



ESCOLA NAVAL



ta sainte & bief faire

Teresa Margarida Lourenço Antunes

Poluição no Mar: Análise e Monitorização utilizando Veículos Não Tripulados

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



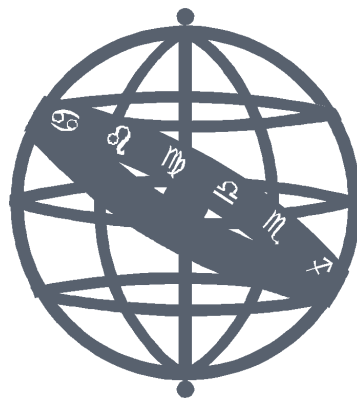
Alfeite

2023



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Teresa Margarida Lourenço Antunes

*Poluição no Mar: Análise e Monitorização utilizando
Veículos Não Tripulados*

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

Orientação de: Ricardo Pinto Moura
Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos
Victor José de Almeida e Sousa Lobo

O Aluno Mestrando,

O Orientador,



Assinado por: Teresa Margarida
Lourenço Antunes
Identificação: 8115804485
Data: 2023-08-30 às 15:00:35

Teresa Antunes

Ricardo Moura

Alfeite

2023

"Não tenhamos pressa, mas não percam tempo."
José Saramago

Dedico este trabalho aos meus avós.

Agradecimentos

Ao chegar ao fim deste percurso acadêmico de cinco anos, repleto de desafios e momentos de superação, é com gratidão que expresso os meus agradecimentos àqueles que desempenharam papéis fundamentais nesta caminhada.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Ricardo Moura e Professor Doutor Nuno Pessanha Santos. O êxito deste estudo deveu-se a uma orientação com valiosas sugestões e críticas construtivas. Toda a disponibilidade e o apoio incansável que recebi por parte deles ao longo de todo o ano letivo, foram indispensáveis para a conclusão dos objetivos pretendidos para esta dissertação.

Não posso deixar de expressar, profunda gratidão à minha família e amigos pelo apoio incondicional ao longo destes cinco anos. Mesmo quando não puderam estar presentes, o simples fato de acreditarem em mim foi fundamental para alcançar esta conquista.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este triunfo, o meu mais sincero agradecimento. Sem o apoio de cada um de vocês, certamente não teria conquistado esta meta.

Que este seja apenas o começo de uma jornada de constante aprendizagem e crescimento, onde possamos partilhar muitas outras conquistas no futuro. Muito obrigada a todos por fazerem parte desta caminhada.

Resumo

É essencial ter a capacidade de efetuar monitorização e controlo da poluição marítima, especialmente na Zona Económica Exclusiva (ZEE) portuguesa. O sistema de monitorização por satélite *CleanSeaNet*, desenvolvido pela Agência Europeia de Segurança Marítima (*European Maritime Safety Agency* - EMSA), é essencial na vigilância e controlo de potenciais derrames de hidrocarbonetos (HC) e substâncias perigosas no oceano. O seu objetivo primordial, é alertar os países costeiros da União Europeia (UE) sobre potenciais derrames nas suas ZEE, para que estes tomem as medidas legais e operacionais necessárias.

Por forma a reduzir os custos operacionais e aumentar a capacidade de resposta, é explorada a viabilidade de implementação de uma rede nacional de veículos não tripulados (superfície e aéreo). A deteção e monitorização de derrames apresenta alguns desafios, incluindo o tempo necessário para chegar ao local do alerta. Por forma a conseguir uma melhor estimativa do comportamento do derrames ao longo do tempo, foi desenvolvido um modelo de deriva simplificado considerando a velocidade do vento e da corrente. Este modelo simplificado, permite assim direccionar is meios necessários de forma mais eficiente conseguindo assim um emprego de meios mais eficiente.

Através de uma análise estatística dos derrames ocorridos na ZEE portuguesa entre 2017 e 2021, de um modelo simplificado de deriva e de uma análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats* (SWOT), foi possível propor a localização ideal para uma rede nacional de veículos não tripulados (aéreos e de superfície) por forma a otimizar as atividades de monitorização e controlo, reduzindo custos e aumentando a eficiência operacional. Os resultados demonstram que a integração dos alertas de derrames no mar com veículos não tripulados, garante melhorias significativas no tempo de resposta, custos e pessoal envolvido, tornando ações de combate à poluição marítima mais eficazes. Esta abordagem pode ser também aplicada noutras áreas, como na vigilância em áreas de maior risco de incêndios e em operações de busca e salvamento marítimo (*Search And Rescue* - SAR).

Palavras-chave: Monitorização Ambiental, Prevenção da Poluição, Controlo de Poluição, Poluição no Mar, Veículos Não Tripulados.

Abstract

It's essential to have the capacity to perform monitoring and control of maritime pollution, especially within the Portuguese Exclusive Economic Zone (EEZ). The CleanSeaNet satellite monitoring system, developed by the European Maritime Safety Agency (EMSA), plays a crucial role in the surveillance and control of potential hydrocarbon and hazardous substances spills in the ocean. Its primary objective is to alert coastal countries of the European Union about potential spills within their EEZs, enabling them to take necessary legal and operational measures.

To reduce operational costs and enhance response capability, the feasibility of implementing a national network of unmanned vehicles (surface and aerial) is explored. Detecting and monitoring spills poses challenges, including the time required to reach the alert location. To achieve a better estimation of spill behavior over time, a simplified drift model has been developed, considering wind speed and currents. This simplified model allows for a more efficient allocation of resources, ensuring a more effective deployment.

Through statistical analysis of spills occurring in the Portuguese EEZ between 2017 and 2021, coupled with a simplified drift model and Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats (SWOT) analysis, the optimal location for a national network of unmanned vehicles (aerial and surface) has been proposed. This optimization aims to enhance monitoring and control activities, reducing costs and increasing operational efficiency. The results demonstrate that integrating spill alerts at sea with unmanned vehicles leads to significant improvements in response time, costs, and personnel involvement, making maritime pollution combat actions more effective. This approach can also be applied to other domains, such as surveillance in high-risk fire-prone areas and Search And Rescue (SAR) maritime operations.

Keywords: Environmental monitoring, Pollution Prevention, Pollution Control, Sea Pollution, Unmanned Vehicles.

Índice

Introdução	1
1 Revisão de Literatura e Enquadramento Teórico	9
1.1 Poluição no Mar	9
1.2 Poluição no Mar - Legislação	11
1.2.1 Convenções Internacionais	12
1.2.2 Legislação Nacional	16
1.3 Poluição por Hidrocarbonetos	18
1.3.1 Caraterísticas dos Hidrocarbonetos	19
1.3.2 Tipos de Hidrocarbonetos	21
1.3.3 Combate à Poluição: Fase Inicial	23
1.3.4 Combate à Poluição: Fase Operacional	25
1.3.5 Equipamentos utilizados na Limpeza	25
1.4 O serviço <i>CleanSeaNet</i>	28
1.4.1 Sensores Passivos	30
1.4.2 Sensores Ativos	31
1.5 Modelos de deriva existentes	33
1.5.1 OILMAP	34
1.5.2 <i>MIKE 21/3</i>	36
1.5.3 <i>OpenDrift</i>	36
1.5.4 Modelo do Instituto Hidrográfico	37
1.6 Estado da Arte	40
2 Modelos de Derrame de Óleo	47
2.1 Principais processos do transporte do óleo	47
2.1.1 Evaporação	48
2.1.2 Dispersão Natural	49
2.1.3 Emulsificação	50
2.1.4 Espalhamento	50
2.1.5 Dissolução	51

2.1.6	Biodegradação	52
2.1.7	Foto-oxidação	52
2.1.8	Sedimentação	52
2.2	Transporte à Superfície	53
2.3	Corrente Marítima em Portugal	57
2.4	Anticiclone dos Açores	59
3	Tratamento e Análise dos Dados	63
3.1	Área do Estudo	63
3.2	Extração dos Dados	65
3.3	Integração dos Dados	68
3.4	Fusão dos Dados	69
3.5	Criação de Variáveis	70
3.6	Simulação do Deslocamento dos Derrames de Alerta <i>CleanSeaNet</i>	72
3.6.1	Conversões e Ajustes nas Unidades:	72
4	Rede Nacional de Veículos Não Tripulados	77
4.1	Silver Marlin	77
4.2	Tekever AR5	78
4.3	Identificação e Avaliação de Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de Veículos Não Tripulados	80
4.4	Criação da Rede Nacional: Combinação entre os Veículos Não Tripulados com os Locais Estratégicos	82
5	Apresentação dos Resultados e Análise SWOT	85
5.1	Desenvolvimento da Aplicação <i>online</i>	85
5.1.1	Proposta da Rede Nacional	88
5.1.2	Mapeamento dos Incêndios e Operações SAR em Portugal	90
5.2	Análise SWOT	94
	Conclusões	97
	Bibliografia	103
	Apêndices	117
	Anexos	117
I	Circular nº107/2005	117

II Relatório de Alerta <i>CleanSeaNet</i>	121
III Configurações das Barreiras	123

