersão inicial (*radius*).

A avaliação baseou-se em três critérios complementares: distância entre centróides, diferença de área e percentagem de partículas dentro da área estimada da mancha observada. Esta combinação permitiu comparar objetivamente os cenários e identificar os mais consistentes em termos espaciais e físicos.

Os resultados indicaram que as simulações com janelas temporais mais curtas (4 dias), associadas ao Fuel Oil No. 6 e a fatores de deriva pelo vento mais elevados (1.5–3.0%), reproduziram com maior fiabilidade a extensão e a posição da mancha detetada, sobretudo para a hipótese com ponto inicial a nordeste. Já as simulações de maior duração apresentaram dispersão mais acentuada e menor sobreposição espacial.

A análise reforça a importância da seleção criteriosa da posição inicial, da janela temporal e dos parâmetros físicos na modelação de *backtracking*, sobretudo quando os dados observacionais são limitados. As conclusões reforçam o potencial do OpenDrift como ferramenta de apoio à análise e gestão de eventos de poluição marinha, recomendando a exploração futura de novos critérios de avaliação, a aplicação a outros casos de estudo e a inclusão de processos adicionais, como o transporte tridimensional e a degradação dos hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Modelação de Deriva, Backtracking, Hidrocarbonetos, OpenDrift, Derrames no Mar

Abstract

This study analyzes the probable origin of an oil pollution slick detected by satellite on March 5, 2022, following the sinking of the *Felicity Ace* off the Azores. To this end, reverse drift (*backtracking*) simulations were carried out using the OpenDrift numerical model, with the OpenOil module representing the surface transport of hydrocarbons.

Four hypotheses were tested, combining two initial positions (northwest and northeast of the slick) and two time windows (4 and 9 days), with different types of hydrocarbons (Fuel Oil No. 6, Fuel Oil No. 2, and Marine Diesel Oil), wind drift factors (0.0%, 1.5%, and 3.0%), and initial dispersion values (*radius*).

The assessment relied on three complementary criteria: centroid distance, area difference, and the percentage of particles within the estimated extent of the observed slick. This combination allowed for an objective comparison of the scenarios and the identification of the most consistent ones in both spatial and physical terms.

The results indicated that simulations with shorter time windows (4 days), associated with Fuel Oil No. 6 and higher wind drift factors (1.5–3.0%), most reliably reproduced the extent and position of the detected slick, particularly for the hypothesis with the initial point to the northeast. In contrast, longer-duration simulations resulted in greater dispersion and lower spatial overlap.

This analysis highlights the importance of a careful selection of the initial position, time window, and physical parameters in *backtracking* modeling, especially when observational data are limited. The findings reinforce the potential of OpenDrift as a supporting tool for the analysis and management of marine pollution events, recommending the future exploration of new evaluation criteria, applications to other case studies, and the inclusion of additional processes such as three-dimensional transport and hydrocarbon weathering.

Keywords: Drift Modelling, Backtracking, Hydrocarbons, OpenDrift, Marine Pollution

Índice

Introdução	1
Contextualização do tema	2
Objetivos do estudo	3
Estrutura da dissertação	4
 1 Modelação de derrames de hidrocarbonetos: fundamentação teórica	 5
1.1 Revisão do estado de arte: Derrames de hidrocarbonetos e modelação da deriva	6
1.1.1 Características do local	6
1.1.2 Condições oceanográficas e meteorológicas	6
1.2 Transporte de hidrocarbonetos	8
1.3 Os Hidrocarbonetos: Características e transformações ambientais .	9
1.3.1 Tipos de hidrocarbonetos	10
1.3.2 Propriedades dos hidrocarbonetos	12
1.3.3 Processos de alteração dos hidrocarbonetos após um derrame	16
1.4 Modelação da deriva de hidrocarbonetos	19
1.5 MV <i>Felicity Ace</i> : Contexto e relevância	21
 2 Dados e Métodos	 25
2.1 Dados iniciais	25
2.2 OpenDrift: Módulos OpenOil e Leeway	27
2.2.1 Módulo OpenOil	27
2.2.2 Módulo Leeway	28
2.3 Modelos de Forçamento	29
Formato dos Dados	30
Forçamento Oceanográfico	31
Forçamento Atmosférico	32
2.4 Cálculo da deriva do navio para análise da origem do derrame . . .	32
2.4.1 Estimativa da deriva do navio antes do naufrágio	32

2.4.2	Deriva de hidrocarbonetos a partir das posições estimadas	33
2.5	Definição e fundamentação dos parâmetros de entrada	34
	Variação do <i>Wind drift factor</i> (WDF)	34
	Deriva para diferentes tipos de Hidrocarbonetos (HC)	36
	Influência da dispersão espacial (<i>radius</i>)	38
2.6	Configurações de modelação	40
2.7	Métodos de avaliação	43
2.7.1	Análise da posição central da mancha	44
2.7.2	Avaliação do formato da mancha	45
2.7.3	Avaliação da sobreposição espacial entre a deriva e mancha observada	47
3	Resultados	49
3.1	Modelação da mancha observada a partir da posição de naufrágio do navio <i>Felicity Ace</i>	49
3.2	Estimativa espacial e temporal da origem do derrame	56
3.3	Modelação da mancha observada com início na posição estimada do navio a 24 de fevereiro	59
3.4	Derivas com <i>backtracking</i>	67
	Hipótese 1	67
	Hipótese 2	75
	Hipótese 3	81
	Hipótese 4	89
4	Discussão dos resultados	97
4.1	Avaliação comparativa dos cenários de <i>backtracking</i>	97
4.2	Impacto dos Parâmetros de Entrada nas Simulações de Deriva	98
4.3	Discussão dos métodos adotados	100
4.4	Limitações específicas do caso de estudo	102
	Conclusão	103
	Bibliografia	107

Lista de Figuras

1	Rotas e densidade do tráfego marítimo global	1
2	Evolução dos derrames de hidrocarbonetos	2
1.1	Localização do evento	22
1.2	Representação cronológica dos principais eventos.	23
2.1	CleanSeaNet Alert Report	26
2.2	Fluxograma metodológico	30
2.3	Esquema da espiral de Ekman	35
2.4	Cone de incerteza num modelo Busca e Salvamento (SAR) com variação do <i>radius</i>	39
2.5	Localização das posições iniciais utilizadas nas derivas	41
2.6	Delimitação estimada da mancha de hidrocarbonetos	46
3.1	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a hipótese inicial: posição de naufrágio e período de tempo T1.	54
3.2	Estimativa das posições de deriva do navio Felicity Ace.	57
3.3	Derivas de manchas de HC com origem nas posições estimadas do navio nos dias 22, 23 e 24 de fevereiro de 2022	58
3.4	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a posição estimada e período de tempo T2.	64
3.5	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 1 do <i>backtracking</i>	72
3.6	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 2 do <i>backtracking</i>	79
3.7	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 3 do <i>backtracking</i>	86
3.8	Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 4 do <i>backtracking</i>	93

Lista de Tabelas

1.1	Classificação dos hidrocarbonetos	12
2.1	Dados iniciais retirados do <i>CleanSeaNet Alert Report</i>	26
2.2	Propriedades físico-químicas de óleos combustíveis selecionados. . .	38
2.3	Configurações adotadas nas simulações <i>forward</i> e de <i>backtracking</i> com diferentes tipos de hidrocarbonetos (HC), wind drift factor (WDF) e raio de dispersão (<i>radius</i>)	42
2.4	Hipóteses para simulações de deriva de <i>backtracking</i> de acordo com as configurações adotadas	43
3.1	Resultados da hipótese inicial: posição de naufrágio e período T1. .	55
3.2	Posições estimadas para cada dia, 22, 23 e 24 de Fevereiro de 2022.	57
3.3	Resultados das derivas de HC nas posições estimadas.	58
3.4	Resultados das simulações de deriva <i>forward</i> no período T2 com início na posição estimada.	65
3.5	Resultados da Hipótese 1 (Ponto Noroeste (NO), 9 dias) do <i>backtracking</i>	73
3.6	Resultados das simulações de deriva da Hipótese 2 do <i>backtracking</i> .	80
3.7	Resultados da Hipótese 3 (Ponto NO, 4 dias) do <i>backtracking</i>	87
3.8	Resultados da Hipótese 4 (Ponto NE, 4 dias) do <i>backtracking</i>	94
4.1	Resumo comparativo dos valores máximos por hipótese.	98

Lista de Equações

1.1	Equação da densidade API	14
2.1	Relação entre o WDF e a velocidade do vento	34
2.2	Equação de Haversine	45

Lista de Símbolos

ρ_o	Densidade da substância	kg/m ³
ρ_w	Densidade da água	kg/m ³
d	Distância entre dois pontos na superfície da Terra	km
r	Raio da Terra	km
φ_1	Latitude do ponto 1	rad
φ_2	Latitude do ponto 2	rad
$\Delta\varphi$	Diferença de latitude: $\varphi_2 - \varphi_1$	rad
λ_1	Longitude do ponto 1	rad
λ_2	Longitude do ponto 2	rad
$\Delta\lambda$	Diferença de longitude: $\lambda_2 - \lambda_1$	rad
$\mathbf{u}_{\text{deriva}}$	Vetor velocidade de deriva das partículas à superfície	m s ⁻¹
$\mathbf{u}_{\text{corrente}}$	Vetor velocidade da corrente superficial	m s ⁻¹
$\mathbf{u}_{\text{vento}}$	Vetor velocidade do vento medida a 10 m de altura	m s ⁻¹
WDF	Fração da velocidade do vento transmitida à deriva	

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AMN	Autoridade Marítima Nacional.
API	<i>American Petroleum Institute gravity.</i>
C3S	Copernicus Climate Change Service.
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Services.
DCPM	Direção de Combate à Poluição do Mar.
DGAM	Direção-Geral da Autoridade Marítima.
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts.
EMSA	European Maritime Safety Agency.
ERA5	<i>Reanalysis 5^a geração.</i>
GNOME	General NOAA Operational Modeling Environment.
HC	Hidrocarbonetos.
IFO	Intermediate Fuel Oil.
ITOPF	International Tanker Owners Pollution Federation.
MARPOL 73/78	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships.
MDO	Marine Diesel Oil.
MRCC Delgada	Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo de Ponta Delgada.

NCLS	<i>Normalized Cumulative Lagrangian Separation.</i>
NE	Nordeste.
NetCDF	Network Common Data Form.
NO	Noroeste.
OILMAP	Oil Spill Model and Response System.
OSCAR	Oil Spill Contingency and Response model.
RAA	Região Autónoma dos Açores.
SAR	Busca e Salvamento.
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development.
WDF	<i>Wind drift factor.</i>
ZEE	Zona Económica Exclusiva.

Introdução

O transporte marítimo assume um papel determinante no funcionamento das cadeias de abastecimento globais e na movimentação de mercadorias à escala internacional. De acordo com a United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2024), mais de 80% do volume do comércio mundial de bens é transportado por via marítima, o que reflete a centralidade e a escala desta atividade no panorama económico global. A elevada densidade de tráfego, facilmente visualizada através de plataformas como o Global Marine Traffic (Figura 1), revela uma vasta rede de rotas marítimas interligadas, com grande concentração em corredores estratégicos.

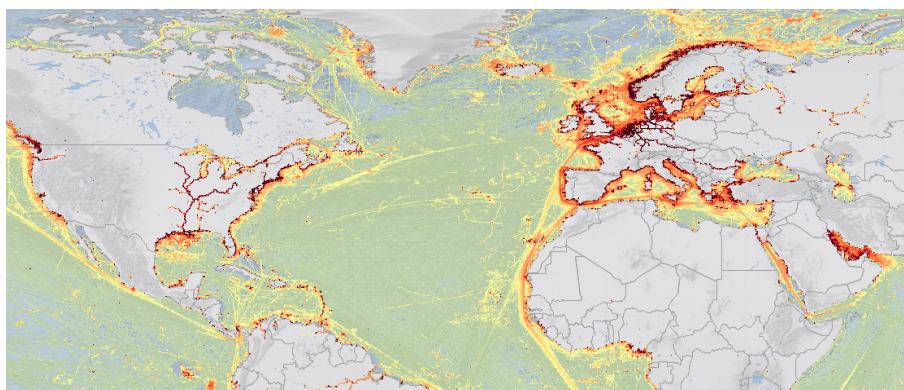


FIGURA 1: Rotas do tráfego marítimo global. Visualização da densidade de navios nos principais corredores marítimos. Fonte: Adaptado de Global Marine Traffic (2024).

Contudo, a intensidade do tráfego marítimo expande os riscos ambientais inerentes à navegação. O transporte de Hidrocarbonetos (HC) tem registado uma redução drástica no número de derrames acidentais nas últimas cinco décadas, graças a melhorias tecnológicas e regulamentares. Conforme ilustrado na Figura 2, o número médio anual de derrames superiores a 7 toneladas caiu de 78,8, nos anos 1970, para apenas 6, nos anos 2010, representando uma diminuição de mais de 90% (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2025). Ainda assim, a década atual apresenta uma média anual de derrames que sugere uma possível estabilização ou reversão desta tendência.

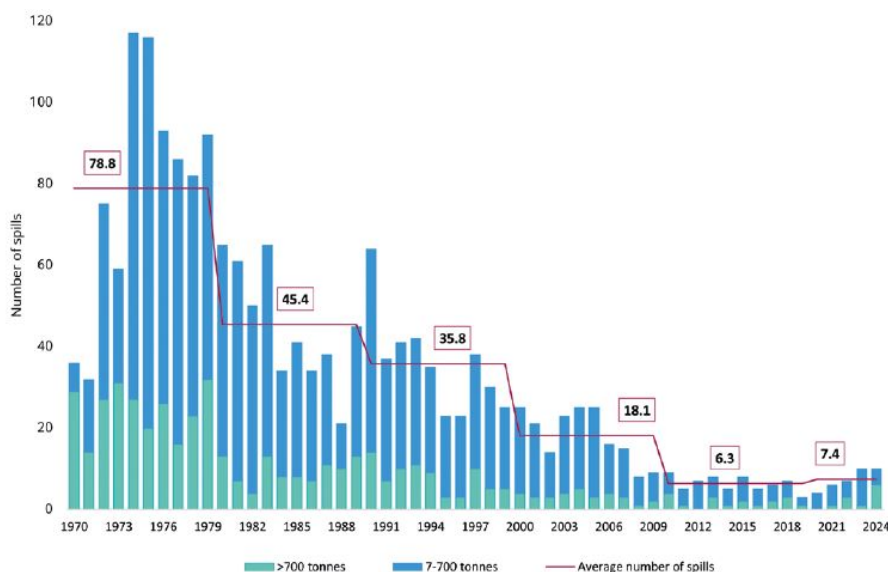


FIGURA 2: Evolução anual do número de derrames de hidrocarbonetos por petroleiros, classificados em derrames grandes (>700 toneladas, a verde) e médios (7-700 toneladas, a azul), no período de 1970 a 2024. A linha vermelha indica a média do número de derrames em intervalos temporais distintos, com valores assinalados para cada período. Fonte: Adaptado de ITOPF (2024).

A relevância deste tema tem motivado um aumento substancial da investigação científica nas últimas décadas, procurando melhorar a modelação do comportamento dos hidrocarbonetos após um derrame e, assim, otimizar os esforços de mitigação (Azevedo, 2010).

Contextualização do tema

Portugal possui uma Zona Económica Exclusiva (ZEE) extremamente extensa, exposta à atividade marítima internacional, sendo cruzada por importantes rotas comerciais. Esta situação, aumenta significativamente o risco de acidentes marítimos e consequentes derrames de hidrocarbonetos, sobretudo ao largo dos Açores e da costa de Portugal continental.

Neste contexto, a proteção do meio marinho e a resposta a episódios de poluição constituem uma prioridade nacional. A Direção de Combate à Poluição do Mar (DCPM), integrada na Direção-Geral da Autoridade Marítima (DGAM), é o órgão responsável pela coordenação e execução das ações de combate à poluição do mar por HC e outras substâncias perigosas, em articulação com a Autoridade Marítima Nacional (AMN).

A DCPM recorre a diversos instrumentos operacionais e científicos, entre os quais se destacam os modelos de previsão de deriva de manchas de poluentes, fundamentais para antecipar a evolução espacial de um derrame e orientar os meios de combate. Estes modelos, alimentados por dados meteo-oceanográficos, permitem prever o movimento das manchas (*forward*) e, em determinadas situações, identificar a possível origem do derrame (*backtracking*), o que pode ser essencial para a responsabilização dos agentes envolvidos.

A presente dissertação insere-se no contexto nacional de reforço da capacidade de resposta a derrames de HC, explorando a aplicação do modelo OpenDrift ao caso do naufrágio do navio Felicity Ace, ocorrido em 2022 ao largo dos Açores. Com este estudo, pretende-se contribuir para o aperfeiçoamento das ferramentas de apoio à decisão operacional utilizadas pela DCPM e para uma melhor compreensão dos processos físicos que influenciam a dispersão de poluentes no mar.

Objetivos do estudo

O objetivo principal desta dissertação é contribuir para a compreensão da origem e do comportamento de manchas de HC, através da aplicação de simulações de deriva de partículas. Para tal, recorre-se ao OpenDrift, um modelo amplamente reconhecido e bem documentado, desenvolvido pelo Instituto Meteorológico da Noruega, concebido para a simulação de transporte e dispersão de partículas no oceano e na atmosfera, com aplicações operacionais e científicas diversificadas, incluindo derrames de HC, missões de Busca e Salvamento (SAR), transporte de ovos e larvas de peixe, e dispersão de gelo (Dagestad & Röhrs, 2019; Dagestad et al., 2018). Pretende-se avaliar a capacidade do OpenDrift em reproduzir a trajetória de uma mancha observada, com base em diferentes configurações no espaço e no tempo, juntamente com parâmetros físicos associados ao tipo de hidrocarboneto e às condições ambientais.

Ao focar-se num caso real, o derrame associado ao naufrágio do navio Felicity Ace, este estudo procura demonstrar a utilidade de ferramentas de modelação numérica na análise da origem de manchas de poluentes detetadas remotamente, contribuindo para o reforço do conhecimento técnico e científico nesta área.

Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta o enquadramento teórico sobre os derrames de hidrocarbonetos, abordando os principais processos físicos e químicos que influenciam a sua dispersão no meio marinho, as propriedades dos diferentes tipos de hidrocarbonetos e os métodos de modelação aplicados a cenários de derrame. Inclui ainda a contextualização do caso de estudo, o naufrágio do navio *Felicity Ace* ao largo dos Açores, e a sua relevância para a aplicação da modelação de deriva.

O Capítulo 2 descreve os dados e a metodologia adotada. Apresenta as fontes de informação utilizadas, os módulos do OpenDrift (OpenOil e Leeway) aplicados às simulações de *backtracking*, os produtos de vento e corrente usados como forçamento e os parâmetros testados, incluindo tipo de hidrocarbonetos, fator de deriva pelo vento e *radius*. Define as quatro hipóteses espaciais e temporais avaliadas e detalha os métodos de avaliação, baseados em critérios quantitativos de distância entre centróides, diferença de área e percentagem de partículas dentro da área estimada.

O Capítulo 3 apresenta os resultados das simulações realizadas, organizados por hipótese. Para cada uma, são incluídas tabelas com os valores obtidos e a análise dos cenários mais relevantes, interpretando-os em função dos parâmetros utilizados e da coerência física e espacial com a mancha observada.

O Capítulo 4 corresponde à discussão dos resultados, estruturada em blocos temáticos que comparam o desempenho entre hipóteses, analisam a influência dos parâmetros físicos de entrada, avaliam a plausibilidade dos cenários simulados e discutem as limitações do modelo e dos dados disponíveis.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões, respondendo aos objetivos definidos e propondo linhas de investigação futura, incluindo melhorias metodológicas e aplicação do método a outros contextos.

Capítulo 1

Modelação de derrames de hidrocarbonetos: fundamentação teórica

Segundo a DGAM (2011), uma situação de poluição no mar é considerada um acidente ou incidente, consoante origine ou não danos pessoais e ambientais que resultem em poluição no mar, rios ou lagos. Dado as particularidades de cada derrame, mesmo que apresentem características semelhantes, nunca são considerados idênticos.

A compreensão e modelação de derrames de HC no mar requerem uma abordagem multidisciplinar, que combine conhecimentos sobre as condições oceanográficas e meteorológicas do local, os mecanismos de transporte das manchas e as propriedades físico-químicas dos HC envolvidos. Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para enquadrar o estudo, começando pela revisão do estado da arte sobre derrames e modelação da deriva, seguida da caracterização das condições ambientais e do transporte de HC. Posteriormente, abordam-se as características, tipos e transformações ambientais destes compostos, bem como os processos de alteração que ocorrem após um derrame. Por fim, descreve-se a modelação da deriva aplicada ao caso de estudo do navio *Felicity Ace*, enquadrando a sua relevância para o trabalho desenvolvido.

1.1 Revisão do estado de arte: Derrames de hidrocarbonetos e modelação da deriva

1.1.1 Características do local

A caracterização do local afetado por um evento de poluição, é um elemento fundamental para a avaliação da sua gravidade e para a definição das estratégias de resposta mais adequadas. Cada região marítima apresenta condições geográficas, morfológicas e ecológicas próprias, que influenciam a forma como os poluentes se dispersam e o grau de impacto que podem causar (DGAM, 2011).

De acordo com a DGAM (2011), é essencial, logo após a deteção de um derrame, identificar as características físicas do local e a sua sensibilidade à poluição, tendo em conta os aspetos ecológicos. Esta sensibilidade pode estar ou não definida legalmente, e pode encontrar-se representada em instrumentos como mapas de sensibilidade ou atlas ambientais (DGAM, 2011).

Para a identificação de zonas sensíveis deve-se recorrer a diversas fontes de informação, tanto formais como informais, incluindo cartas náuticas, fotografias aéreas, literatura técnico-científica, regulamentos, e ainda o conhecimento empírico de agentes locais, como pescadores e técnicos ambientais. Para além disso, é recomendado a utilização de ferramentas digitais e sistemas de monitorização, como o *CleanSeaNet*, gerido pela European Maritime Safety Agency (EMSA). Este sistema recorre a imagens satélite para detetar possíveis manchas de poluição por HC em tempo quase real, constituindo um apoio importante na identificação e delimitação espacial de derrames (DGAM, 2011).

Idealmente, toda a informação deve estar previamente organizada e de fácil acesso, de modo a permitir uma resposta célere e eficaz perante situações de emergência.

1.1.2 Condições oceanográficas e meteorológicas

As condições oceanográficas e meteorológicas têm influência direta tanto na origem como na evolução dos eventos de poluição no mar. A forte agitação marítima, provocada por vento intenso e ondas de grande altura, pode estar na origem de acidentes com navios, atuando como fator precipitante de derrames. Simultaneamente, essas mesmas condições podem também favorecer a dispersão e diluição dos

HC na coluna de água, mitigando parcialmente os seus efeitos, especialmente em mar aberto (DGAM, 2011).

Para além do transporte da mancha, as condições ambientais influenciam significativamente os processos de alteração física e química dos hidrocarbonetos (*weathering*). A radiação solar, por exemplo, induz reações de foto-oxidação, que modificam a composição química dos compostos, podendo levar à formação de resinas ou compostos mais persistentes no ambiente (DGAM, 2011; Fingas, 2015). A temperatura do ar, a velocidade do vento e a humidade relativa condicionam a evaporação, um dos primeiros processos a ocorrer após um derrame, e que afeta diretamente a densidade e viscosidade da substância, tornando-a mais espessa e difícil de remover (Azevedo, 2010; Fingas, 2015; Moreira, 2016).

A avaliação dos fatores ambientais é, por isso, fundamental antes de se iniciarem as operações de resposta a um derrame. Esta deve considerar variáveis como a altura significativa da vaga, a direção e intensidade das correntes oceânicas, bem como os ventos dominantes. De acordo com Holthuijsen (2007), designa-se por ondulação (*swell*) o conjunto de ondas que se propagam após deixarem a área onde foram formadas pelo vento, caracterizando-se por cristas mais regulares e longos comprimentos de onda. Já a vaga corresponde ao estado do mar local, resultante da combinação entre a ondulação incidente e o mar de vento local, sendo geralmente quantificada através da altura significativa. A diferença essencial reside, portanto, no facto de a ondulação traduzir a propagação de ondas provenientes de áreas de geração distintas, enquanto a vaga expressa a agitação efetiva à superfície. Neste contexto, a vaga assume maior relevância na modelação de derrames de HC, uma vez que a sua altura significativa reflete a energia disponível para os principais processos físicos que condicionam a evolução de uma mancha, nomeadamente a dispersão superficial e a emulsificação. Em Portugal Continental, observa-se frequentemente, sobretudo na faixa litoral ocidental, uma deriva litoral predominante de norte para sul, influenciando a dispersão superficial de contaminantes (DGAM, 2011).

A área de estudo desta dissertação localiza-se no Atlântico Nordeste, uma região com dinâmica oceanográfica complexa, influenciada por grandes correntes como a Corrente do Atlântico Norte, prolongamento da Corrente do Golfo (Talley, 2011), e por correntes de menor escala como a Corrente das Canárias e as circulações costeiras da Península Ibérica (Peliz et al., 2002; Relvas et al., 2007). A variabilidade sazonal da temperatura da superfície do mar, a predominância de ventos de noroeste e os fenómenos de afloramento costeiro, sobretudo no verão, contribuem para uma grande variação nas condições de deriva (Alvarez et al., 2008; Fiúza, 1983).

Estas condições meteo-oceanográficas não só determinam o transporte das manchas de poluentes, como também influenciam os processos de alteração que condicionam a sua persistência e toxicidade no mar. Assim, a sua correta caracterização e integração em modelos numéricos de elevada resolução é essencial para a previsão fiável da trajetória e transformação dos HC derramados (Dagestad et al., 2018; Fingas, 2011).

1.2 Transporte de hidrocarbonetos

O transporte marítimo de HC evoluiu consideravelmente nas últimas décadas, através do desenvolvimento de navios de maior capacidade e melhorias tecnológicas nas condições de segurança e eficiência operacional. Durante as primeiras fases deste tipo de transporte, desde o final do século XIX até pouco depois da Segunda Guerra Mundial, as embarcações eram tipicamente limitadas a capacidades de carga abaixo de 10 000 toneladas (Council, 1991). Contudo, o desenvolvimento tecnológico, aliado à necessidade de otimização logística e operacional, permitiu a construção de navios de maior porte, capazes de transportar volumes substancialmente superiores de HC. Esta evolução, embora benéfica do ponto de vista económico, trouxe um aumento proporcional do risco ambiental, refletido na frequência e magnitude dos acidentes marítimos envolvendo derrames de HC (Moreira, 2016).

Para mitigar estes riscos, foram implementadas diversas medidas regulamentares e tecnológicas. Uma das principais inovações na arquitetura e construção naval foi a introdução obrigatória dos cascos duplos em petroleiros, conforme estipulado no Anexo I da Convenção MARPOL 73/78, que visa prevenir a poluição por hidrocarbonetos em caso de colisão ou encalhe (International Maritime Organization (IMO), 2006). Esta configuração estrutural cria uma barreira física entre a carga e o ambiente marinho, reduzindo significativamente a probabilidade de derrame.

A regulamentação internacional distingue-se, assim, por diferentes âmbitos de atuação:

- No plano estrutural e operacional, a Convenção SOLAS (Safety of Life at Sea) estabelece requisitos técnicos para a construção e segurança dos navios, incluindo sistemas de combate a incêndios, estabilidade, meios de evacuação e planos de emergência para proteger tripulação e carga.
- Em termos de prevenção da poluição, o Anexo I da MARPOL define limites rigorosos para a descarga de óleos no mar e impõe a obrigatoriedade de equipamentos como separadores óleo/água, tanques de retenção de resíduos

oleosos e sistemas de monitorização automáticos. Esta convenção aplica-se à maioria dos navios em operação e tem sido progressivamente atualizada para incorporar novas exigências ambientais (International Maritime Organization (IMO), 2020).

- Para o transporte de substâncias perigosas, incluindo HC e seus derivados, aplica-se o Código IMDG (International Maritime Dangerous Goods Code), que regula o acondicionamento, rotulagem, documentação, segregação e manuseamento das cargas perigosas. As embalagens devem ser apropriadas ao tipo de substância transportada e garantir contenção adequada dos riscos ambientais. É também obrigatória a identificação permanente e clara dos produtos a bordo, de acordo com os critérios das Nações Unidas, bem como a manutenção de uma lista especial com a localização exata de cada substância na embarcação, facilitando a atuação em caso de emergência (do Espírito Santo, 2000; ITOPF, 2024).

Estas normas internacionais, sob a égide da IMO (International Maritime Organization), são complementadas por legislação regional (como as diretivas europeias) e normas nacionais, assegurando que a navegação dos navios que operam em águas nacionais seja feita de forma segura, controlada e ambientalmente responsável.

1.3 Os Hidrocarbonetos: Características e transformações ambientais

O termo “hidrocarbonetos” engloba todos os tipos e formas de óleo, incluindo o crude, os seus derivados e produtos refinados. O crude consiste numa complexa mistura de HC, que contém diferentes proporções de outras substâncias (Fingas, 2011; ITOPF, 2024). Esta composição influencia diretamente algumas das propriedades fundamentais como a viscosidade e a densidade. As propriedades físico-químicas são determinantes no comportamento dos HC quando ocorrem os derrames, afetando a sua deriva, persistência e transformação.

Neste contexto, as ações de resposta a incidentes com HC dependem fortemente da capacidade de prever, a curto e a longo prazo, a trajetória e a evolução do composto derramado. Uma resposta eficaz exige, portanto, não só o conhecimento da dinâmica de dispersão do derrame, mas também da evolução reológica¹ do composto no ambiente (Azevedo, 2010).

¹Evolução reológica refere-se aos processos de escoamento e deformação dos materiais.

1.3.1 Tipos de hidrocarbonetos

A escolha do tipo de HC a considerar nos modelos de simulação de derrames é um fator essencial para garantir previsões mais fiáveis do seu comportamento e do impacto ambiental.

A variabilidade das propriedades dos HC implica que os impactos ambientais de um derrame não sejam uniformes. Tal como referido por Fingas (2011), diferentes tipos de HC podem afetar organismos diferentes de formas variadas, sendo os efeitos condicionados por fatores como as suas características, as condições oceanográficas locais e a vulnerabilidade dos ecossistemas afetados. Esta complexidade reforça a necessidade de uma seleção criteriosa do tipo de HC na fase de modelação, por forma a garantir que os cenários simulados demonstrem de forma realista a dispersão e os potenciais efeitos do derrame.

A International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL 73/78), através do Anexo I, estabelece o enquadramento jurídico para a prevenção da poluição por HC no mar. A definição de “óleo” inclui petróleo bruto, óleos combustíveis, óleos refinados e resíduos oleosos. Contudo, esta convenção não distingue os HC com base no seu comportamento ambiental ou toxicológico. Para efeitos de modelação da deriva e da previsão do impacto ambiental de um derrame, é necessário recorrer a uma caracterização mais técnica, tendo em conta propriedades como a densidade, viscosidade, volatilidade, toxicidade e persistência.

A caracterização pode variar bastante, uma vez que diferentes autores e instituições utilizam critérios distintos para agrupar os HC, dependendo dos objetivos dos seus estudos. Estes, podem focar-se na composição química, nas propriedades físicas ou no impacto ambiental dos compostos.

Segundo Fingas e Hollebone (2015), os HC são distribuídos com base na sua composição química, em quatro grupos principais: Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos. Esta divisão é amplamente utilizada na área da química do petróleo e permite compreender melhor o comportamento físico-químico dos HC no ambiente. A abordagem semelhante utilizada pela ITOPF (2024), faz a classificação em quatro grupos com base na sua densidade relativa (*specific gravity*). Os grupos vão desde óleos muito leves (Grupo 1), que tendem a flutuar com facilidade, até óleos muito pesados (Grupo 4), com maior probabilidade de se misturarem com a coluna de água ou de afundarem parcialmente, dependendo das condições ambientais.

Em termos de comportamento ambiental, os HC leves apresentam geralmente uma maior volatilidade e menor viscosidade, o que faz com que evaporem e

dispersem rapidamente, sobretudo nas primeiras horas após o derrame. Estes compostos tendem a ser menos persistentes no ambiente, embora possam ser mais tóxicos a curto prazo. Por outro lado, os HC pesados, como o Fuel Oil No. 6 ou Bunker C, possuem uma elevada viscosidade e densidade, o que dificulta a sua dispersão natural e evaporação, tornando-os mais persistentes e passíveis de causar impactos ambientais duradouros (Fingas, 2011; ITOPF, 2024).

Esta classificação é bastante útil, pelo facto de se conseguir prever a tendência da substância para flutuar ou afundar, e consequentemente, efetuar o planeamento de estratégias de resposta.

Outra classificação é a da Direção-Geral da Autoridade Marítima (DGAM, 2011), que tal como a ITOPF (2024), classifica os HC com base na sua densidade, sendo desta forma agrupados em cinco grupos, tal como mostra a tabela 1.1.

Esta última classificação é considerada adequada para o presente estudo, por ser necessário considerar diferentes tipos de HC com características distintas. Por ser mais abrangente, permite englobar uma variedade de compostos com base em propriedades físico-químicas relevantes, facilitando a seleção e comparação de diferentes cenários de simulação.

TABELA 1.1: Classificação dos hidrocarbonetos, exemplos e características principais (Fonte: DGAM (2011)).

Tipos de HC	Exemplos	Características principais
Tipo I: HC voláteis leves	Gasolina, querosene, parafina, diesel	Apresentam baixa viscosidade, evaporam e dissolvem facilmente em água. Tendem a formar emulsões instáveis e penetram rapidamente em superfícies naturais.
Tipo II: HC moderados a pesados	Marine diesel, gasóleo, fuel-óleo leve, óleo de lubrificação leve	Têm viscosidade moderada a alta, especialmente em climas quentes. Com o tempo, os componentes mais voláteis evaporam e os solúveis dispersam-se, restando resíduos menos tóxicos e com maior probabilidade de afundarem.
Tipo III: HC pesados	Crudes parafínicos, emulsão água/óleo (“mousse de chocolate”), óleos de lubrificação pesados	Devido à alta viscosidade, dispersam-se com dificuldade. Após a exposição aos elementos, transformam-se em massas semelhantes a alcatrão, podendo amolecer sob exposição solar.
Tipo IV: HC residuais	<i>Bunker</i> , fuel-óleos pesados, crude degradado, asfaltos	Formam massas espessas e pegajosas à temperatura ambiente, com dispersão praticamente inexistente.
Tipo V: HC de densidade superior à da água que se afundam	—	Apresentam-se sob forma semi-sólida, são pouco voláteis, praticamente insolúveis em água e tendem a formar aglomerados conhecidos como <i>tar balls</i> , com baixa toxicidade.

1.3.2 Propriedades dos hidrocarbonetos

Nos estudos de derrames, geralmente opta-se por analisar HC com características e propriedades distintas para compreender melhor o seu comportamento e avaliar a eficácia das técnicas de contenção. É o caso do estudo de Yang et al.

(2020), em que explorou a aplicação de uma análise espectral avançada com o *Modelo de Machine Learning: Support Vector Machine* (SVC), por forma a caracterizar e identificar os diferentes tipos de HC em derrames no mar. A investigação destacou a importância de determinar com precisão a substância envolvida em acidentes, uma vez que esta informação é essencial para a implementação de estratégias de limpeza eficientes, para minimizar os danos ambientais e para a identificação de um navio infrator.

A literatura salienta que a resposta a um derrame deve ser adaptada ao tipo de composto envolvido, o que reforça ainda mais a importância de uma seleção adequada durante a fase de modelação. Como aponta Moreira (2016), o conhecimento prévio das propriedades dos HC permite não só uma melhor previsão do seu comportamento, como também um planeamento mais eficaz das ações de resposta, minimizando os danos ambientais e operacionais. Dessa forma, a seleção de HC com propriedades distintas nos estudos, garante que as soluções propostas sejam abrangentes e aplicáveis a diferentes situações de poluição.

Para se conseguir prever o comportamento de um derrame ou o melhor método de contenção, é necessário conhecer as propriedades da substância derramada. Segundo Fingas (2011), as mais importantes são a viscosidade, densidade, solubilidade, ponto de inflamação, entre outras. De modo a compreender de que forma estas propriedades afetam a dinâmica de um derrame, são descritas em seguida as propriedades mais relevantes e a sua influência.

Viscosidade

A viscosidade é a resistência de um líquido à deformação num escoamento (coeficiente de proporcionalidade entre tensões tangenciais e taxas de deformação do fluido) e varia com a temperatura, ou seja, diminui com o aumento da temperatura, e aumenta quando esta desce (DGAM, 2011; Fingas, 2015). HC com maior teor de componentes leves apresentam viscosidade mais baixa, enquanto aqueles com elevado teor de asfaltenos são mais viscosos (Fingas, 2015). Esta propriedade influencia significativamente o comportamento dos HC no mar, pelo que, compostos mais viscosos espalham-se mais lentamente, são mais difíceis de transferir e recuperar, e infiltram-se com maior dificuldade no solo (Fingas, 2015).

Densidade

A densidade é definida como a massa por unidade de volume de uma substância, sendo normalmente expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3). No

contexto dos HC, esta propriedade é amplamente utilizada pela indústria petrolífera para classificar os HC brutos como leves ou pesados (Fingas, 2015). A densidade da água doce à temperatura de 15°C é de aproximadamente 1.0g/cm³, enquanto que a maioria dos HC apresenta valores entre 0.7 e 0.99g/cm³, o que faz com que flutuem na água. No caso da água do mar, cuja densidade ronda os 1.03g/cm³, até mesmo HC relativamente pesados tendem a permanecer à superfície (Fingas, 2015).

Contudo, a densidade dos HC pode aumentar com o tempo devido à evaporação dos componentes mais leves, tornando possível, embora raro, que determinados HC ultrapassem a densidade da água e afundem. Este fenómeno verifica-se sobretudo em combustíveis residuais, como o *Bunker C*, ou em produtos brutos como o betume (Fingas, 2015; Moreira, 2016). Quando tal ocorre, a recuperação torna-se significativamente mais difícil, dada a dispersão do produto no fundo (Moreira, 2016).