Lista de Figuras

1	Desenho e projeto de uma rede de veículos não tripulados (aéreos e de superfície) para monitorização e combate da poluição no mar - Esquema ilustrativo	2
1.1	Tartaruga no meio de plástico. Fonte: Carrington, 2021	11
1.2	Regiões do Atlântico Nordeste abrangidas pela Convenção OSPAR. Fonte: Commission, 2019	14
1.3	Bases logísticas de combate à poluição do mar. Fonte: Autoridade Marítima Nacional, s.d.	17
1.4	Efluente de resíduos para o ambiente marinho. Fonte: Haill, 2022	19
1.5	Ilustração de uma barreira. Fonte: Fingas, 2011	26
1.6	Falha nas barreiras, por ação da corrente. Fonte: Fingas, 2011	26
1.7	Ilustração de um recuperador de tapete. Fonte: Fingas, 2011	27
1.8	Exemplos de absorventes. Fontes: Admin, 2014; Dom Phillips, 2013	28
1.9	Órbita Quase-Polar ou Heliosíncrona. Fonte: Sophia, 2022	30
1.10	Satélites SAR do catálogo <i>CleanSeaNet</i>	30
1.11	Imagem satélite da deteção de um derrame de óleo após a colisão entre duas embarcações no Mediterrâneo. Fonte: The Maritime Executive, 2018	32
1.12	a) Cenário de uma simulação de um fluido. b) Abordagem <i>Lagrangiana</i> : modelo em partículas. Fonte: Vieira, 2008	34
1.13	<i>OILMAP software</i> . Fonte: Etneca, 2021	35
1.14	Simulação do <i>MIKE 21/3</i> de um incidente no Mar Mediterrâneo. Fonte: Mike, 2020	37
1.15	Modelo do cálculo empírico da deriva de substâncias. Fonte: Autoridade Marítima, 2011	39
1.16	Exemplo de um veículo aéreo não tripulado, denominado por <i>Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk</i> da Força Aérea dos Estados Unidos. Fonte: Gady, 2015	40
1.17	Exemplo de veículo de superfície não tripulado SAM (<i>Surface Autonomous Marine</i>). Fonte: SAAB, 2020	42

2.1	Processos de derrame de óleo. Fonte: Xie et al., 2007	48
2.2	Representação da influência no processo de dispersão. Fonte: Korotenko et al., 2010	49
2.3	Aspeto de uma emulsão de HC. Fonte: Ward e Overton, 2020	51
2.4	Elipse formada por um derrame de óleo. Fonte: Natália Mendonça, 2020	55
2.5	Esboço geral da circulação das correntes superficiais do Oceano Atlântico Norte. Fonte: Barton et al., 2001	58
2.6	Esboço geral da circulação das correntes superficiais do Oceano Atlântico Norte (esquerda) e de Portugal (direita). Fonte: Dodet, 2013	59
2.7	Ilustração do comportamento do Vento à Superfície em pleno Verão 2023. Fonte: Earth, 2023	60
2.8	Ilustração do comportamento do Vento à Superfície em pleno Inverno 2023. Fonte: Earth, 2023	60
3.1	Zona Económica Exclusiva Portuguesa a laranja. Fonte: Campuzano et al., 2013	64
3.2	Densidade do Transporte Marítimo. Fonte: Rodrigue, 2013	65
3.3	Densidade de Tráfego Marítimo em Portugal no ano 2022. Fonte: <i>Marine Traffic</i> MarineTraffic, 2022	66
3.4	Ilustração da informação contida na BD.	67
3.5	Caixa representativa dos limites geográficos utilizados para a extração dos dados.	67
3.6	Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN em Portugal Continental	74
3.7	Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN nas Ilhas dos Açores	75
3.8	Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN nas Ilhas da Madeira	76
4.1	Silver Marlin. Fonte: Ruslan Zhir, s.d.	78
4.2	Veículo Aéreo Não Tripulado da Tekever AR5. Fonte: MarineLink, 2020	79
4.3	Alcance em Portugal Continental dos Veículos Não Tripulados.	84
5.1	Análise do mapa com os Alertas CSN na Aplicação <i>Online</i> , baseado na Área.	86
5.2	Análise do mapa com os Alertas CSN, onde as coordenadas das possíveis ocorrências de derrames de HC são indicadas por pontos.	87

5.3	Região da Macaronésia. Fonte: Arnold Platon, s.d.	88
5.4	Áreas cobertas baseada nas características dos Veículos não tripulados.	89
5.5	Incêndios ocorridos em 2021 e 2022.	91
5.6	Eventos SAR na ZEE portuguesa ocorridos entre 2013 e 2021.	93
I.1	Fluxograma de procedimentos SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição (A1 a A7). Fonte: Circular N°107, 2007	117
I.2	Fluxograma de procedimentos SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição (A8 a A14). Fonte: Circular N°107, 2007	118
I.3	Fluxograma de procedimentos de relatório SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição. Fonte: Circular N°107, 2007	119
II.1	Relatório de Alerta <i>CleanSeaNet</i> . Fonte: EMSA, 2018	121
II.2	Relatório de Alerta <i>CleanSeaNet</i> . Fonte: EMSA, 2018	121
II.3	Relatório de Alerta <i>CleanSeaNet</i> . Fonte: EMSA, 2018	122
II.4	Relatório de Alerta <i>CleanSeaNet</i> . Fonte: EMSA, 2018	122
III.1	Ilustração de várias configurações utilizadas na implementação de barreiras. Fonte: Fingas, 2011	123

Lista de Tabelas

1	Potenciais derrames de HC em Portugal - Total vs Confirmados . . .	5
1.1	Graus de Prontidão do Plano Mar Limpo.	17
3.1	Organização das variáveis presentes no DataFrame 'data_anonimize'.	71
4.1	Tabela Síntese dos Veículos Não-Tripulados <i>Silver Marlin</i> e AR5. .	82
4.2	Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de VANT	83
4.3	Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de VSNT	83
4.4	Locais Estratégicos nas Ilhas para a Implementação de Veículos Não Tripulados	84
5.1	Possíveis locais para bases de VANT e VSNT.	90
5.2	Ambiente Interno	96
5.3	Ambiente Externo	97

Lista de Equações

1.1	Equação para calcular Desvio baseado na força do Vento	38
2.1	Equação da Velocidade de Advecção	54
2.2	Fórmula da área da Elipse	55
2.3	Fórmula para calcular o comprimento do Eixo Menor	55
2.4	Fórmula para calcular o comprimento do Eixo Principal	56
2.5	Fórmula que define o comprimento máximo da Elipse	56
2.6	Fórmula que define o comprimento mínimo da Elipse	56
3.1	Fórmula para definir a variável 'width'	70

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AMN	Autoridade Marítima Nacional
BD	Base (de) Dados
ANPC	Autoridade Nacional (de) Proteção Civil
CEE	Comunidade Económica Europeia
CEOM	Centro (de) Experimentação Operacional da Marinha
CEOV	Célula (de) Experimentação Operacional (de) Veículos Não Tripulados
CILPAN	Centro Internacional (de) Luta Contra a Poluição (do) Atlântico Nordeste
CNUDM	Convenção (das) Nações Unidas sobre o Direito (do) Mar
CP	Corrente de Portugal
DCPM	Direção (de) Combate à Poluição (do) Mar
DGAM	Direção-Geral (da) Autoridade Marítima
DL	Decreto-Lei
EMSA	<i>European Maritime Security Agency</i>
ENACW	<i>Eastern North Atlantic Central Waters</i>
FFAA	Forças Armadas
HC	HidroCarbonetos
IMO	<i>International Maritime Organization</i> (Organização Marítima Internacional)
IPMA	Instituto Português (do) Mar e (da) Atmosfera
MAMAOT	Ministério (da) Agricultura, (do) Mar, (do) Ambiente e (do) Ordenamento (do) Território
MARPOL	<i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i> ou (Convenção Internacional sobre a Poluição Marítima)
MIC	<i>Monitoring (and) Information Centre</i>
MDN	Ministério (da) Defesa Nacional
MN	Milhas Náuticas

MRCC	<i>Maritime Rescue Coordination Centre</i> (Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo)
MW	<i>Mediterranean Water</i>
NATO	<i>North Atlantic Treaty Organization</i> (Organização do Tratado do Atlântico Norte)
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
OILMAP	<i>Oil Spill Model and Response System</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OPRC	<i>Oil Preparedness, Response (and) Cooperation</i>
PCC	<i>Portugal Coastal Current</i> (Corrente Costeira de Portugal)
PCCC	<i>Portugal Coastal Countercurrent</i> (Contracorrente Costeira de Portugal)
PML	Plano Mar Limpo
POLREP	<i>Pollution Reporting system</i>
RCM	Resolução (do) Conselho (de) Ministros
RTS	<i>Real Time System</i>
SAM	Sistema (da) Autoridade Marítima
SAR	<i>Search And Rescue</i> (Busca e Salvamento)
SBSM	Serviço (de) Busca (e) Salvamento Marítimo
SIG	Sistema (de) Informação Geográfica
SOLAS	<i>Safety Of Life At Sea</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities (and) Threats</i>
UE	União Europeia
UNCLOS	<i>United Nations Convention on the Law of the Sea</i> (Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VSNT	Veículo (de) Superfície Não Tripulado
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Introdução

Os mares e oceanos são essenciais para a proliferação da vida no planeta Terra, pois ocupam cerca de 70% de toda a sua superfície e representam 97% de toda a água disponível (Cava et al., 2005; Seckler et al., 1998). Por outro lado, metade de todo o oxigênio existente é produzido diretamente de algas e fitoplâncton através de processos de fotossíntese (Chapman, 2013; O’Dor & Berghe, 2012).

O oceano é também o maior regulador do clima e da temperatura global (Chisholm et al., 2001), para além de que toda a sua biodiversidade fornece muita da proteína que é consumida diariamente pela população, particularmente nos países menos desenvolvidos (Ehrlich et al., 1993). Existe assim, e de forma natural, uma ligação direta entre a poluição existente nos oceanos e o futuro daqueles que habitam o planeta Terra.

O planeta terra com o passar dos anos tem sido gravemente prejudicado com o aumento da poluição e pela degradação ambiental devido aos avanços tecnológicos e às atividades humanas. A Poluição nos mares e oceanos, é exatamente uma das consequências mais preocupantes que se tem verificado. O aumento desta poluição, tem ocorrido sobretudo pelos (Coe & Rogers, 2012; Rhodes, 2018):

1. Resíduos oleosos provenientes da agricultura, ou de indústrias que acabam por chegar às águas costeiras;
2. Descargas deliberadas de substâncias perigosas e nocivas provenientes do transporte marítimo;
3. Lixo, nomeadamente plásticos.