Para além da densidade em unidades do Sistema Internacional, a indústria petrolífera recorre frequentemente à densidade *American Petroleum Institute gravity* (API) como forma alternativa de expressar a densidade dos hidrocarbonetos, facilitando a sua classificação e comparação.

Densidade API

A densidade API (*American Petroleum Institute gravity*), foi desenvolvida com o objetivo de facilitar a classificação dos HC consoante sejam considerados mais leves ou mais pesados em relação à água. Esta escala é inversamente proporcional à densidade relativa do petróleo a 15.6°C, sendo calculada com base na razão entre a densidade do composto e a água, segundo a fórmula:

$$\text{API} = \frac{141.5}{\Delta} - 131.5 \quad (1.1)$$

em que $\Delta = \frac{\rho_o}{\rho_w}$, sendo ρ_o a densidade da substância e ρ_w a densidade da água (Azevedo, 2010; Fingas, 2015).

Nesta escala, valores superiores a 10 indicam que a substância é menos densa que a água doce e, portanto, tende a flutuar. A maioria dos produtos petrolíferos apresenta valores de API superiores a este limite. De forma geral, HC com densidade API elevada correspondem a compostos mais leves, com menor viscosidade e maior proporção de compostos voláteis (DGAM, 2011). No entanto, importa salientar que a densidade API se aplica à substância derramada apenas nas fases iniciais do

derrame, dado que, com o tempo, as suas propriedades físico-químicas se alteram significativamente (Azevedo, 2010).

Solubilidade

A solubilidade dos HC na água corresponde à quantidade de compostos que se conseguem dissolver a nível molecular. Embora, geralmente, apenas uma pequena parte da substância se dissolva, este processo pode ter relevância ecológica. Os componentes mais voláteis tendem a apresentar maior solubilidade, o que significa que produtos ou misturas com maior porção de compostos leves, na generalidade, tendem a ter um maior potencial de dissolução (DGAM, 2011).

Apesar de a solubilidade representar um mecanismo de perda de massa pouco significativo, sendo frequentemente desprezada nas estimativas da quantidade de substância envolvida no derrame, o impacto ambiental da porção dissolvida pode ser relevante. Mesmo concentrações reduzidas de compostos solúveis podem ter efeitos tóxicos sobre organismos sensíveis, especialmente quando ocorrem em ambientes com baixa circulação de água (Fingas, 2015; Moreira, 2016).

Ponto de inflamação ("Flash point")

O ponto de inflamação corresponde à temperatura mínima à qual uma substância líquida liberta vapores em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura inflamável, capaz de se incendiar na presença de uma fonte de ignição. Este fenómeno ocorre apenas enquanto a fonte de calor estiver presente, extinguindo-se de seguida devido à emissão insuficiente de vapores para manter a combustão (DGAM, 2011). Quanto mais baixo for o ponto de inflamação, maior é a volatilidade da substância e, consequentemente, maior o risco de ignição à temperatura ambiente. Esta propriedade pode ser considerada um indicador do quão perigoso pode ser um HC, sendo particularmente relevante no contexto do armazenamento, transporte ou operações de resposta a derrames, em que a segurança é uma prioridade (Azevedo, 2010; Moreira, 2016). Um líquido é geralmente considerado inflamável se o seu ponto de inflamação for inferior a 60°C (Moreira, 2016).

Tensão superficial

A tensão superficial é a energia por unidade de área (J/m^2) existente na interface entre dois fluidos imiscíveis (tipicamente líquido-ar) resultante do desequilíbrio das forças de coesão que atuam entre as moléculas do líquido. No interior, cada molécula encontra-se rodeada por vizinhas em todas as direções, sofrendo forças de

igual intensidade e sentido oposto, o que resulta num balanço nulo. Já à superfície, as moléculas não possuem vizinhas acima e são atraídas predominantemente pelas do interior, originando uma contração superficial e a tendência para minimizar a área livre. Em termos quantitativos, a tensão superficial é expressa em $N \cdot m^{-1}$ e constitui um parâmetro fundamental em fenómenos como a formação de gotas, a emulsificação, o espalhamento e a dinâmica de derrames de HC no mar (Fingas, 2015).

1.3.3 Processos de alteração dos hidrocarbonetos após um derrame

Na sequência de um derrame de HC, é essencial compreender os processos físicos e químicos que afetam a mancha desde o momento do incidente. Esta informação é determinante para a eficácia das decisões a tomar, nomeadamente, a mobilização de meios de resposta e a articulação entre entidades competentes (Moreira, 2016).

Os HC sofrem uma série de alterações após a sua libertação no ambiente, um conjunto de processos conhecidos como *weathering*. Estes processos modificam substancialmente as propriedades físicas e químicas dos HC, influenciando diretamente o seu comportamento e destino.

Nas fases iniciais de um derrame, especialmente nas primeiras horas após a libertação, a mancha espalha-se rapidamente sobre a superfície da água devido ao domínio de diversos fatores como a gravidade, a inércia, a viscosidade e a tensão superficial. Segundo o modelo clássico de Fay (1971), o espalhamento ocorre em três fases, sendo a primeira dominada pela ação gravitacional, que determina a expansão radial da mancha até que outras forças comecem a controlar a sua dinâmica. Esta fase inicial tem um impacto relevante na dimensão da mancha e na sua evolução posterior, e está incluída nos modelos modernos de simulação de derrames, como referido por Reed et al. (1999).

Entre os processos mais relevantes destacam-se a evaporação, a emulsificação, a dispersão natural, a dissolução, a foto-oxidação, a sedimentação e a biodegradação (Fingas, 2015). A magnitude e a velocidade com que estes processos ocorrem dependem fortemente do tipo de substância que foi libertada e das condições meteorológicas e oceanográficas que prevalecem no momento.

Paralelamente aos processos de *weathering*, existe um segundo grupo de fenómenos relacionado com o movimento da mancha no ambiente, ou seja, com a sua

deriva e transporte. Estes processos físicos, controlados por fatores como o vento, as correntes e as ondas, interagem de forma complexa com os mecanismos de degradação da substância. De facto, a evolução química e física da mancha afeta diretamente a sua mobilidade e vice-versa, sendo por isso necessário considerar ambos os grupos de processos de forma integrada em qualquer abordagem de modelação ou resposta operacional (Fingas, 2015).

A caracterização das propriedades iniciais dos HC derramados perde a utilidade prática se não forem considerados os efeitos meteo-oceanográficos e os processos de degradação que atuam sobre a mancha ao longo do tempo. Estudos e observações ao longo dos anos demonstram que os HC podem sofrer alterações substanciais nas suas propriedades durante um derrame, influenciando de forma significativa o seu comportamento, a sua trajetória e os impactos ambientais resultantes (Fingas, 2015).

Processos de alteração

- **Evaporação** – A evaporação é um dos primeiros e mais relevantes processos de *weathering*, atuando como um mecanismo natural de remoção dos componentes mais voláteis dos HC. Ocorre rapidamente nas primeiras horas após o evento, podendo eliminar uma parte significativa da substância, especialmente no caso de produtos leves, como a gasolina (Fingas, 2015). A taxa e a extensão da evaporação dependem, sobretudo, da composição dos HC, sendo menos eficaz no caso das substâncias mais densas e pesadas, como o Bunker C (Azevedo, 2010; Bouças, 2017). Este processo altera significativamente as propriedades da mancha promovendo o aumento da sua densidade e viscosidade, e influenciando assim a eficácia das operações de resposta (Fingas, 2015).
- **Emulsificação (*water-in-oil emulsion*)** – É um processo de *weathering* em que pequenas gotículas de água do mar se incorporam no interior da mancha de HC, originando uma mistura espessa, estável e persistente, frequentemente designada informalmente de “mousse”, devido à sua coloração castanha ou alaranjada (DGAM, 2011; Fingas, 2015).

Este fenómeno é condicionado sobretudo pela composição química da substância e pela intensidade da agitação marítima (Azevedo, 2010). As emulsões formadas podem conter até 90% de água, aumentando consideravelmente o volume da substância em relação ao HC original, com valores até três a quatro vezes superiores (DGAM, 2011). Além disso, a emulsificação provoca um aumento significativo da viscosidade e uma alteração na densidade da mancha,

comprometendo a eficiência dos métodos de recuperação inicialmente utilizados, e reduzindo a capacidade de flutuação e de adesão aos equipamentos de recolha, prolongando a persistência no ambiente e dificultando a sua biodegradação (Azevedo, 2010; DGAM, 2011; Moreira, 2016).

- **Dispersão natural** – A dispersão natural é um processo em que a mancha se fragmenta à superfície, originando pequenas gotículas que se misturam com a coluna de água, sobretudo devido à turbulência gerada pelas ondas e a ação do vento (National Research Council, 2003). As ondas de quebram promovem esse efeito mecânico, quebrando a película superficial da substância em gotas finas que se mantêm em suspensão por algum tempo. Este processo pode ser intensificado pela aplicação de dispersantes químicos, que reduzem a tensão superficial do composto, facilitando a sua fragmentação e mistura com a água (International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF), 2023; National Research Council, 2003). A eficácia da dispersão depende da agitação marítima, da viscosidade do HC e da presença de emulsificantes ou dispersantes. As gotas maiores, com maior flutuabilidade, tendem a regressar à superfície, enquanto as menores podem permanecer na coluna de água durante mais tempo (Moreira, 2016).
- **Dissolução** – trata-se de um fenómeno em que uma pequena fração dos compostos solúveis presentes nos HC se mistura com a água do mar, principalmente nas camadas imediatamente abaixo da mancha derramada (Fingas, 2015; Moreira, 2016). Embora esse processo afete geralmente menos de 1% da massa total do que foi derramado, tem um impacto ambiental relevante, uma vez que os compostos que se dissolvem tendem a ser os mais tóxicos para os organismos (Fingas, 2015). Quanto maior a solubilidade de um composto, maior o seu potencial tóxico, originando uma mistura homogénea e considerada perigosa para o ambiente (Azevedo, 2010).
- **Foto-oxidação** – Ocorre quando a radiação solar induz reações químicas nos HC, alterando a sua composição original (DGAM, 2011). A exposição à luz pode promover a combinação de oxigénio com os compostos do hidrocarboneto, originando novos produtos, como as resinas. Estas substâncias podem dissolver-se parcialmente na água ou contribuir para a formação de emulsões estáveis (Fingas, 2015). A relevância da foto-oxidação varia consoante o tipo de HC e as condições ambientais, sendo que, na maioria dos casos, este processo não altera de forma significativa o seu destino (Fingas, 2015).
- **Sedimentação** – é o processo pelo qual os HC, nomeadamente sob a forma

de emulsões ou após se agregarem a partículas em suspensão, se depositam no fundo. Este fenómeno ocorre quando a densidade da substância ou da mistura HC juntamente com sedimentos, ultrapassa a densidade da água envolvente, provocando a sua descida até à camada de equilíbrio (Azevedo, 2010; DGAM, 2011). A presença de matéria em suspensão, sendo mais comum em zonas costeiras, aumenta a probabilidade de sedimentação, sendo este um processo potenciado por alterações anteriores como a evaporação, a emulsificação e a dissolução, que tornam a substância mais densa.

- **Biodegradação** – A biodegradação é um processo natural de degradação microbiana progressiva, em que microrganismos como bactérias, fungos e algumas algas consomem os HC e os transformam em compostos mais simples e menos tóxicos. Embora seja um processo mais lento em comparação com outros mecanismos de *weathering*, pode assumir um papel relevante na redução da massa poluente a médio prazo, especialmente em ambientes marinhos costeiros (Fingas, 2011; National Research Council, 2003). A sua eficácia depende de fatores como, a temperatura da água (mais eficaz em águas quentes), a disponibilidade de nutrientes, a presença de oxigénio dissolvido e a diversidade de microrganismos presentes no local (Azevedo, 2010; DGAM, 2011).

1.4 Modelação da deriva de hidrocarbonetos

A modelação da deriva de HC constitui uma ferramenta fundamental na resposta a derrames no mar, permitindo prever a trajetória e o destino de poluentes na superfície ou na coluna de água. A evolução desta área científica tem sido marcada por um progresso significativo, com a transição de modelos simplificados, baseados em teorias físicas clássicas, para sistemas de modelação mais avançados, capazes de integrar dados meteo-oceanográficos em tempo real, propriedades físico-químicas dos HC e processos de degradação.

Modelos simplificados, como os baseados na teoria de Ekman, descrevem a resposta da coluna de água à tensão do vento aplicada na superfície, considerando o balanço entre esta força de fronteira, a força de coriolis e o atrito vertical entre camadas. Este mecanismo origina a chamada espiral de Ekman, na qual a corrente superficial se orienta cerca de 45° à direita do vento no hemisfério norte, enquanto o transporte integrado ao longo da coluna de Ekman se situa, em média, 90° à direita da direção do vento (Ekman, 1905; Pond & Pickard, 1983). Apesar de útil numa primeira aproximação, este tipo de abordagem apresenta limitações consideráveis,

sobretudo em zonas costeiras, onde a batimetria, a interação com correntes locais e a variabilidade atmosférica exigem maior resolução e complexidade. Além disso, estes modelos não consideram processos cruciais como a evaporação, emulsificação, dispersão ou a sedimentação da substância derramada (Reed et al., 1999).

Face a estas limitações, foram desenvolvidos modelos operacionais de deriva de HC, como o General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME), o MEDSLIK-II, o Oil Spill Model and Response System (OILMAP), o Oil Spill Contingency and Response model (OSCAR) e o OpenDrift, entre outros. Estes modelos permitem a simulação da deriva de manchas de HC através da resolução das equações de movimento de partículas (método lagrangiano), incorporando dados meteo-oceanográficos (vento, correntes, ondas), características dos HC (densidade, viscosidade, volatilidade), bem como a modelação dos principais processos de transformação do composto ao longo do tempo.

Entre os modelos referidos, destaca-se o OpenDrift, utilizado na presente dissertação. Trata-se de um sistema de modelação Lagrangiana desenvolvido em Python e de código aberto, sob responsabilidade do Instituto Meteorológico da Noruega (Norwegian Meteorological Institute) (Dagestad et al., 2018). Concebido para múltiplas aplicações, o OpenDrift é utilizado tanto para modelação de deriva oceânica como atmosférica, sendo capaz de simular o comportamento de uma grande variedade de objetos à deriva, incluindo manchas de HC, boias, embarcações ou plâncton (Belzunce, 2024; Dagestad et al., 2018).

A sua estrutura modular e flexível permite definir parâmetros fundamentais como a localização inicial da libertação de partículas, taxas de emissão, propriedades físicas dos elementos (como a flutuabilidade ou dimensão), bem como a origem e tipo dos dados ambientais de forçamento, nomeadamente vento, correntes e ondas (Belzunce, 2024). O OpenDrift baseia-se numa abordagem Lagrangiana, na qual o movimento de cada elemento é calculado individualmente ao longo do tempo, proporcionando uma representação precisa na trajetória bem como da evolução das suas propriedades físico-químicas, como é o caso da evaporação dos HC (Dagestad et al., 2018).

Entre as suas funcionalidades destacam-se a capacidade de realizar simulações com milhões de partículas num computador pessoal e a simplicidade na instalação e utilização do sistema (Dagestad et al., 2018). O modelo inclui ainda ferramentas integradas de visualização, permitindo representar graficamente os resultados através de mapas de trajetórias, campos de concentração e padrões de dispersão (Belzunce, 2024).

O repositório oficial do OpenDrift disponibiliza diversos módulos específicos, prontos a utilizar e facilmente adaptáveis. Entre eles destacam-se o OpenOil (para modelação da deriva de HC) e o Leeway (utilizado em operações de busca e salvamento) (Dagestad et al., 2018). Cada módulo inclui exemplos aplicáveis e personalizáveis, facilitando o processo de aprendizagem e adaptação do modelo às necessidades específicas de cada utilizador.

Importa referir que o OpenDrift disponibiliza também um mecanismo de simulação de trajetória inversa (*backtracking*), implementado através da utilização de passos de tempo negativos, funcionalidade que permite estimar a origem de uma substância ou objeto detetado no oceano (Dagestad et al., 2018).

A escolha do OpenDrift nesta dissertação deve-se à sua comprovada versatilidade, à integração com dados ambientais reais e à disponibilidade de módulos específicos para diferentes tipos de deriva. Embora não modele explicitamente os processos físico-químicos que afetam os HC, como a evaporação ou a dispersão, o modelo considera os seus contributos através de fatores de correção aplicados à integração da velocidade das partículas. Esta abordagem permite representar de forma eficaz o comportamento global da mancha de poluente, mantendo a simplicidade computacional necessária para simulações operacionais. No presente trabalho, foram utilizados os módulos OpenOil e Leeway, cuja descrição e aplicação ao caso de estudo do naufrágio do navio *Felicity Ace* serão apresentadas nas secções seguintes.

1.5 MV *Felicity Ace*: Contexto e relevância

O caso escolhido para esta investigação é o do navio mercante *Felicity Ace*, que, no dia 16 de fevereiro de 2022, se encontrava a cerca de 100 milhas náuticas a sudoeste da ilha do Faial, em águas da ZEE nacional (Figura 1.1). O navio seguia em trânsito da Europa para os Estados Unidos, com 22 tripulantes a bordo e cerca de quatro mil automóveis de luxo (Marinha Portuguesa, 2022).



FIGURA 1.1: Localização do evento (retirado de *Panama Maritime Authority (2022)*).

Nesse mesmo dia, pelas 10:47, o Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo de Ponta Delgada (MRCC Delgada) recebeu um alerta de incêndio descontrolado a bordo. A resposta envolveu a colaboração de navios próximos, do helicóptero EH-101 Merlin da Força Aérea Portuguesa e do NRP² Setúbal (Marinha Portuguesa, 2022).

Segundo a Marinha Portuguesa (2022), pelo dia 21 de fevereiro de 2022, devido às condições de mar adversas, o navio iniciou a sua deriva, tendo ficado a cento e sessenta milhas náuticas da linha de costa da Região Autónoma dos Açores (RAA), limite do fim do espaço marítimo sobre o qual as autoridades nacionais ainda têm competência de intervenção. Após dias de deriva, agravada pelo incêndio e pelas más condições meteorológicas, o MV *Felicity Ace* acabou por naufragar no dia 1 de março de 2022. No dia 5 de março de 2022, foi detetada por satélite a primeira mancha de HC proveniente do navio naufragado.

A sequência de eventos encontra-se representada na figura 1.2, que apresenta uma linha cronológica dos principais marcos do evento, desde o início do incêndio a bordo do navio, até ao naufrágio do mesmo e a deteção das manchas de poluição.

²Navio da República Portuguesa

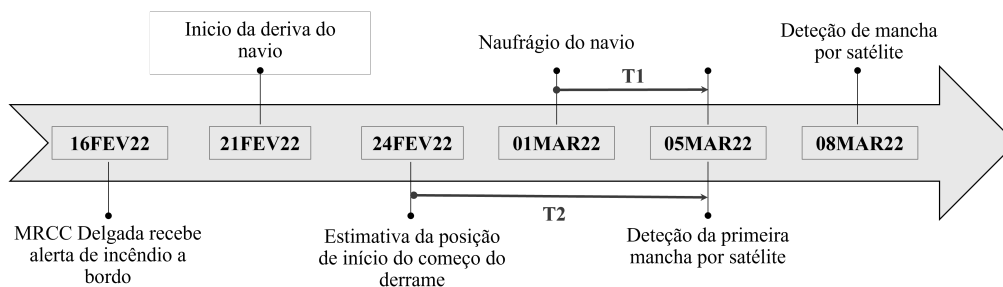


FIGURA 1.2: Representação cronológica dos principais eventos do navio Felicity Ace entre os dias 16FEV22 e 08MAR22. Os instantes T1 e T2 indicam dois períodos de tempo em análise nas derivas.

Importa referir que o evento resultou num derrame significativo, uma vez que o navio transportava mais de quatro mil veículos, muitos deles com baterias de lítio e tanques de combustível cheios. Esta dimensão confere ao caso um elevado interesse do ponto de vista ambiental e técnico, permitindo testar a capacidade dos modelos em cenários complexos e com elevada carga poluente, tendo sido detetada a última mancha, através do CleanSea Net, no dia 16 de março de 2022.

Assim, a combinação entre a magnitude do evento, a diversidade dos poluentes envolvidos e o envolvimento em águas profundas e distantes de costa, tornam o incidente do navio Felicity Ace um cenário particularmente desafiante e representativo.

Este evento foi escolhido como caso de estudo para a presente dissertação, por reunir um conjunto de fatores que o tornam particularmente relevante para a aplicação de modelos de simulação de derrames de HC. Em primeiro lugar, trata-se de um acontecimento recente, o que permite o acesso a dados atualizados, incluindo imagens satélite, registos de navegação e informação operacional, facilitando a reconstrução do evento. Esta atualidade também contribui para a pertinência do estudo, tendo em conta o contexto atual da segurança marítima e da proteção ambiental. A sua localização, ao largo dos Açores - uma região de elevado tráfego marítimo e sensibilidade ecológica - acrescenta uma dimensão estratégica à análise, especialmente por ter ocorrido em águas sob jurisdição portuguesa. Acresce ainda o facto de ter sido um caso amplamente divulgado e acompanhado por diversas entidades internacionais, o que facilitou o acesso a documentação pública e informação complementar, enriquecendo a investigação.

A sua análise permite não só testar a aplicabilidade dos modelos de deriva em contextos reais, como também reforçar a importância da modelação numérica enquanto ferramenta essencial na resposta a incidentes ambientais de grande escala.

Capítulo 2

Dados e Métodos

O presente capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados, desde a caracterização dos dados e formulação das hipóteses de *backtracking* até à implementação dos módulos OpenDrift (OpenOil e Leeway) e à aplicação dos modelos de forçamento oceanográfico e atmosférico. São descritos o cálculo da deriva do navio e da mancha de hidrocarbonetos, a definição dos parâmetros de entrada e a hipótese inicial de modelação, concluindo com os métodos de avaliação aplicados às simulações.

2.1 Dados iniciais

Os dados iniciais utilizados nas simulações foram obtidos a partir de fontes oficiais, incluindo relatórios públicos internacionais relacionados com o evento e, de forma particular, através do contacto direto com a DCPM.

O contacto permitiu aceder a informação específica sobre o evento, nomeadamente através do *CleanSeaNet Alert Report*, que registou a deteção, por satélite, de uma extensa mancha nos dias subsequentes ao naufrágio. Adicionalmente, a documentação fornecida pela DCPM permitiu identificar o tipo de hidrocarboneto presente no caso de estudo como Fuel Oil No. 6, informação relevante para a correta parametrização das simulações. Estes dados forneceram uma referência espacial e temporal concreta sobre a possível área de contaminação, constituindo o principal elemento de validação para as simulações realizadas (Figura 2.1).

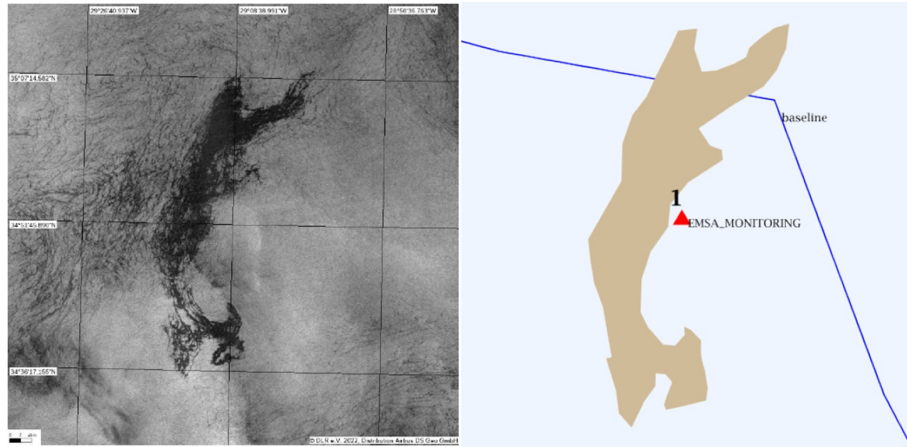


FIGURA 2.1: (a)Imagem satélite (b)Esboço criado através do programa CleanSeaNet (retirado do *CleanSeaNet Alert Report*).

A tabela 2.1 apresenta os parâmetros disponíveis para caracterizar a mancha observada.

TABELA 2.1: Dados iniciais da mancha retirados do *CleanSeaNet Alert Report*.

Parâmetros	Dados
Posição central	$\varphi = 34^{\circ} 50' 30''$ N $L = 029^{\circ} 09' 52''$ W
Área (km^2)	611,40
Comprimento (km)	64.40
Largura (km)	22.39
Número de manchas	1

Apesar da importância dos registos disponíveis, subsistem várias incertezas críticas para a modelação:

- **Origem temporal do derrame:** não existe confirmação do momento exato em que começou a libertação de poluentes, se ainda durante a deriva do navio ou já após o seu naufrágio.
- **Local inicial da libertação:** a posição geográfica inicial do derrame não é conhecida com precisão.

- **Volume do poluente:** não foi possível obter estimativas fiáveis sobre a quantidade derramada.
- **Evolução prévia da mancha:** a mancha detetada por satélite já apresentava vários dias de dispersão, não representando a fase inicial do derrame.

Face às limitações identificadas, adotou-se uma abordagem exploratória, formulando diferentes hipóteses quanto ao momento e à localização inicial da libertação das partículas, com o objetivo de avaliar cenários plausíveis de evolução e dispersão da mancha. Nas simulações, não foi estabelecida correspondência direta entre o número de partículas modeladas e a massa real derramada, dado não existirem dados quantitativos fiáveis. Assim, as partículas funcionam como representações discretas da mancha de HC, permitindo reproduzir a trajetória e a transformação da mancha sem quantificação absoluta da carga poluente.

Para todas as simulações de *backtracking*, o número de partículas foi aumentado para 1000, de forma a melhorar a resolução espacial da mancha simulada, tendo em conta que o OpenDrift, ao operar no sentido inverso, não considera a continuidade temporal da mancha nem os processos físico-químicos de transformação dos hidrocarbonetos (Dagestad et al., 2018).

2.2 OpenDrift: Módulos OpenOil e Leeway

2.2.1 Módulo OpenOil

O OpenOil é um dos módulos específicos do OpenDrift, desenvolvido com o objetivo de simular a deriva e a transformação de derrames de HC no mar. Este modelo computacional adota uma abordagem lagrangiana, representando o composto derramado como partículas individuais, com propriedades físicas próprias, como viscosidade e densidade, as quais são fundamentais para determinar o seu comportamento ao longo do tempo e do espaço (P. Keramea et al., 2022). A propagação dessas partículas é condicionada pelas condições meteorológicas e oceanográficas, sendo transportadas por correntes, vento e ondas, na respetiva posição georreferenciada (longitude, latitude e em situações em que se considera relevante, a profundidade).

Uma das principais funcionalidades do OpenOil que o distingue de outros módulos é a incorporação de parametrizações para simular os processos de alteração e evolução da substância, como evaporação, emulsificação, mistura vertical e biodegradação (Pärt et al., 2023). Estas transformações são influenciadas pelas características específicas de cada tipo de HC, cujos dados são obtidos a partir

da *ADIOS Oil Database*, desenvolvida pela NOAA³. Esta base de dados de acesso aberto contém informação detalhada sobre as propriedades físicas e químicas de diversos tipos de HC, permitindo simulações mais realistas e ajustadas à composição da substância envolvida (P. Keramea et al., 2022).

A aplicação prática do OpenOil tem vindo a destacar-se em diversos estudos e contextos operacionais. Um exemplo é a simulação do derrame causado pelo navio Heibei Spirit em 2007, que utilizou o OpenOil juntamente com modelos de forçamento meteorológicos e oceanográficos (correntes, vento e ondulação) para reproduzir o evento com grande precisão (Dang et al., 2024). Adicionalmente, o módulo tem sido utilizado para analisar eventos como o desastre da DeepWater Horizon no Golfo do México, bem como para avaliar o transporte de HC em regiões como os estreitos da Flórida (P. Keramea et al., 2022). A sua eficiência tem sido validada com sucesso por comparação com observações de deteção remota, nomeadamente no Mar do Norte, onde demonstrou elevada concordância com a deriva de óleo em mar aberto (P. Keramea et al., 2022).

A utilidade operacional do OpenOil também é reconhecida no apoio à resposta a emergências de poluição ambiental. O modelo permite prever com precisão a trajetória de uma mancha de HC, fornecendo às autoridades e agências competentes dados essenciais para otimizar operações de busca, salvamento e limpeza (Belzunce, 2024). Assim, o OpenOil assume um papel fundamental na formulação de estratégias de mitigação de impactos, contribuindo para a proteção de ecossistemas e para a minimização das consequências de eventos catastróficos.

No âmbito deste estudo, o módulo OpenOil foi utilizado para simular a trajetória de uma mancha de HC associada ao naufrágio do navio Felicity Ace, com base em dados reais e hipotéticos da localização do naufrágio e dados de forçamento ambientais. Esta aplicação permitiu estimar a possível evolução espacial da mancha ao longo do tempo.

2.2.2 Módulo Leeway

O módulo Leeway, disponível no OpenDrift, foi desenvolvido para simular a deriva de objetos flutuantes à superfície do mar, sendo especialmente utilizado em operações de busca e salvamento ou em estudos de rastreio de destroços e objetos à deriva. Esta implementação, designada Leeway, baseia-se no modelo operacional

³<https://github.com/NOAA-ORR-ERD/OilLibrary> (último acesso a 1 de abril de 2025).

adotado pelo Instituto Meteorológico da Noruega para fins de busca e salvamento (Breivik & Allen, 2008; Dagestad et al., 2018).

O módulo permite a seleção de diferentes classes de objetos, como pessoa na água (“Person in water”-PIW), navio de pesca (“Fishing vessel”) ou até mesmo uma balsa salva-vidas (“Liferaft”), cada uma caracterizada por propriedades específicas de deriva, como as componentes ao longo da direção do vento (*downwind leeway*) e na direção transversal (*crosswind leeway*), determinados com base em observações reais (Dagestad et al., 2018).

Após a escolha da classe do objeto e a definição dos campos de vento e corrente adequados, as partículas são semeadas com base nas informações conhecidas e fornecidas, como a posição e momento inicial (Dagestad et al., 2018).

Este módulo tem sido aplicado em diversas situações atuais, como, por exemplo, demonstrado por Ličer et al. (2020), que analisaram a deriva de uma pessoa desaparecida no mar Adriático durante uma tempestade. Neste estudo, foram testadas diferentes classes de objetos e analisados os efeitos da inclusão de campos de corrente de alta resolução, tendo os resultados mostrado boa concordância entre as simulações e a localização final observada.

2.3 Modelos de Forçamento

A Figura 2.2 apresenta, de forma esquemática, o enquadramento geral do processo de aquisição e integração dos dados de forçamento utilizados no presente estudo, bem como a sua ligação aos módulos de deriva. O diagrama sintetiza as fontes de dados oceanográficos e atmosféricos, Copernicus Marine Environment Monitoring Services (CMEMS) e *Reanalysis 5^a geração* (ERA5), respetivamente, e a sua aplicação nos módulos do OpenDrift (OpenOil e Leeway), conduzindo à geração de simulações *forward* e de *backtracking*.

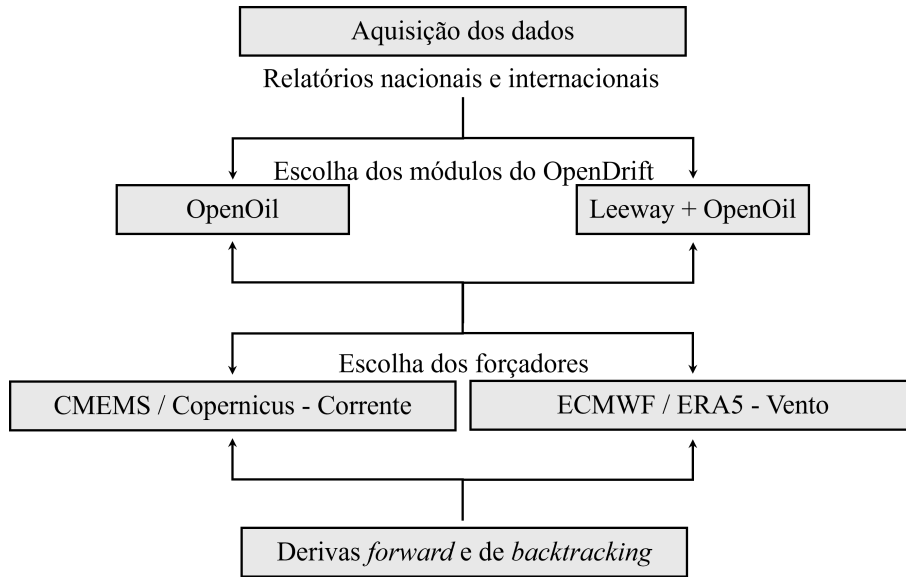


FIGURA 2.2: Esquema do processo metodológico adotado no estudo, desde a aquisição dos dados até à aplicação dos módulos do OpenDrift nas derivas *forward* e *backtracking*.

Os modelos de forçamento utilizados neste estudo, de natureza hidrodinâmica, meteorológica e oceanográfica, incorporam variáveis como vento, correntes e ondas, que constituem fatores determinantes na trajetória de transporte de uma mancha de HC (Dang et al., 2024). No caso do vento, as propriedades atmosféricas obtidas a partir de modelos meteorológicos influenciam não apenas o transporte, mas também processos de transformação destes compostos, como a evaporação (Keramea et al., 2023).

Para garantir uma caracterização rigorosa das condições ambientais no período do incidente, recorreu-se a produtos do CMEMS para o forçamento oceanográfico e do European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) para o forçamento atmosférico. A escolha de modelos globais assegurou cobertura espacial e temporal adequadas, abrangendo toda a área de estudo e disponibilizando dados em períodos não contemplados por modelos regionais.

Formato dos Dados

Os dados de ambos os tipos de forçamento foram disponibilizados em formato Network Common Data Form (NetCDF), amplamente utilizado para armazenar e partilhar grandes volumes de informação científica, especialmente proveniente de modelos numéricos. Este formato organiza variáveis em matrizes associadas a

dimensões como latitude, longitude e tempo, permitindo representar de forma eficiente campos espaciais e temporais. Entre as suas principais vantagens destaca-se a possibilidade de extrair subconjuntos específicos, como intervalos temporais ou áreas geográficas, otimizando o acesso e a análise (Rew & Davis, 1990; Unidata, 2023).

Forçamento Oceanográfico

O CMEMS, a parte do programa Copernicus dedicada à monitorização dos oceanos, fornecendo dados de observação e resultados de modelos numéricos que caracterizam o estado físico e biogeoquímico do oceano. Entre as variáveis disponibilizadas pelo produto `GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024`⁴ encontram-se a temperatura da água, salinidade, correntes, altura da superfície do mar e concentração de gelo.

No presente trabalho, foi utilizado um subconjunto destas variáveis como entrada no OpenDrift. Em particular, foram extraídas as componentes `uo` e `vo` da corrente, correspondentes às velocidades nas direções este-oeste e norte-sul, respetivamente. Estas variáveis são processadas pelo módulo de leitura de dados oceanográficos do OpenDrift, que realiza a interpolação espacial e temporal para a posição e instante de cada partícula simulada. Embora o produto também disponibilize outros parâmetros físicos, como temperatura e salinidade, estes não foram utilizados diretamente nas simulações, uma vez que o módulo OpenOil requer, como forçamento oceânico principal, apenas as componentes de corrente para calcular o transporte horizontal.

Este produto global apresenta uma resolução espacial de $1/12^\circ$ (aproximadamente 9 km), cobertura de latitudes entre -80° e 90° e longitudes entre -180° e 179.92° , e estrutura vertical de 50 níveis desde a superfície até 5500 metros de profundidade. Os dados estão disponíveis desde 2020 e incluem reanálises, dados diários e mensais, bem como previsões até 10 dias, atualizadas diariamente.

A escolha do modelo global justificou-se pela sua ampla cobertura espacial e temporal, necessária para analisar o incidente do MV *Felicity Ace*, ocorrido fora da cobertura temporal e espacial dos modelos regionais, que apenas disponibilizam dados a partir de novembro de 2022. Reconhece-se que a menor resolução espacial do modelo global pode limitar a representação de fenómenos de pequena escala, mas considerou-se que a sua maior abrangência compensava essa limitação face aos objetivos do estudo.

⁴Mais detalhes sobre o modelo https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/description último acesso em 25 de março de 2025.

Forçamento Atmosférico

O conjunto de reanálises ERA5⁵ fornecido pelo Copernicus Climate Change Service (C3S), integra observações de satélites, boias e estações meteorológicas com modelos numéricos, reconstruindo de forma consistente as condições atmosféricas e oceânicas desde 1940 (Hersbach et al., 2020). Possui uma resolução espacial de aproximadamente 31 km e resolução temporal horária, oferecendo cobertura global e contínua.

No presente estudo, foi utilizado um subconjunto das variáveis disponíveis como entrada no OpenDrift, especificamente as componentes “10m u-component of wind” e “10m v-component of wind” do vento a 10 metros de altura, que representam as componentes da velocidade do vento nas direções este-oeste e norte-sul. Estas variáveis são lidas pelo módulo de leitura de dados atmosféricos do OpenDrift, que realiza a interpolação espacial e temporal para cada instante e posição das partículas simuladas. Este campo de vento é posteriormente integrado nos cálculos do módulo OpenOil para determinar o contributo da força do vento na deriva das partículas, através do parâmetro *Wind drift factor* (WDF).

A escolha do ERA5 fundamentou-se na sua ampla cobertura temporal, permitindo a análise de eventos passados com elevada fiabilidade, e na elevada resolução espacial e temporal, essenciais para a caracterização detalhada do campo de vento no caso de estudo. Além disso, trata-se de uma base de dados amplamente validada e reconhecida pela comunidade científica como uma das reanálises atmosféricas mais robustas atualmente disponíveis, conferindo maior confiança aos resultados obtidos no modelo de deriva.