Motivação e Contexto:

É na poluição do mar por HC e substâncias perigosas que este trabalho de investigação se irá apoiar. Tanto os HC, como as substâncias perigosas quando entram em contacto com o mar causam, inevitavelmente, um impacto ambiental nos ecossistemas existentes afetando diretamente todos os seres vivos (Clark et al., 1997).

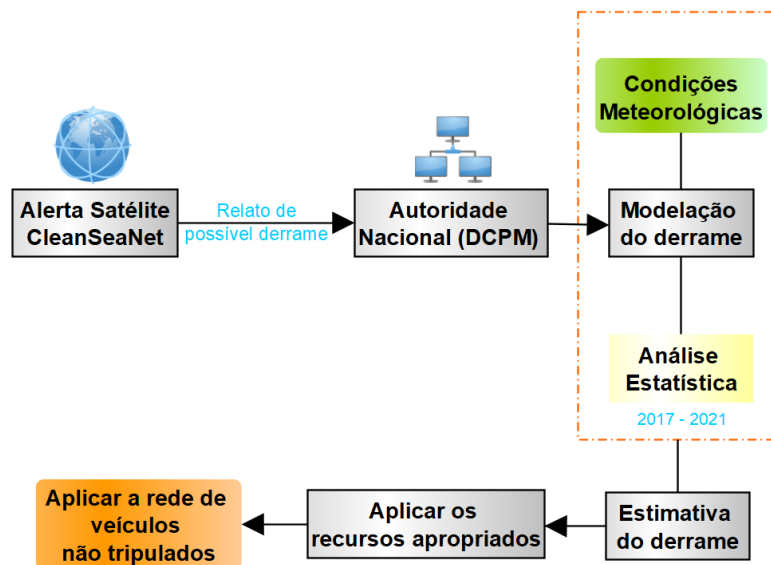


FIGURA 1: Desenho e projeto de uma rede de veículos não tripulados (aéreos e de superfície) para monitorização e combate da poluição no mar - Esquema ilustrativo

Nesta investigação, utilizámos uma base de dados (BD) fornecida pela Direção de Combate à Poluição do Mar (DCPM), que são os alertas recebidos em Portugal de possíveis manchas de poluição no mar, conforme Figura 1. Estes alertas são transmitidos diretamente do *CleanSeaNet* (CSN), serviço disponibilizado pela *European Maritime Safety Agency*¹ (EMSA). A EMSA, é uma agência da União Europeia (UE) criada para auxiliar os Estados-membros a cumprir com as suas obrigações em matérias de segurança marítima e proteção do meio ambiente (Groenleer et al., 2010).

O CSN é um serviço desenvolvido pela EMSA, que surgiu após a necessidade de melhorar a capacidade de deteção e monitorização da poluição marinha da UE (Carpenter, 2016), nomeadamente pelos acidentes que envolveram os petroleiros *Erika* e *Prestige*. Os desastres marítimos dos petroleiros *Erika* e *Prestige* causaram significativos derrames de HC. *Erika* em 1999, na costa da França, resultou em 20.000 toneladas de óleo derramados, enquanto que o *Prestige* afundou em 2002, próximo da costa da Galiza, resultando num derrame de cerca de 63.000 toneladas de óleo. Estes acidentes causaram danos ambientais graves, afetando praias e ecossistemas marinhos, e levaram a medidas mais rígidas para prevenir futuros derrames. Este serviço tem como missão fornecer de forma sistemática a monitorização das águas europeias de maneira a detetar derrames de óleo. Tudo isto é conseguido a partir

¹Em língua portuguesa: Agência Europeia da Segurança Marítima.

dos seus quatro satélites *Synthetic Aperture Radar* (SAR)² que permanecem em constante órbita polar.

Após se efetuar uma análise da BD, será demonstrado quais são as áreas da ZEE Portuguesa mais atingidas com os alertas CSN. Já com essa informação em consideração, procedeu-se a um estudo com as velocidades de correntes marítimas e do vento que ocorreram no período da BD. Com essa análise, será então possível construir um modelo matemático de deriva baseado nessas duas variáveis (velocidade da corrente e do vento), de forma a ser possível monitorizar o comportamento do possível derrame ao longo do tempo.

Como último passo, será desenvolvida uma análise Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats (SWOT)³ para que seja implementada uma rede nacional de veículos não-tripulados (Aéreos e de Superfície) para efetuarem a monitorização e combate dos possíveis derrames de poluição provenientes dos alertas CSN. Juntamente com os resultados finais, e de maneira a dar uma maior relevância e abrangência à investigação, foram trabalhadas duas BD com informações dos incêndios em Portugal Continental (2021-2022) e de eventos SAR na ZEE portuguesa (2013-2021). Este passo foi importante para que toda a proposta da rede nacional de veículos não tripulados, fosse vista não apenas para lidar com derrames de HC, como também para auxiliar na vigilância a incêndios e em operações SAR em Portugal.

Esta investigação ultrapassa a dimensão de um simples projeto académico, a proposta da rede nacional de veículos não tripulados terá bastante potencial para um desenvolvimento mais profundo no futuro e com capacidade de ser realmente implementada em Portugal. A implementação desta rede nacional permitirá que a resposta aos alertas do CSN fosse realizada de forma mais eficiente e segura, reduzindo principalmente os custos e pessoal envolvido nas operações de monitorização de derrames de HC.

Objetivos:

Com este trabalho de investigação, os objetivos a alcançar podem ser divididos em três fases distintas, onde no final se complementam todas entre si. Como

²Em língua portuguesa: Radar de Abertura Sintética.

³Em língua portuguesa: Forças, Fraquezas, Oportunidade e Ameaças. A análise SWOT é uma estrutura para identificar e analisar os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças de uma organização/projeto (Panagiotou, 2003).

objetivo inicial, pretende-se realizar uma análise da BD dos alertas emitidos pelo serviço CSN, a fim de visualizar todos os alertas num mapa interativo, permitindo uma melhor compreensão da distribuição e frequência dos alertas no território nacional.

Para a segunda fase, o objetivo que se segue é demonstrar um modelo matemático de deriva do comportamento dos derrames de óleo no mar ao longo do tempo e tendo em conta as condições meteorológicas, como as correntes marítimas e o vento. Neste passo, pretende-se demonstrar um modelo simples que possa ser implementado a bordo de um veículo autónomo, que por vezes pode ter um processamento limitado, dependendo do seu tipo e tamanho.

Como último objetivo e como complemento aos anteriores, pretende-se propor a criação de uma rede nacional de veículos não tripulados (aéreos e de superfície). A intenção é de monitorizar e responder aos alertas emitidos pelo serviço CSN, e permitir uma rápida deteção e resposta com vista a minimizar os danos ambientais, custos e pessoal envolvido.

Esta proposta será disponibilizada por meio de uma aplicação *online*. Além disso, e como complemento, serão analisados dados de incêndios ocorridos entre 2021 e 2022, bem como eventos SAR ocorridos entre 2013 e 2021 em Portugal. Isto, com o propósito de destacar que esta rede nacional não se limita somente à monitorização da poluição marítima, abrangendo também outros cenários.

Desafios:

Nesta abordagem, enfrentámos diversos desafios até chegarmos à representação da proposta da rede nacional de veículos não tripulados. A monitorização da poluição marinha por meio de veículos autónomos acarreta consigo vários desafios. Esta atividade pode ser bastante complexa, nomeadamente pela incerteza das imagens adquiridas pelo satélite devido às limitações naturais decorrente do mesmo. Além disso, a verificação e confirmação dos possíveis derrames relatados pelo CSN em Portugal (Anexo I) são realizadas por meio de abordagens onde raramente se procede à verificação. Uma vez que a maioria dos alertas resulta em falsos positivos, conforme descrito na Tabela 1, pois os custos operacionais (p.ex. manutenção, combustível, pessoal, entre outros) associados são desproporcionais aos benefícios. Devemos assim, investir em veículos não tripulados e desenvolver a capacidade de monitorizar e combater a poluição com custos mais eficientes.

Enfrentámos desafios também ao determinar o Veículo de Superfície Não

	Número total de alertas	Derrames Confirmados
2017	124	1
2018	206	0
2019	347	1
2020	406	0
2021	162	0

TABELA 1: Potenciais derrames de HC em Portugal - Total vs Confirmados

Tripulado (VSNT) mais adequado, principalmente pelas baixas velocidades apresentadas e a incapacidade de considerarem a poluição marítima. Por outro lado, com os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), os desafios não foram pronunciados, especialmente porque a própria EMSA já atua com veículos não tripulados para este âmbito. Além disso, encontrar os locais estratégicos para os Veículos de Superfície Não Tripulados (VSNTs) também foi considerado um desafio. Esta área específica de VSNT carece de desenvolvimento e infraestruturas suficientes em Portugal, podendo ser este estudo um impulso para o desenvolvimento nesta área.

Metodologia:

Através dos dados existentes de todos os alertas recebidos em Portugal emitidos pela DCPM que por sua vez são transmitidos pelo serviço CSN, podemos fazer uma previsão dos locais mais propícios a poluição e, por sua vez adotar medidas que sejam adaptadas de forma eficaz para a sua resolução de uma forma mais rápida. Para além desta análise de informação disponibilizada por este serviço, este trabalho faz também uma compilação de dados meteorológicos (velocidade das correntes e dos ventos) de forma a procurar e a monitorizar o comportamento dos derrames ao longo do tempo.