2.4 Cálculo da deriva do navio para análise da origem do derrame

2.4.1 Estimativa da deriva do navio antes do naufrágio

Para investigar a possibilidade de o derrame de HC ter tido origem antes do naufrágio do navio Felicity Ace, foi necessário estimar a sua trajetória entre o início da sua deriva e o naufrágio (Figura 1.2). Esta análise permitiu identificar possíveis posições anteriores à data do naufrágio que pudessem corresponder ao local e momento de início do derrame.

⁵Mais detalhes em: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> último acesso a 25 de março de 2025.

A deriva do navio foi simulada com o módulo Leeway do OpenDrift, especificamente concebido para modelar a movimentação de objetos à deriva no mar, considerando a ação conjunta de vento e corrente. A simulação foi realizada para o período compreendido entre 21 de fevereiro e 1 de março de 2022, num total de nove dias. Esta data inicial corresponde ao momento a partir do qual se verificou, com base em fontes externas, que o navio iniciou a sua deriva.

O modelo de deriva foi forçado com dados meteo-oceanográficos dos quais, as correntes provenientes do modelo global CMEMS e o vento proveniente da reanálise ERA5, conforme descrito no capítulo 2 e esquematizado na Figura 2.2.

Foram simuladas 2500 partículas, posicionadas na localização registada para o navio a 21 de fevereiro, de forma a aumentar a resolução espacial da simulação e a probabilidade de representar adequadamente a variabilidade das trajetórias possíveis. Cada partícula corresponde a um percurso potencial e foi configurada com um parâmetro físico associado a um navio com características semelhantes às do *Felicity Ace*, através da definição do parâmetro `object_type = 20`, que no OpenDrift corresponde à classificação de Navio de grande porte.

As trajetórias foram calculadas para cada dia do período simulado, permitindo determinar, para cada um dos dias, a posição média das partículas que permaneceram dentro da área entre o ponto inicial (21 de fevereiro) e o ponto final (local do naufrágio). As posições médias diárias serviram como estimativas prováveis de localização do navio em cada dia, com o objetivo de testar hipóteses retrospectivas para o início do derrame.

Para a análise ser o mais rigorosa, foram descartadas trajetórias cujas partículas se afastaram da área delimitada entre os dois extremos da deriva, de modo a evitar interpretações baseadas em *outliers* não representativos.

2.4.2 Deriva de hidrocarbonetos a partir das posições estimadas

A partir das posições médias dos dias 22, 23 e 24 de fevereiro, obtidas pela simulação de deriva do navio, realizaram-se novas simulações de deriva *forward* de HC com o módulo OpenOil, assumindo cada uma destas posições como ponto de origem hipotético do derrame. Tal como nas derivas anteriores, foram utilizados os mesmos dados de vento e corrente (CMEMS e ERA5), e a simulação foi mantida até ao dia 5 de março de 2022, data da deteção da mancha por satélite em estudo,

adotando-se para estas novas simulações a configuração utilizada na Simulação 1 (Tabela 2.3).

2.5 Definição e fundamentação dos parâmetros de entrada

A modelação da deriva de HC no mar depende fortemente da correta definição das variáveis de forçamento, os quais influenciam diretamente o comportamento das manchas simuladas. Dentro destes parâmetros, destacam-se o WDF, o tipo de hidrocarboneto e o raio de incerteza associado à posição inicial ou observada da mancha (*radius*). A seleção adequada destes elementos é essencial para garantir o realismo de cada cenário, uma vez que refletem a complexidade das interações entre as propriedades físicas dos poluentes, as condições ambientais e as limitações dos dados disponíveis. Nesta secção, apresentam-se as escolhas efetuadas para cada um destes parâmetros, justificadas com base em literatura científica e nas especificidades do caso de estudo, de forma a permitir uma análise de sensibilidade e a robustez do modelo face a diferentes cenários.

Variação do WDF

A influência do vento é um dos fatores determinantes na modelação da deriva de HC à superfície. Nos modelos de simulação, esta influência é normalmente representada pelo fator de deriva do vento (WDF), que expressa a fração da velocidade do vento transmitida ao movimento das partículas de HC na superfície. De forma simplificada, a velocidade de deriva pode ser expressa por (Hackett et al., 2006; Reed et al., 1994):

$$\mathbf{u}_{\text{deriva}} = \mathbf{u}_{\text{corrente}} + \text{WDF} \times \mathbf{u}_{\text{vento}} \quad (2.1)$$

onde:

- $\mathbf{u}_{\text{deriva}}$ – vetor velocidade de deriva das partículas de HC à superfície (m s^{-1});
- $\mathbf{u}_{\text{corrente}}$ – vetor velocidade da corrente superficial (m s^{-1});
- $\mathbf{u}_{\text{vento}}$ – vetor velocidade do vento medida a 10 m de altura (m s^{-1});
- WDF – *Wind Drift Factor*, coeficiente adimensional que representa a fração da velocidade do vento transmitida à deriva.

Este parâmetro incorpora, de forma empírica, o efeito da interação entre o vento e o mar, e é crucial para reproduzir trajetórias mais realistas.

A influência do vento na deriva superficial pode ser explicada pela teoria de Ekman, que descreve a resposta da camada superior do oceano à ação do vento. Nesta teoria, a ação do vento na interface oceano-atmosfera gera correntes superficiais cuja direção sofre uma deflexão para a direita no hemisfério norte (esquerda no hemisfério sul) devido à força de Coriolis, formando a chamada Espiral de Ekman (Ekman, 1905). O ângulo de 45° à superfície corresponde a um valor teórico da solução idealizada, sendo que na realidade este valor pode diferir em função da estratificação e da turbulência local. O transporte integrado na camada de Ekman ocorre, teoricamente, 90° à direita do vento no hemisfério norte, na ausência de gradientes de pressão (Pond & Pickard, 1983).

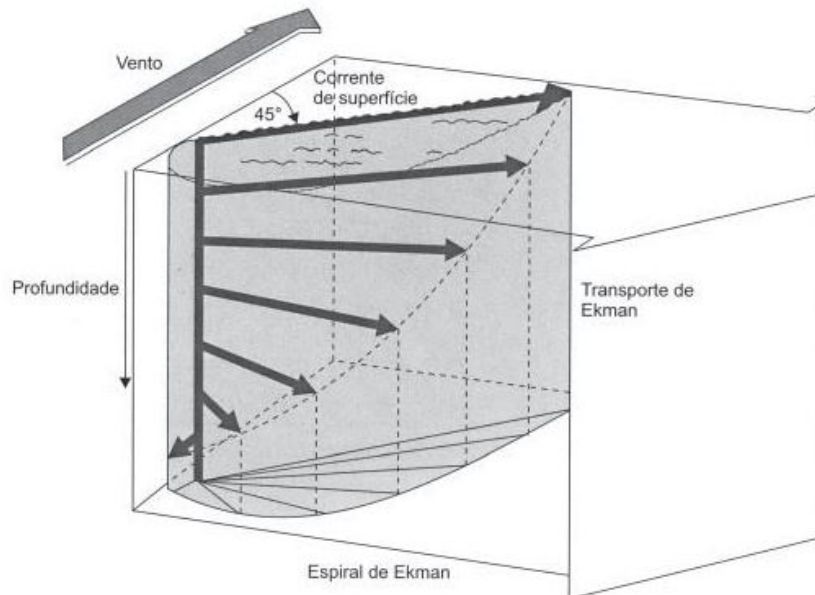


FIGURA 2.3: Esquema da espiral de Ekman. Fonte: Maia (2021).

Embora os modelos de deriva não representem toda a complexidade das interações entre o vento e o oceano, o WDF constitui uma parametrização empírica do arrastamento superficial induzido pelo vento, ajustando a velocidade das partículas a uma fração da velocidade do vento medida a 10 metros de altura. Esta abordagem não corresponde ao transporte de Ekman, que resulta da integração vertical da resposta da coluna de água e tem natureza distinta, mas permite representar de forma simplificada a influência do vento na deriva superficial.

Na prática, muitos modelos consideram o WDF como um valor empírico constante aplicado à velocidade do vento (Liu et al., 2023), o que simplifica mas não capta a variabilidade espacial e temporal das condições ambientais. Estudos demonstram que o valor ótimo depende de fatores como o tipo de HC, intensidade do vento e características da mancha (Kim et al., 2014), sendo praticamente inviável medi-lo diretamente em mar aberto (Liu et al., 2023). Assim, valores de referência são frequentemente adotados: De Dominicis et al. (2013a, 2013b) testaram 0–3%, Bozkurtoğlu e Ertürk (2017) seguiram Stolzenbach et al. (1977) ao adotar 3.0% para planeamento, e outros mantêm valores abaixo de 6.0% (Carson et al., 2013; Reed et al., 1994).

No presente trabalho, foram testados três valores de WDF: 0.0%, para isolar o efeito das correntes superficiais e avaliar a deriva sem vento; 1.5%, como valor intermediário representativo de cenários com influência moderada do vento (como manchas parcialmente submersas ou emulsificadas); e 3.0%, amplamente adotado em contextos operacionais e recomendado para planeamento (Bozkurtoğlu & Ertürk, 2017; Stolzenbach et al., 1977). Esta seleção, inspirada em estudos como Kim et al. (2014) e Mohan et al. (2014), permite avaliar a sensibilidade do modelo à parametrização do WDF em simulações *forward* e de *backtracking*, invertendo-se apenas o vetor do vento e mantendo-se o valor percentual escolhido.

Deriva para diferentes tipos de HC

Para as derivas realizadas no âmbito deste trabalho, foram selecionados três tipos de HC com características e aplicabilidades distintas: Fuel Oil No. 6, Fuel Oil No. 2 e o Marine Diesel Oil (MDO). Esta escolha teve como objetivo representar diferentes substâncias que podem ser derramadas no mar, quer por eventos associados ao transporte marítimo, quer por operações de abastecimento ou descarga de combustível.

O Fuel Oil No. 6, também conhecido como Bunker C, é uma mistura de óleos residuais pesados juntamente com um mais leve, que apresenta elevada viscosidade e densidade (NOAA Office of Response and Restoration, 2022). Utilizado principalmente em grandes embarcações e unidades industriais (U.S. Energy Information Administration, n.d.), quando derramado, este tipo de substância espalha-se em manchas espessas e escuras, apresentando uma elevada persistência na água, sendo difícil de se dispersar e podendo causar grandes impactos ambientais e duradouros. Para além das suas propriedades desafiantes, este hidrocarboneto foi escolhido por ter sido o composto detetado que foi derramado pelo navio *Felicity Ace*, envolvido

no caso real em análise neste trabalho. Assim, a sua inclusão permite garantir um maior realismo das simulações esperando-se uma melhor correspondência entre os dados modelados e as condições do evento estudado.

O Fuel Oil No. 2, por sua vez é um destilado mais leve, com menor viscosidade e muito pouca volatilidade (United States Environmental Protection Agency, 2024). É utilizado frequentemente em motores de navios mais pequenos e em geradores (National Center for Biotechnology Information, 2025). A sua composição permite uma maior taxa de evaporação, o que altera significativamente a sua dinâmica de comportamento no mar, pelo que se dispersa facilmente e não é suscetível de formar emulsões, sendo relativamente pouco persistente no ambiente.

O MDO é um combustível também muito comum no setor marítimo, não sendo um destilado puro. O MDO é muitas das vezes chamado de Intermediate Fuel Oil (IFO), por ser uma mistura de pequenas proporções de óleo combustível pesado e outros destilados (Oiltanking GmbH, 2025). Geralmente é utilizado em motores auxiliares e em embarcações de média dimensão. Em comparação com um óleo mais pesado como o Fuel Oil No. 6, e segundo a Government of British Columbia (2025), é considerado não persistente, possuindo taxas de evaporação e dissolução relativamente rápidas.

A escolha dos referidos HC abrange desde combustíveis com baixa viscosidade, como o Fuel Oil No. 2, a óleos mais densos e persistentes, como o *Fuel Oil No. 6*. Na tabela 2.2 estão algumas das propriedades mais importantes de cada e em que são demonstradas as diferenças de cada um. Estas diferenças refletem-se, por exemplo, na viscosidade do Fuel Oil No. 6 de 96 cSt⁶ a 50°C para a uma viscosidade de 4.1 cSt a 40°C do Fuel Oil No. 2, que por consequência, tem um impacto direto na dispersão, evaporação e formação de emulsões. A densidade também varia de forma significativa, influenciando a flutuabilidade e o comportamento da mancha à superfície. O ponto de inflamação, por sua vez, apresenta valores mais baixos no Fuel Oil No. 2 (52-96°C), o que indica maior risco de inflamabilidade nas fases iniciais de um derrame, sobretudo em climas mais quentes. Já o MDO e o Fuel Oil No. 6 apresentam pontos de inflamação mais elevados, o que reduz esse risco.

⁶centistokes, unidade de medida da viscosidade cinemática

TABELA 2.2: Propriedades físico-químicas de óleos combustíveis selecionados.

Propriedades	MDO	Fuel Oil No. 2	Fuel Oil No. 6
Densidade (g/mL)	0.863 (15°C)	0.879 (20°C)	0.869-0.982 (15°C)
Viscosidade cinemática (cSt)	5.2 (40°C)	4.1 (40°C)	96 (50°C)
Ponto de inflamação (°C)	71-116	52-96	83-99
Solubilidade (ppm)	<0.03	insolúvel	insolúvel

Adaptado de Emergencies Science Division, Environment Canada (1999), Fingas (2011) e National Center for Biotechnology Information (2025)

Por fim, todos os HC apresentam solubilidade extremamente baixa ou nula em água. Embora o Fuel Oil No. 2 seja classificado como um óleo leve, a sua composição é denominada por hidrocarboneto não polar, que não se mistura com a água, o que justifica a sua insolubilidade. Esta característica é comum a óleos combustíveis em geral, sendo especialmente marcada nos mais pesados, como o Fuel Oil No. 6, que tendem a persistir por mais tempo no ambiente (Serafim, 2011). Assim, a seleção destes três compostos permite uma abordagem comparativa e abrangente, reforçando a importância de considerar a diversidade dos HC potencialmente envolvidos em incidentes no mar e as suas implicações na resposta e mitigação de derrames.

Influência da dispersão espacial (*radius*)

O parâmetro *radius* desempenha um papel central na representação da incerteza espacial relativamente à localização inicial de um derrame de HC, sendo amplamente utilizado em modelos de deriva para simular a dispersão inicial dos elementos. É frequentemente interpretado como o desvio padrão de uma distribuição normal bidimensional centrada na posição inicial do derrame, implicando que a maior concentração de partículas ocorre nas proximidades do centro, com dispersão progressiva para a periferia. Nesta configuração, cerca de 68% dos elementos encontram-se distribuídos dentro do valor de *radius* estipulado (Devis-Morales et al., 2022).

A relevância deste parâmetro estende-se a modelos de simulação aplicados a operações de SAR, como os desenvolvidos por Breivik e Allen (2008), em que o *radius* representa a incerteza espacial associada à última posição conhecida de uma pessoa ou objeto à deriva. Nestes casos, as partículas são distribuídas dentro de uma área plausível de busca, podendo a incerteza aumentar com o tempo e a

distância percorrida. Tal abordagem conduz frequentemente a zonas de sementeira com geometria cônica, em que o *radius* é reduzido no ponto inicial (P0) e ampliado no ponto final (P1), simulando a expansão gradual da área de procura ao longo da trajetória provável (Dagestad et al., 2018).

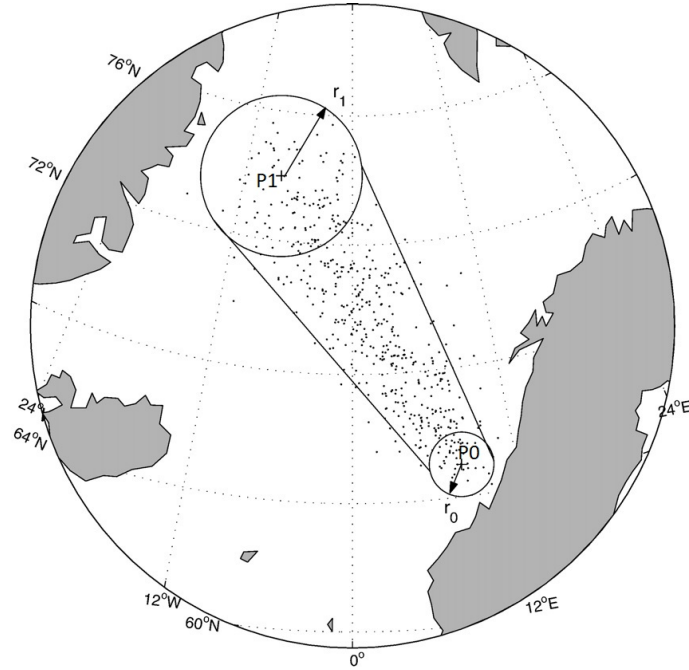


FIGURA 2.4: Representação esquemática de um cone de incerteza num modelo de SAR, com distribuição de partículas entre dois pontos (P0 e P1). O raio (*radius*) aumenta ao longo do tempo, refletindo a expansão da área provável de localização do objeto à deriva. (Fonte: Adaptado de Breivik e Allen (2008).)

A realização de múltiplas simulações com pequenas variações nas posições iniciais, todas contidas dentro da área definida pelo *radius*, permite representar diferentes trajetórias resultantes de variações naturais nas condições de vento e correntes. Esta metodologia, utilizada tanto em SAR como em modelação de derrames de HC, é particularmente útil quando a localização exata da libertação ou a evolução temporal do evento são incertas (Breivik & Allen, 2008). Em aplicações práticas, Devis-Morales et al. (2022) utilizaram valores de 400 e 800 metros, consoante o volume de HC libertados, realçando que o *radius* não é uma fronteira rígida, mas sim a medida estatística de uma incerteza espacial.

Segundo a documentação oficial do OpenDrift Project (2020), o *radius* é definido como um “*uncertainty radius (standard deviation, given in meters) around the given location within which all the (5000) elements will be seeded*”, o que reforça a ideia de que este parâmetro controla diretamente a dispersão inicial das partículas

e a área abrangida na simulação. A biblioteca do OpenDrift disponibiliza exemplos de configurações variadas, evidenciando a sua adaptabilidade a diferentes contextos operacionais.

No presente estudo, o *radius* foi incluído na análise de sensibilidade para avaliar o impacto da incerteza espacial na posição inicial das partículas, tanto em simulações *forward* (previsão) como *backward* (deriva inversa). Foram testados três valores, 100, 300 e 800 metros, definidos com base nas abordagens descritas por Devis-Morales et al. (2022) e na documentação do OpenDrift (OpenDrift Project, 2020).

- Simulações *forward*: partindo da posição assumida para o naufrágio do navio *Felicity Ace*, o *radius* representa a dispersão inicial das partículas, considerando desvios locais ou variação espacial na origem. Assim, 100 metros traduzem elevada confiança na posição de naufrágio; 300 metros simulam incerteza moderada; e 800 metros correspondem a elevada incerteza, alinhando com valores aplicados em outros estudos.
- Simulações *backward*: partindo da posição da mancha observada na imagem satélite (captada vários dias após o naufrágio), o *radius* representa a incerteza na localização e dispersão da mancha. Neste caso, 100 metros traduzem uma mancha bem delimitada; 300 metros representam incerteza intermédia; e 800 metros refletem elevada dispersão, seguindo a lógica aplicada em SAR, onde a incerteza aumenta com o tempo (Breivik & Allen, 2008).

Esta estratégia permite comparar o efeito de diferentes valores de *radius* na direção e extensão das trajetórias, avaliando a robustez do modelo perante uma incerteza espacial. A repetição das simulações com diferentes configurações contribui para identificar se pequenas imprecisões na posição inicial (no caso *forward*) ou na posição da mancha (no caso *backward*) resultam em alterações significativas na previsão da deriva, seguindo abordagens semelhantes às adotadas por Haddaoui et al. (2025).

2.6 Configurações de modelação

Como dito anteriormente, as simulações de deriva de HC, incidiram sobre o incidente do MV *Felicity Ace*, ocorrido em fevereiro de 2022, no Atlântico Norte.

A Figura 2.5 apresenta a localização geográfica das posições estimadas através da imagem satélite e utilizadas como ponto de origem nas diferentes hipóteses

testadas. Estas posições foram definidas com base na mancha observada por satélite e incluem três localizações: o ponto Nordeste (NE), o ponto Noroeste (NO) e a posição do naufrágio do navio (Panama Maritime Authority, 2022). O objetivo é explorar diferentes cenários iniciais no processo de modelação da deriva. Cada uma destas posições está associada às configurações descritas na Tabela 2.3.

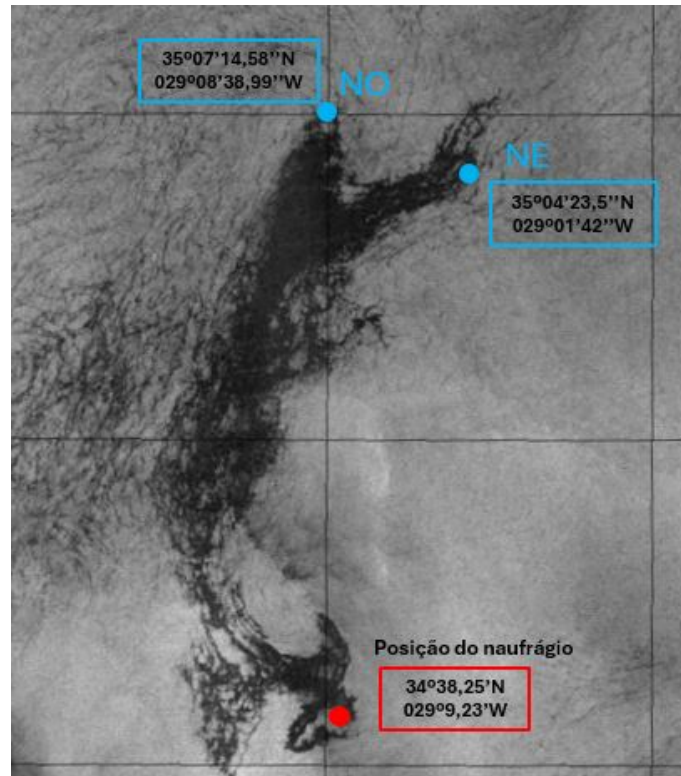


FIGURA 2.5: Localização das três posições utilizadas como ponto inicial nas derivas: ponto noroeste (NO), ponto nordeste (NE) e posição do naufrágio do navio.

Cada configuração corresponde a uma combinação específica dos parâmetros de entrada do modelo, nomeadamente o *wind drift factor* (WDF), o tipo de hidrocarboneto (HC) e o raio de dispersão (*radius*). Cada linha da tabela representa uma previsão de deriva distinta, numerada de 1 a 27, sendo a numeração utilizada ao longo da dissertação para facilitar a referência e discussão dos resultados. As configurações foram definidas de forma a representar diferentes cenários de dispersão, permitindo avaliar a sensibilidade do modelo às variações dos parâmetros considerados.

TABELA 2.3: Configurações adotadas nas simulações *forward* e de *backtracking* com diferentes tipos de hidrocarbonetos (HC), wind drift factor (WDF) e raio de dispersão (*radius*)

Simulação	WDF (%)	HC	<i>Radius</i> (m)
1	0	Fuel Oil No. 6	100
2	0	Fuel Oil No. 6	300
3	0	Fuel Oil No. 6	800
4	0	Fuel Oil No. 2	100
5	0	Fuel Oil No. 2	300
6	0	Fuel Oil No. 2	800
7	0	MDO	100
8	0	MDO	300
9	0	MDO	800
10	1.5	Fuel Oil No. 6	100
11	1.5	Fuel Oil No. 6	300
12	1.5	Fuel Oil No. 6	800
13	1.5	Fuel Oil No. 2	100
14	1.5	Fuel Oil No. 2	300
15	1.5	Fuel Oil No. 2	800
16	1.5	MDO	100
17	1.5	MDO	300
18	1.5	MDO	800
19	3	Fuel Oil No. 6	100
20	3	Fuel Oil No. 6	300
21	3	Fuel Oil No. 6	800
22	3	Fuel Oil No. 2	100
23	3	Fuel Oil No. 2	300
24	3	Fuel Oil No. 2	800
25	3	MDO	100
26	3	MDO	300
27	3	MDO	800

No caso dos pontos NE e NO, serão analisados dois períodos distintos, designados por T1 (correspondente ao espaço temporal de 1 de março a 5 de março de 2022) e T2 (correspondente ao período desde dia 24 de fevereiro a 5 de março de 2022), de forma a avaliar o impacto da data de início na simulação da deriva.

Desta forma, foram definidas quatro hipóteses, resultantes da combinação entre duas posições iniciais (NE e NO) e dois intervalos temporais (T2 e T1), apresentadas na Tabela 2.4.

TABELA 2.4: Hipóteses para simulações de deriva de *backtracking* de acordo com as configurações adotadas

Hipótese	Posição Inicial	Período de tempo	Duração
Hipótese 1	Ponto NO	T2	9 dias
Hipótese 2	Ponto NE	T2	9 dias
Hipótese 3	Ponto NO	T1	4 dias
Hipótese 4	Ponto NE	T1	4 dias

O objetivo desta hipótese inicial é identificar um conjunto de condições iniciais plausível e representativo, que possa posteriormente servir de base para a realização de testes de sensibilidade aos diferentes parâmetros do modelo.

2.7 Métodos de avaliação

A validação de simulações de derrames de HC é uma etapa crucial para aferir a fiabilidade dos resultados e a sua aplicabilidade em contextos reais de previsão de trajetórias, planeamento de resposta e avaliação de riscos ambientais. A natureza dos diversos fatores destes eventos, influenciados por correntes, vento e propriedades físico-químicas dos HC, exige que sejam utilizados métodos capazes de avaliar diferentes dimensões do comportamento da mancha.

Nos estudos de modelação, têm sido aplicadas diversas abordagens para aferir o desempenho dos modelos, desde a comparação direta de trajetórias à análise da distribuição espacial das partículas. Por exemplo, Liu et al. (2023) desenvolveram um modelo de parametrização do *wind drift factor* baseado em *support vector regression* (SVR), utilizando dados de boias de deriva e reanálises oceânicas. A avaliação foi realizada comparando previsões e observações através do erro quadrático médio (RMSE) e do coeficiente de determinação (R^2), mostrando que técnicas de aprendizagem automática podem reduzir erros e melhorar a simulação da deriva à superfície.

Outra abordagem amplamente utilizada é o cálculo do *Normalized Cumulative Lagrangian Separation* (NCLS) (Y. Liu & Weisberg, 2011), que quantifica a distância acumulada entre partículas simuladas e observadas, normalizando-a pela

distância total percorrida pela partícula observada. Este método avalia não só a proximidade espacial, mas também a coerência temporal do movimento, revelando diferenças de desempenho entre modelos hidrodinâmicos em regiões com características distintas de circulação. A sua aplicação foi demonstrada em ambientes tão diversos como o Mar Báltico (Pärt et al., 2023) e operações no Ártico para avaliação de algoritmos de óleo em gelo (de Aguiar et al., 2022).

Com base nas abordagens identificadas na literatura e na disponibilidade de dados no presente estudo, foram selecionados três métodos principais para a validação das simulações:

1. **Análise da posição central da mancha** - através do cálculo da distância entre os centróides da mancha simulada e observada, utilizando a fórmula de Haversine;
2. **Avaliação do formato da mancha** - com base na comparação das áreas projetadas da mancha simulada e observada;
3. **Comparação espacial com base na percentagem de partículas** - através do cálculo da percentagem de partículas simuladas que se encontram dentro da área estimada e delineada da mancha observada.

Estes métodos permitem uma avaliação abrangente, tanto do movimento global da mancha como da sua evolução, fornecendo uma validação robusta das simulações realizadas.

2.7.1 Análise da posição central da mancha

A posição média, bem como o centróide da mancha de HC simulada, fornece uma indicação clara da trajetória global do derrame ao longo do tempo, sendo por isso um método fundamental para avaliar a capacidade do modelo na previsão do transporte da mancha. Para quantificar esse deslocamento, foi adotado o cálculo da distância utilizando a fórmula de Haversine, tal como aplicado por Lyu et al. (2024). Nesse estudo, os autores utilizaram a fórmula para comparar a posição prevista de uma mancha de óleo com a observada através de imagens reais, devido à sua eficácia na medição de distâncias entre dois pontos na superfície terrestre com base em coordenadas geográficas. Assim, no presente estudo, esta abordagem foi utilizada tanto para calcular a distância entre o centróide da mancha simulada e o da mancha observada, como para comparar quantitativamente os resultados da simulação com os dados reais.

A fórmula de Haversine permite calcular a distância ortodrômica (i.e., a menor distância entre dois pontos sobre a superfície de uma esfera) com base nas coordenadas geográficas dos pontos. A expressão matemática é dada por:

$$d = 2r \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) \quad (2.2)$$

Onde:

- d é a distância entre os dois pontos, 1 e 2 (em quilómetros),
- r é o raio da Terra (aproximadamente 6 371 km),
- $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$, sendo ϕ a latitude (em radianos),
- $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, sendo λ a longitude (também em radianos).

A fórmula assume uma Terra esférica e apresenta elevada precisão para distâncias curtas a moderadas. Foi utilizada neste trabalho para a comparação entre posições simuladas e observadas e encontra-se documentada em Scripts (2024).

2.7.2 Avaliação do formato da mancha

A forma da mancha de HC simulada é um dos parâmetros qualitativos relevantes na validação do modelo, já que reflete a influência do conjunto de processos de transporte e das condições ambientais envolvidas. A avaliação do formato incide sobre a geometria geral assumida pela mancha ao longo do tempo, nomeadamente a sua orientação predominante (e.g., alongamento norte-sul ou leste-oeste) e a sua configuração alargada ou compacta.

Para efeitos de comparação, foi utilizada a estimativa da mancha observada a partir da imagem satélite, simplificada sob a forma de um retângulo, tal como ilustrado na figura 2.6. A correspondência entre as orientações e proporções gerais constitui um indicativo da coerência geométrica dos resultados do modelo em relação à realidade observada.

Para além do forma, foi também considerada a comparação entre as áreas da mancha simulada e da mancha observada. Esta comparação fornece um critério quantitativo adicional, permitindo verificar se a extensão espacial da mancha modelada está de acordo com a realidade. Diferenças significativas entre as áreas podem

indicar uma subestimação ou sobrestimação da dispersão, refletindo possíveis limitações na parametrização do modelo ou na representação das condições ambientais. A análise conjunta da forma e da área permite, assim, uma avaliação mais completa da capacidade do modelo em reproduzir a realidade. Esta abordagem é apoiada por estudos que demonstraram a eficácia da comparação de áreas e formas na validação de modelos de derrames de HC (Dagestad et al., 2018; De Dominicis et al., 2013b; Dearden et al., 2021).

Dado que não foi possível extrair diretamente a forma detalhada da mancha observada na imagem satélite disponível no *CleanSeaNet Alert Report*, associada ao naufrágio do navio *Felicity Ace*, procedeu-se à estimativa das coordenadas dos seus pontos extremos (norte, sul, este e oeste), os quais se encontram assinalados a azul na Figura 2.6, juntamente com as respetivas coordenadas geográficas. A posição do naufrágio encontra-se igualmente indicada, a vermelho. Estes pontos serviram de base para uma simplificação geométrica da mancha sob a forma de um polígono retangular (Figura 2.6), permitindo assim uma comparação direta com os resultados obtidos nas simulações de deriva realizadas.

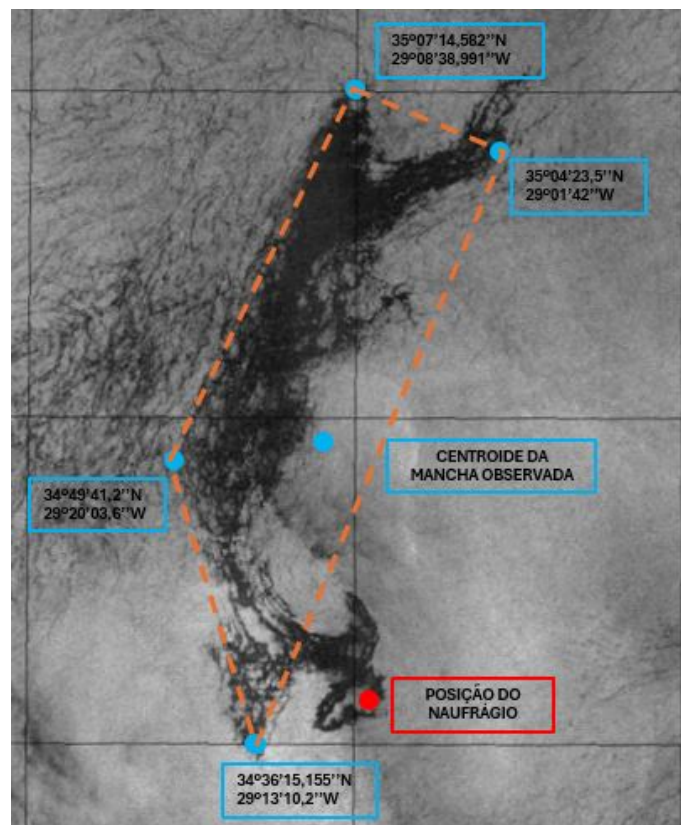


FIGURA 2.6: Delimitação estimada da mancha de hidrocarbonetos

2.7.3 Avaliação da sobreposição espacial entre a deriva e mancha observada

Para avaliar a correspondência espacial entre as simulações e a mancha observada, foi adotado um método quantitativo baseado na percentagem de partículas simuladas que se encontram dentro da área estimada da mancha real. Esta abordagem permite verificar de forma objetiva o grau de sobreposição espacial entre os resultados do modelo e a mancha visível na imagem de satélite.

Não sendo possível determinar com precisão a forma da mancha, recorreu-se a uma representação geométrica simplificada com base nos pontos extremos (Figura 2.6), que serviu de referência para a análise espacial.

Com base na posição final das partículas simuladas, foi calculada a fração que se encontrava dentro da área definida, permitindo assim avaliar se a concentração principal de partículas prevista pelo modelo coincide com a mancha observada. Este método constitui uma forma simples mas eficaz de validar a simulação, proporcionando uma medida clara da sua precisão espacial.

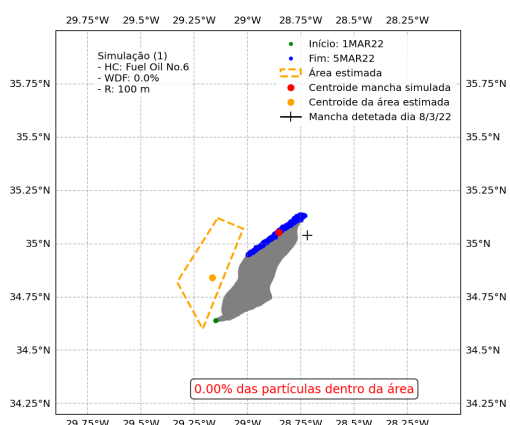
Capítulo 3

Resultados

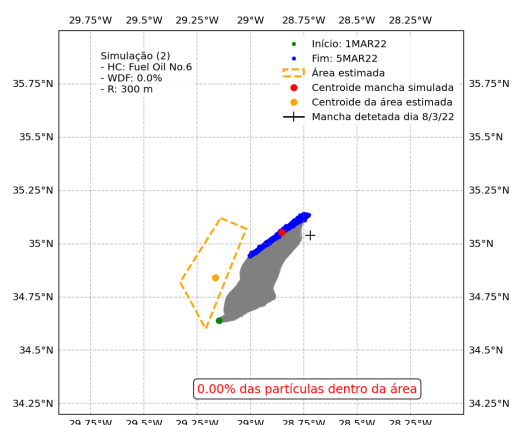
3.1 Modelação da mancha observada a partir da posição de naufrágio do navio *Felicity Ace*

Tendo em conta a informação disponível sobre o evento de naufrágio do navio *Felicity Ace*, a hipótese inicial formulada para a análise dos resultados parte do pressuposto de que a mancha de HC observada no dia 5 de março de 2022 terá tido origem na posição exata do naufrágio, ocorrida a 1 de março. Assim, as simulações foram configuradas para semear partículas nessa posição, considerando o período T1, em conformidade com o cronograma apresentado na Figura 1.2.

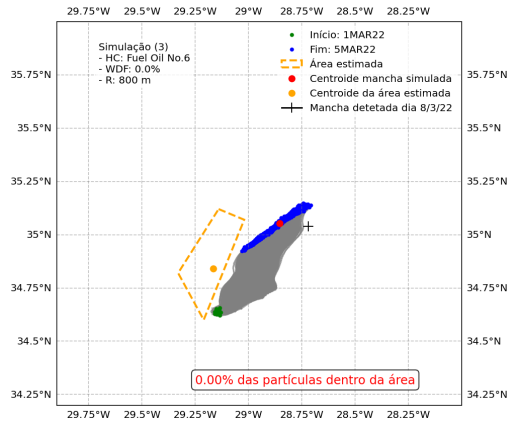
Os resultados obtidos com esta configuração inicial são apresentados na Figura 3.1 e na Tabela 3.1, permitindo avaliar a coerência espacial e temporal da trajetória simulada face à mancha observada, e definir novas condições nos testes subsequentes.



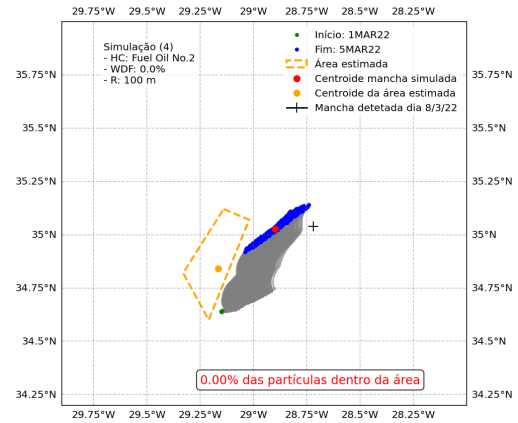
a) Simulação 1



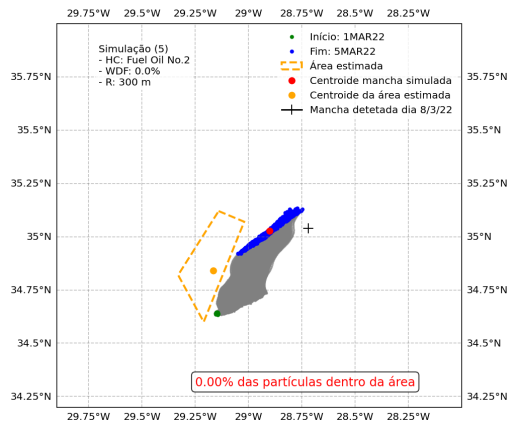
b) Simulação 2



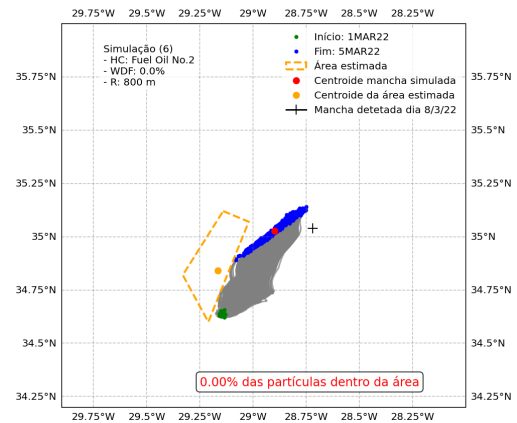
c) Simulação 3



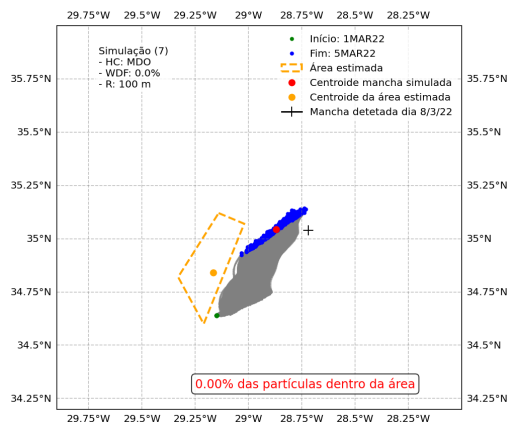
d) Simulação 4



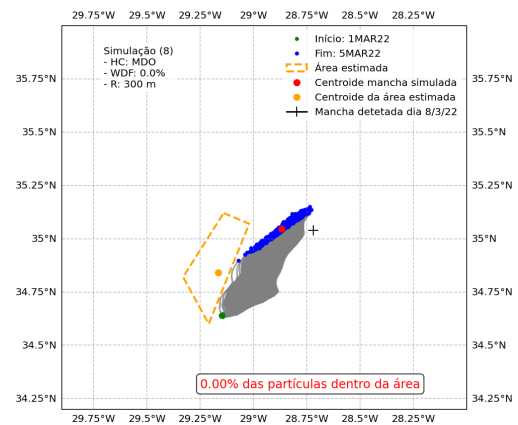
e) Simulação 5



f) Simulação 6

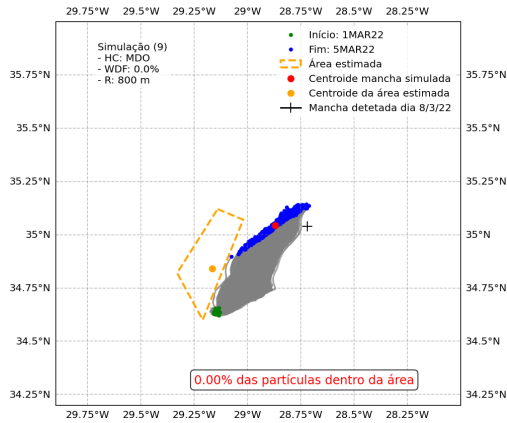


g) Simulação 7

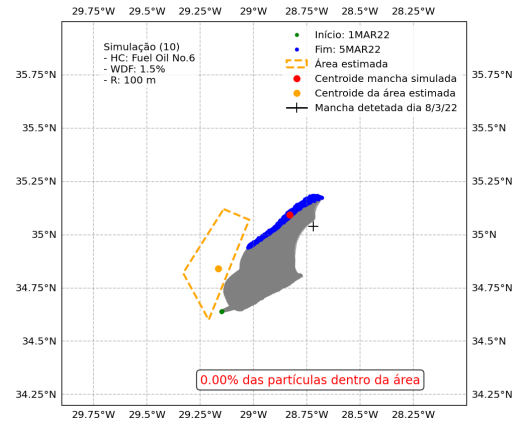


h) Simulação 8

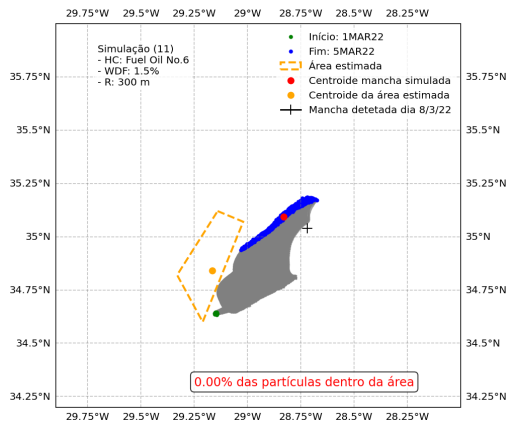
3.1. Modelação da mancha observada a partir da posição de naufrágio do navio *Felicity Ace*



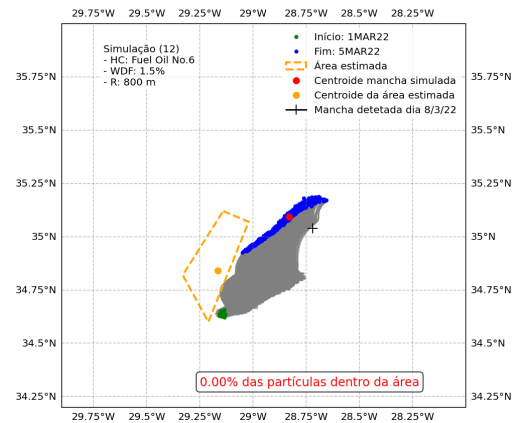
i) Simulação 9



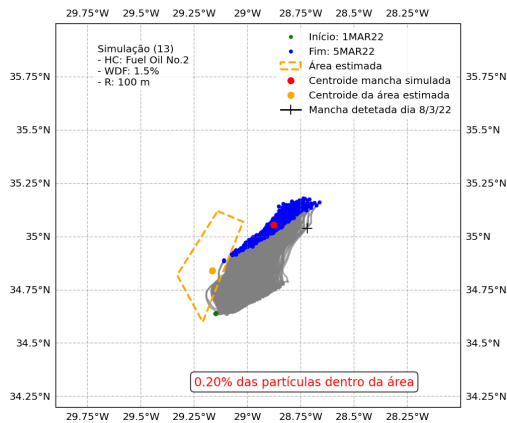
j) Simulação 10



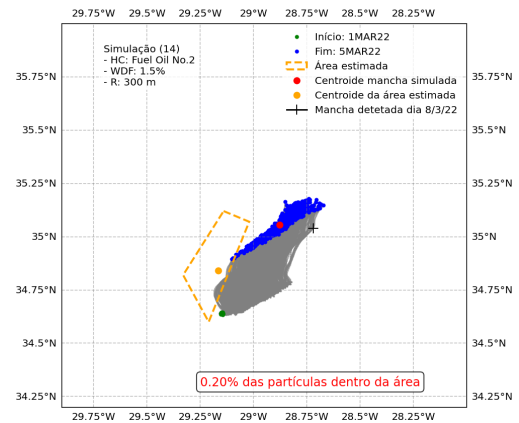
k) Simulação 11



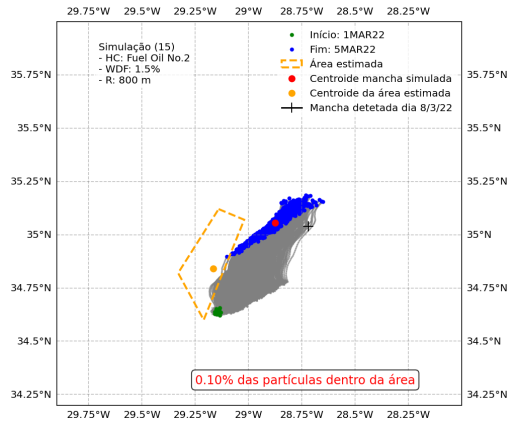
l) Simulação 12



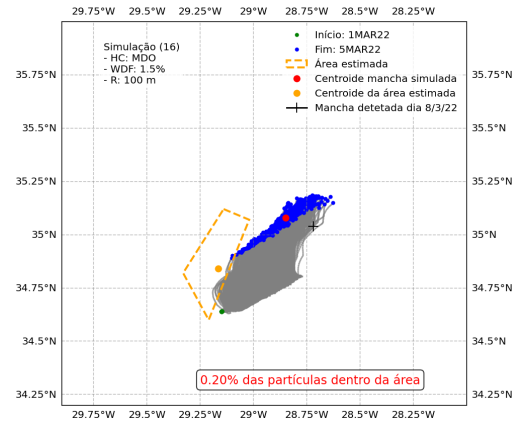
m) Simulação 13



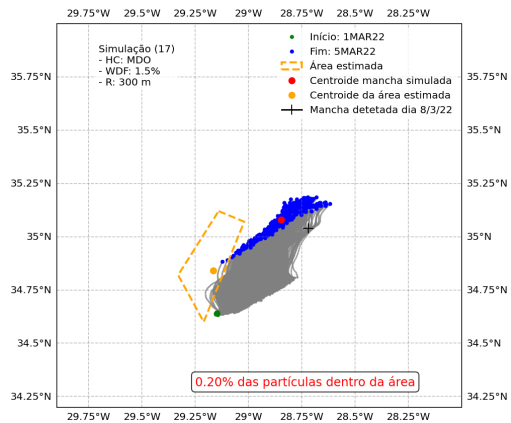
n) Simulação 14



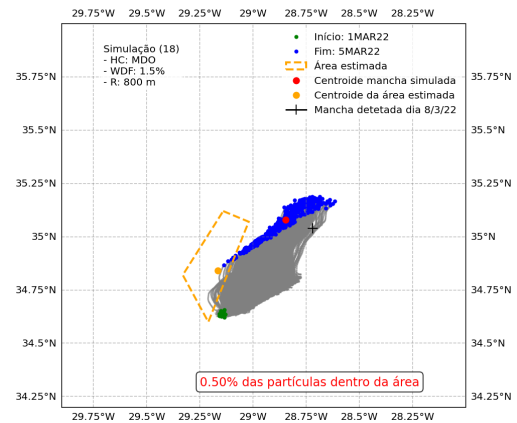
o) Simulação 15



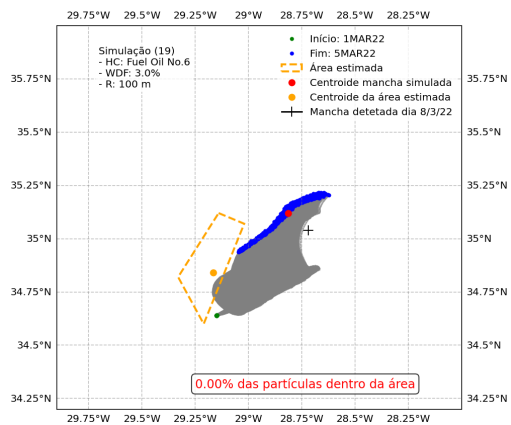
p) Simulação 16



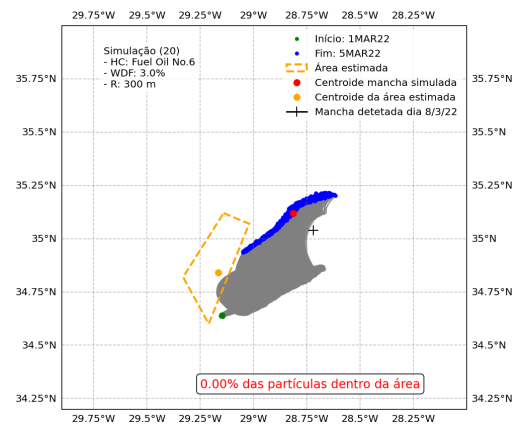
q) Simulação 17



r) Simulação 18

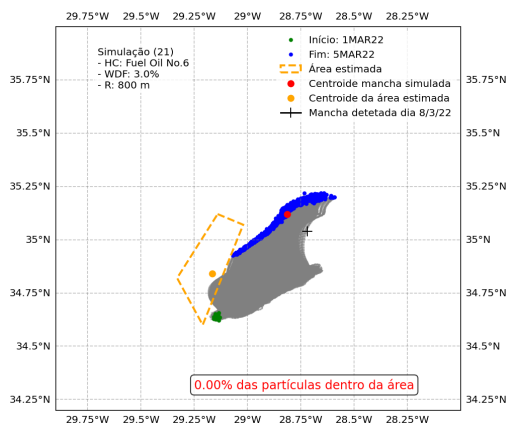


s) Simulação 19

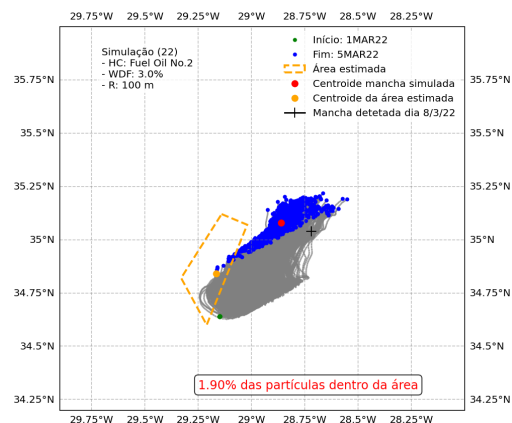


t) Simulação 20

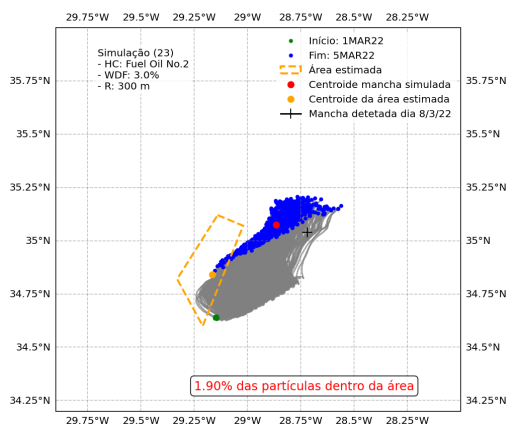
3.1. Modelação da mancha observada a partir da posição de naufrágio do navio *Felicity Ace*



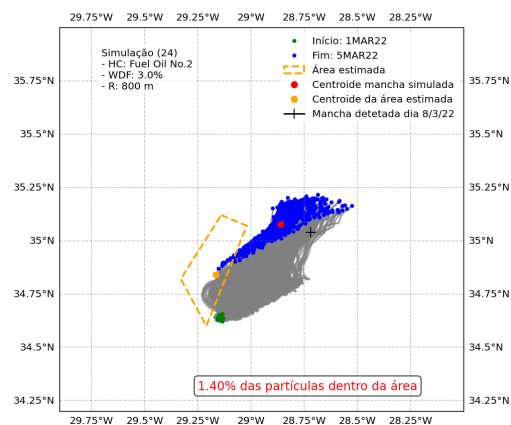
u) Simulação 21



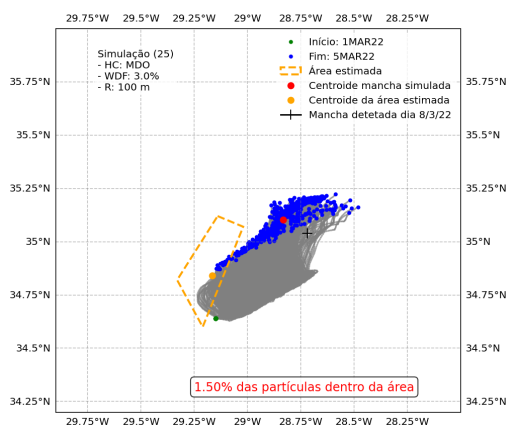
v) Simulação 22



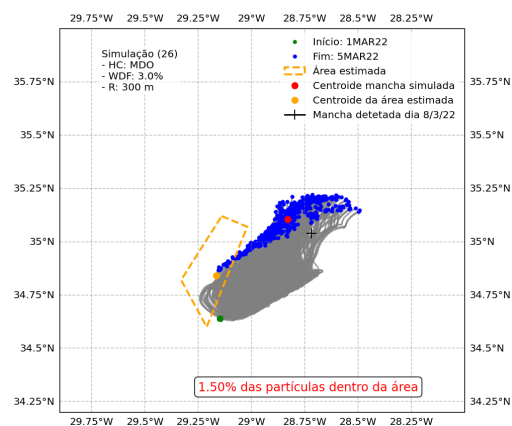
w) Simulação 23



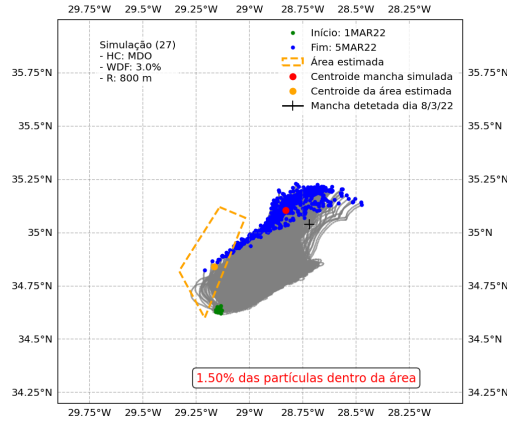
x) Simulação 24



y) Simulação 25



z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.1: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a hipótese inicial: posição de naufrágio e período de tempo T1, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. A trajetória das partículas simuladas é representada a cinzento, com o ponto de início da simulação assinalado a verde (1 de março de 2022) e o de fim a azul (5 de março de 2022). A área delimitada a tracejado laranja corresponde à área estimada da mancha observada por satélite. Os centróides da mancha simulada (vermelho) e da área estimada (laranja) estão indicados por marcadores circulares. O símbolo de cruz preta assinala a posição da mancha detetada no dia 8 de março de 2022. O valor em destaque na parte inferior da figura, indica a percentagem de partículas que se encontram dentro da área estimada.

Os resultados das 27 simulações realizadas, utilizando as diferentes combinações de parâmetros definidos na metodologia, encontram-se na Tabela 3.1. Para cada simulação, foi avaliada a distância entre os centróides das manchas simuladas e a mancha observada, bem como a área total da mancha modelada e a percentagem de partículas que se sobrepõem espacialmente com a extensão da mancha real.

TABELA 3.1: Resultados da hipótese inicial: posição de naufrágio e período T1. Valores a verde indicam os melhores resultados para cada parâmetro (menor distância entre centróides, área mais próxima do valor de referência de 611.40 km² e maior percentagem de partículas). Valores a vermelho indicam os piores resultados (maior distância entre centróides, área mais afastada do valor de referência e menor percentagem de partículas).

Simulação	Dist. Centróides (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	36.83	71.24	0.00
2	36.84	76.96	0.00
3	36.79	105.07	0.00
4	31.82	86.72	0.00
5	31.78	95.73	0.00
6	31.88	112.03	0.00
7	34.98	105.80	0.00
8	35.22	115.17	0.00
9	35.02	145.90	0.00
10	41.36	111.50	0.00
11	41.37	121.57	0.00
12	41.34	174.74	0.00
13	35.33	295.20	0.20
14	35.45	331.21	0.20
15	35.44	319.55	0.10
16	39.11	340.98	0.20
17	39.32	369.16	0.20
18	39.24	361.95	0.50
19	44.52	203.05	0.00
20	44.52	220.43	0.00
21	44.51	297.81	0.00
22	38.12	700.05	1.90
23	37.59	676.32	1.90
24	38.11	694.11	1.40
25	41.98	851.08	1.50
26	42.28	843.89	0.50
27	42.24	1026.97	1.50

Nenhuma das simulações apresentou uma percentagem significativa de partículas localizadas no interior da mancha observada. Na maioria dos casos, este valor

foi de 0.00%, e mesmo as simulações com maior sobreposição, como as Simulações 22 e 23, não ultrapassaram 1.90%, evidenciando uma fraca representação da dispersão real das partículas.

No que se refere à distância entre os centróides, os valores oscilaram entre 31.78 km (Simulação 5) e 44.52 km (Simulações 19 e 20), revelando desvios espaciais consideráveis entre a mancha simulada e a observada. Mesmo as simulações com distâncias relativamente menores, como as Simulações 4, 5 e 6, apresentaram separações demasiado grandes para representar uma sobreposição geográfica adequada.

Quanto à área, as diferenças absolutas em relação ao valor de referência de 611.40 km² foram, na maioria dos casos, significativas. As áreas mais próximas do valor de referência ocorreram nas Simulações 22 (700.05 km²) e 23 (676.32 km²), mas, mesmo nestes casos, os desvios continuam expressivos. Outras simulações, como a 27 (1026.97 km²) e a 1 (71.24 km²), apresentaram discrepâncias muito elevadas, reduzindo fortemente a correspondência com a mancha real.

De forma geral, os resultados desta hipótese indicam que o conjunto de parâmetros testados não foi capaz de reproduzir adequadamente a posição, a extensão e a distribuição das partículas da mancha observada, justificando a exploração de novas configurações nas hipóteses seguintes.

3.2 Estimativa espacial e temporal da origem do derrame

Partindo da hipótese inicial de que o derrame teria começado no dia e local do naufrágio do navio *Felicity Ace* (período T1), realizaram-se simulações de deriva de HC apresentadas na secção anterior. No entanto, os resultados mostraram que, ao fim de quatro dias, as partículas simuladas terminavam em posições próximas da mancha detetada por satélite a 8 de março, o que levou a reavaliar a hipótese inicial.

A possibilidade de o derrame ter começado antes de 1 de março ou noutra posição motivou a realização de simulações adicionais, com o objetivo de testar origens alternativas no tempo e no espaço. Para isso, estimaram-se as possíveis posições do navio entre 21 de fevereiro e 1 de março, com base em simulações da sua deriva.

A Figura 3.2 apresenta as trajetórias das partículas simuladas com o modelo Leeway, destacando a posição inicial (verde), a posição final (vermelho) e as posições médias diárias (azul), obtidas a partir das partículas que se mantiveram dentro da

3.2. Estimativa espacial e temporal da origem do derrame

área delimitada entre os dois extremos da deriva. Estas posições médias serviram de base para as simulações seguintes.

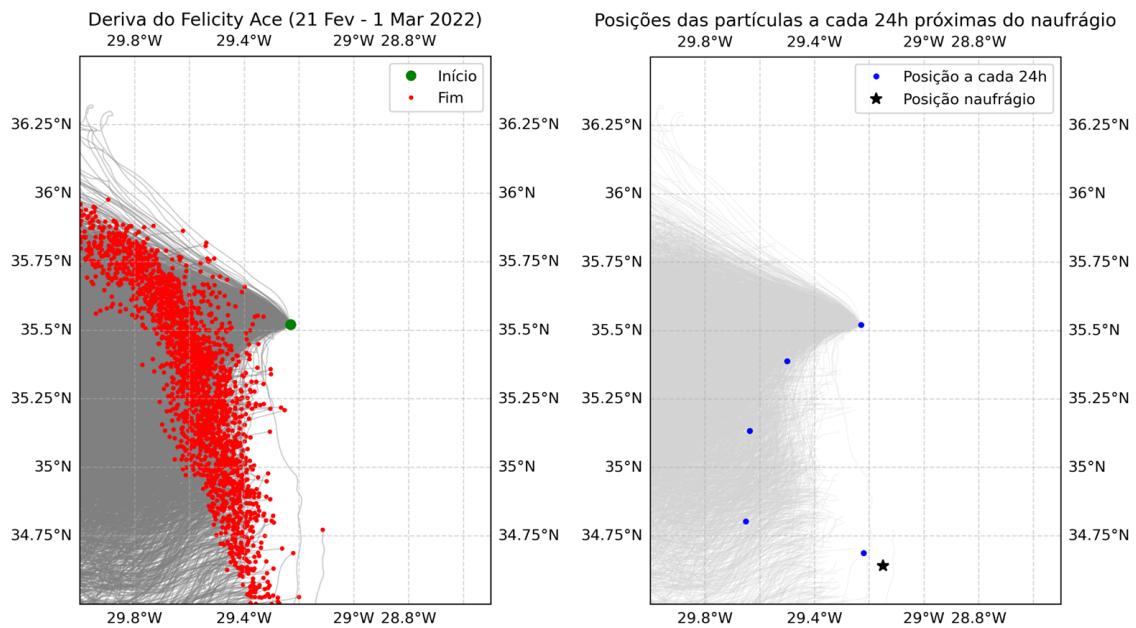


FIGURA 3.2: Estimativa da deriva do navio Felicity Ace entre 21 de fevereiro e 1 de março de 2022, utilizando o módulo Leeway do OpenDrift.

TABELA 3.2: Posições estimadas para cada dia, 22, 23 e 24 de Fevereiro de 2022, através do módulo Leeway do OpenDrift.

Dia	Latitude (°N)	Longitude (°W)
22	35.38	-29.49
23	35.13	-29.63
24	34.80	-29.65

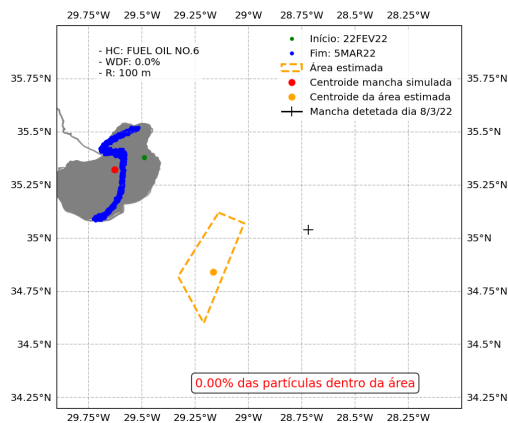
É de salientar que, na figura 3.2, apenas foram incluídas as posições dos dias cujas partículas se mantiveram dentro da área delimitada entre a posição inicial e a posição final. Os dias cujas partículas se deslocaram para fora da área representada na grelha/imagem foram excluídos da visualização, por não contribuírem para o objetivo da análise.

Com base nas posições estimadas dos dias 22, 23 e 24 de fevereiro, realizaram-se simulações de deriva de HC com o módulo OpenOil, com o objetivo de verificar se alguma das datas e posições permitiria reproduzir trajetórias compatíveis com a mancha observada.

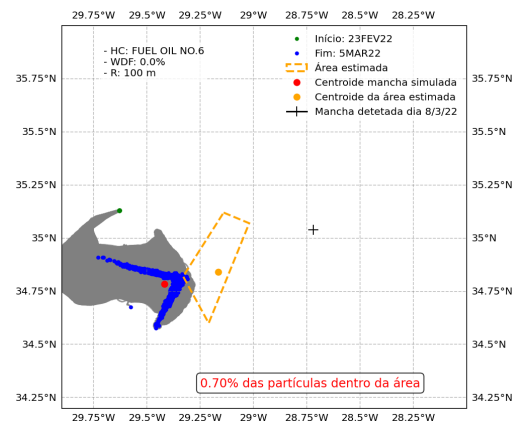
Na figura 3.3 e na Tabela 3.3, apresentam-se os resultados das derivas, realizadas com o módulo OpenOil do OpenDrift.

TABELA 3.3: Resultados das derivas de HC nas posições estimadas.

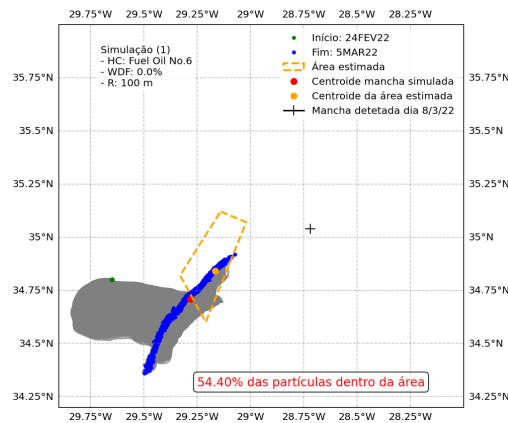
Dia	Dist. Centróides (km)	Área (km ²)	% Partículas
22	68.21	1814.66	0.00
23	24.06	684.51	0.70
24	18.30	392.17	54.40



a) Deriva 22 Feb - 5 Mar



b) Deriva 23 Feb - 5 Mar



c) Deriva 24 Feb - 5 Mar

FIGURA 3.3: Derivas realizadas assumindo como origem as posições estimadas do navio nos dias 22, 23 e 24 de fevereiro de 2022 através do módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda de acordo com a Figura 3.1.

A Tabela 3.3 apresenta os valores obtidos para as derivas simuladas nas posições estimadas, abrangendo os dias 22, 23 e 24.

O dia 22 apresentou o pior desempenho global, caracterizado pela maior distância entre centróides (68.21 km), pela discrepância mais elevada relativamente à área de referência (1814.66 km²) e pela ausência total de partículas na área delineada (0.00%).

No dia 23 verificou-se uma melhoria, com redução acentuada da distância entre centróides para 24.06 km e obtenção de uma área simulada (684.51 km²) mais próxima do valor de referência. Contudo, a percentagem de partículas na área estimada manteve-se baixa (0.70%).

O melhor desempenho foi registado no dia 24, que apresentou simultaneamente a menor distância entre centróides (18.30 km), a segunda menor diferença absoluta de área (392.17 km²) e, principalmente, a percentagem mais elevada de partículas dentro da área de interesse (54.40%), valor significativamente superior ao observado nos dias anteriores.

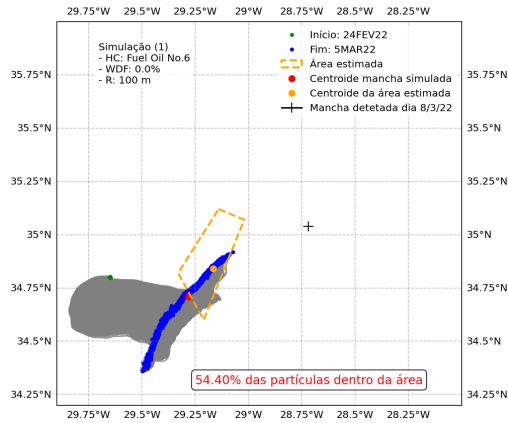
De forma global, verifica-se que apenas o dia 24 apresenta uma correspondência aceitável com a mancha observada, enquanto os dias 22 e 23 evidenciam limitações significativas, sobretudo pela baixa ou nula sobreposição espacial entre partículas simuladas e a área estimada.

Este resultado suporta de forma significativa a hipótese de que o derrame terá tido início a 24 de fevereiro, numa posição intermédia entre o início da deriva do navio e o local do naufrágio. Esta compatibilidade temporal e espacial sustenta a necessidade de ajustar a narrativa do evento em estudo, deslocando a origem do derrame para uma data anterior ao naufrágio, sendo utilizado como ponto de partida para os ensaios de sensibilidade realizados posteriormente, por forma a testar o comportamento do modelo face às diferentes configurações definidas no capítulo das metodologias 2.

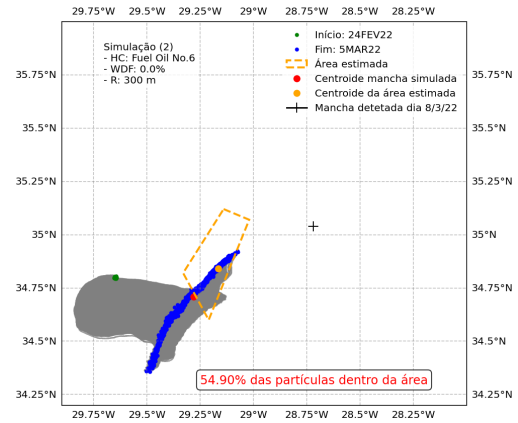
3.3 Modelação da mancha observada com início na posição estimada do navio a 24 de fevereiro

Com base na simulação de deriva do navio Felicity Ace, foi possível estimar uma nova posição e data de início do derrame de HC, diferente da inicialmente considerada. Este novo cenário, designado como período T2 (Figura 1.2), reflete de forma mais realista a evolução temporal da mancha observada na imagem satélite disponível.

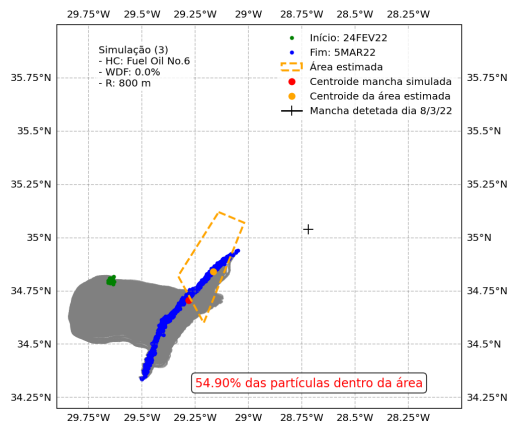
Foram então realizadas 27 simulações de deriva, ajustando-se a posição inicial das partículas com base na posição estimada do navio, dia 24 de fevereiro, no momento do início da libertação de HC. A abordagem utilizada seguiu os mesmos procedimentos metodológicos anteriormente descritos.