Contribuições Originais:

Como resultado da investigação desenvolvida, foram feitas as seguintes contribuições:

- Análise estatística da BD dos alertas CSN entre 2017 e 2021, que são recebidos em Portugal para detetar possíveis manchas de poluição no mar. Esta análise identifica as áreas de maior concentração de alertas no território marítimo português, a qual contribuiu para planear e propor os melhores locais estratégicos dos veículos não tripulados;

-
- Desenvolvimento de um modelo de deriva simples para prever o comportamento dos derrames ao longo do tempo, considerando as variáveis da velocidade do vento e corrente. Através deste modelo, vamos compreender melhor o trajetória dos derrames no mar, melhorando assim o tempo de resposta a estes alertas, atuando de maneira mais direcionada para as áreas potencialmente afetadas.
 - Identificação e avaliação de locais estratégicos em Portugal para a implementação da rede nacional de veículos não tripulados. Durante este processo, vários fatores tiveram de ser considerados. Isso inclui a análise dos alertas CSN para perceber as áreas mais críticas e a partir dessa análise, avaliar os locais de modo a cobrir ao máximo toda a região (considerando as características de cada veículo não tripulado).
 - Criação de uma aplicação *online* para facilitar o acesso e a análise dos dados da investigação. Esta aplicação de fácil acesso, proporciona uma melhor compreensão dos dados, auxiliando o processo de tomada de decisão.
 - Uma aplicação *online* de fácil acesso que integra os alertas do CSN com o uso de veículos não tripulados.
 - Análise SWOT que irá permitir identificar e avaliar os pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças desta investigação.

Trabalhos Publicados:

O presente trabalho de investigação originou até ao momento, as seguintes participações académicas:

- Participação na conferência *4^o Encontro de Investigação e Desenvolvimento em Ciências Militares na Academia da Força Aérea*. Este artigo apresentou de forma muito sucinta, os principais objetivos desta investigação (T. L. Antunes et al., 2022);
- Participação na conferência *International Symposium on Underwater Technology (UT23)* com uma apresentação via *online* realizada em Tóquio (Japão). Neste artigo, apresentamos de maneira breve todos os principais passos da investigação, assim como alguns resultados já obtidos até ao momento da participação (T. L. Antunes et al., 2023);

-
- Submissão de um artigo para a *Cognitive Robotics* e publicado na *KeAi Publishing* (Pessanha Santos et al., 2023). Neste artigo, exploramos em maior detalhe as possíveis localizações dos veículos não tripulados.

Organização da Tese:

Esta tese encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1** - Neste capítulo, exploramos a questão da poluição marítima e da problemática dos HC, abordando a legislação nacional e internacional que se aplica. Além disso, analisamos em detalhes o serviço CSN, destacando as suas limitações, explorando também a questão dos satélites e sensores utilizados para detetar derrames no mar. Serão introduzidos alguns modelos de deriva existentes, incluindo o modelo utilizado pelo Instituto Hidrográfico (IH). Por fim, analisamos trabalhos relacionados com o objetivo central da monitorização de poluição marítima através da utilização de VANTs e VSNTs, explorando tendências recentes e progressos significativos na área;
- **Capítulo 2** - Neste capítulo, investigamos em detalhe os processos físicos do transporte de óleo na água, bem como o transporte matemático superficial de HC. O objetivo será compreender a deslocação dos HC no mar, tendo em conta variáveis cruciais, como a velocidade do vento e das correntes marítimas. Para melhor compreensão do possível comportamento dos HC na área de estudo será ainda abordada as características das correntes marítimas no mar português e dos ventos em Portugal;
- **Capítulo 3** - Neste capítulo, será abordada em detalhe todo o tratamento e análise dos dados. Apresentamos mais detalhadamente a área de estudo e, em seguida, será explicada toda a extração das bases de dados cruciais para a continuidade do estudo, além de integrar e combinar posteriormente todos esses dados que irão desempenhar um papel fundamental nos passos seguintes da investigação;
- **Capítulo 4** - Neste capítulo, investigamos as características dos veículos não tripulados que serão empregues na proposta da Rede Nacional. Será descrito o processo de avaliação e identificação dos locais estratégicos em Portugal para a implementação desses veículos. Por fim, esses locais estratégicos serão combinados com as características dos veículos não tripulados;

-
- **Capítulo 5** - Neste capítulo, apresentaremos uma análise SWOT para identificar e avaliar os aspetos positivos, negativos, oportunidades e desafios de toda a investigação. Para facilitar a elaboração desta análise, introduziremos uma aplicação *online* baseada nos dados dos alertas de poluição CSN. Essa aplicação permitirá a visualização dos resultados do estudo por meio de mapas interativos. Além disso, e como complemento à proposta da rede nacional de veículos não tripulados, analisaremos duas bases de dados que revelarão o potencial da rede nacional para abordar questões para além da poluição marítima. Isso inclui as áreas de incêndios em Portugal Continental e de operações SAR.

Capítulo 1

Revisão de Literatura e Enquadramento Teórico

Neste capítulo apresenta-se a problemática questão da poluição no mar por HC, incluindo uma explicação da legislação nacional e internacional aplicável. Iremos também abordar o serviço CSN e as suas limitações, bem como os satélites e sensores disponíveis para detetar os derrames no mar. Além disso, serão introduzidos alguns dos modelos de deriva existentes, nomeadamente o modelo DERIVA utilizado em Portugal. Posteriormente será apresentada uma análise do estado da arte, com os trabalhos relacionados com o objetivo principal do tema em estudo. Explorando as últimas tendências e avanços das utilizações de VANTs e de VSNTs para monitorizar a poluição marinha.

1.1 Poluição no Mar

Sabe-se que mais de dois terços da superfície terrestre é composta por mares e oceanos (Cava et al., 2005; Choudhary et al., 2020), que desempenham um papel fundamental para o desenvolvimento da vida humana. Estes fornecem alimento, meios de subsistência, atividades culturais e recreativas para biliões de pessoas em todo o mundo (Rayner et al., 2019). No entanto, todas essas necessidades têm sido ameaçadas pela poluição marítima.

Segundo a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, também conhecida como *United Nations Convention on the Law of the Sea* (UNCLOS), a poluição do meio marinho é definida como sendo a introdução humana (direta ou indireta) de substâncias no meio marinho que provoque ou possa vir a provocar efeitos nocivos. Estes incluem danos aos recursos vivos e à vida marinha, riscos à saúde humana, entrave às atividades marítimas (UNCLOS, 1998). A qualidade do

meio marinho é influenciada por inúmeros condicionantes, como a quantidade de precipitação, o clima, o tipo de solo, a vegetação, a geologia, o ambiente marinho subterrâneo e as atividades humanas (Katsanou & Karapanagioti, 2019).

No passado, foram tomadas decisões em relação à gestão dos recursos hídricos que nem sempre foram as mais acertadas ou sustentáveis. Entre eles, destacam-se transformações físicas nas áreas costeiras, tais como dragagem, aterros e construções, negligenciando impactos ambientais. Outros exemplos incluem a super-exploração de recursos, pesca não sustentável e a acumulação de toneladas de plástico nos oceanos, que conduzem, indubitavelmente, ao declínio de organismos marinhos, comprometendo a saúde dos oceanos e das áreas costeiras afetando, conseqüentemente, a economia (Agardy, 2010). O progressivo aumento da contaminação química e a acidez dos oceanos têm prejudicado espécies como corais e moluscos, afetando a cadeia alimentar e causando desequilíbrios ecológicos (Doney et al., 2009).

Entre as principais ameaças à qualidade da água, destacam-se as indústrias e comunidades costeiras, que são fontes pontuais de poluição⁴. Os principais impulsionadores da poluição marinha incluem a rápida industrialização, o aumento da produção e libertação de produtos químicos e plásticos, expansão da agricultura intensiva, descarga de resíduos em rios, portos e estuários, bem como a falta de reutilização e reciclagem de materiais (Halpern et al., 2012; Jackson et al., 2001; Rayner et al., 2019).

O plástico é o elemento mais aparente na poluição marítima (Jambeck et al., 2015; Rhodes, 2018). A cada ano, milhões de toneladas de plástico vão parar ao oceano, podendo levar centenas de anos para se decomporem. O plástico é particularmente perigoso para o meio marinho pois animais como tartarugas, aves e peixes podem entrelaçar-se nele ou confundi-lo com comida, que poderá resultar na ingestão de substâncias tóxicas, asfixia ou na morte (Figura 1.1) (Gregory, 2009; Hammer et al., 2012; Rhodes, 2018). Além do plástico, há outros tipos de poluentes no oceano, como a evidente poluição por óleo, produtos químicos industriais e agrícolas e esgoto (Chaudhry & Malik, 2017).

A poluição é, atualmente, a principal causa ambiental de doenças, estimando-se cerca de nove milhões de mortes prematuras anualmente (Fleming et al., 2006; Landrigan et al., 2020). Em Portugal, onde a pesca é intensa, a sustentabilidade dos

⁴Poluição de fonte pontual é conhecida pelos poluentes que entram na água que provém de uma fonte identificável, como valas, tubos industriais, drenagem pluvial e estações de tratamento de esgoto, etc. (Chaudhry & Malik, 2017).

recursos marinhos é crucial para o crescimento económico e a saúde (Pita & Gaspar, 2020).



FIGURA 1.1: Tartaruga no meio de plástico. Fonte: Carrington, 2021

Para enfrentar o problema da poluição marítima, já existem inúmeras iniciativas e soluções inovadoras em funcionamento. Estão a ser desenvolvidas tecnologias avançadas, como métodos de limpeza de oceanos e recuperação de áreas contaminadas, com o objetivo de mitigar os impactos negativos, serão enunciados mais à frente métodos de limpeza específicos para poluição do mar por óleo. Para além de que estão a ser cada vez mais adotadas políticas de redução do uso de plástico⁵, incentivos económicos para práticas sustentáveis e projetos de educação ambiental para promover uma maior sensibilização e transformação comportamental. É crucial que haja uma abordagem integrada, envolvendo governos, organizações e pessoas, a fim de garantir a preservação dos nossos oceanos num mundo cada vez mais populacional e tecnológico.