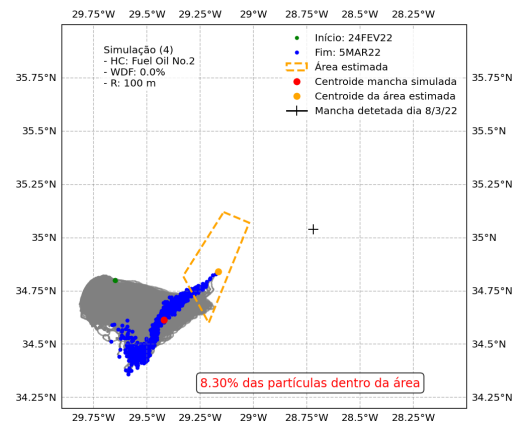
a) Simulação 1



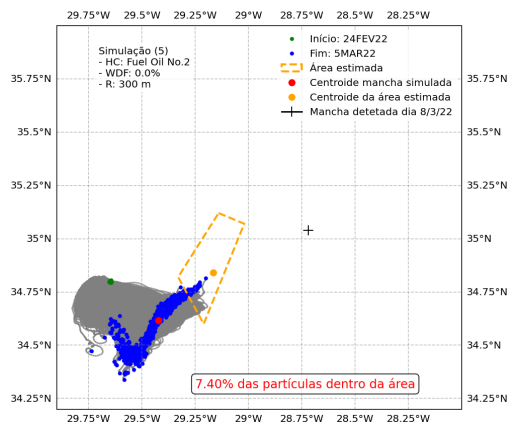
b) Simulação 2



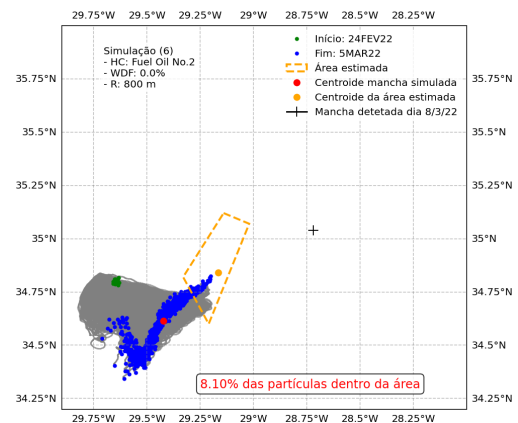
c) Simulação 3



d) Simulação 4

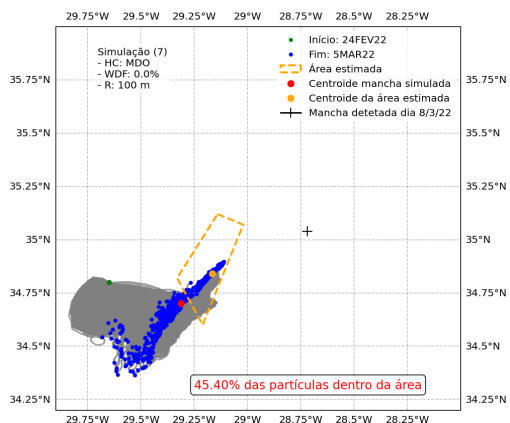


e) Simulação 5

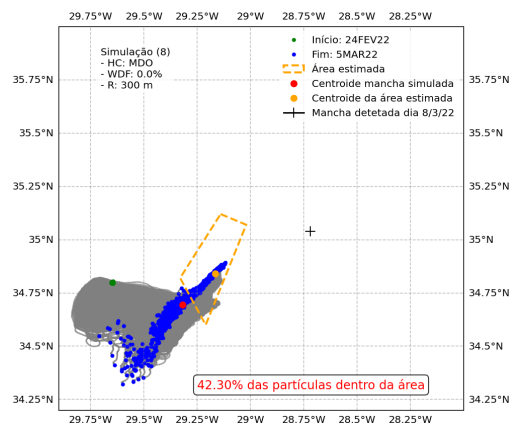


f) Simulação 6

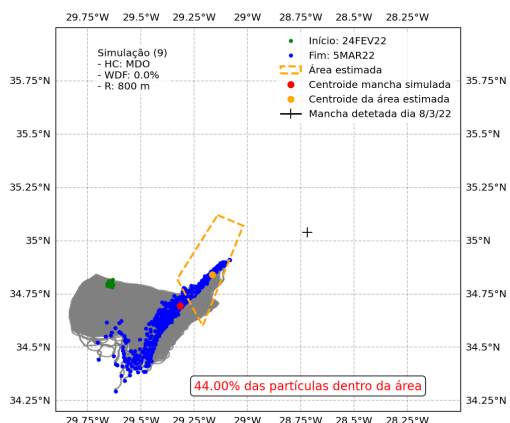
3.3. Modelação da mancha observada com início na posição estimada do navio a 24 de fevereiro



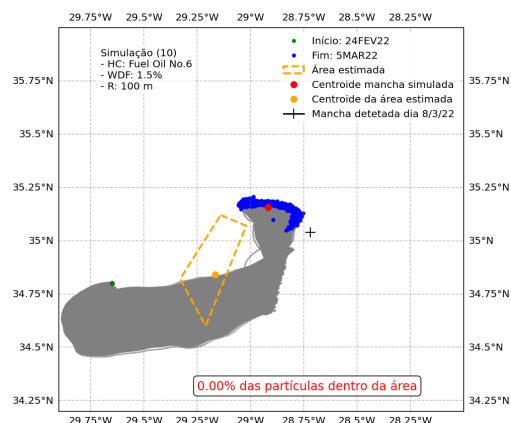
g) Simulação 7



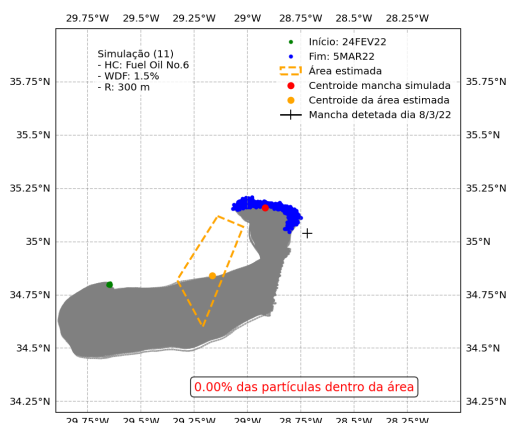
h) Simulação 8



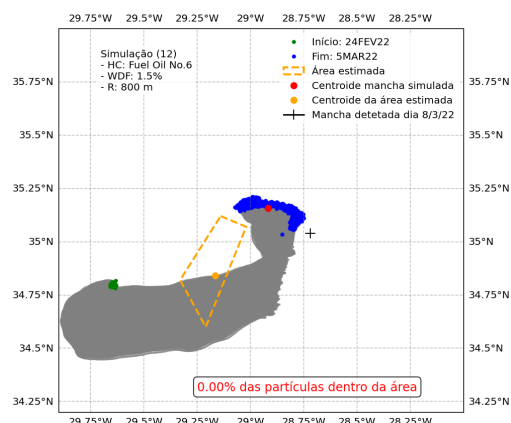
i) Simulação 9



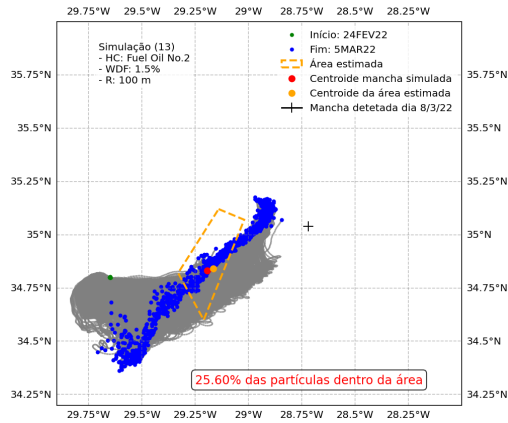
j) Simulação 10



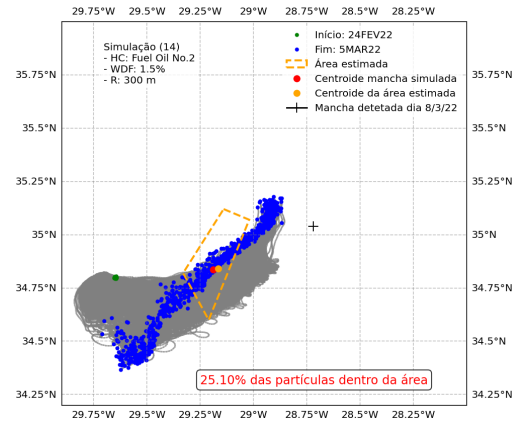
k) Simulação 11



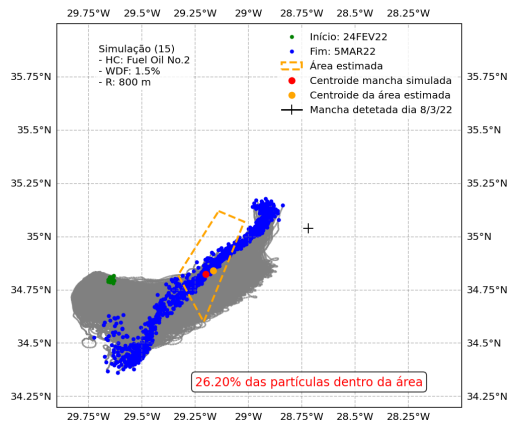
l) Simulação 12



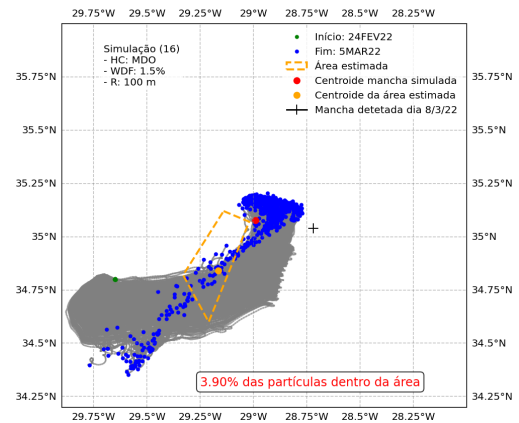
m) Simulação 13



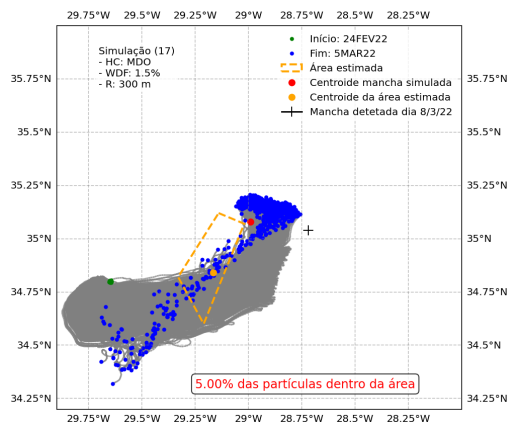
n) Simulação 14



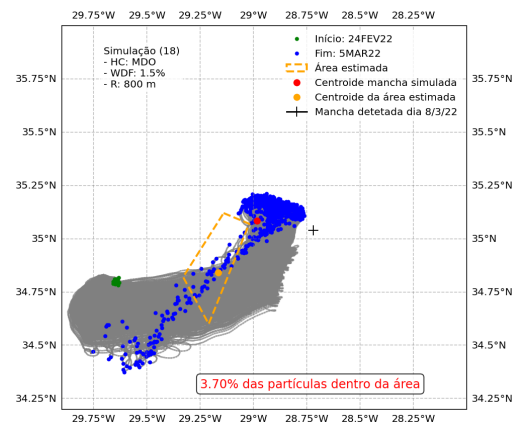
o) Simulação 15



p) Simulação 16

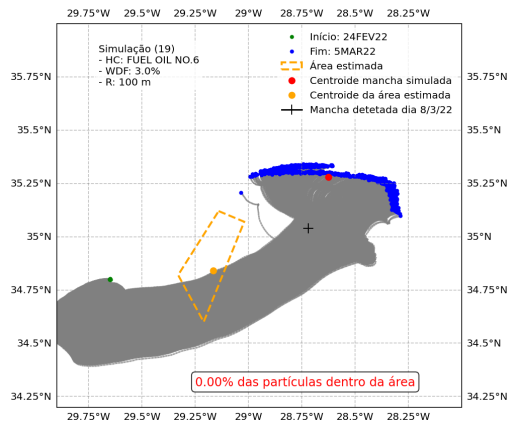


q) Simulação 17

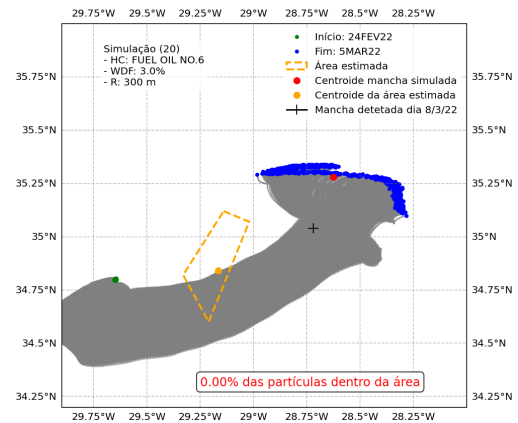


r) Simulação 18

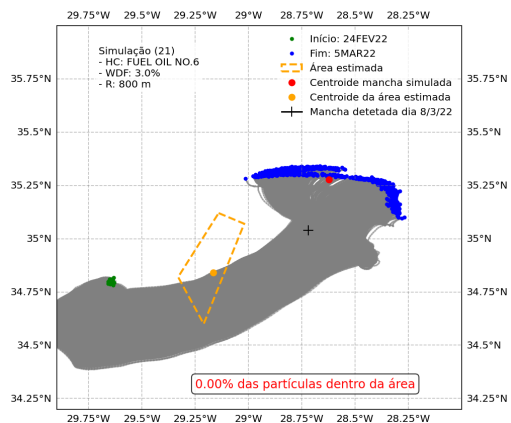
3.3. Modelação da mancha observada com início na posição estimada do navio a 24 de fevereiro



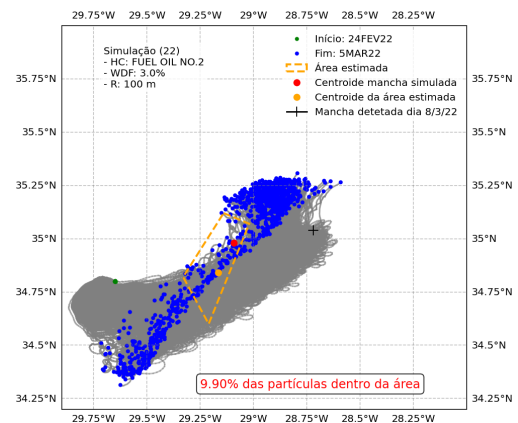
s) Simulação 19



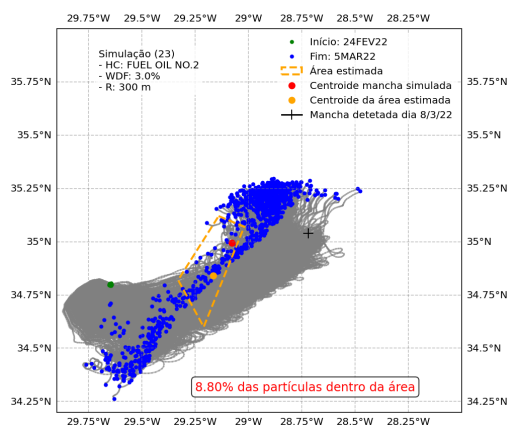
t) Simulação 20



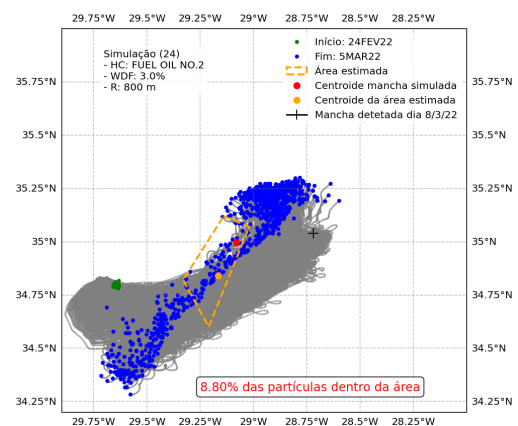
u) Simulação 21



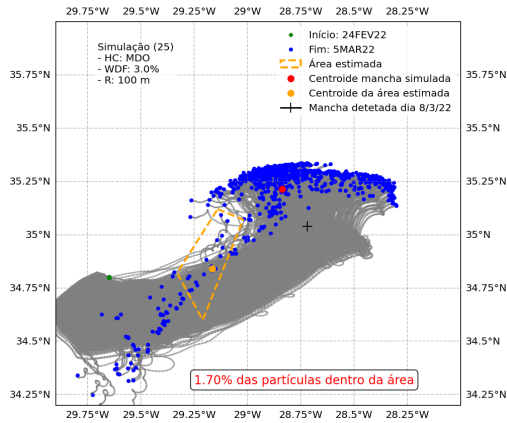
v) Simulação 22



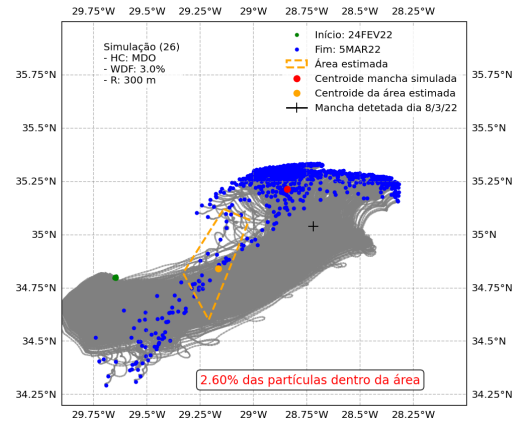
w) Simulação 23



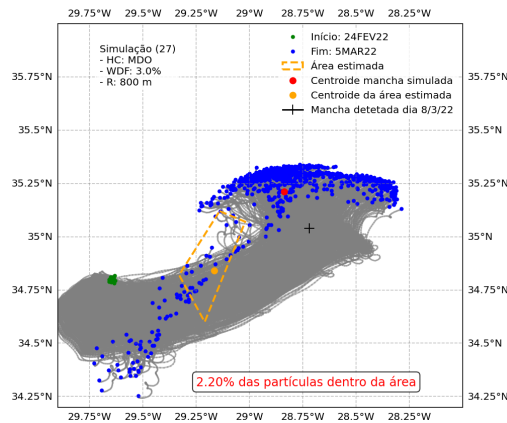
x) Simulação 24



y) Simulação 25



z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.4: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a posição estimada e período de tempo T2, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda de acordo com a Figura 3.1

3.3. Modelação da mancha observada com início na posição estimada do navio a 24 de fevereiro

TABELA 3.4: Resultados das simulações de deriva *forward* no período T2 com início na posição estimada, recorrendo ao módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda de acordo com a Tabela 3.1

Simulação	Dist. Centróides (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	18.30	392.17	54.40
2	18.32	408.94	54.90
3	18.42	453.44	54.90
4	34.31	781.26	8.30
5	34.39	965.76	7.40
6	34.46	990.49	8.10
7	20.45	1088.50	45.40
8	21.64	1159.76	42.30
9	21.39	1339.14	44.00
10	41.71	270.06	0.00
11	41.75	278.75	0.00
12	41.80	323.56	0.00
13	2.97	2406.28	25.60
14	2.20	2165.56	25.10
15	3.87	2195.65	26.20
16	30.55	2716.70	3.90
17	30.68	2971.85	5.00
18	31.51	2828.85	3.70
19	69.07	1162.29	0.00
20	69.13	795.43	0.00
21	69.25	915.27	0.00
22	16.68	3582.24	9.90
23	18.71	4763.74	8.80
24	18.74	4479.07	8.80
25	51.01	8161.73	1.70
26	50.71	6423.57	2.60
27	50.88	7185.56	2.20

A análise das simulações *forward* iniciadas a 24 de fevereiro, com duração de nove dias, permitiu avaliar o desempenho de diferentes configurações iniciais com vista a determinar o intervalo temporal e a posição mais adequados para a realização de derivas de *backtracking*.

De forma geral, as simulações 1, 2 e 3, com o hidrocarboneto do tipo Fuel Oil No. 6 e WDF de 0.0%, destacaram-se pelo melhor desempenho global. A Simulação 3 apresentou a área mais próxima do valor de referência (453.44 km^2), enquanto as três configurações registaram percentagens de partículas dentro da área estimada próximas de 55% e distâncias entre centróides reduzidas (cerca de 18 km). Em termos visuais, estas manchas evidenciam uma sobreposição substancial com a área observada, o que lhes confere elevada fiabilidade como base para o *backtracking*.

Ainda em patamares elevados de desempenho surgem as simulações 7 e 9 (ambas com MDO), que, embora apresentem percentagens de partículas inferiores às melhores (45.40% e 44.00%), mantêm configuração espacial consistente, com sobreposição visível e distâncias entre centróides moderadas (20–21 km). Estas configurações mostram-se robustas do ponto de vista visual, ainda que sem atingir o grau de correspondência obtido com o Fuel Oil No. 6 e WDF nulo.

Por outro lado, há um conjunto de simulações com desempenho menos positivo. As simulações 25, 27 e 26 (todas com MDO e WDF = 3.0%) registaram as menores percentagens de partículas na área estimada (1.70%, 2.20% e 2.60%) e áreas muito superiores ao valor de referência (8161.73, 7185.56 e 6423.57 km^2 , respetivamente). Visualmente, estas manchas apresentam fraca interseção com a área estimada, com o núcleo de partículas claramente deslocado.

Um segundo padrão particular reúne as configurações com 0.00% de partículas na área: as simulações 10, 11 e 12 (Fuel Oil No. 6, WDF = 1.5%) e as simulações 19, 20 e 21 (Fuel Oil No. 6, WDF = 3.0%). No primeiro grupo, a ausência de partículas na área estimada é compensada por áreas relativamente próximas da referência; já no segundo grupo, os valores de área são mais distantes e as distâncias de centróides elevadas, com a Simulação 21 a registar a maior distância do conjunto (69.25 km).

Entre estes extremos, encontram-se resultados intermédios. As simulações 4, 5 e 6 (Fuel Oil No. 2, WDF = 0.0%) apresentam resultados de distâncias de centróides na ordem dos 34 km e áreas ainda relativamente próximas da referência, mas são penalizadas por percentagens de partículas baixas (7–8%). Por outro lado, as simulações 13, 14 e 15 (Fuel Oil No. 2, WDF = 1.5%) registaram as menores distâncias de centróides de todo o conjunto (a Simulação 14 com apenas 2.20 km), embora associadas a áreas muito superiores ao valor de referência, o que visualmente se traduz em manchas extensas, com centróide próximo mas dispersão elevada.

De forma global, os resultados indicam que a configuração mais consistente

na reprodução da mancha estimada combina Fuel Oil No. 6 com $WDF = 0.0\%$ (Simulações 1–3), independentemente do raio inicial (100, 300 ou 800 m), já que as diferenças de desempenho entre raios neste conjunto são pouco significativas. Em contraste, um $WDF = 3.0\%$ combinado com MDO evidencia baixa interseção visual e reduzida percentagem de partículas coincidentes, apontando para limitações na reprodução da posição observada.

Com base nos resultados obtidos e na avaliação visual das simulações *forward*, definiu-se que esta configuração espaço-temporal, posição de 24 de fevereiro e duração de nove dias, será utilizada inicialmente nas simulações de *backtracking*, servindo como referência para a posição final a partir da qual será efetuada a trajetória inversa até à possível origem da mancha observada.

3.4 Derivas com *backtracking*

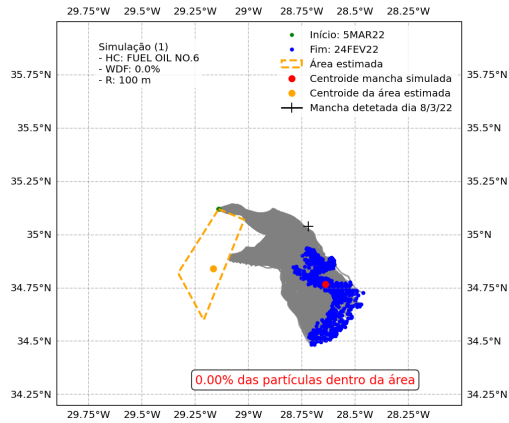
Após a definição das quatro hipóteses de simulação de deriva, com base nas combinações descritas no capítulo 2, foram executadas as simulações de *backtracking* utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. O objetivo principal foi avaliar, para cada cenário, a trajetória da deriva inversa da mancha de HC detetada, de modo a identificar possíveis zonas de origem do derrame.

Nesta secção, apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das hipóteses, destacando as diferenças entre posições iniciais (Ponto NO e Ponto NE) e a influência do intervalo temporal considerado (T1 e T2) na trajetória simulada. A comparação entre os diferentes cenários permite perceber a sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros iniciais e contribui para uma interpretação mais fundamentada da plausibilidade de cada hipótese.

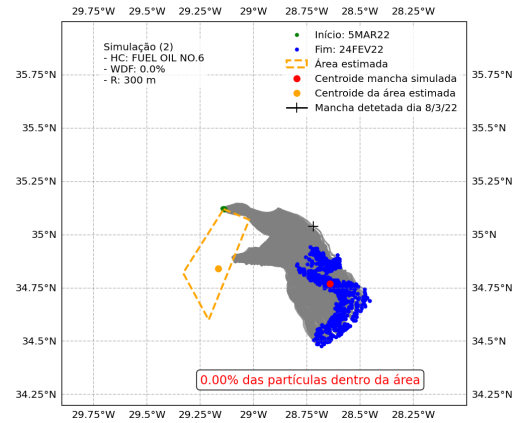
Os resultados são analisados tanto do ponto de vista espacial, observando a dispersão e a direção das partículas simuladas, como do ponto de vista temporal, avaliando a consistência com o período em que o derrame poderá ter ocorrido.

Hipótese 1

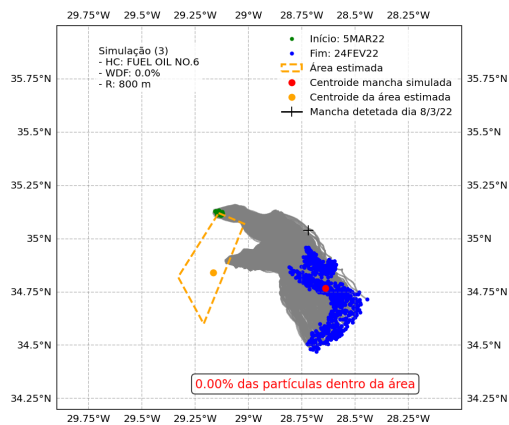
A Hipótese 1, na qual se assume que a mancha detetada teve origem no Ponto NO e que a sua trajetória teve uma duração de 9 dias, no período T2, permite avaliar se a mancha poderá ter derivado de uma fonte mais distante a nível temporal. A análise que se segue foca-se na trajetória das partículas simuladas, nas zonas de maior concentração e na plausibilidade da origem estimada face ao posicionamento real do navio *Felicity Ace*, de acordo com os parâmetros definidos na metodologia.



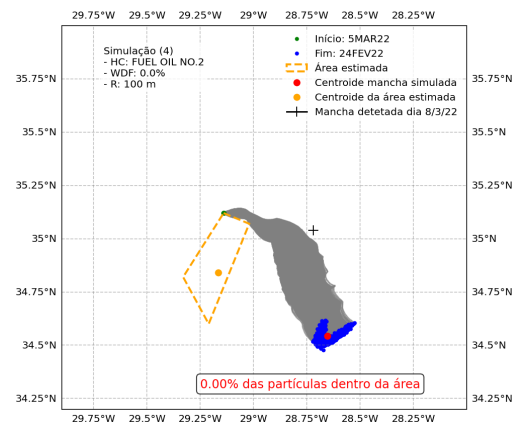
a) Simulação 1



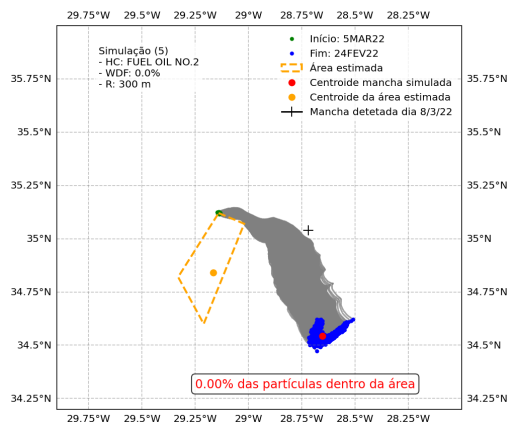
b) Simulação 2



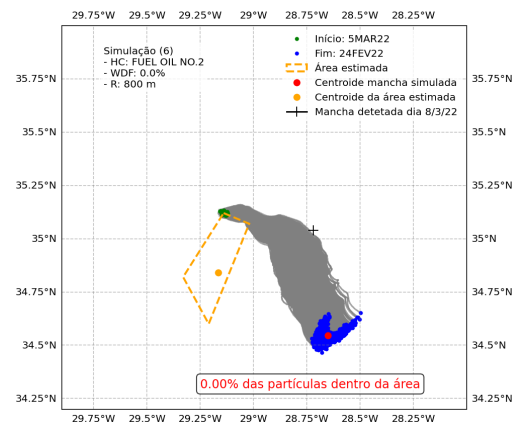
c) Simulação 3



d) Simulação 4

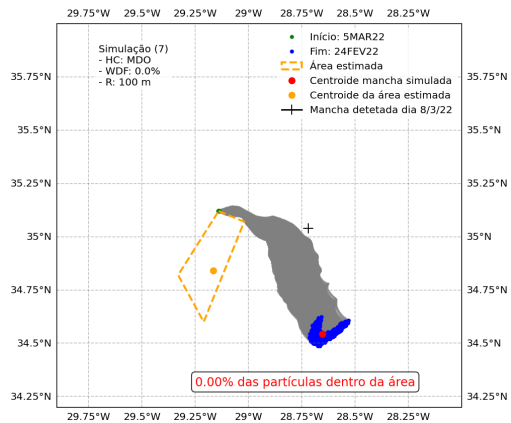


e) Simulação 5

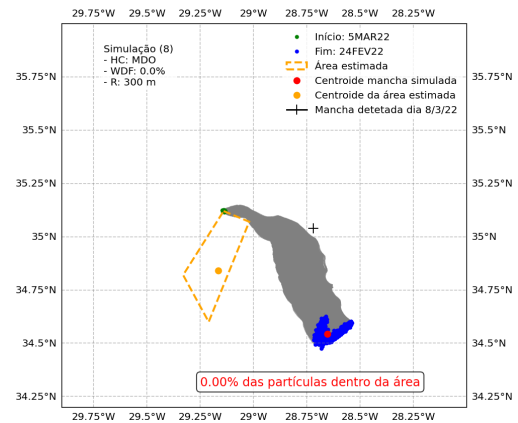


f) Simulação 6

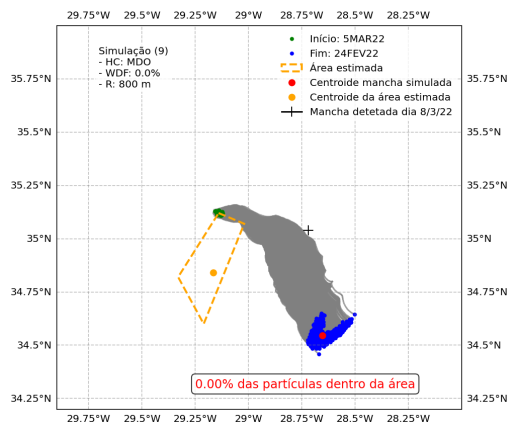
3.4. Derivas com backtracking



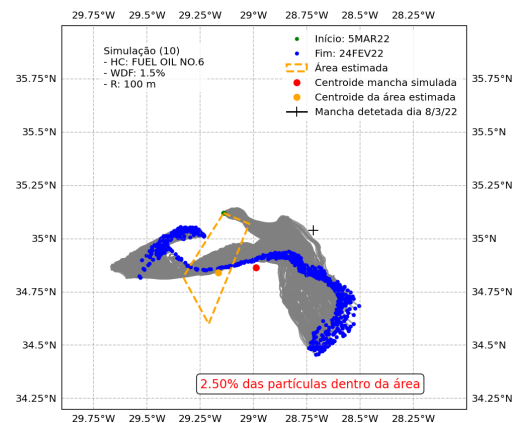
g) Simulação 7



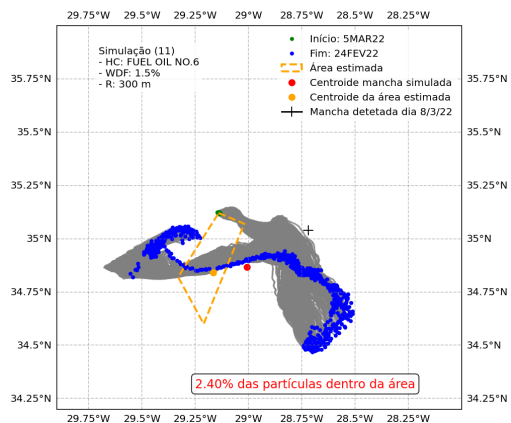
h) Simulação 8



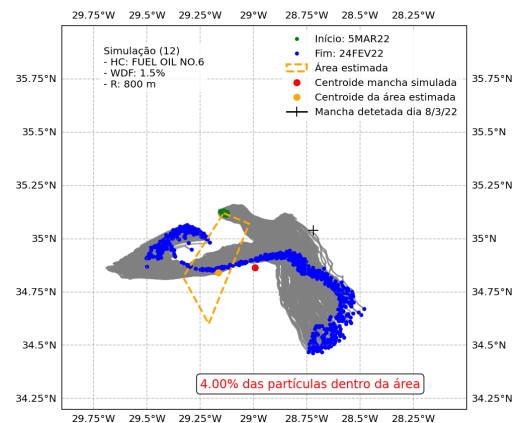
i) Simulação 9



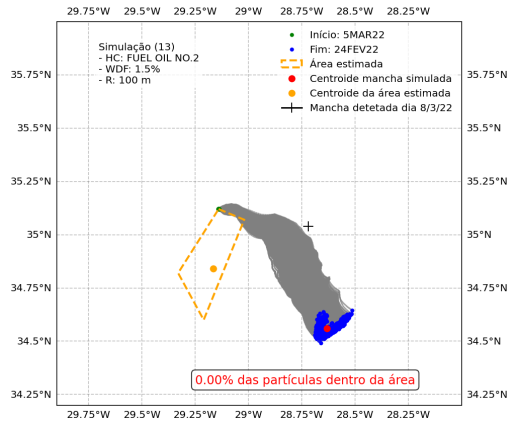
j) Simulação 10



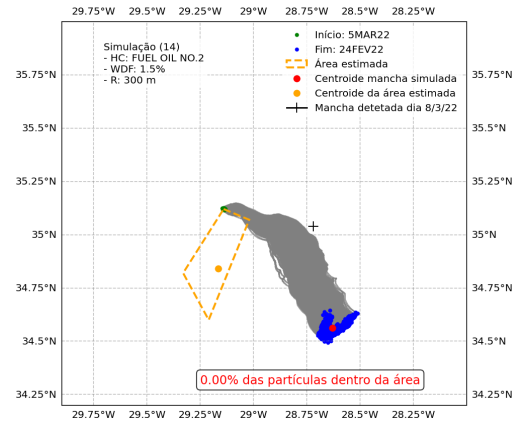
k) Simulação 11



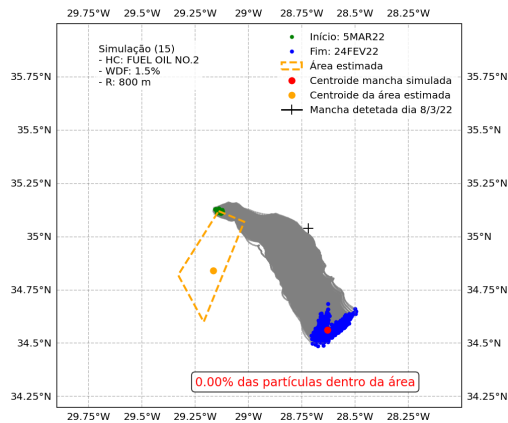
l) Simulação 12



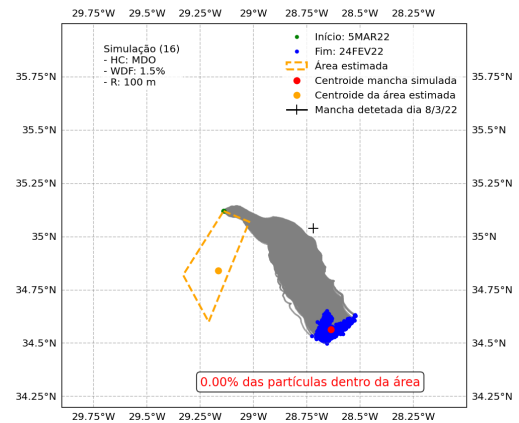
m) Simulação 13



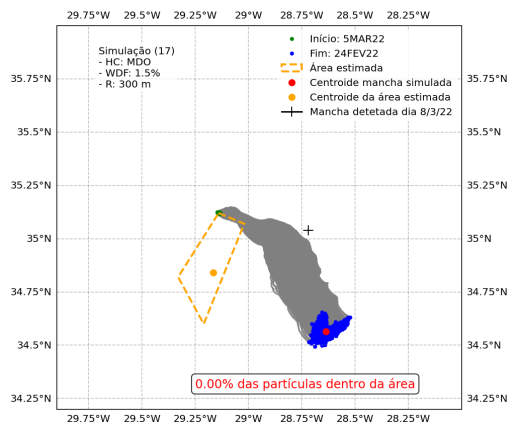
n) Simulação 14



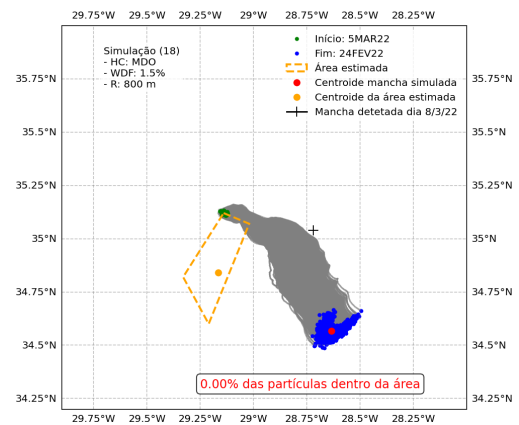
o) Simulação 15



p) Simulação 16

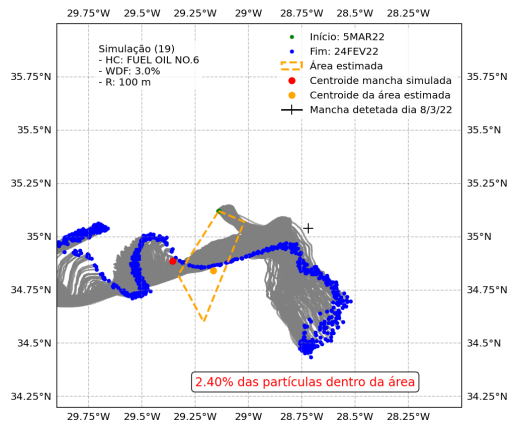


q) Simulação 17

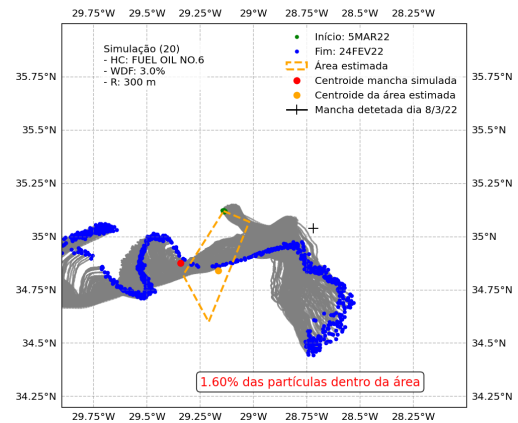


r) Simulação 18

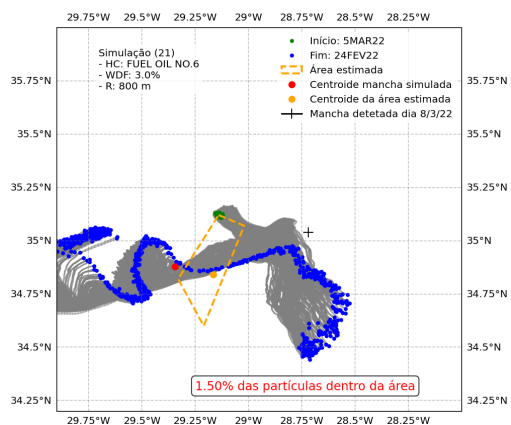
3.4. Derivas com backtracking



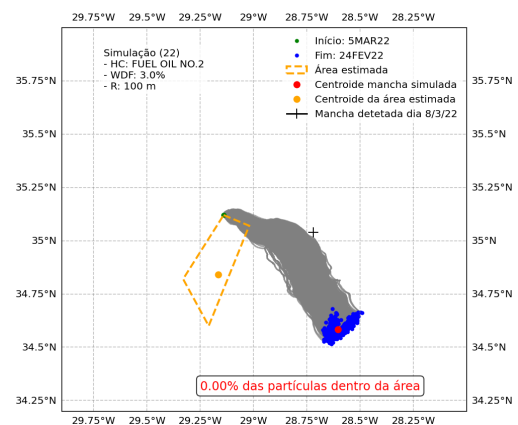
s) Simulação 19



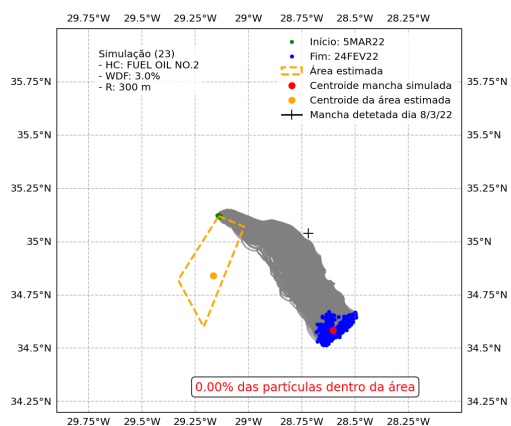
t) Simulação 20



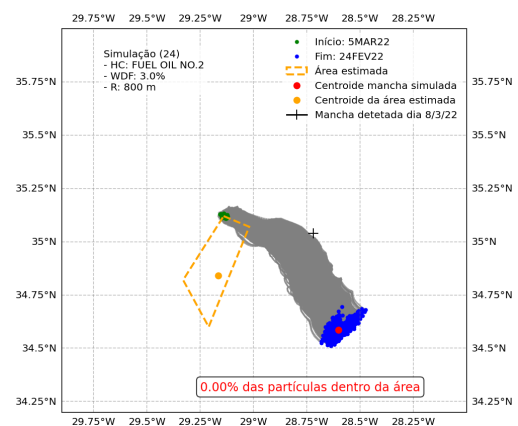
u) Simulação 21



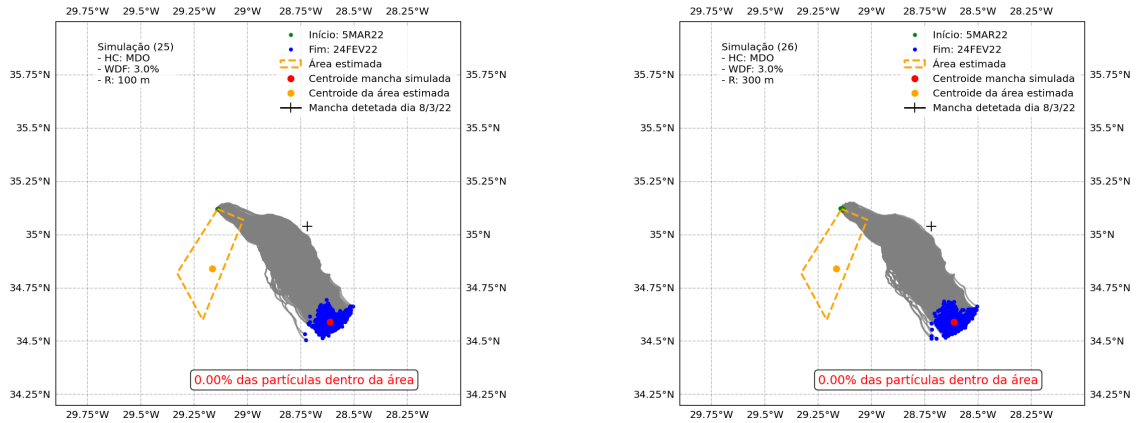
v) Simulação 22



w) Simulação 23

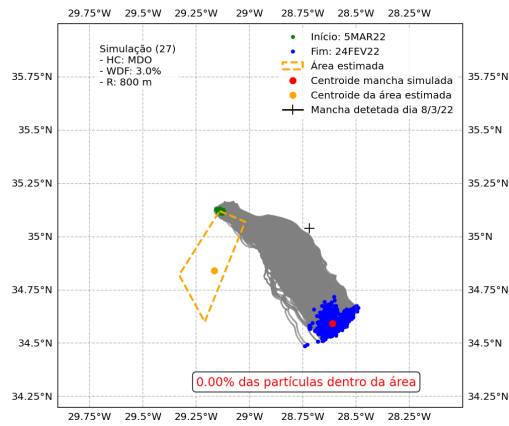


x) Simulação 24



y) Simulação 25

z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.5: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 1 do *backtracking* utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift.
Legenda das imagens de acordo com a Figura 3.1.

TABELA 3.5: Resultados da Hipótese 1 (Ponto NO, 9 dias) do *backtracking*, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda da Tabela conforme Tabela 3.1.

Simulação	Distância (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	48.57	940.59	0.00
2	48.47	987.82	0.00
3	48.68	1070.89	0.00
4	57.28	156.61	0.00
5	57.26	177.31	0.00
6	57.23	248.74	0.00
7	57.20	156.10	0.00
8	57.19	162.86	0.00
9	57.15	243.29	0.00
10	16.19	3455.01	2.50
11	14.59	3444.74	2.40
12	15.76	3272.21	4.00
13	57.88	162.01	0.00
14	57.87	172.73	0.00
15	57.85	243.18	0.00
16	57.22	196.59	0.00
17	57.23	194.76	0.00
18	57.22	258.630	0.00
19	18.21	5070.32	2.40
20	16.60	5167.08	1.60
21	17.03	5251.79	1.50
22	58.77	187.68	0.00
23	58.74	197.64	0.00
24	58.80	209.17	0.00
25	57.70	266.37	0.00
26	57.66	262.84	0.00
27	57.76	332.87	0.00

A primeira hipótese corresponde a simulações de deriva de partículas a partir do Ponto NO da mancha observada, considerando uma janela temporal de nove dias (período T2).

De forma geral, os resultados desta hipótese revelam desempenhos muito diversificados entre as simulações. Embora alguns cenários tenham obtido valores

mais favoráveis, grande parte apresentou resultados reduzidos, principalmente devido à ausência de partículas dentro da área estimada e a distâncias significativas entre centróides.

As simulações com melhor desempenho (12, 11 e 10) obtiveram, respectivamente, 4.00%, 2.40% e 2.50% das partículas dentro da área estimada. Nestes casos, a distância entre centróides foi reduzida (entre 14.59 km e 16.19 km), o que contribuiu de forma decisiva para a proximidade espacial. No entanto, apesar desta proximidade, as áreas simuladas foram bastante superiores ao valor de referência, resultando numa sobreposição apenas parcial com a área observada.

Num conjunto intermédio de resultados, como nas simulações 19, 20 e 21, as distâncias entre centróides variaram entre cerca de 16.60 km e 18.21 km, e as percentagens de partículas dentro da área estimada situaram-se entre 1.50% e 2.40%. Embora estes valores indiquem uma aproximação à área de interesse, as imagens evidenciam que a mancha simulada, apesar de relativamente próxima, não intersejou devidamente com a área estimada, resultando numa sobreposição limitada.

Relativamente à área simulada, os valores mais próximos do de referência ocorreram nas simulações 27 (332.87 km²), 25 (266.37 km²) e 26 (262.84 km²). Apesar disso, estas simulações apresentaram distâncias elevadas entre centróides e ausência de partículas na área estimada, demonstrando que a proximidade da área, por si só, não é suficiente para garantir uma boa representação da mancha observada. Por outro lado, as maiores discrepâncias ocorreram nas simulações 21 (5251.79 km²), 20 (5167.08 km²) e 19 (5070.32 km²), com áreas mais de oito vezes superiores ao valor de referência, o que contribuiu para uma menor correspondência, mesmo com percentagens não nulas de partículas.

As simulações com piores resultados apresentaram ausência total de partículas na área estimada e distâncias elevadas entre centróides (superiores a 48 km, atingindo mais de 58 km nos piores casos). Em alguns cenários, mesmo quando a área simulada se aproximou do valor de referência, a configuração espacial das partículas manteve-se afastada da zona de interesse. Estas condições foram frequentes em simulações com HC de diferentes viscosidades e WDF de 0.0%, resultando em dispersões deslocadas para leste-sudeste.

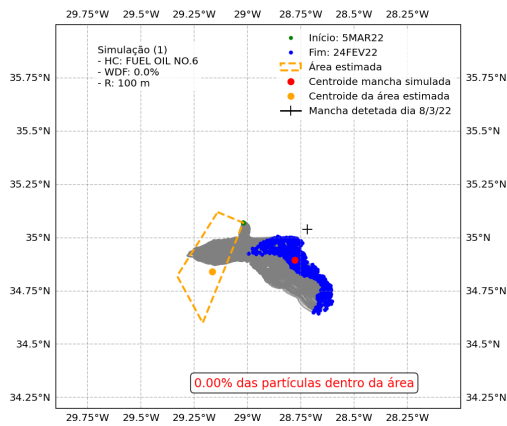
Assim, a Hipótese 1 demonstrou que, apesar de existirem configurações de parâmetros capazes de produzir resultados satisfatórios, a maioria das simulações apresentou fraca correspondência com a mancha observada. A localização NO, revelou potencial para aproximar a mancha simulada da observada em alguns cenários,

3.4. Derivas com backtracking

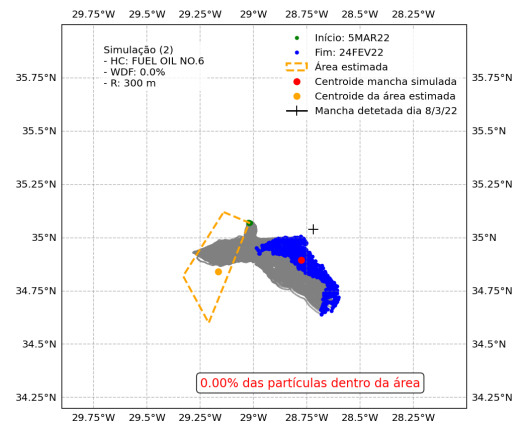
mas de forma geral não assegurou uma reprodução consistente do evento real.

Hipótese 2

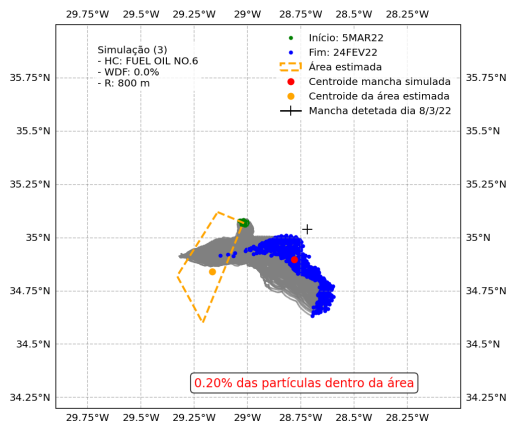
Nesta hipótese, assume-se que o final do derrame ocorreu no ponto mais a NE da área de estudo, sendo esse o local de início das simulações de deriva de *backtracking*. A janela temporal considerada corresponde a um período de 9 dias (período T2), abrangendo o intervalo máximo de dispersão definido para as simulações. O objetivo desta hipótese é avaliar a trajetória potencial das partículas libertadas a partir do ponto NE ao longo desse período, considerando as condições meteo-oceanográficas reais, de forma a testar a compatibilidade desta origem com a mancha observada.



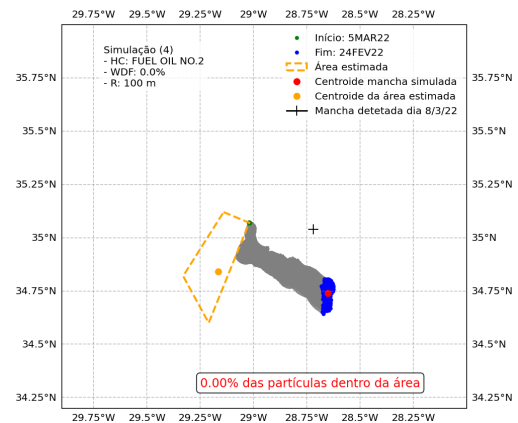
a) Simulação 1



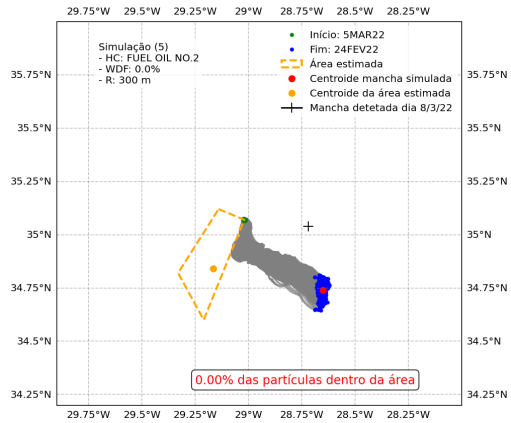
b) Simulação 2



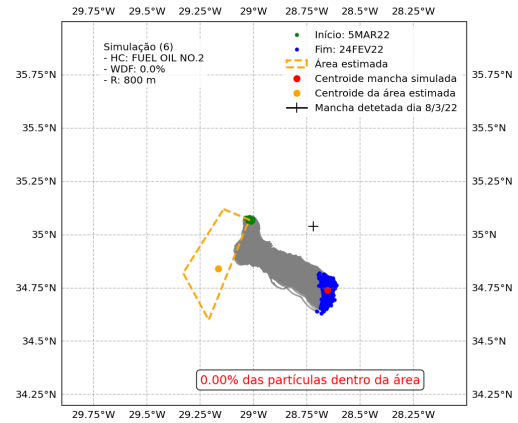
c) Simulação 3



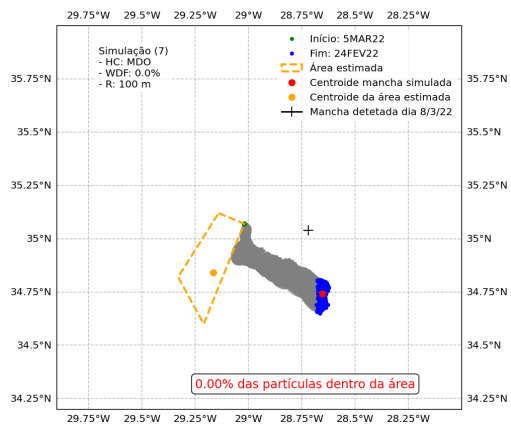
d) Simulação 4



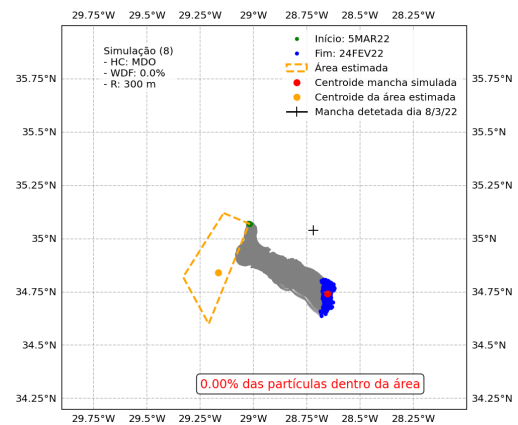
e) Simulação 5



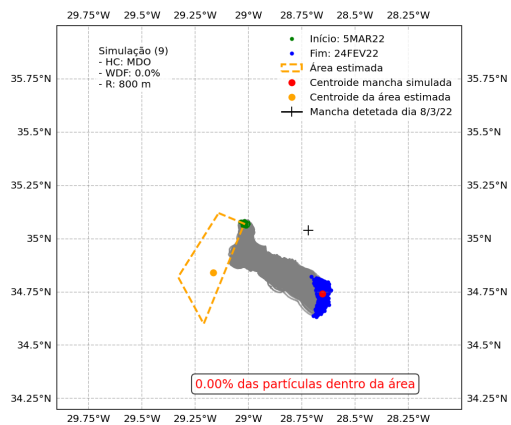
f) Simulação 6



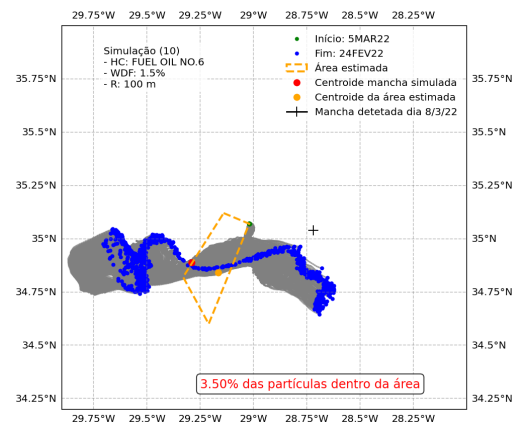
g) Simulação 7



h) Simulação 8

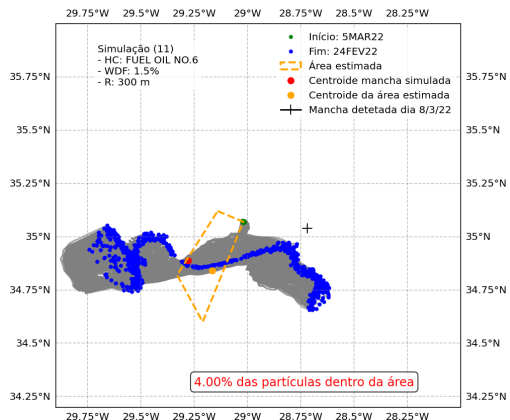


i) Simulação 9

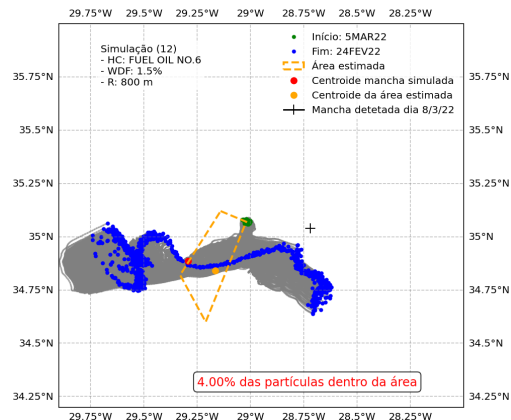


j) Simulação 10

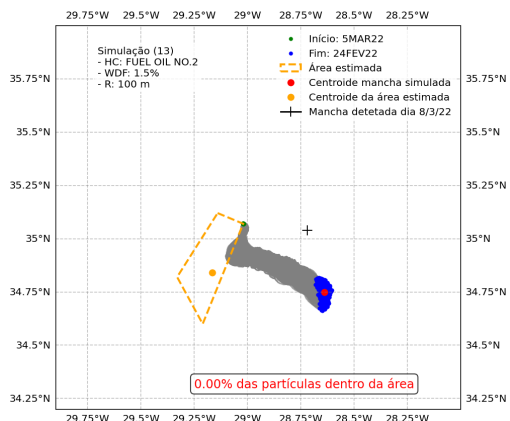
3.4. Derivas com backtracking



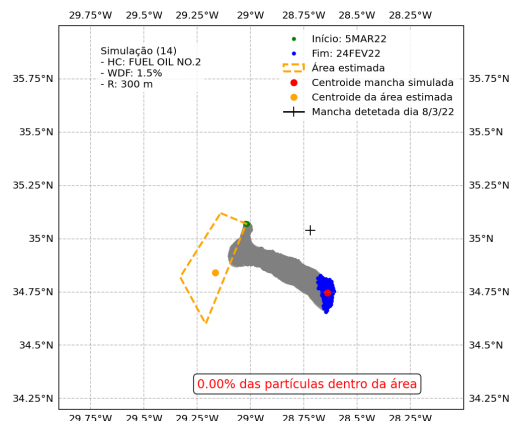
k) Simulação 11



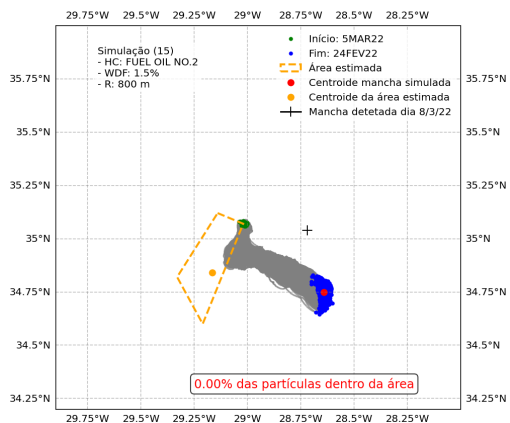
l) Simulação 12



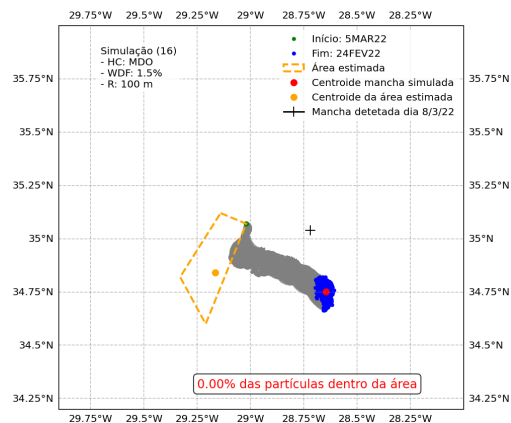
m) Simulação 13



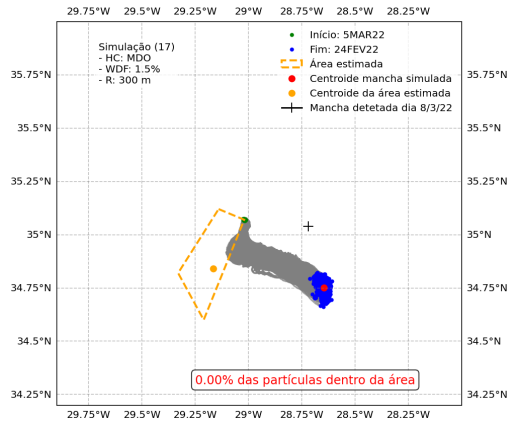
n) Simulação 14



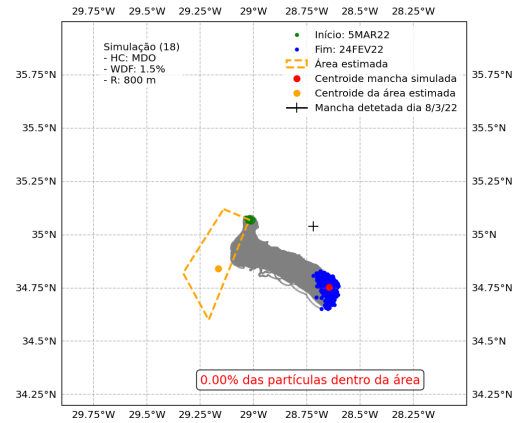
o) Simulação 15



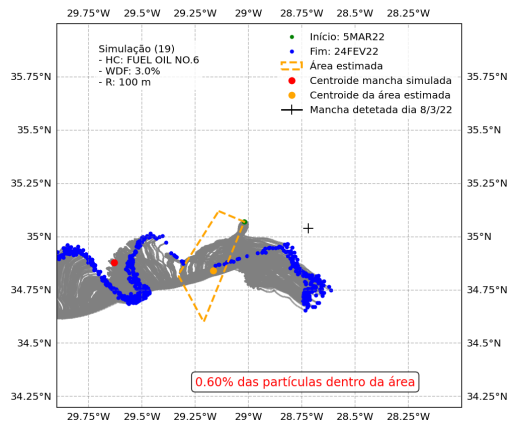
p) Simulação 16



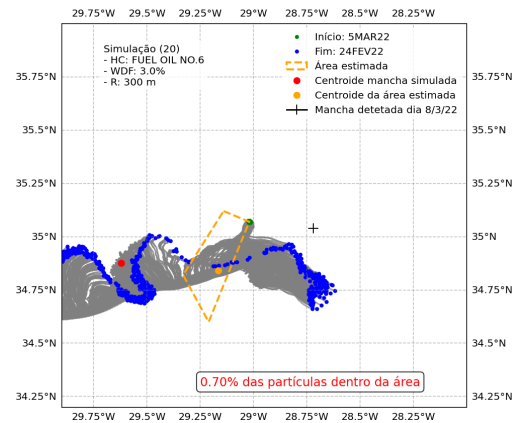
q) Simulação 17



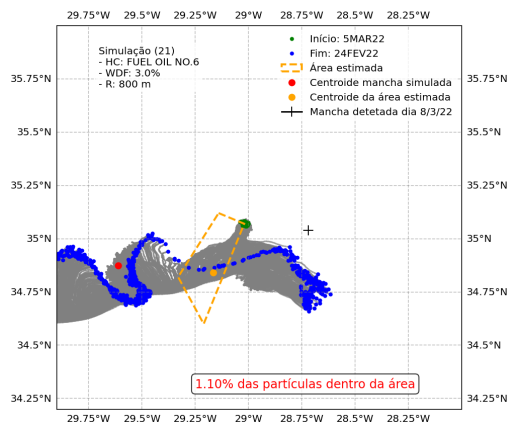
r) Simulação 18



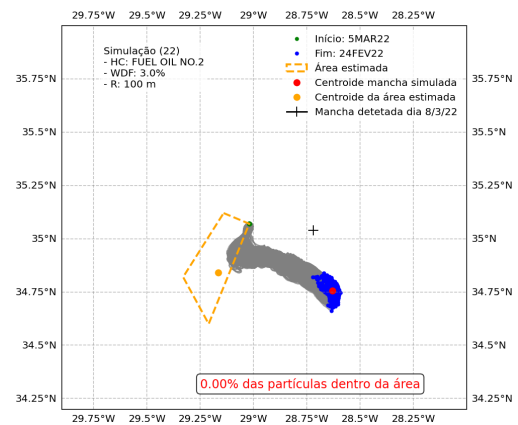
s) Simulação 19



t) Simulação 20

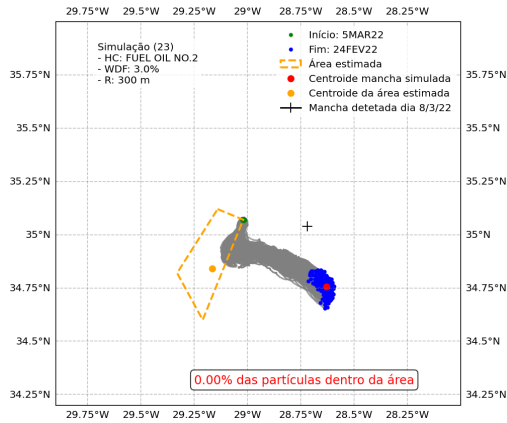


u) Simulação 21

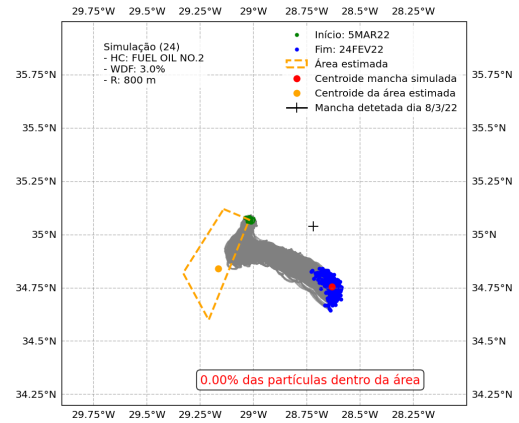


v) Simulação 22

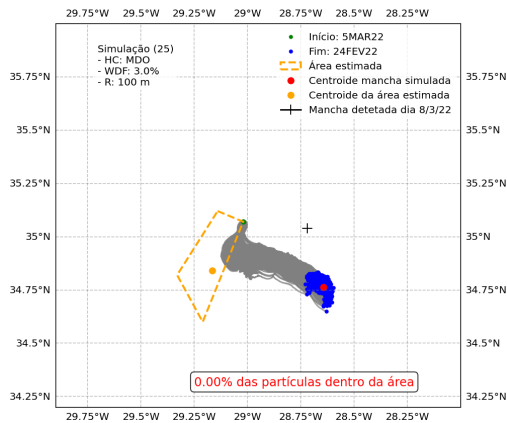
3.4. Derivas com backtracking



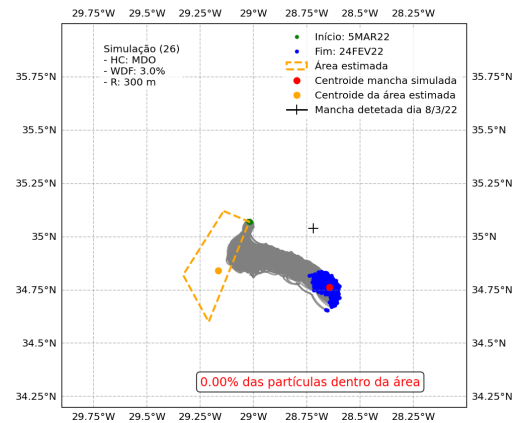
w) Simulação 23



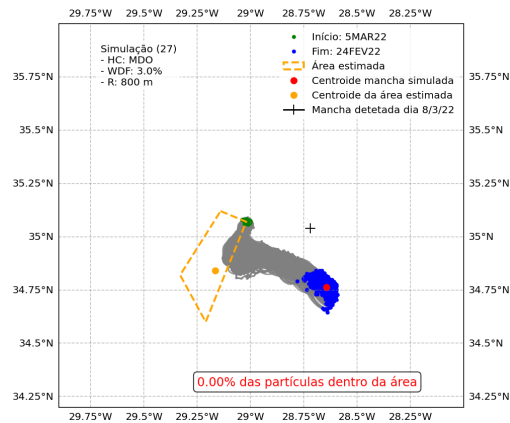
x) Simulação 24



y) Simulação 25



z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.6: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 2 do *backtracking* utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda conforme Figura 3.1.

TABELA 3.6: Resultados das simulações de deriva da Hipótese 2 do *backtracking*, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda conforme Tabela 3.1.

Simulação	Dist. Centróides (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	35.84	736.13	0.00
2	35.89	698.47	0.00
3	35.57	1030.27	0.20
4	48.16	69.99	0.00
5	48.15	94.73	0.00
6	48.05	127.70	0.00
7	48.03	74.97	0.00
8	48.03	85.65	0.00
9	47.93	128.78	0.00
10	12.58	3010.36	3.50
11	11.70	3119.71	4.00
12	12.68	3188.10	4.00
13	49.09	83.35	0.00
14	49.10	82.57	0.00
15	48.97	131.55	0.00
16	48.36	100.94	0.00
17	48.33	122.55	0.00
18	48.26	155.37	0.00
19	42.66	4398.49	0.60
20	41.90	4273.09	0.70
21	40.84	4444.82	1.10
22	49.78	120.55	0.00
23	49.69	139.68	0.00
24	49.62	173.18	0.00
25	48.42	167.13	0.00
26	48.41	165.86	0.00
27	48.33	211.40	0.00

De forma geral, os resultados desta hipótese revelam um fraco desempenho global, com valores pequenos ou nulos de partículas localizadas dentro da área estimada. Nenhum dos cenários conseguiu representar de forma satisfatória a mancha observada, seja pela reduzida sobreposição espacial, seja pela distância significativa entre centróides.

As simulações com melhor desempenho (11, 12 e 10) obtiveram, respectivamente, 4.00%, 4.00% e 3.50% das partículas dentro da área estimada, valores ainda assim muito reduzidos. Nestes casos, a distância entre centróides foi menor (entre 11.70 km e 12.68 km), mas as áreas simuladas foram bastante superiores ao valor de referência, e a configuração espacial das partículas não proporcionou uma sobreposição significativa com a área observada, mantendo dispersões largas e concentrações afastadas do centróide da mancha.

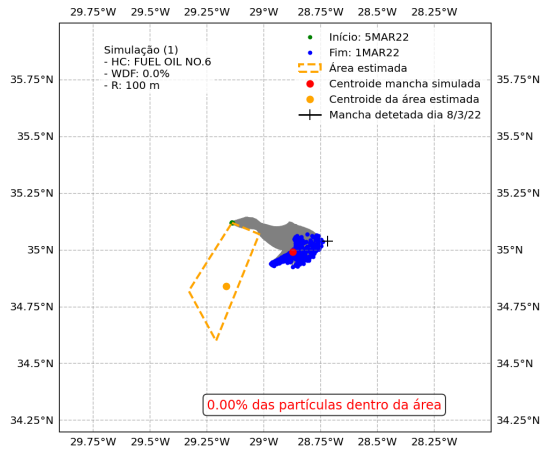
Num conjunto intermédio de resultados, como nas simulações 1, 2 e 3, a distância entre centróides rondou os 35 km e, apesar de as áreas simuladas se aproximarem mais do valor de referência, a percentagem de partículas na área estimada foi nula ou muito baixa (0.20% no melhor caso). A análise visual destas simulações mostra que, embora parte da mancha de partículas se encontrasse próxima da área de referência, não houve sobreposição suficiente para garantir uma correspondência relevante.

As simulações com piores resultados apresentaram ausência total de partículas na área estimada e distâncias entre centróides muito elevadas (superiores a 40 km), em alguns casos associadas a áreas simuladas extremamente superiores ou inferiores ao valor de referência. Estas condições foram mais frequentes em simulações com HC de menor viscosidade (Fuel Oil No. 2 e MDO) e com WDF de 0.0% ou 3.0%, resultando numa dispersão das partículas afastada da trajetória plausível para a origem do derrame.

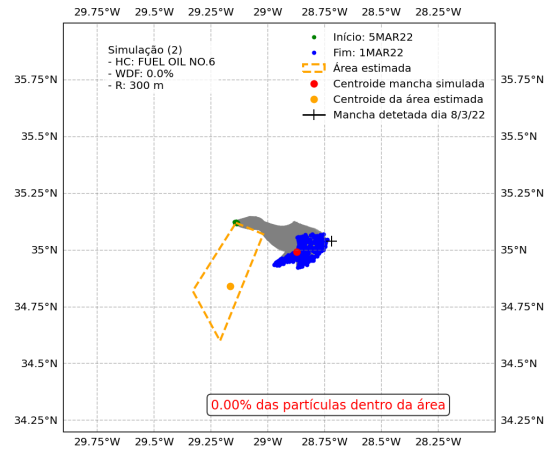
Assim, a Hipótese 2 evidenciou que, mesmo nas condições de parâmetros mais favoráveis, a correspondência com a mancha observada foi insuficiente. As limitações verificadas sugerem que a localização NE, associada a um intervalo temporal de 9 dias (5 de março a 24 de fevereiro de 2022), não fornece condições favoráveis para reproduzir com precisão o cenário observado.

Hipótese 3

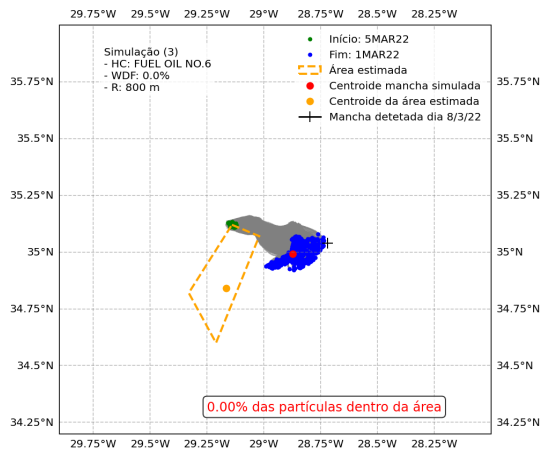
A terceira hipótese consiste na simulação de *backtracking* a partir do ponto NO da mancha detetada, considerando uma janela temporal reduzida de quatro dias (período T1).