1.2 Poluição no Mar - Legislação

Nesta secção, abordamos o cenário legal relacionado à poluição marítima. A ocorrência de poluição no mar, quer seja acidental ou intencional, desencadeia uma série de procedimentos legais para identificar as fontes, responsabilizar os infratores e determinar responsabilidades. Serão exploradas as convenções internacionais

⁵DIRETIVA (UE) 2019/904 do Parlamento Europeu e de Conselho de 5 de junho de 2019 relativa à redução do impacto de determinados produtos de plástico no ambiente (Parlamento Europeu e do Conselho da UE, 2019).

e legislação nacional em vigor, que garante a prevenção e mitigação da poluição marítima.

A Directiva 2009/123/CE (2009) é conhecida como "Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à poluição por navios e à introdução de sanções, incluindo sanções penais, para os crimes de poluição". Esta estabelece um enquadramento jurídico abrangente que visa combater a poluição marinha causada por embarcações e impor medidas disciplinares, incluindo sanções penais, para crimes relacionados à poluição.

1.2.1 Convenções Internacionais

No âmbito internacional, existem acordos e convenções que se concentram na prevenção da poluição marítima. A Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization* - IMO) lidera ações globais através de convenções e regimes internacionais abrangentes na prevenção e combate da poluição marinha. Por exemplo, a UNCLOS estabelece o quadro jurídico global para a proteção e preservação dos oceanos. Esta reconhece o princípio da responsabilidade dos Estados pela poluição causada e promove a cooperação internacional para enfrentar a poluição marinha.

Outra convenção existente que tem como objetivo reduzir o volume de materiais prejudiciais que chegam ao oceano é a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* - MARPOL 73/78). Para alcançar esse objetivo, a Convenção e os seus Anexos estabelecem padrões e regulamentos para controlar o derrame acidental ou deliberado de substâncias como óleo, produtos químicos e lixo.

A MARPOL (2009) é composta até ao momento por 6 Anexos, sendo o primeiro Anexo direcionado, especificamente, para o tipo de poluição marinha por HC. Este Anexo estabelece requisitos para a construção de navios visando a proteção do ambiente marinho e proíbe descargas de óleo no mar. No entanto, é permitida a descarga de misturas oleosas em conformidade com as regulamentações aplicáveis. Nesse sentido, estabelece, também, regras para o livro de registo de óleo e gestão adequadas de todos os eventos operacionais importantes que ocorrem a bordo, especialmente relacionados com o tratamento e armazenamento de resíduos de óleo e água oleosa.

Além da UNCLOS e MARPOL destacam-se, de seguida, outras convenções importantes neste âmbito:

- A *Safety Of Life At Sea* (SOLAS) 74⁶ ou Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar é considerada a convenção mais abrangente em termos de requisitos de segurança para navios, compreendendo tanto aspectos de segurança como de proteção. Esta convenção tem passado por várias alterações ao longo dos anos, tendo sido atualizada por dois protocolos em 1978 e 1988 e ratificados⁷ em 1983 e 1994, respetivamente. Em Portugal, a convenção foi aprovada para ratificação pelo Decreto do Governo n.º 79/1983 (1983);
- A *Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic* (OSPAR) ou Convenção para a Proteção do Meio Marinho do Atlântico Nordeste, resulta da fusão das Convenções de Oslo e Paris⁸. Os Estados Contratantes comprometeram-se a tomar todas as medidas necessárias para prevenir e combater a poluição marinha, assim como proteger os espaços marítimos dos efeitos prejudiciais das atividades humanas, visando a preservação dos ecossistemas marinhos e a proteção da saúde humana. Na Figura 1.2, é possível observar as regiões que fazem parte desta convenção, na qual Portugal faz parte à região IV da costa ibérica. Apesar de estar fora do âmbito da IMO, a OSPAR é vinculativa para Portugal no que diz respeito à disposição de substâncias poluentes no mar. Foi aprovada para ser ratificada em Portugal pelo Decreto n.º 59/1997 de 31 de outubro (1997).
- A *Oil Preparedness, Response and Cooperation* (OPRC) 1990 ou Convenção Internacional sobre Preparação, Atuação e Cooperação no Combate à Poluição por HC estabelece um sistema global de preparação, resposta e cooperação no combate à poluição por HC. Para que este seja realizado de forma coordenada e eficiente a OPRC promove a cooperação entre os países signatários. Esta envolve o desenvolvimento de planos de emergência, disponibilidade de equipamentos especializados e treinamento de profissionais habilitados, garantindo, assim, uma resposta eficaz em caso de grandes derrames de óleo e outros produtos petrolíferos.

⁶Lançada pela primeira vez em 1914 como resposta ao trágico naufrágio do *Titanic* (Team, 2021).

⁷Ratificar é um verbo que revela a ação de confirmar e aprovar algo por meio de uma avaliação ou processo de validação. Quando algo é ratificado, isso indica que foi oficialmente aceite e validado (Priberam, s.d.).

⁸A Convenção de Oslo (adotada em 1972) e a Convenção de Paris (adotada em 1974) são acordos internacionais relacionados com a proteção do meio ambiente marinho. A fusão dessas convenções resultou na criação da Convenção OSPAR, que abrange a proteção do meio marinho no Atlântico Nordeste (Autoridade Marítima, 2011).



FIGURA 1.2: Regiões do Atlântico Nordeste abrangidas pela Convenção OSPAR. Fonte: Commission, 2019

São, ainda, de salientar convenções internacionais específicas que abordam as questões da responsabilidade e indemnização em casos de poluição marítima. O objetivo das mesmas passa por assegurar que os danos e prejuízos resultantes de derrames de substâncias poluentes no ambiente marinho sejam adequadamente compensados. Desta forma, garante-se o pagamento de indemnizações às partes afetadas, bem como limites de responsabilidade para os proprietários de navios e operadores envolvidos. As referidas convenções têm, adicionalmente, um papel fundamental na proteção dos ecossistemas marinhos e na promoção de práticas seguras no transporte e manuseio de substâncias potencialmente poluentes. Estas convenções incluem (Autoridade Marítima, 2011):

- O Acordo de Bona de 1969: Convenção de cooperação no combate à poluição por HC e outras substâncias nocivas no **Mar do Norte** e no **Canal da Mancha**. As partes contratantes são a Alemanha, Bélgica, Comunidade Económica Europeia (CEE), Dinamarca, França, Holanda, Irlanda, Noruega, Reino Unido e Suécia;
- O Acordo de Copenhaga de 1971: convenção de cooperação entre os **países nórdicos**, incluindo Dinamarca, Finlândia, Islândia, Noruega e Suécia, no combate à poluição por HC e outras substâncias nocivas das águas da região. Este acordo foi revisto em 1993 para fortalecer as medidas de proteção ambiental e garantir a preservação dos ecossistemas marinhos nos países envolvidos;
- O Acordo de Helsínquia de 1974 e 1992: Também conhecido como HELCOM

dirigida pela *Helsinki Commission*, responsável pela coordenação das ações relacionadas ao acordo: Convenção de cooperação para combater a poluição por HC e substâncias nocivas no **Mar Báltico**, incluindo águas interiores. As partes contratantes são Alemanha, CEE, Dinamarca, Estónia, Finlândia, Letónia, Lituânia, Polónia, Rússia e Suécia. A convenção foi revista em 1992 e uma nova convenção entrou em vigor em 2000;

- O Acordo de Barcelona de 1976: convenção de cooperação no combate à poluição por HC e outras substâncias nocivas no **Mar Mediterrâneo**. Este visa a tomada de medidas necessárias para evitar/reduzir e combater a poluição causada por descargas de navios, a exploração da plataforma continental e derrames em cursos de água e estabelecimentos costeiros. As partes contratantes são a CEE, Espanha, Eslovénia, França, Grécia, Itália e outros Estados com fronteira para o Mar Mediterrâneo. O acordo foi revisto em 1995, reafirmando o compromisso das partes em proteger o ecossistema do Mar Mediterrâneo;
- Protocolo 1995: medida adicional ao Acordo de Barcelona, no qual as Partes Contratantes se comprometem a tomar medidas para prevenir e reduzir a poluição no **Mar Mediterrâneo** resultante das operações de imersão realizadas por navios e aeronaves. A imersão de resíduos ou outras substâncias especificadas é proibida no primeiro Anexo. Enquanto no segundo Anexo se estabelece que as mesmas estão sujeitas à obtenção de uma autorização prévia concedida pelas autoridades nacionais competentes;
- Acordo de Lisboa de 1990: tratado de cooperação entre as partes contratantes - Portugal, Espanha, França, Marrocos e CEE - para a proteção das costas e das águas do **Atlântico Nordeste** contra a poluição. O acordo impõe a responsabilidade de cada parte criar os organismos e planos de intervenção próprios e adequados. Portugal é o exemplo disso com a implementação do Plano Mar Limpo, que será explicado mais adiante. Além disso, o acordo levou à criação do Centro Internacional de Luta Contra a Poluição do Atlântico Nordeste (CILPAN), com sede em Lisboa, para fortalecer ainda mais os esforços de combate à poluição marinha na região do Atlântico Nordeste.

Embora a UE não seja parte contratante direta em todas estas convenções, a Comissão Europeia, que representa a UE, desempenha um papel fundamental na implementação e coordenação das medidas e políticas necessárias para proteger e preservar as áreas marítimas abrangidas por esses acordos.

1.2.2 Legislação Nacional

Ao nível nacional, sendo que o elevado tráfego marítimo diário na ZEE portuguesa conduz a um risco significativo de acidentes. Estes podem ter consequências devastadoras para o meio marinho e para a costa litoral. Requerem particular atenção, eventos como a lavagem de tanques e descargas de lastro de petroleiros e outros navios em portos ou no mar. Tornou-se fundamental estabelecer diretrizes claras para lidar com emergências que envolvessem derrames de HC e substâncias poluentes perigosas.