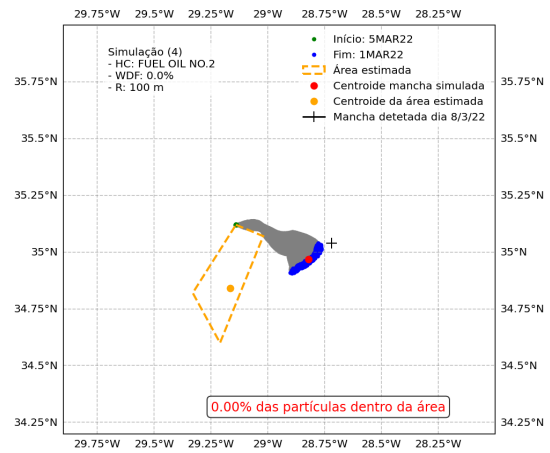
a) Simulação 1



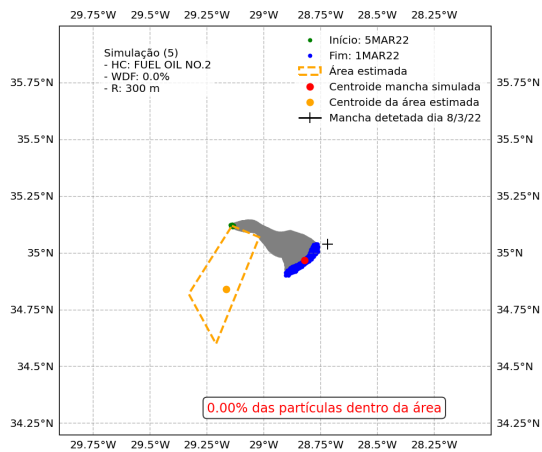
b) Simulação 2



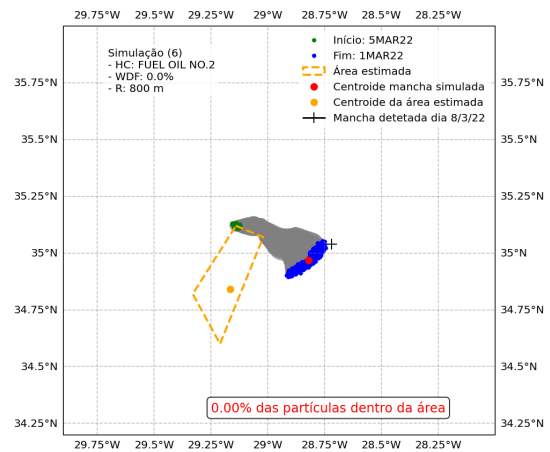
c) Simulação 3



d) Simulação 4

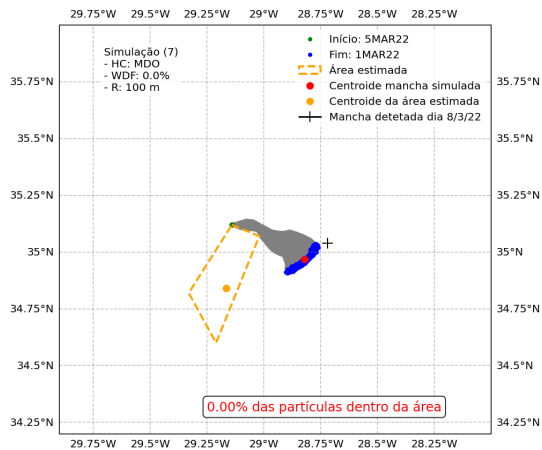


e) Simulação 5

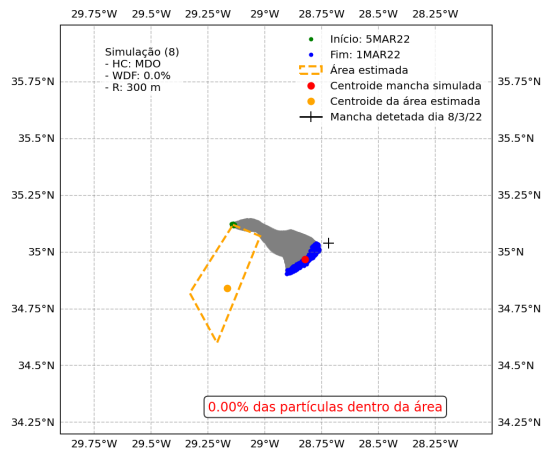


f) Simulação 6

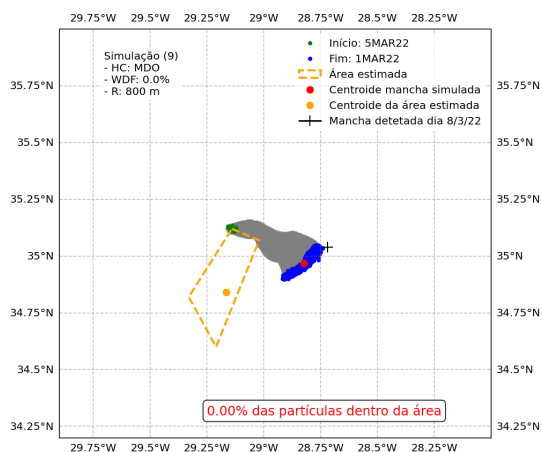
3.4. Derivas com backtracking



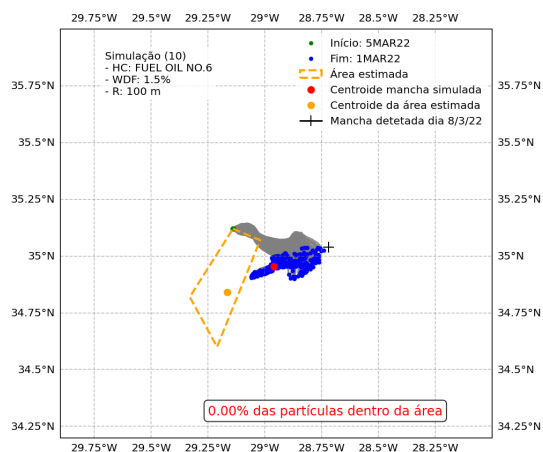
g) Simulação 7



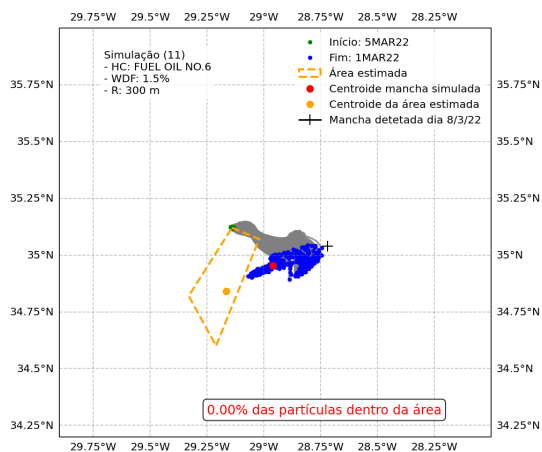
h) Simulação 8



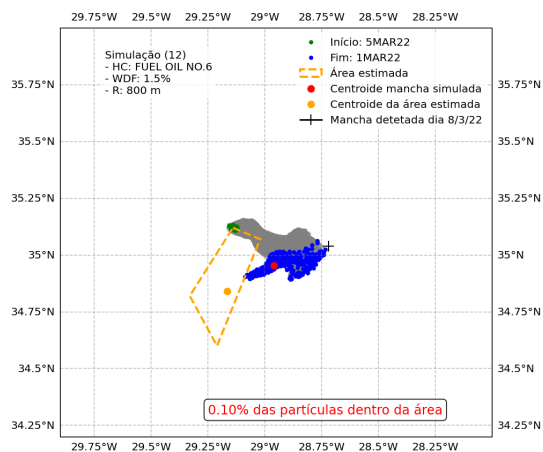
i) Simulação 9



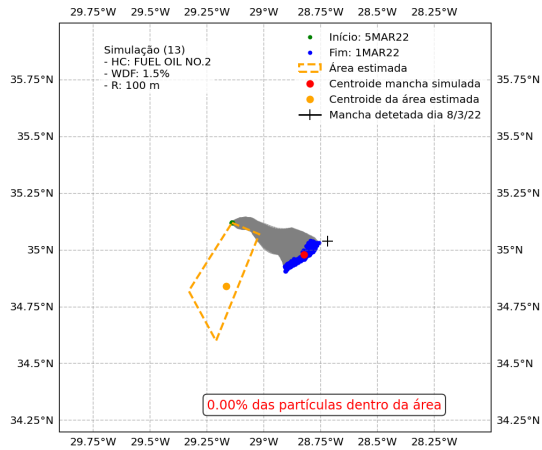
j) Simulação 10



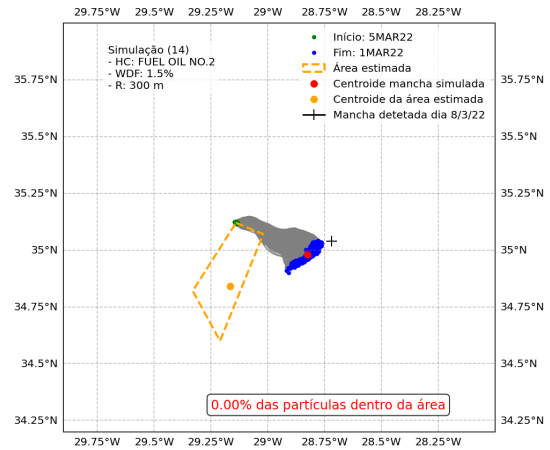
k) Simulação 11



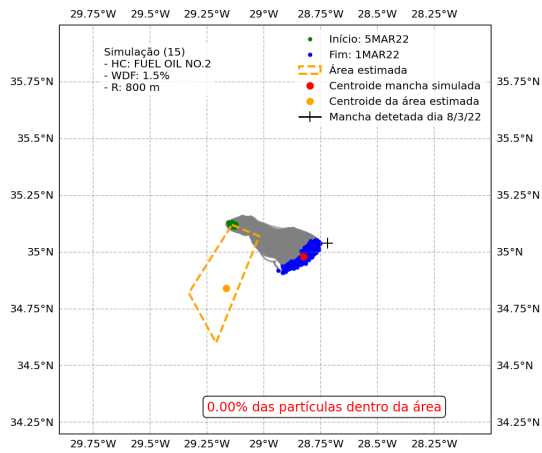
l) Simulação 12



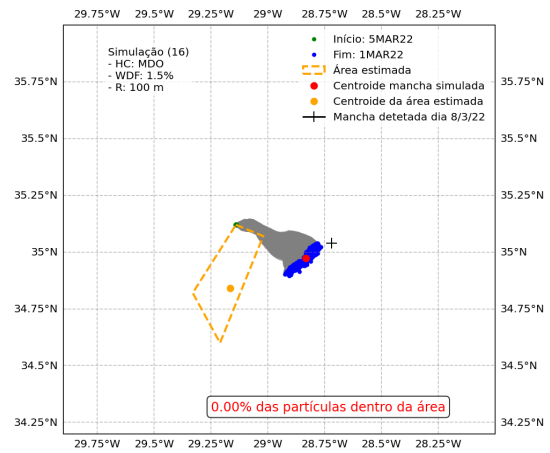
m) Simulação 13



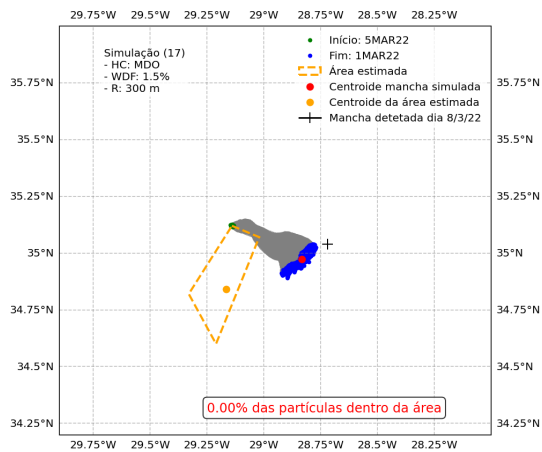
n) Simulação 14



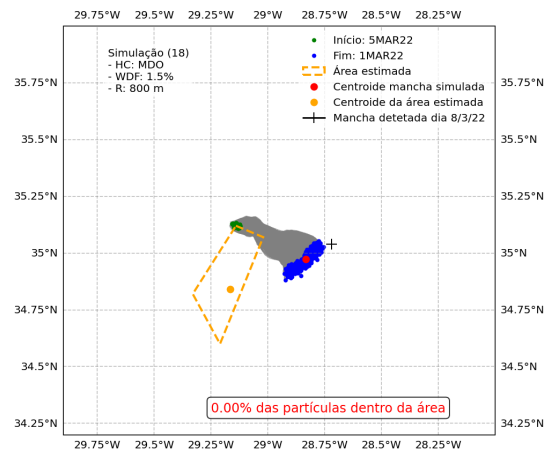
o) Simulação 15



p) Simulação 16

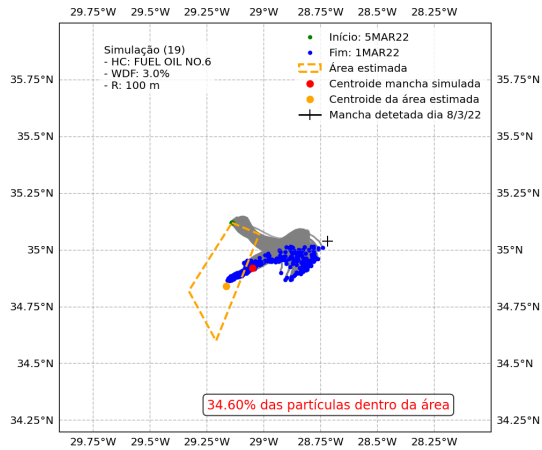


q) Simulação 17

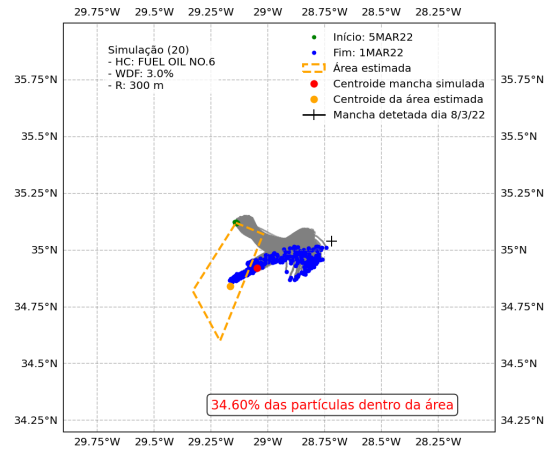


r) Simulação 18

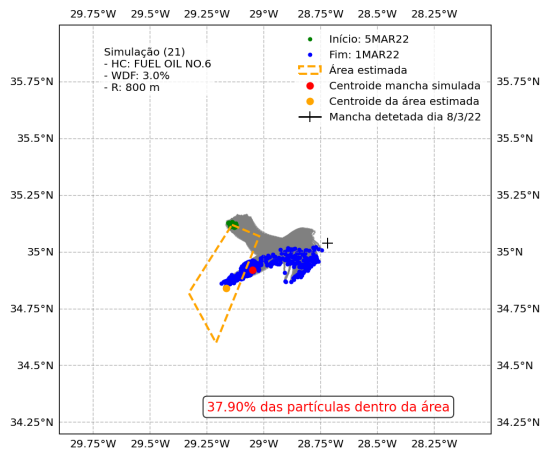
3.4. Derivas com backtracking



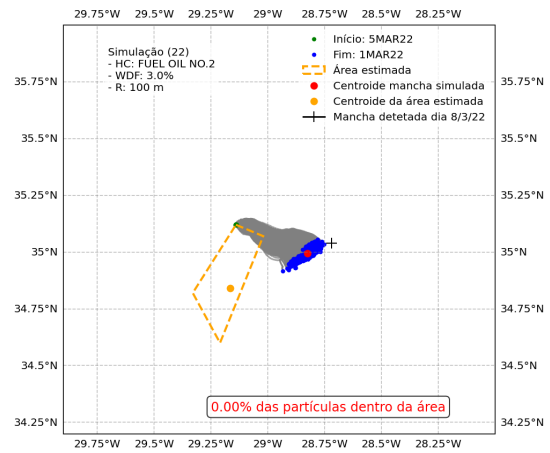
s) Simulação 19



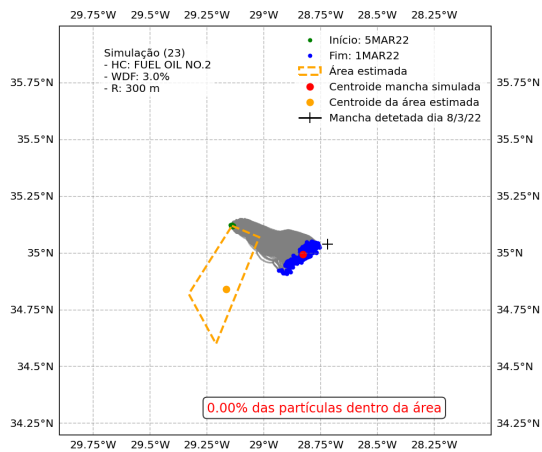
t) Simulação 20



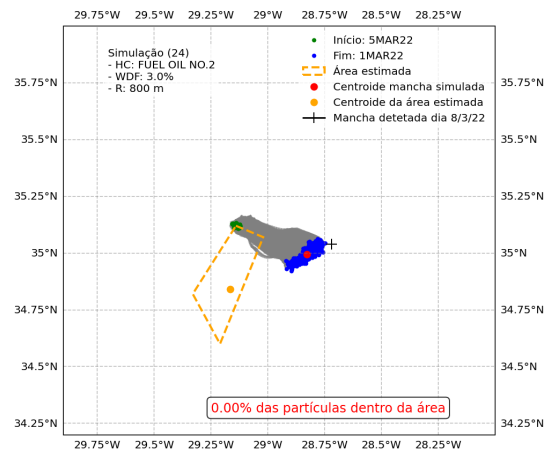
u) Simulação 21



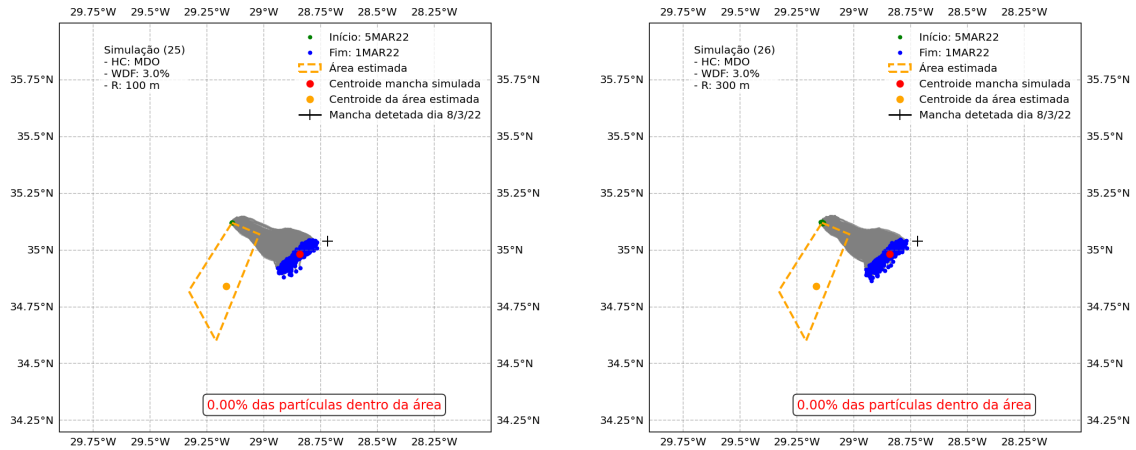
v) Simulação 22



w) Simulação 23

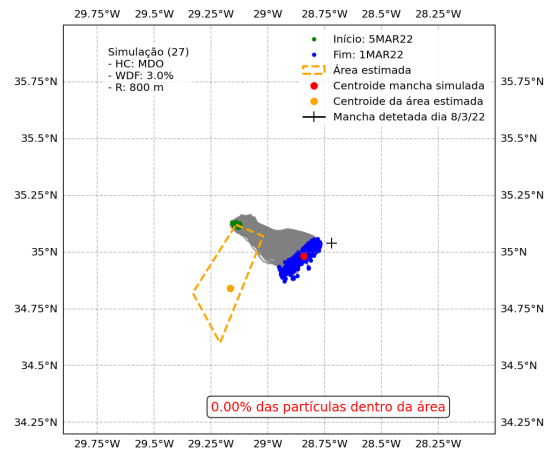


x) Simulação 24



y) Simulação 25

z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.7: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 3 do *backtracking* utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift.
Legenda conforme Figura 3.1.

TABELA 3.7: Resultados da Hipótese 3 (Ponto NO, 4 dias) do *backtracking*, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda conforme Tabela 3.1.

Simulação	Distância (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	31.34	199.28	0.00
2	31.36	207.43	0.00
3	31.28	245.17	0.00
4	34.35	53.26	0.00
5	34.32	58.97	0.00
6	34.27	95.01	0.00
7	34.23	52.40	0.00
8	34.22	58.92	0.00
9	34.15	95.90	0.00
10	22.50	278.01	0.00
11	22.56	292.95	0.00
12	22.49	348.37	0.10
13	34.62	62.01	0.00
14	34.60	68.73	0.00
15	34.55	100.02	0.00
16	33.56	76.95	0.00
17	33.58	83.57	0.00
18	33.55	130.09	0.00
19	13.70	411.03	34.60
20	13.75	421.65	34.60
21	13.68	460.74	37.90
22	35.13	86.99	0.00
23	35.09	101.59	0.00
24	35.15	118.03	0.00
25	33.35	130.37	0.00
26	33.31	135.70	0.00
27	33.43	164.11	0.00

De forma geral, os resultados desta hipótese revelam um desempenho global bastante desigual entre as simulações. Embora alguns cenários tenham apresentado valores muito favoráveis, a maioria registou resultados reduzidos, frequentemente devido à ausência de partículas dentro da área estimada e a distâncias consideráveis entre centróides.

As simulações com melhor desempenho (21, 19 e 20) obtiveram, respectivamente, 37.90%, 34.60% e 34.60% das partículas localizadas dentro da área estimada, valores bastante superiores aos observados nas hipóteses anteriores. Além disso, a distância entre centróides foi reduzida (entre 13.680 km e 13.750 km), permitindo uma sobreposição significativa entre a mancha simulada e a área estimada. Apesar de as áreas simuladas (460.74 km², 411.03 km² e 421.65 km²) se encontrarem abaixo do valor de referência de 611.40 km², esta diferença não impediu um elevado grau de correspondência espacial.

Num conjunto intermédio de resultados, como nas simulações 10, 11 e 12, as distâncias entre centróides variaram entre 22.49 km e 22.56 km, e as percentagens de partículas foram muito baixas (0.00% a 0.10%). As áreas simuladas (278.01 km² a 348.37 km²) apresentaram-se inferiores em relação à de referência, e a sobreposição com a área observada foi limitada, resultando em desempenhos moderados.

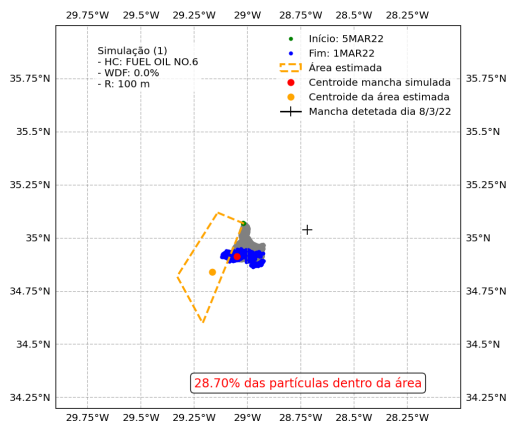
Quanto à análise das áreas, as mais próximas do valor de referência ocorreram nas simulações 21, 20 e 19 (460.74 km², 421.65 km² e 411.03 km²), o que, aliado às distâncias reduzidas e à elevada presença de partículas, resultou nos melhores resultados desta hipótese. Por outro lado, as maiores discrepâncias foram observadas nas simulações 4, 7 e 1 (53.26 km², 52.40 km² e 199.28 km², respetivamente), representando áreas muito inferiores ao valor de referência e associadas a desempenhos fracos.

As simulações com piores resultados apresentaram ausência total de partículas na área estimada e distâncias elevadas (superiores a 33 km, atingindo mais de 35 km nos piores casos). Nestas condições, a dispersão espacial das partículas manteve-se afastada da área observada, mesmo em casos com áreas simuladas próximas do valor de referência.

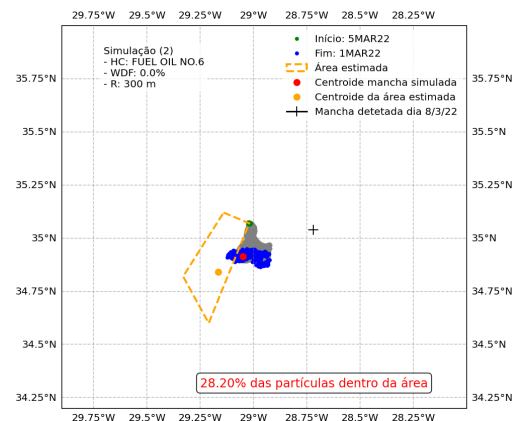
Visualmente, observa-se que apenas um pequeno grupo de simulações conseguiu alinhar a mancha simulada com a área estimada, enquanto a maioria apresentou uma deriva acentuada para este e centróides distantes. Assim, esta hipótese demonstrou que a redução do intervalo temporal para quatro dias pode, em condições específicas de parâmetros, melhorar substancialmente a correspondência com a mancha observada, mas não garante por si só bons resultados.

Hipótese 4

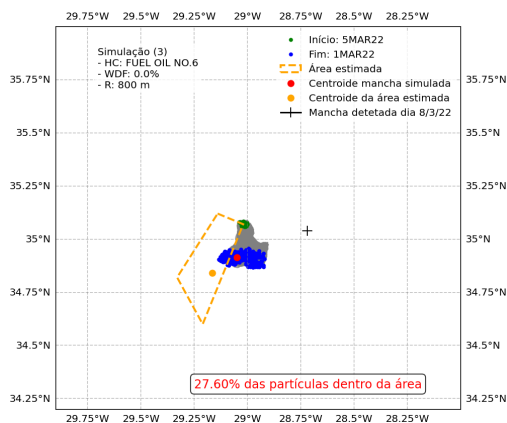
A Hipótese 4 consiste na realização de simulações de deriva inversa com uma janela temporal de quatro dias (período T1), assumindo como ponto de observação da mancha de HC a posição NE, conforme identificado na imagem satélite (Figura 2.5). Esta hipótese visa testar a sensibilidade do *backtracking* à duração da janela temporal, avaliando se um período mais curto influencia significativamente a estimativa da origem potencial da mancha, partindo de uma localização alternativa à utilizada nas Hipóteses 1 e 3.



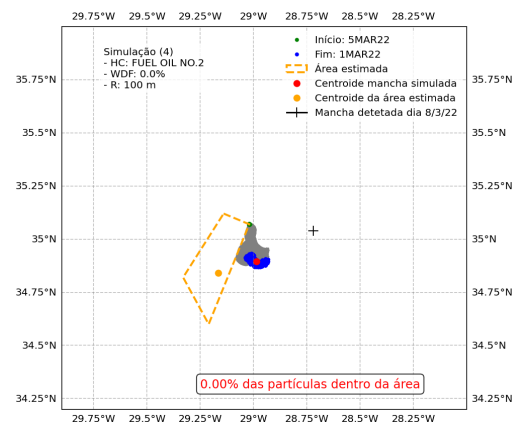
a) Simulação 1



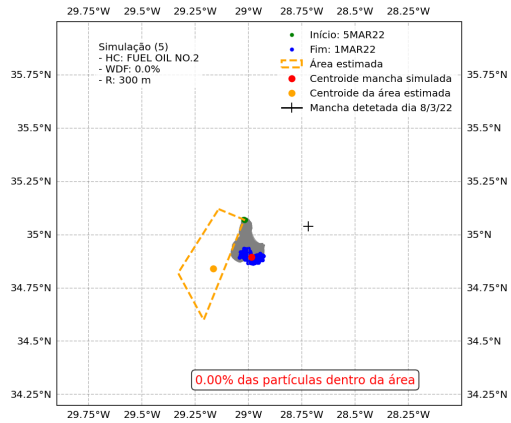
b) Simulação 2



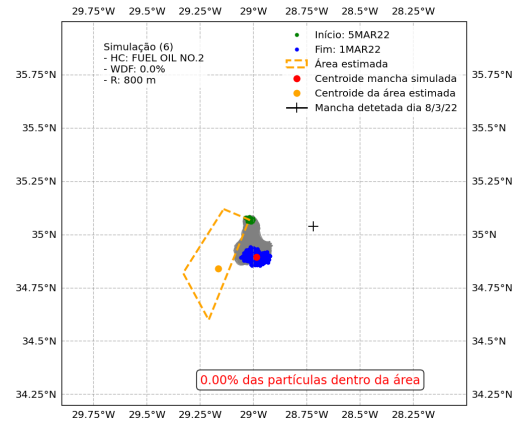
c) Simulação 3



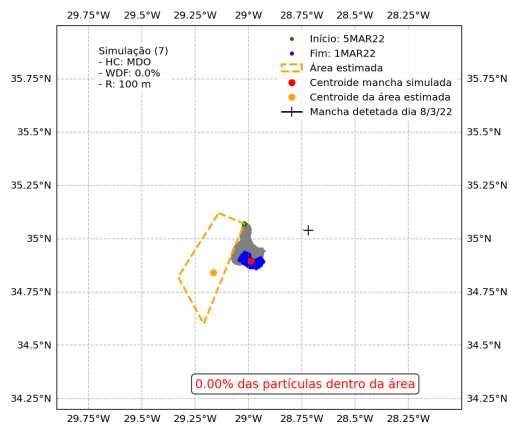
d) Simulação 4



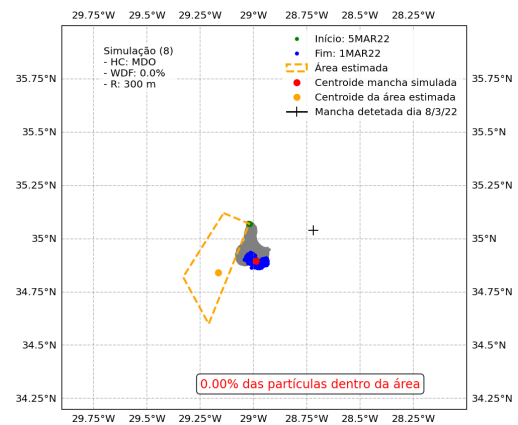
e) Simulação 5



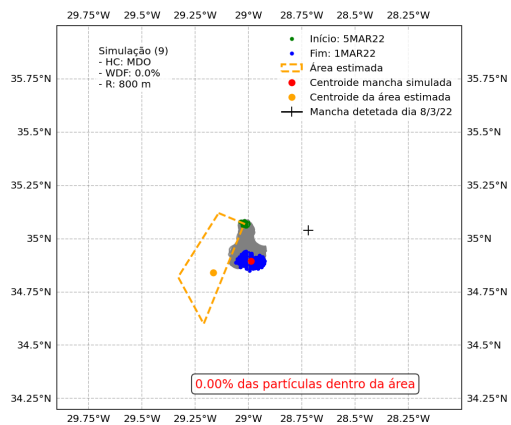
f) Simulação 6



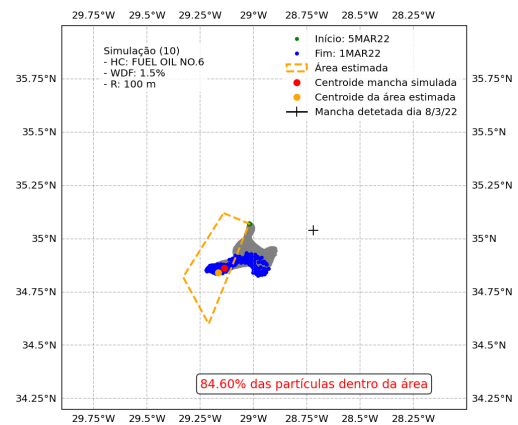
g) Simulação 7



h) Simulação 8

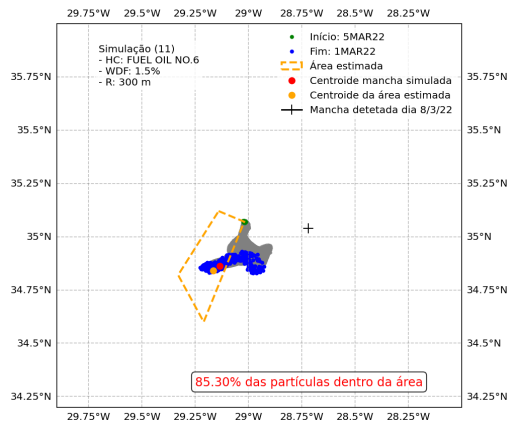


i) Simulação 9

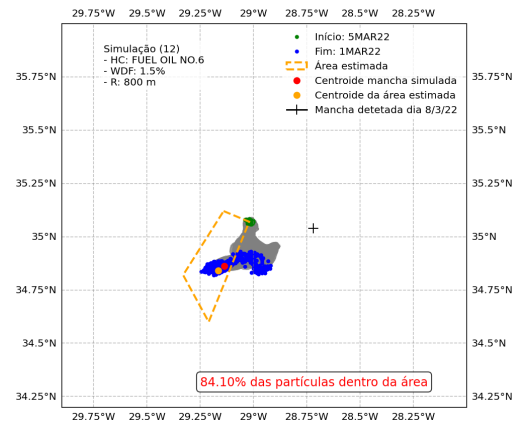


j) Simulação 10

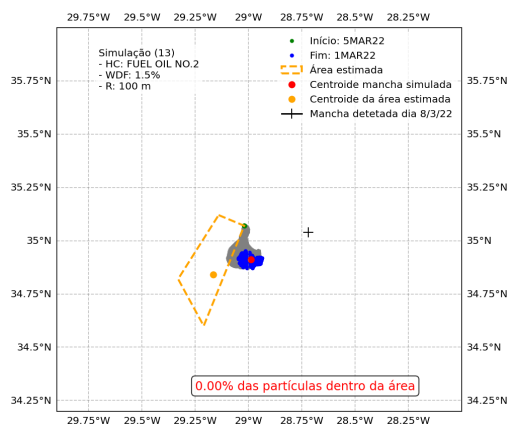
3.4. Derivas com backtracking



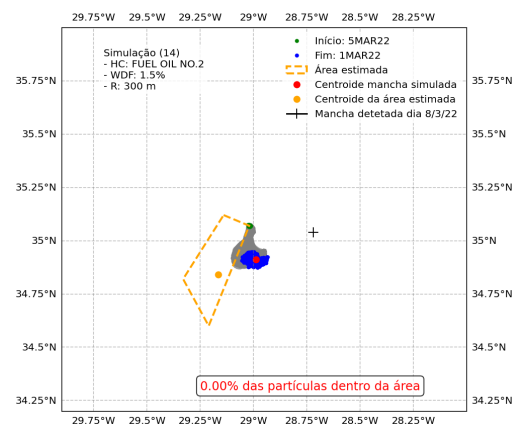
k) Simulação 11



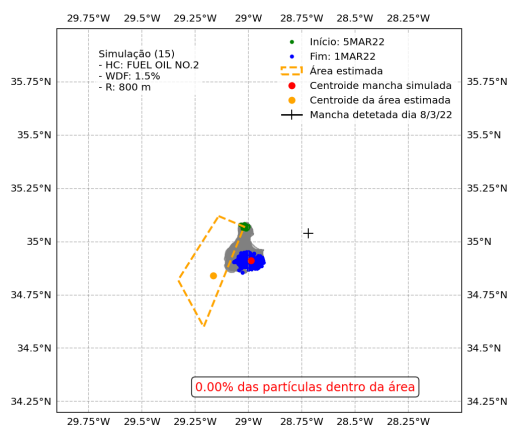
l) Simulação 12



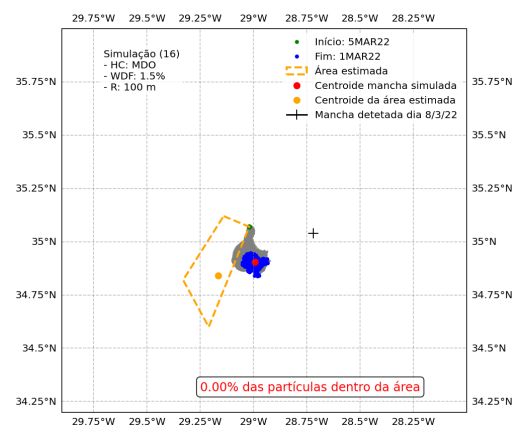
m) Simulação 13



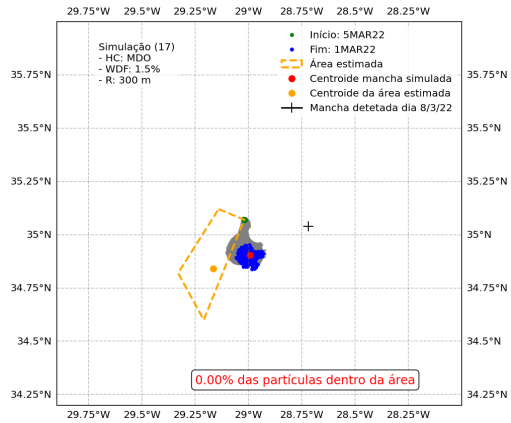
n) Simulação 14



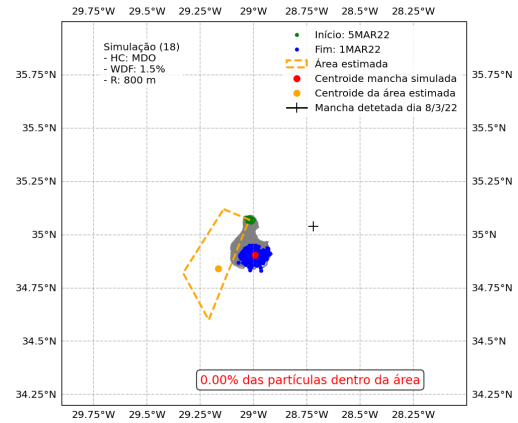
o) Simulação 15



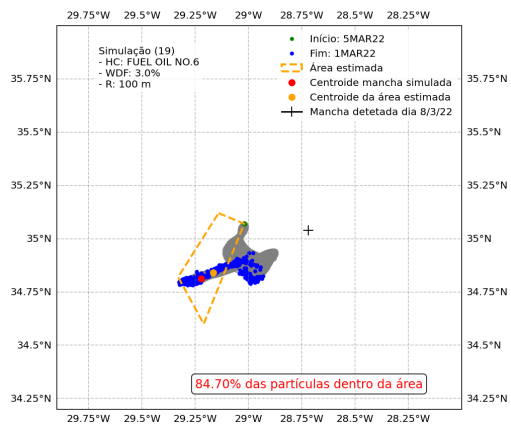
p) Simulação 16



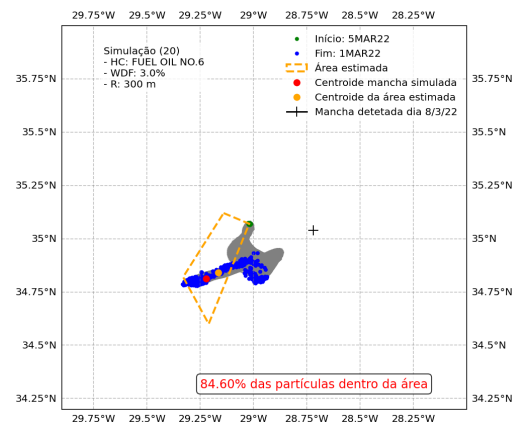
q) Simulação 17



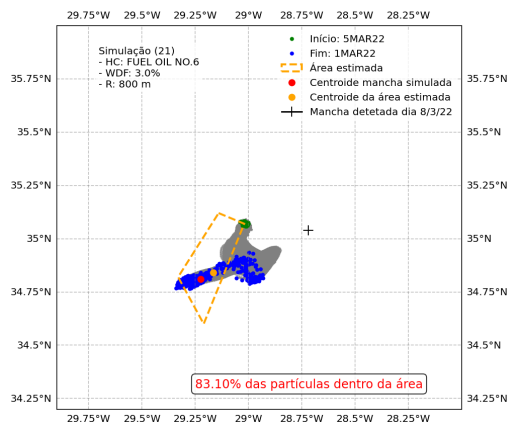
r) Simulação 18



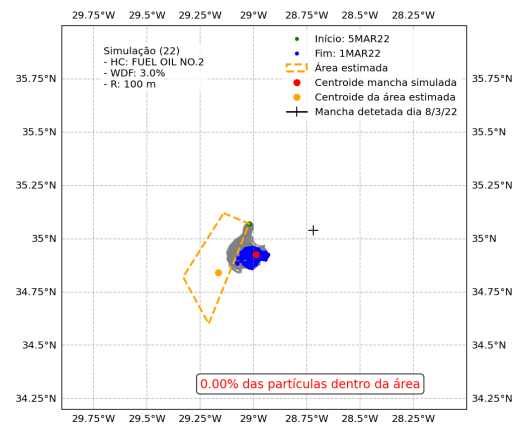
s) Simulação 19



t) Simulação 20

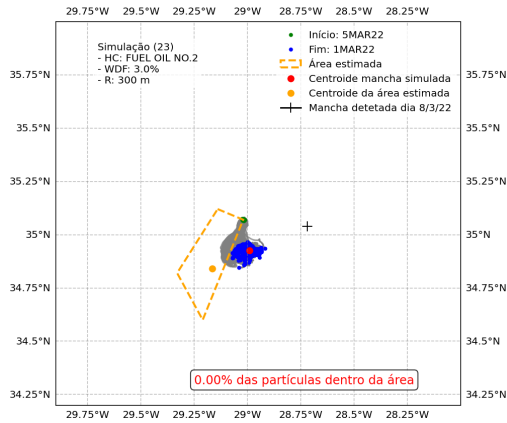


u) Simulação 21

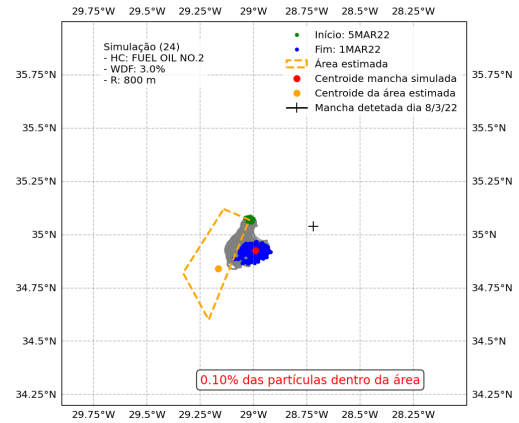


v) Simulação 22

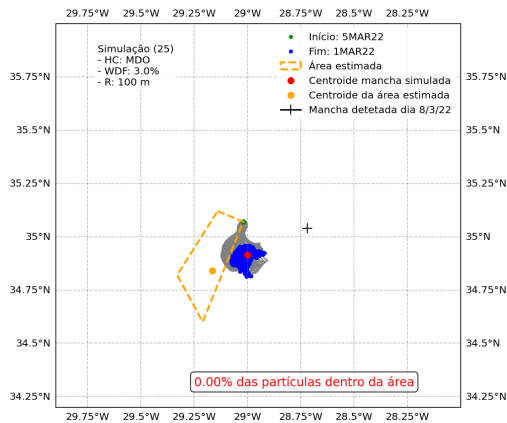
3.4. Derivas com backtracking



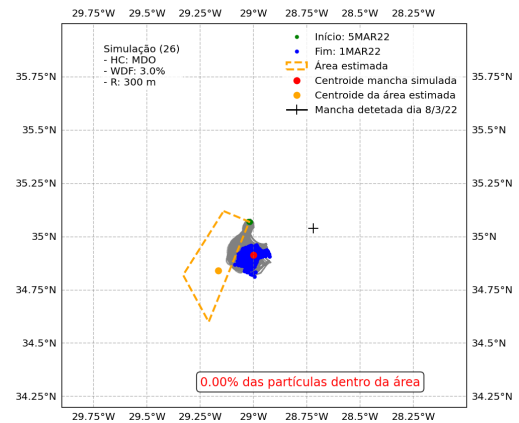
w) Simulação 23



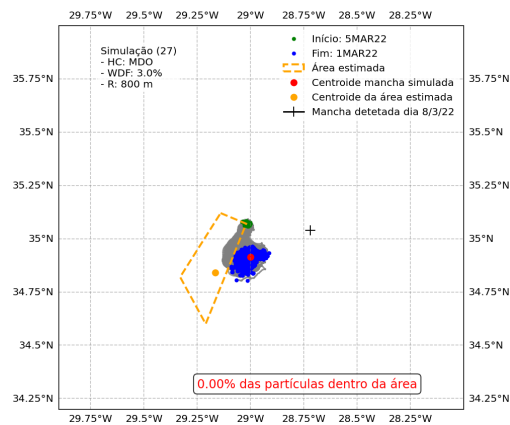
x) Simulação 24



y) Simulação 25



z) Simulação 26



aa) Simulação 27

FIGURA 3.8: Resultados das simulações 1 a 27 de acordo com a Hipótese 4 do *backtracking*, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda conforme Figura 3.1.