Nasceu, assim, um instrumento essencial para Portugal na prevenção, resposta e cooperação no combate à poluição marinha, o Plano Mar Limpo (PML). O PML está em conformidade com as normas do direito internacional. Foi aprovado e implementado através da Resolução Conselho Ministros n.º 25/1993 (1993) o plano de emergência, também conhecido como Plano de Emergência para o Combate à Poluição das Águas Marinhas, Portos, Estuários e Trechos Navegáveis dos Rios, por HC e Outras Substâncias Perigosas. A estratégia operacional do PML engloba normativas internas designadas circulares⁹, as quais estabelecem os procedimentos a serem adotados em caso de poluição marítima.

Além das diretrizes estabelecidas pelo PML, é essencial contar com um mecanismo eficiente de relato e monitorização de incidentes de poluição marítima. Um exemplo de um sistema de notificação e comunicação é o Relato de Poluição (*Pollution reporting system* - POLREP)¹⁰. O POLREP permite às autoridades marítimas receber informações detalhadas sobre derrames de HC e outras substâncias perigosas, bem como de situações de ameaça iminente.

De forma a cumprir o seu objetivo principal, o PML estabelece, também, as responsabilidades das entidades envolvidas e define as competências necessárias das autoridades do Sistema da Autoridade Marítima (SAM)¹¹. O SAM tem a responsabilidade de liderar as coordenar operações de combate à poluição. Utiliza os recursos das capitánias, departamentos e serviços da autoridade marítima. Para garantir o apoio imediato a essas operações, existem seis bases logísticas distribuídas pelo país, conforme se pode observar na Figura 1.3.

⁹Circular n.º149/2010-P, Circular n.º123/2007-P, Circular n.º158/2014-P e Circular n.º168/2020-P (Circular N.º107, 2007; Circular n.º123/2007, 2007).

¹⁰Circular n.º107/2005-P, alt.4 - Relato de Episódio de Poluição no Mar (Circular N.º107, 2007).

¹¹O SAM é o quadro institucional composto por entidades, órgãos ou serviços em nível central, regional ou local, que exercem poderes de autoridade marítima com funções de coordenação, executivas, consultivas ou policiais («Diário Da República — I Série-A», 2002).



FIGURA 1.3: Bases logísticas de combate à poluição do mar. Fonte: Autoridade Marítima Nacional, s.d.

A Marinha Portuguesa oferece suporte às estruturas e recursos do dispositivo naval. A DCPM é o organismo da Autoridade Marítima Nacional (AMN) encarregado de estabelecer, coordenar e dirigir os procedimentos de vigilância e as operações de combate à poluição no mar (Autoridade Marítima, 2011). Consoante a gravidade da situação, o dispositivo de resposta é ajustado de acordo com diferentes graus de prontidão. O PML estabelece quatro graus de prontidão descritos e resumidos na Tabela 1.1. À medida que a situação evolui é fundamental avaliar e modificar o grau de prontidão.

TABELA 1.1: Graus de Prontidão do Plano Mar Limpo.

Graus de Prontidão do Plano Mar Limpo		
	Ação	Direção e Coordenação
4.º grau	Local	Administração Portuária
3.º grau	Local	Capitão de Porto
2.º grau	Regional	Chefe de Departamento Marítimo
1.º grau	Nacional	Diretor-geral da Autoridade Marítima

Em conclusão, esta análise da legislação marítima ressalta a importância de um quadro legal sólido e respostas eficazes para combater a poluição marinha. Tanto as leis internacionais como as nacionais desempenham um papel crucial na proteção dos oceanos, estabelecendo diretrizes, responsabilidades e medidas de controlo. No entanto, é fundamental assegurar a implementação eficiente das leis, fortalecer as medidas de controlo e aumentar a consciencialização sobre a preservação do meio ambiente marinho. Trabalhando em conjunto podemos construir um futuro mais sustentável, protegendo os oceanos e preservando as suas riquezas naturais para as gerações presentes e futuras.

1.3 Poluição por Hidrocarbonetos

Os HC são moléculas orgânicas compostas por átomos de carbono e hidrogénio com elevada diversidade estrutural. Os HC podem originar uma vasta variedade de substâncias: desde gases, como o metano, até compostos mais complexos, como os derivados de petróleo. Estas substâncias desempenham um papel essencial na economia global, uma vez que são amplamente utilizadas como fontes de energia e matéria-prima na indústria e sociedade. Por outro lado, é preocupante a problemática da poluição por HC, uma vez que quando libertados de forma inadequada causam impactos negativos no meio ambiente.

As principais fontes de poluição por HC no ambiente marinho são provenientes da indústria do petróleo e do transporte marítimo. O petróleo é extraído de reservatórios subterrâneos, sendo as áreas de concentração mais conhecidas em regiões como o Golfo Pérsico (Harayama et al., 1999). Assim que ocorre o derrame de petróleo no mar há, automaticamente, contaminação da água, que representa uma ameaça iminente à vida marinha que poderá provocar danos irreversíveis aos ecossistemas costeiros. Portanto, os derrames de petróleo representam uma das formas mais preocupantes de poluição por HC. Os derrames de petróleo podem ocorrer tanto durante a exploração e extração de petróleo *offshore*¹², como durante o seu transporte.

Cerca de 90% do comércio mundial é movimentado por mar, sendo o petróleo uma das principais matérias-primas transportadas por tráfego marítimo (J.-P. Rodrigue, 2020). Consequentemente, é natural que toda esta atividade cause riscos

¹²A exploração *offshore* é o procedimento de extrair petróleo e gás natural das profundezas do mar, utilizando plataformas estáticas ou móveis instaladas em áreas distantes da costa, em regiões oceânicas de águas profundas. Mas também pode ser a libertação de petróleo bruto ou produtos petrolíferos refinados de navios-tanque, plataformas, poços e plataformas (SurferToday.com, s.d.).

acrescidos de derrames de HC. Estes derrames podem ser acidentais¹³ ou ilegais¹⁴, libertando grandes quantidades de HC no mar.



FIGURA 1.4: Efluente de resíduos para o ambiente marinho. Fonte: Haill, 2022

Para a realização de uma investigação mais profunda sobre a poluição do mar HC, é fundamental obter uma compreensão geral das suas principais características. A seguir, vão ser explorados alguns elementos essenciais dos HC, que desempenham um papel significativo nos processos físicos associados ao longo do tempo, processos esses que serão abordados em detalhe posteriormente.

1.3.1 Características dos Hidrocarbonetos

Compreender as propriedades dos HC é fundamental para uma gestão eficaz e adequada em casos de derrames de óleo. O comportamento e impacto dos derrames são condicionados pelas características físico-químicas distintas de cada HC. É importante ter acesso imediato a essas informações que estão disponíveis em fichas técnicas e de segurança dos fabricantes, a fim de obter dados precisos sobre os produtos envolvidos (Autoridade Marítima, 2011). De seguida, estão descritas algumas propriedades dos HC (Autoridade Marítima, 2011):

- **Viscosidade**

A viscosidade representa a resistência do fluido ao movimento, estando inversamente relacionada com a velocidade de escoamento. Esta varia devido à

¹³Sinistros marítimos, como encalhes, afundamentos, explosões, danos estruturais e colisões envolvendo navios que transportem HC, seja como carga ou combustível próprio (Autoridade Marítima, 2011).

¹⁴Descargas intencionais de águas oleosas de porões, de lavagem de tanques e lastro de navios (Autoridade Marítima, 2011).

interação com o ambiente a fatores como evaporação de componentes leves e alterações de temperatura. A viscosidade influencia o espalhamento e remoção dos HC, sendo maior a dificuldade de remoção quanto maior a viscosidade. Esta característica dos HC é crucial para o planeamento e execução de operações eficazes de combate à poluição marinha, pois permite a seleção mais adequada dos métodos e equipamentos necessários para a resposta a derrames de HC.

- **Densidade**

A densidade representa a quantidade de massa por unidade de volume e varia de acordo com a temperatura. A densidade da maioria dos óleos (entre 0,7 e 0,99g/cm³) é inferior à da água (1,027g/cm³), fazendo com que eles flutuem no mar. No entanto, após o derrame, a densidade do óleo aumenta devido aos processos de transformação. Há casos em que a densidade do óleo é superior à da água, o que o faz afundar e dificultar a sua remoção.

- **Ponto de Fluidiez**

O ponto de fluidiez é a temperatura mais baixa a que um HC ainda flui a uma velocidade específica. Nos petróleos brutos, a temperatura varia de $-35^{\circ}C$ a $40^{\circ}C$ e é crucial na seleção de métodos de recuperação e combate à poluição do mar. Quando a temperatura do HC atinge ou fica abaixo do seu ponto de fluidiez, a recuperação mecânica torna-se desafiante, uma vez que os óleos têm dificuldade em fluir em direção aos recuperadores (*skimmers*). Óleos abaixo do ponto de fluidiez espalham-se lentamente na água e são mais difíceis de dispersar. Por conseguinte, quando a temperatura do HC é inferior ao ponto de fluidiez, a sua viscosidade aumenta, dificultando ainda mais a sua recuperação.

- **Ponto de Inflamação**

O ponto de inflamação é a temperatura mínima na qual uma substância é capaz de emitir vapores combustíveis em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar. Quanto menor o ponto de inflamação maior o risco de evaporação dos HC à temperatura ambiente e, conseqüentemente, maior perigo representam, podendo entrar em combustão na presença de uma fonte de calor (ex. faísca). Essa propriedade é essencial para a segurança das operações de combate à poluição, permitindo estimar a quantidade de HC derramados e o seu estado de degradação.

- **Ponto de Ebulição**

O ponto de ebulição é a temperatura em que um óleo passa do estado líquido para o estado gasoso, à pressão atmosférica. É amplamente utilizado para determinar taxas de evaporação e prever o envelhecimento dos óleos após um derrame, que contribuirá para o apoio à decisão nas ações de combate.