TABELA 3.8: Resultados da Hipótese 4 (Ponto NE, 4 dias) do *back-tracking*, utilizando o módulo OpenOil do OpenDrift. Legenda conforme Tabela 3.1.

Simulação	Distância (km)	Área (km ²)	% Partículas
1	13.25	118.22	28.70
2	13.24	125.15	28.20
3	13.18	153.03	27.60
4	17.33	45.80	0.00
5	17.33	56.20	0.00
6	17.28	82.34	0.00
7	17.21	48.24	0.00
8	17.21	53.67	0.00
9	17.17	82.45	0.00
10	3.52	213.57	84.60
11	3.56	219.99	85.30
12	3.40	258.69	84.10
13	17.93	62.45	0.00
14	17.93	64.27	0.00
15	17.84	93.99	0.00
16	17.13	85.13	0.00
17	17.12	96.25	0.00
18	17.07	128.10	0.00
19	6.26	355.58	84.70
20	6.28	356.73	84.60
21	6.38	396.50	83.10
22	18.54	93.38	0.00
23	18.42	112.37	0.00
24	18.39	121.63	0.10
25	17.04	146.78	0.00
26	17.03	153.92	0.00
27	16.98	184.94	0.00

De forma geral, os resultados desta hipótese revelam um desempenho global variado entre simulações, incluindo os melhores valores obtidos em todo o conjunto de análises. A combinação do ponto NE com um período de deriva inversa de quatro dias produziu, em determinadas condições, a melhor correspondência com a mancha observada.

Os melhores desempenhos foram registados nas simulações 19, 20, 21 e 11. Todas apresentaram percentagens de partículas dentro da área estimada superiores a 83%, distâncias entre centróides baixas (entre 3.56 km e 6.38 km) e áreas simuladas entre 219.99 km² e 396.50 km². Apesar de estas áreas se encontrarem abaixo do valor de referência (611.40 km²), a elevada sobreposição espacial compensou essa diferença, garantindo uma reprodução fiel da configuração observada.

Num conjunto intermédio de resultados, como nas simulações 1, 2 e 3, o tipo de hidrocarboneto manteve-se no Fuel Oil No. 6, mas com WDF de 0.0%. As áreas simuladas variaram entre 118.22 km² e 153.03 km², as percentagens de partículas na área estimada situaram-se entre 27.60% e 28.70%, e as distâncias entre centróides ficaram em torno dos 13.20 km. Estes valores, apesar de aceitáveis, indicam uma correspondência espacial menos robusta do que a verificada nos melhores casos.

Por outro lado, a maioria dos desempenhos mais baixos ocorreu com Fuel Oil No. 2 ou MDO e WDF entre 0.0% e 1.5%, independentemente do raio de dispersão. Nestes casos, a percentagem de partículas na área estimada foi nula ou muito baixa (0.00% a 0.10%), e as distâncias entre centróides ultrapassaram frequentemente os 17 km, chegando a mais de 18 km nos cenários menos favoráveis. Mesmo quando as áreas simuladas eram relativamente próximas da referência — como na simulação 27, com 184.94 km², a ausência de partículas na área estimada impediu um bom desempenho. Entre os piores valores de área destacam-se as simulações 4, 7 e 8, com 45.80 km², 48.24 km² e 53.67 km², respetivamente, muito inferiores ao valor de referência e sem interseção relevante com a mancha observada.

Visualmente, os melhores cenários caracterizam-se por uma trajetória simulada que se estende desde a posição inicial até à área estimada com boa sobreposição do centróide da mancha sobre a área estimada e uma reduzida dispersão. Por outro lado, os piores resultados mostram um afastamento acentuado para sudeste, com partículas concentradas fora da área estimada e centróides deslocados.

Assim, esta hipótese evidenciou que a redução do intervalo temporal para quatro dias, a partir do ponto NE, aliada ao Fuel Oil No. 6 com WDF entre 1.5% e 3.0%, foi determinante para alcançar os melhores resultados de todo o estudo. Contudo, manteve-se uma elevada sensibilidade ao tipo de hidrocarboneto e ao valor do WDF, que, quando não ajustados devidamente, resultaram em desempenhos muito inferiores.

Capítulo 4

Discussão dos resultados

4.1 Avaliação comparativa dos cenários de *back-tracking*

A análise comparativa das quatro hipóteses evidencia diferenças claras de desempenho quando se combinam posição inicial e janela temporal. O destaque global pertence à Hipótese 4 (Ponto NE, 4 dias), que apresentou a maior percentagem de partículas dentro da área estimada (84.70%), uma das menores distâncias entre centróides (6.26 km) e uma área simulada ligeiramente perto do valor de referência (355.58 km²). Este cenário reúne, portanto, a melhor coerência entre os três critérios (distância, área e interseção), traduzindo-se na correspondência espacial mais robusta com a mancha observada. Em termos de parâmetros, os melhores resultados da Hipótese 4 ocorreram com Fuel Oil No. 6, WDF entre 1.5% e 3.0% e *radius* entre 100 e 800 metros, sugerindo que, dentro destas gamas, o raio teve impacto secundário face ao efeito do WDF e do tipo de hidrocarboneto.

A Hipótese 3 (Ponto NO, 4 dias) surge em segundo plano, com percentagens máximas de partículas na área estimada de 37.90%, distâncias entre centróides de cerca de 13.68 km e áreas simuladas próximas de 460.74 km². Embora menos expressiva do que a Hipótese 4, confirma que a janela curta de 4 dias melhora a fidelidade espacial, reduz a dispersão e favorece a interseção com a área estimada, quando comparada com os cenários de janela mais longa.

As hipóteses de 9 dias apresentam um quadro distinto. A Hipótese 1 (Ponto NO, 9 dias) e a Hipótese 2 (Ponto NE, 9 dias) registaram percentagens de partículas na área estimada muito baixas (até 4.00%), com distâncias entre centróides reduzidas em alguns casos (15.76 km na Hipótese 1 e 11.70 km na Hipótese 2), mas associadas a áreas simuladas muito superiores ao valor de referência (até mais de oito vezes maiores). Este contraste sublinha um ponto metodológico importante:

mesmo quando um parâmetro isolado apresenta valores favoráveis, a combinação global pode ser pouco realista, resultando em baixa sobreposição espacial e utilidade operacional limitada.

Em síntese, os resultados demonstram que a escolha da posição inicial e da janela temporal é determinante para o sucesso do *backtracking*. A posição NE, quando combinada com uma janela curta (4 dias), proporcionou a melhor correspondência espacial (Hipótese 4), ao passo que a posição NO com a mesma janela obteve resultados positivos mas inferiores (Hipótese 3). Já as janelas longas (9 dias), independentemente da posição inicial (Hipótese 1 e Hipótese 2), aumentaram a incerteza, levaram a áreas simuladas mais extensas e reduziram a interseção com a área estimada. Assim, a decisão conjunta sobre onde (posição inicial) e quanto tempo recuar (janela temporal) deve ser tratada como um parâmetro crítico do desenho experimental, com prioridade para combinações que minimizem a dispersão e maximizem a sobreposição com a mancha observada.

Esta conclusão é reforçada pelos valores apresentados na Tabela 4.1, onde se comparam os melhores resultados de cada hipótese com base nos três critérios definidos.

TABELA 4.1: Resumo comparativo dos valores máximos por hipótese.

Hipótese	Dist. Centróides (km)	Área (km ²)	% Partículas
Hipótese 1	15.76	3272.21	4.00
Hipótese 2	11.70	3119.71	4.00
Hipótese 3	13.68	460.74	37.90
Hipótese 4	6.26	355.58	84.70

4.2 Impacto dos Parâmetros de Entrada nas Simulações de Deriva

A análise das quatro hipóteses mostra que os parâmetros de entrada WDF e o tipo de hidrocarboneto, condicionam fortemente a coerência espacial das manchas simuladas, mas o seu efeito é modulável pela posição inicial (NE vs. NO) e, sobretudo, pela janela temporal (4 vs. 9 dias). Em termos de desempenho global, os melhores cenários ocorreram quando o WDF foi estabelecido entre 1.5% e 3.0% para Fuel Oil No. 6, com *radius* de 100–800 metros, na configuração ponto NE e 4 dias (Hipótese 4), que agregou simultaneamente altas interseções com a área estimada

($\geq 83\%$), distâncias entre centróides baixas ($\approx 3.4\text{--}6.4$ km) e áreas moderadas ($\approx 214\text{--}397$ km²). Esta leitura está de acordo com a evolução dos modelos Lagrangianos operacionais, tal como sintetizado por Reed et al. (1999), detalhado para sistemas de uso operacional por De Dominicis et al. (2013a) e enquadrado para o Open-Drift por Dagestad et al. (2018), que sublinham a importância do enquadramento espaço-temporal e da representação do termo de vento.

O WDF revelou ser o parâmetro de maior influência direta na orientação e extensão da deriva superficial. Em janelas curtas (4 dias), juntamente com um WDF de 1.5–3.0% foi acompanhado por ganhos significativos na sobreposição espacial sempre que o HC foi Fuel Oil No. 6 (Hipóteses 3 e 4), tal como formalizado no conceito de *leeway/windage* por Breivik e Allen (2008) e aprofundado por Breivik et al. (2011). Na Hipótese 4 (NE, 4 dias), as simulações 19–21 (Fuel Oil No. 6; WDF = 3.0%) e 10–12 (Fuel Oil No. 6; WDF = 1.50%) concentraram entre 83% e 85% das partículas na área estimada. Já com WDF = 0.0%, as percentagens caíram para cerca de 28%, um padrão coerente com a sensibilidade ao vento descrita por Breivik e Allen (2008) e observada em eventos reais, como referido por Kim et al. (2014). De forma consistente, na Hipótese 3 (NO, 4 dias), o melhor desempenho ocorreu com WDF = 3.0% (simulações 19–21, Fuel Oil No. 6), com 34.60% a 37.90% de partículas na área estimada. Em janelas longas (9 dias), porém, a eficácia do WDF foi superada pelos efeitos cumulativos do tempo — resultando em dispersões mais extensas e apenas 4.00% de interseção máxima — tal como já discutido por Reed et al. (1999) e Reed et al. (1994) e enfatizado no enquadramento de desempenho por Dagestad et al. (2018).

O Fuel Oil No. 6, mais viscoso e persistente, sustentou os melhores cenários nas janelas de tempo curtas, provavelmente por apresentar menor dispersão e menor volatilidade no período considerado, mantendo o núcleo de partículas coeso e alinhado com o polígono de referência. Por outro lado, o Fuel Oil No. 2 e o MDO associaram-se, com frequência, a baixa interseção (muitas simulações com 0–0.10% dentro da área), mesmo quando as áreas não eram extremas, sugerindo maior sensibilidade à difusão/espalhamento e menor persistência superficial, tal como referido por Fingas (2011) e Fingas e Hollebone (2015). Esta leitura é coerente com as propriedades físico-químicas dos HC testados em estudos como os de Azevedo (2010) e Fingas (2015) (densidade, viscosidade e comportamento na interface ar-mar), que ajudam a explicar diferenças de retenção e transporte à superfície observadas nos resultados.

O *radius* controla a largura inicial do “leque” de partículas (incerteza espacial) e, por consequência, a dispersão inicial da mancha. Naturalmente, valores mais altos (p. ex., 800 metros) ampliam a área provável e podem alargar a mancha, enquanto valores mais baixos (p. ex., 100–300 m) restringem a variedade de trajetórias. No presente estudo, observou-se que, dentro dos cenários de melhor desempenho, o efeito do *radius* foi secundário face ao WDF e ao tipo de HC. Por exemplo, na Hipótese 4, as simulações mais favoráveis ocorreram tanto com 100 metros como com 800 metros, mantendo resultados consistentes. Isto sugere que, quando a posição e a janela temporal, assim como a combinação WDF + HC, estão bem configuradas, o *radius* não é o fator limitativo — conclusão coerente com as recomendações para a distribuição inicial de partículas pelo método Leeway, as orientações do OpenDrift e a descrição apresentada por Breivik e Allen (2008) e Dagestad et al. (2018).

O desempenho de cada combinação de parâmetros depende do contexto espacial e temporal. Em janelas curtas (4 dias), através da utilização dos pontos NE e NO como pontos de partida, obtiveram-se bons resultados juntamente com o Fuel Oil No. 6 + WDF 1.5–3.0%, com ganhos evidentes de interseção e redução de distância entre centróides. Em janelas longas (9 dias), através dos mesmos parâmetros, obteve-se um decréscimo da correspondência espacial: as melhores simulações apresentaram apenas 4.00% de partículas na área, com áreas na ordem dos 3 100–3 300 km² (bem acima do valor de referência), o que confirma um resultado já demonstrado por Reed et al. (1999) e aprofundado por Dagestad et al. (2018): à medida que aumenta o tempo de transporte, a deriva acumulada e as incertezas meteo-oceanográficas passam a dominar sobre os ajustes de parâmetros. Em termos práticos, isto significa que a escolha da janela temporal e da posição inicial delimita o espaço de soluções plausíveis; WDF/HC/*radius* atuam dentro desse espaço para maximizar a correspondência com a mancha observada, uma linha metodológica que está em consonância com as recomendações sintetizadas por De Dominicis et al. (2013a) e com o enquadramento de *leeway/windage* proposto por Breivik e Allen (2008).

4.3 Discussão dos métodos adotados

As metodologias adotadas mostraram-se adequadas ao objetivo central do estudo, identificar cenários plausíveis de origem através do *backtracking*, ao combinar o modelo OpenDrift com parâmetros como o WDF, o tipo de hidrocarboneto e o *radius*. Esta abordagem acompanha a evolução dos modelos de trajetória e do uso operacional de representações lagrangianas dos processos de deriva na superfície do

oceano, tal como sintetizado por Reed et al. (1999) e enquadrado para o OpenDrift por Dagestad et al. (2018).

A opção por utilizar dados do ERA5 (vento) e do CMEMS (correntes) garantiu cobertura consistente no tempo e no espaço. Contudo, por serem produtos de resolução global, apresentam limitações na representação de correntes e variações de pequena escala, especialmente relevantes em simulações mais longas, como as de 9 dias. Esta limitação é referida por Hersbach et al. (2020) no caso do ERA5 e por Dagestad e Röhrs (2019), que demonstraram que a precisão das trajetórias melhora quando os campos de correntes representam melhor os movimentos reais da superfície. Não surpreende, portanto, que as simulações com janelas curtas (Hipóteses 4 e 3, com 4 dias) tenham obtido melhor desempenho, acumulando menos erro e preservando maior coerência espacial.

A validação baseada em três critérios, distância entre centróides, diferença de área e percentagem de partículas localizadas na mancha observada, revelou-se uma escolha robusta. A aplicação conjunta destes métodos permitiu avaliar o desempenho de forma equilibrada, sem depender apenas de um único indicador, refletindo simultaneamente a localização, a dimensão e o grau de sobreposição da mancha simulada com a estimada. No entanto, ao atribuir igual peso a todos os critérios, o método permite compensações que podem não ser ideais em contextos operacionais; por exemplo, é possível obter uma avaliação global favorável mesmo com baixa interseção, desde que a posição e a área estejam próximas dos valores de referência. Estudos mais recentes, como o de Dearden et al. (2021), sugerem explorar outras abordagens, quer ajustando os pesos atribuídos a cada critério, quer integrando métodos complementares. Um exemplo é o índice de Jaccard, que mede diretamente a sobreposição entre a mancha simulada e a observada, dividindo a área comum pela área total coberta por ambas. Este índice, cujo valor varia entre 0 (ausência de interseção) e 1 (sobreposição perfeita), pode oferecer uma quantificação mais objetiva do grau real de coincidência espacial.

Em síntese, os métodos utilizados permitiram atingir os objetivos do estudo e foram consistentes com o que é recomendado na literatura. Embora existam limitações, sobretudo nos cenários de maior duração, o modelo e os dados adotados mostraram-se eficazes na análise das janelas temporais mais curtas, que revelaram melhor desempenho e maior coerência espacial.

4.4 Limitações específicas do caso de estudo

Para além das limitações associadas ao modelo de deriva e ao método de avaliação, é importante reconhecer as restrições derivadas da informação disponível sobre o caso real do navio *Felicity Ace*. A localização da mancha utilizada como referência foi extraída de uma única imagem de satélite (CleanSeaNet), captada já vários dias após o afundamento, o que impossibilita a reconstrução precisa da evolução temporal da mancha e levanta dúvidas quanto ao momento e ao local exato da libertação do poluente. Como referido por Reed et al. (1999), a ausência de observações frequentes e bem distribuídas no tempo é uma das principais limitações em estudos de modelação de derrames.

Além disso, a falta de dados técnicos detalhados sobre a composição e a quantidade de combustível a bordo obrigou à construção de cenários teóricos, com base em três tipos representativos de hidrocarboneto: Fuel Oil No. 6, Fuel Oil No. 2 e MDO. Esta abordagem foi suportada por fontes técnicas como a DGAM (2011) e por revisões como as de Fingas (2015), que descrevem as diferenças entre tipos de óleos em termos de viscosidade, persistência e comportamento na superfície do mar.

Adicionalmente, subsiste uma incerteza importante quanto à zona de libertação do poluente. Embora as simulações realizadas considerem uma libertação à superfície, foi discutida a possibilidade de parte do combustível ter sido libertado em profundidade, durante ou após o naufrágio. Casos como o do Deepwater Horizon, analisados por Gros et al. (2017), mostram que derrames em profundidade podem originar plumas subsuperficiais e intrusões horizontais a diferentes profundidades, o que afeta significativamente a trajetória do óleo, algo que não é representado nos modelos utilizados neste estudo. Além disso, importa referir que o modelo, na sua aplicação na vertente do *backtracking*, não incorpora os processos físicos e químicos associados à degradação do poluente ao longo do tempo, como a evaporação, emulsificação, dispersão ou biodegradação, o que pode levar à sobrestimação da quantidade de hidrocarboneto presente à superfície e, consequentemente, à simulação de manchas mais extensas ou persistentes do que as que realmente ocorreram. A opção por simular apenas o transporte superficial baseou-se na observação de uma mancha visível por satélite, mas deve ser entendida como uma aproximação plausível, e não como uma representação exata da dinâmica real do derrame.

Estas limitações condicionam a precisão dos resultados e reforçam o carácter exploratório das simulações. Ainda assim, os cenários testados permitiram identificar combinações de parâmetros com forte coerência física e espacial, alinhadas

com os princípios operacionais discutidos por Breivik e Allen (2008) e De Dominicis et al. (2013a). Os resultados devem, por isso, ser interpretados como aproximações informadas e não como uma reconstrução determinística do evento.

Por fim, é de referir que o modelo de deriva utilizado não considera a possível existência de fontes múltiplas, nem a variabilidade associada à incertezas na posição real da mancha observada, que foi inferida a partir de uma imagem satélite e simplificada para um polígono regular. Tal como referido por Reed et al. (1999) e mais recentemente por Dagestad et al. (2018), os resultados de simulações de deriva devem ser interpretados como soluções plausíveis, e não como reproduções determinísticas, especialmente quando se trabalha com dados de entrada indiretos ou incompletos.

Em síntese, a discussão dos resultados obtidos ao longo das quatro hipóteses testadas permite concluir que a combinação de uma janela temporal curta, utilização de Fuel Oil No.6 e um valor intermédio de WDF resulta em simulações com elevada coerência física e espacial. A Hipótese 4 destacou-se como a mais robusta em todos os critérios avaliados, sendo a única a reunir, de forma consistente, elevada interseção, proximidade geográfica e área simulada compatível com a mancha observada. Esta conclusão fornece uma base sólida para as considerações finais a apresentar no capítulo seguinte.

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo aprofundar a compreensão da origem e do comportamento de manchas de HC no mar, recorrendo a simulações inversas de deriva de partículas. A partir de um caso real, o derrame associado ao naufrágio do navio *Felicity Ace*, foram testadas diferentes hipóteses para a possível origem da mancha observada em 5 de março de 2022, combinando duas posições iniciais (Ponto NE e Ponto NO), dois intervalos temporais (4 e 9 dias) e um conjunto de parâmetros físicos relevantes, como o tipo de hidrocarboneto, o *wind drift factor* e o *radius* de dispersão inicial.

O modelo OpenDrift permitiu simular a trajetória inversa das partículas a partir da posição da mancha observada, considerando condições ambientais realistas. Os resultados foram avaliados com base em três critérios — percentagem de partículas na área estimada, distância entre centróides e área da mancha simulada — o que possibilitou a comparação objetiva entre cenários e a identificação dos mais plausíveis, dos pontos de vista espacial e físico.

De forma geral, verificou-se que as simulações com janelas temporais mais curtas, associadas a um hidrocarboneto mais viscoso e a um fator de deriva pelo vento mais elevado, apresentaram maior proximidade com a mancha observada na imagem de satélite. Este padrão foi particularmente evidente nas simulações iniciadas a partir da posição NE, que, combinando esses parâmetros, produziram trajetórias mais realistas e uma melhor correspondência espacial com a extensão estimada da mancha. Em contrapartida, janelas mais longas ou HC menos persistentes resultaram em menor fidelidade espacial, refletindo a dispersão acumulada e a menor coerência física ao longo do tempo. Estes resultados sublinham a importância de uma escolha criteriosa dos parâmetros de entrada e da janela temporal na modelação de *backtracking*, sobretudo em contextos com dados limitados.

Apesar da robustez e coerência dos resultados, importa reconhecer algumas limitações. O modelo não contempla processos de degradação físico-químicos dos HC, nem mecanismos verticais ou de interação com o fundo marinho. Os forçadores

ambientais, obtidos a partir de reanálises globais, podem não reproduzir com precisão todas as variabilidades locais. Além disso, a atribuição de igual peso a todos os critérios de avaliação pode não refletir a importância relativa de cada um em diferentes contextos operacionais.

Este estudo abre várias perspectivas para investigação futura: (i) explorar novos critérios de avaliação, como métodos de forma e orientação da mancha, ou aplicar pesos diferenciados aos parâmetros avaliados; (ii) aplicar a metodologia a outros casos de estudo com origem conhecida, testando a sua validade em diferentes contextos oceanográficos; (iii) avaliar o impacto de diferentes resoluções temporais e espaciais dos dados ambientais e considerar cenários de forçamento alternativo; e (iv) incorporar processos de transporte tridimensional e degradação natural dos hidrocarbonetos para aumentar o realismo das simulações.

Em síntese, este trabalho demonstrou o potencial da modelação numérica de *backtracking* como ferramenta de apoio à análise de eventos de poluição marinha, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico e científico sobre a dinâmica de hidrocarbonetos em mar aberto. A aplicação rigorosa da metodologia, aliada a uma análise crítica e quantitativa dos resultados, mostrou-se eficaz para identificar a origem mais provável de uma mancha observada, com base em simulações de elevada coerência física e espacial.

Bibliografia

- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., Decastro, M., & Dias, J. M. (2008). Spatiotemporal evolution of upwelling regime along the western coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7).
- Azevedo, A. (2010). *Sistema integrado de modelação para apoio à prevenção e mitigação de acidentes de hidrocarbonetos em estuários e orla costeira* [tese de doutoramento, Universidade de Lisboa].
- Belzunce, A. N. (2024). *Simulation of oil spill trajectories using Opendrift: case study on Canary Islands* [B.S. thesis]. Universidade Católica de Valencia.
- Bouças, M. H. C. d. R. (2017). *Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos* [tese de doutoramento, Escola Naval].
- Bozkurtoglu & Ertürk, Ş. N. (2017). Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.029>
- Breivik, Ø., & Allen, A. A. (2008). An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea. *Journal of marine systems*, 69(1-2), 99–113.
- Breivik, Ø., Allen, A. A., Maisondieu, C., & Roth, J. C. (2011). Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method. *Applied Ocean Research*, 33(2), 100–109.
- Carson, H., Lamson, M. R., Nakashima, D., Toloumu, D., Hafner, J., Maximenko, N., & McDermid, K. J. (2013). Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawai ‘i. *Marine environmental research*, 84, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.002>
- Council, N. R. (1991). *Tanker Spills: Prevention by Design*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1621>
- Dagestad, K.-F., & Röhrs, J. (2019). Prediction of ocean surface trajectories using satellite derived vs. modeled ocean currents. *Remote Sensing of Environment*, 223, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.001>
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., & Ådlandsvik, B. (2018). OpenDrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1405–1420.

- Dang, V., Hai, Joo, Suchan, Lim, Junhyeok, Hur, Jinhwan & Shin, S. (2024). Numerical Model Test of Spilled Oil Transport Near the Korean Coasts Using Various Input Parametric Models. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 38(2), 64–73. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2024.043>
- De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., & Lardner, R. (2013a). MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 1: Theory. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 1851–1869. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1851-2013>
- De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., & Lardner, R. (2013b). MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting—Part 2: Numerical simulations and validations. *Geoscientific Model Development*, 6(6), 1871–1888. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1871-2013>
- de Aguiar, V., Dagestad, K.-F., Hole, L. R., & Barthel, K. (2022). Quantitative assessment of two oil-in-ice surface drift algorithms. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113393.
- Dearden, C., Culmer, T., & Brooke, R. (2021). Performance measures for validation of oil spill dispersion models based on satellite and coastal data. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(1), 126–140.
- Devis-Morales, A., Rodríguez-Rubio, E., & Rincón-Martínez, D. (2022). Numerical modeling of oil spills in the Gulf of Morrosquillo, Colombian Caribbean. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 12(1), 69–83.
- DGAM. (2011). MTAMN 1 (A) - Guia de apoio ao combate à poluição do mar por hidrocarbonetos e outras substâncias perigosas.
- do Espírito Santo, C. M. (2000). *Proteção das Zonas Costeiras Contra a Poluição Por Hidrocarbonetos* [tese de mestrado, Universidade do Porto (Portugal)].
- Ekman, V. W. (1905). On the influence of the earth's rotation on ocean-currents. *Ark. Mat. Astr. Phys.*, 2, 1–52.
- Emergencies Science Division, Environment Canada. (1999, dezembro). Information Sheet: Marine Fuel Oils [Acedido: 2025-04-19]. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/spills-and-environmental-emergencies/docs/info_sheet_marine_fuels.pdf
- Fay, J. A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, 463–467.
- Fingas, M. (2011). *Oil spill science and technology*. Gulf professional publishing.
- Fingas, M. (2015). *Handbook of oil spill science and technology*. John Wiley & Sons.

- Fingas, M., & Hollebone, B. P. (2015). Oil Physical Properties: Measurement and Correlation. Em M. Fingas (Ed.), *Handbook of Oil Spill Science and Technology* (pp. 39–50). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118989982.ch2>
- Fiúza, A. F. (1983). Upwelling patterns off Portugal. Em *Coastal upwelling its sediment record: Part A: Responses of the sedimentary regime to present coastal upwelling* (pp. 85–98). Springer.
- Global Marine Traffic. (2024). Global ship traffic density map [Consultado em 2025-06-17]. <https://globalmaritimetraffic.org/index.html>
- Government of British Columbia. (2025). Fate, Effect, Behaviour and Environmental Impacts as the Products Weather [Acedido: 17 de abril de 2025]. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/spills-and-environmental-emergencies/docs/fate_effect_behaviour.pdf
- Gros, J., Socolofsky, S. A., Dissanayake, A. L., Jun, I., Zhao, L., Boufadel, M. C., Reddy, C. M., & Arey, J. S. (2017). Petroleum dynamics in the sea and influence of subsea dispersant injection during Deepwater Horizon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38), 10065–10070. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612518114>
- Hackett, B., Breivik, Ø., & Wettre, C. (2006). Forecasting the drift of objects and substances in the ocean. *Ocean weather forecasting: an integrated view of oceanography*, 507–523.
- Haddaoui, H., Hakkou, M., Aangri, A., Souiri, S., Amari, Y. S., & Laghzal, A. (2025). Numerical simulation of oil spill dispersion along Morocco's Northern Atlantic coast using OpenOil: A case study near Asilah. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(5).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999–2049.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
- International Maritime Organization (IMO). (2006). MARPOL: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973/78 – Consolidated Edition.
- International Maritime Organization (IMO). (2020). International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT), 6th Edition [Produced in cooperation with OCIMF, ICS, IAPH and IOGP].

- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2023). Technical Information Paper 4: Use of Dispersants to Treat Oil Spills [Accessed 1 August 2025].
- International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF). (2025, janeiro). Oil Tanker Spill Statistics 2024 [Published 16 January 2025; data refer to 2024; Consultado a 2025-06-17]. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2024/>
- ITOPF. (2024, julho). *Handbook 2024/25* [Promoting effective spill response]. International Tanker Owners Pollution Federation Limited. <https://www.itopf.org>
- Keramea, Panagioti, Kokkos, Nikolaos, Zodiatis, George, Sylaios & Georgios. (2023). Modes of operation and forcing in oil spill modeling: state-of-art, deficiencies and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6), 1165. <https://doi.org/10.3390/jmse11061165>
- Keramea, P., Kokkos, N., Gikas, G. D., & Sylaios, G. (2022). Operational modeling of North Aegean oil spills forced by real-time met-ocean forecasts. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 411.
- Kim, Tae-Ho, Yang, Chan-Su, Oh, Jeong-Hwan, Ouchi & Kazuo. (2014). Analysis of the contribution of wind drift factor to oil slick movement under strong tidal condition: Hebei Spirit oil spill case. *PloS one*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087393>
- Ličer, M., Estival, S., Reyes-Suarez, C., Deponte, D., & Fettich, A. (2020). Lagrangian modelling of a person lost at sea during the Adriatic scirocco storm of 29 October 2018. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2335–2349.
- Liu, Darong, Li, Y., & Mu, L. (2023). Parameterization modeling for wind drift factor in oil spill drift trajectory simulation based on machine learning. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1222347. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1222347>
- Liu, Y., & Weisberg, R. H. (2011). Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).
- Lyu, X., Han, H., Ren, P., & Grecos, C. (2024). DiffusionLSTM: a framework for image sequence generation and its application to oil spill monitoring and prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Maia, J. P. R. F. (2021). *Evolução recente da dinâmica costeira no setor Afife-Arda (Viana do Castelo)* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.

- Marinha Portuguesa. (2022). O caso do Felicity Ace e o Exercício de competências no quadro do Estado Costeiro. *Revista da Armada*, (578), 15–17. <https://www.marinha.pt/pt/servicos/Paginas/revista-armada.aspx>
- Mohan, Kankara & Venkatachalapathy. (2014). Oil spill trajectory modelling of Chennai coast, east coast of India. *Proceedings of 5th Indian National Conference on Harbour and Ocean Engineering*, 5.
- Moreira, P. A. R. (2016). *Derrames de Hidrocarbonetos no Mar: Uma Avaliação das Questões Operacionais* [tese de mestrado, Universidade do Porto (Portugal)].
- National Center for Biotechnology Information. (2025). Fuel oil, No. 2 [Acedido: 17 de abril de 2025]. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Fuel-oil_No.-2
- National Research Council. (2003). *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10388>
- NOAA Office of Response and Restoration. (2022). *No. 6 Fuel oil (Bunker C) Spills* [Acedido em abril de 2025]. <https://incidentnews.noaa.gov/incident/7708/519777/7981>
- Oiltanking GmbH. (2025). Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO) [Acedido: 17 de abril de 2025]. <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html>
- OpenDrift Project. (2020). OpenDrift - Open Source Framework for Lagrangian Particle Tracking [Acedido em 22 de abril de 2025].
- Panama Maritime Authority. (2022, março). *Panama Maritime Authority Investigation Report: Felicity Ace* (rel. téc.) (Investigation Report on the Fire and Sinking of the MV Felicity Ace). Panama Maritime Authority. <https://www.segumar.com/wp-content/uploads/2023/06/Panama-Felicity-Ace-Cargo-Fire-Sinking-March-2022.pdf>
- Pärt, S., Björkqvist, J.-V., Alari, V., Maljutenko, I., & Uiboupin, R. (2023). An ocean-wave-trajectory forecasting system for the eastern Baltic Sea: Validation against drifting buoys and implementation for oil spill modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 195, 115497.
- Peliz, Á., Rosa, T. L., Santos, A. M. P., & Pissarra, J. L. (2002). Fronts, jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of marine systems*, 35(1-2), 61–77.
- Pond, S., & Pickard, G. L. (1983). *Introductory Dynamical Oceanography* (2nd). Pergamon Press.
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., & Prentki, R. (1999). Oil spill modeling towards the close of the 20th

- century: Overview of the state of the art. *Spill Science & Technology Bulletin*, 5(1), 3–16. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(98)00029-2)
- Reed, M., Turner, C., & Odulo, A. (1994). The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1(2), 143–157. [https://doi.org/10.1016/1353-2561\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/1353-2561(94)90022-1)
- Relvas, P., Barton, E. D., Dubert, J., Oliveira, P. B., Peliz, Á., da Silva, J. C., & Santos, A. M. P. (2007). Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74(2-3), 149–173.
- Rew, R., & Davis, G. (1990). NetCDF: an interface for scientific data access. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 10(4), 76–82. <https://doi.org/10.1109/38.56302>
- Scripts, M. T. (2024). Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points [Accessed 1 August 2025].
- Serafim, J. G. (2011). *Biodegradação dos óleos e sua relação com as fácies sedimentares da região do Anhembi* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Estado do Rio de Janeiro [Acesso em: 19 abr. 2025]. <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/7063>
- Stolzenbach, K. D., Madsen, O. S., Adams, E. E., Pollack, A. M., & Cooper, C. (1977). A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks. *Mit Sea Grant Program*.
- Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press.
- Unidata. (2023). *NetCDF User's Guide*. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Boulder, CO. <https://docs.unidata.ucar.edu/netcdf>
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2024). Review of Maritime Transport 2024. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2024>
- United States Environmental Protection Agency. (2024). Types of Refined Petroleum Products [Acedido: 17 de abril de 2025]. <https://www.epa.gov/emergency-response/types-refined-petroleum-products>
- U.S. Energy Information Administration. (n.d.). *Residual Fuel Oil – Glossary* [Acedido em abril de 2025]. <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Residual%20fuel%20oil>
- Yang, J., Wan, J., Ma, Y., Zhang, J., & Hu, Y. (2020). Characterization analysis and identification of common marine oil spill types using hyperspectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 41(18), 7163–7185. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1754496>