- **Solubilidade**

A solubilidade é a capacidade de uma substância se dissolver em água. Quanto mais voláteis forem os componentes de um produto ou HC, maior será a sua solubilidade na água. A solubilidade de um óleo na água indica a quantidade de óleo que se dissolve nela. Componentes solúveis nos HC também tendem a ser mais tóxicos, o que significa que uma pequena quantidade dissolvida pode ter um maior impacto nos ecossistemas.

1.3.2 Tipos de Hidrocarbonetos

De acordo com Fingas (2010), existem diferentes tipos de óleo com características distintas, tais como a persistência, a toxicidade e efeitos de revestimento/lesão mecânica. De acordo com as suas características únicas, cada óleo provoca impactos ambientais e socioeconômicos distintos.

Para além das características é útil classificar os tipos de óleo em categorias, nomeadamente para fins de modelo e estimativa de danos ou impactos. As categorias baseiam-se na gravidade específica dos óleos e na concentração de compostos aromáticos¹⁵ e de compostos mais pesados. Os óleos com maiores concentrações de compostos aromáticos tendem a ser mais tóxicos e a evaporar mais facilmente comparativamente a óleos com maiores concentrações de componentes mais pesados que são altamente persistentes no ambiente. De seguida estão descritos os diferentes tipos de HC consoante a sua volatilidade (Autoridade Marítima, 2011):

- **Voláteis Leves**

Os HC voláteis Leves¹⁶ englobam a gasolina, o querosene¹⁷, a parafina e diesel. Estes HC possuem baixa viscosidade, são solúveis em água, evaporam e dispersam facilmente. Embora sejam tóxicos, a sua toxicidade diminui rapidamente devido à rápida evaporação. Geralmente são quase impossíveis de limpar com ferramentas de resposta convencionais.

¹⁵Compostos aromáticos são compostos orgânicos que possuem uma estrutura de anel aromático, conferindo-lhes propriedades distintas e um odor característico (Vargas, s.d.).

¹⁶Voláteis Leves são compostos químicos que têm a capacidade de evaporar facilmente devido à sua baixa massa molecular, normalmente estes HC evaporam completamente entre 1 a 2 dias.

¹⁷Querosene é um produto líquido obtido do petróleo, utilizado na iluminação (Infopédia, s.d.).

- **Moderados e Pesados**

Os HC Moderados e Pesados englobam grande parte dos óleos brutos, diesel, óleo combustível e óleo lubrificante leve. Apresentam viscosidade baixa a moderada, têm solubilidade moderada em água e tendem a formar emulsões¹⁸ estáveis. Estes HC têm a capacidade de contaminar os recursos superficiais e subterrâneos, representando um potencial de contaminação a longo prazo. No entanto, geralmente é possível remover esses contaminantes com recurso a instrumentos de resposta eficazes.

- **Pesados**

Os HC pesados incluem os *crudes* altamente parafínicos, as emulsões de HC na água e os óleos de lubrificação pesados. Quando submetidos a temperaturas elevadas libertam componentes voláteis e, conseqüentemente, aumentam a densidade, podendo mesmo afundar. Assim, a contaminação por HC pesados pode causar conseqüências graves e de longa duração. Entre estas destacam-se os impactos nos ecossistemas marinhos, especialmente em aves e mamíferos marinhos. As ações de limpeza rápidas e eficazes são fundamentais para minimizar os danos ambientais e maximizar a possibilidade de recuperação das áreas afetadas.

- **Residuais**

Os HC residuais incluem os *bunkers*¹⁹, o *fuel-oil* pesado e o asfalto. Estes HC possuem alta viscosidade, baixa solubilidade em água e, quando em contacto com água, têm tendência a formar aglomerados de alcatrão (*tar balls*). Estas substâncias, não se dispersam facilmente na água, causando contaminação persistente, e muito difíceis de limpar. A poluição por HC residuais causa também impactos gravíssimos nas aves e mamíferos com pelagem, seja pela ingestão ou revestimento de óleo.

Para além dos HC referidos existem, ainda, os HC com densidade superior à da água, que afundam. São substâncias de baixa toxicidade, semissólidas e não-voláteis, que não se dissolvem na água, resultando na formação de *tar balls*. Em suma, as características dos HC derramados influenciam as operações de resposta, assim como os custos associados, os impactos e o comportamento no ambiente.

¹⁸Quando HC entram em contacto com a água, formam-se emulsões. O estudo das características das emulsões (densidade e viscosidade dos HC presentes) é essencial para uma resposta eficaz e minimização dos danos causados pela poluição (Autoridade Marítima, 2011).

¹⁹O *bunker oil* é um tipo de combustível bastante denso e viscoso e altamente poluente muito utilizado em navios e aplicações industriais (Autoridade Marítima, 2011).

1.3.3 Combate à Poluição: Fase Inicial

Quando ocorre um episódio de poluição marinha causado por HC em espaços marítimos sob soberania ou jurisdição de Portugal, seguem-se diferentes diretrizes de acordo com o Guia de Apoio da Autoridade Marítima (2011). Nesta secção apresenta-se a sequência geral de operações no combate à poluição, em conformidade com as regulamentações estabelecidas. No fim desta secção apresentam-se os principais equipamentos empregues no combate à poluição marítima causada por HC.

Assim que um alerta de poluição marítima é recebido seguem-se os seguintes passos que estão descritos e explicados abaixo:

- **Passo 1 – Confirmação**

A confirmação de alertas de poluição marítima envolve reconhecimento visual por meios aéreos ou navais. Alguns alertas captados por satélite não necessitam de confirmação imediata, conforme definido no Anexo I, no entanto são monitorizados com a ajuda do IH devido ao risco de evoluírem para manchas que possam atingir costa. Por outro lado, alertas com área superior a 20 km² e a menos de 35 milhas náuticas (MN) da costa requerem confirmação visual que será solicitada a um meio aéreo ou um navio SAR. Uma operação de confirmação permite determinar se houve um falso alarme evitando o uso desnecessário de recursos;

- **Passo 2 – Registo dos Factos**

A primeira ação a ser tomada após a confirmação de um episódio de poluição do mar é a realização de um documento que registe todas as informações relevantes, tais como os recursos materiais e humanos envolvidos. De seguida com essas informações é criada uma linha de tempo para reconstruir todo o processo. A responsabilidade pelo registo recai sobre a Autoridade Marítima encarregue de direcionar e coordenar as operações de combate à poluição do mar, de acordo com o grau de prontidão estabelecido do PML (Tabela 1.1);

- **Passo 3 – Estabelecimento do Grau de Prontidão**

De acordo com o PML, assim que um incidente de poluição é identificado, a autoridade competente determina o nível de prontidão apropriado para a situação. Posteriormente, caso ocorram alterações na situação, a autoridade competente pode ajustar o nível de prontidão;

- **Passo 4 – Informação das Entidades competentes**

Conforme estabelecido no PML é essencial informar outras entidades e organismos relevantes sobre o episódio de poluição. Diferentes autoridades são informadas de acordo com a urgência e as suas funções específicas, tais como:

- Outras autoridades do SAM, especialmente a DGAM e AMN;
- Administrações portuárias afetadas ou potencialmente afetadas, priorizando por proximidade;
- Autarquias locais afetadas ou potencialmente afetadas, também por proximidade;
- A ANPC, o Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos (IPTM), o MAMAOT e o Instituto Nacional de Emergência Médica (INEM), em caso de pessoas afetadas;
- Administrações de parques naturais e áreas protegidas;
- FFAA.

- **Passo 5 - Recolha de Amostra**

Após um episódio de poluição do mar por HC pode ser solicitada a recolha de amostras seguindo as diretrizes estabelecidas na Circular nº123/2007 (2007) de colheita de amostras. Isto visa identificar o poluidor e apurar responsabilidades;

- **Passo 6 - Realização do POLREP**

O POLREP, como já referido anteriormente, é um sistema padrão de relato de episódios de poluição marinha adotado pela DGAM. Existem duas variantes na Circular N°107 (2007): o POLREP inicial e o POLREP final que é uma mensagem formatada mais completa, enviada dois dias depois;

- **Passo 7 – Designação de um Oficial de Ligação**

Quando ocorre um episódio de poluição de grande escala que possa afetar os Estados vizinhos, a autoridade marítima responsável designa um oficial de ligação. Esse oficial tem a incumbência de facilitar a comunicação com todas as entidades envolvidas, incluindo aquelas dos Estados vizinhos.

1.3.4 Combate à Poluição: Fase Operacional

Uma vez que o contexto da situação e o nível de prontidão tenham sido estabelecidos, passamos para a fase operacional das operações de combate à poluição. Esta fase é coordenada pela autoridade competente e seguem-se as normas do PML. Nesta subsecção, serão destacados os principais critérios a serem seguidos. A autoridade competente deve interpretar e adaptar-se conforme as circunstâncias do episódio de poluição e da missão de combate, considerando a singularidade de cada caso e não podendo negligenciar a necessidade de ajustar as regras gerais.

Critérios

As operações de combate à poluição têm como prioridades:

- Garantir a segurança das vidas humanas: evitar expor desnecessariamente vidas humanas a perigo, enfatizando a importância de equipar adequadamente o pessoal antes de iniciar as operações;
- Minimizar danos à propriedade (bens) e ao ambiente.

1.3.5 Equipamentos utilizados na Limpeza

Nesta subsecção apresenta-se a variedade de equipamentos utilizados para combater a poluição marinha, bem como as condições adequadas para sua aplicação. É importante ressaltar que, à medida que as correntes e a agitação marítima se intensificam, a eficácia destes métodos é reduzida. Os principais equipamentos e técnicas utilizados para a recolha de HC no mar são:

- **Barreiras (*Booms*)**

As barreiras (Figura 1.5) são equipamentos utilizados para evitar a deriva e o espalhamento de manchas de poluentes no mar. Estas confinam ou direcionam as manchas, facilitando a colheita dos poluentes em quantidades significativas ou evitando que se espalhem para áreas sensíveis. Existem diferentes tipos de barreiras classificadas de acordo com critérios como a resistência, o local de aplicação (oceânicas ou alto mar), natureza (químicas, flutuantes e especiais) e rigidez.

A eficácia das barreiras está dependente de uma série de fatores. Estes incluem a agitação marítima, correntes, a eficiente ligação entre os seus componentes

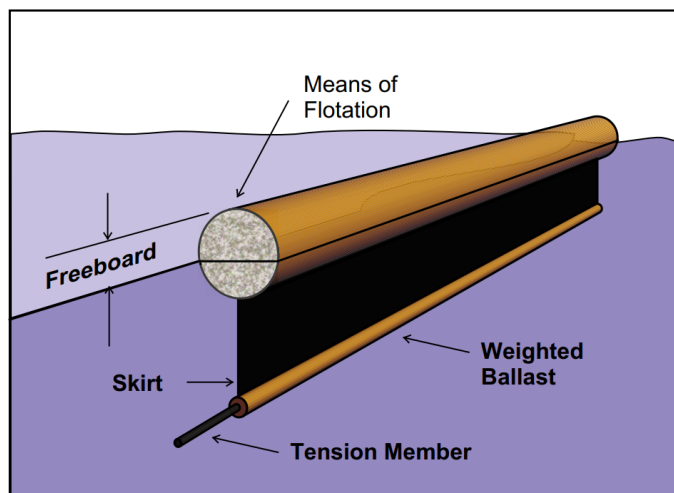


FIGURA 1.5: Ilustração de uma barreira. Fonte: Fingas, 2011

e amarrações, além das limitações inerentes a amarrações com pouco resistência, assim como procedimentos desadequados no reboque, quando aplicável. Falhas nas barreiras podem ocorrer quando as correntes e a agitação marítima arrastam os poluentes para fora delas como pode ser observado na Figura 1.6. No Anexo III encontram-se representadas várias configurações de barreiras.

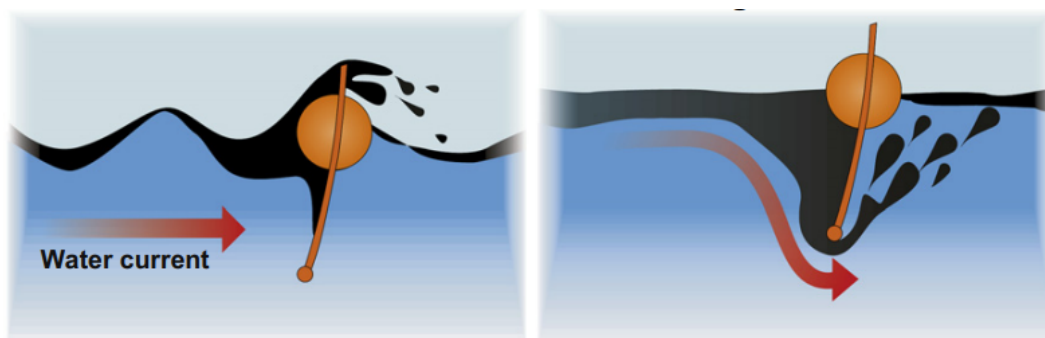


FIGURA 1.6: Falha nas barreiras, por ação da corrente. Fonte: Fingas, 2011

- **Recuperadores (*Skimmers*)**

Os recuperadores são equipamentos utilizados para a colheita de poluentes, conforme demonstrado na Figura 1.7. A viscosidade dos poluentes é a propriedade de mais impacto na eficiência dos recuperadores. Portanto, é essencial ter conhecimento dos HC a recolher (e das características das emulsões resultantes) para determinar qual é o melhor tipo de recuperador a ser utilizado entre as opções disponíveis (Fingas, 2011).

Existem dois métodos principais de recolha de poluentes utilizando recuperadores: estático e dinâmico. O método estático envolve o uso de um recuperador imóvel, sendo adequado apenas em condições marítimas muito calmas, com correntes abaixo de 1,5 nós e vento fraco. Por outro lado, o método dinâmico envolve o movimento do recuperador juntamente com o navio, seja integrado nele ou rigidamente apoiado. Esse método é mais versátil e passível de ser utilizado com sucesso numa ampla gama de situações, em comparação com o método estático.

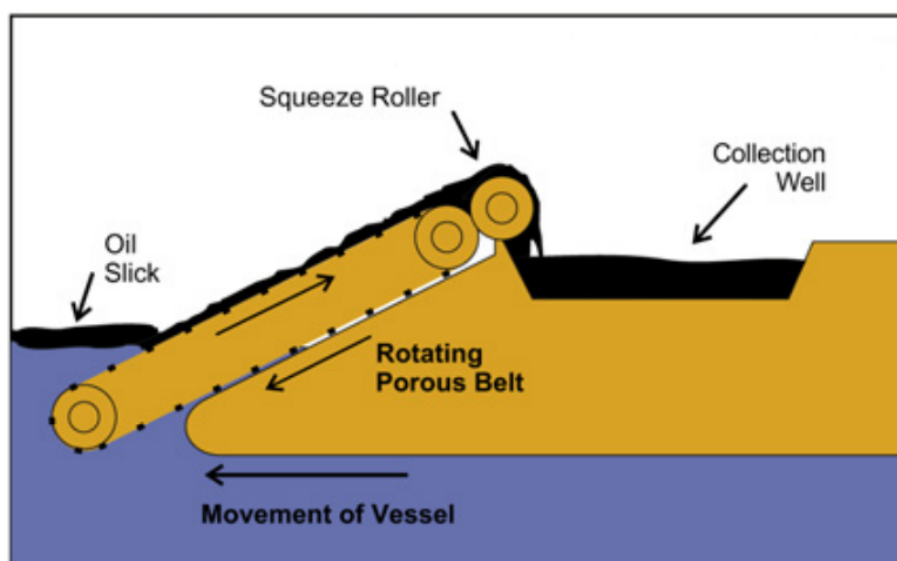


FIGURA 1.7: Ilustração de um recuperador de tapete. Fonte: Fingas, 2011

- **Absorventes**

Os absorventes são substâncias porosas que têm a capacidade de absorver HC. Estes materiais podem ser utilizados na forma de tapetes, discos, barreiras, mantas, pompons ou almofadas, conforme nas Figura 1.8. A eficácia dos absorventes depende não só da quantidade absorvida, como também do poder de retenção. Estes são por sua vez influenciados pelo tipo de absorvente e pela estrutura dos poros. No caso das barreiras absorventes, embora sejam eficazes na absorção de HC de baixa viscosidade (ex. gasolina e gasóleo), a sua eficiência é reduzida quando se tratam de HC mais viscosos.

Em Portugal, os equipamentos mais avançados e eficazes existentes para combater a poluição marítima estão a cargo da DCPM. Estes equipamentos estão localizados em Lisboa, na Doca da Marinha, e em Troia, nas Instalações Navais. Assim que necessários, estes equipamentos podem ser rapidamente transportados



FIGURA 1.8: Exemplos de absorventes. Fontes: Admin, 2014; Dom Phillips, 2013

por terra, ar e mar para qualquer parte do país, incluindo as Regiões Autónomas com a colaboração da Força Aérea Portuguesa (Autoridade Marítima, 2011).

Por sua vez, o *Monitoring and Information Centre* (MIC) de Portugal, através da AMN e da DGAM, pode solicitar apoio a outros Estados-membros da UE e à EMSA para combater episódios de poluição nas suas águas territoriais. No entanto, o apoio oferecido pela EMSA não é independente e é complementar ao auxílio fornecido pelos Estados. Além disso, Portugal também está obrigado a disponibilizar os seus próprios recursos, por meio do MIC, a outros Estados que solicitem ajuda para lidar com episódios de poluição nas suas águas territoriais.

1.4 O serviço *CleanSeaNet*

O CSN é uma serviço para monitorizar a poluição marítima operado pela EMSA. A finalidade primordial do CSN é alertar as autoridades competentes, independentemente da origem ou contexto legal do derrame, deixando a cargo dessas autoridades a responsabilidade de implementar as ações necessárias. Este serviço disponibiliza informações em tempo quase real acerca de derrames de HC no mar. O serviço utiliza imagens SAR como principal fonte de dados e fornece, também, acesso a alguns serviços adicionais, tais como imagens de satélite óticas de alta resolução (S. Antunes, 2020). Estes possuem dados de vento e direção, informações meteorológicas e oceanográficas no momento e local da imagem.

Após a aquisição da imagem, os alertas ficam disponíveis para enviar às autoridades nacionais competentes no prazo de 30 minutos. Quando o satélite realiza a aquisição da imagem é enviado um sinal para a estação recetora. Nesta estação a

imagem é processada e é gerado o relatório de alerta CSN. Este é o relatório enviado por *mail* para os utilizadores finais (S. Antunes, 2020).

Alguns derrames de óleo no mar são causados por ações deliberadas, como a limpeza de tanques, enquanto outros são resultados de acidentes marítimos, como colisões entre navios (Figura 1.11) ou avarias. Outros são ainda causados por atividades operacionais regulares, como o despejo de águas residuais de plataformas petrolíferas ou vazamentos de reservas naturais de HC no mar.

O relatório de alerta CSN apresenta três níveis distintos de alerta: verde, amarelo e vermelho. Estes níveis são determinados pelo centro de dados CSN por meio de uma matriz de alerta, que tem em conta a proximidade a costa. Um alerta verde indica um risco moderado, ao passo que um alerta amarelo indica risco alto e o alerta vermelho risco muito alto. Em situações em que um derrame afete vários países, o relatório de alerta é calculado de forma independente para cada nação.

Quando gerado, o relatório (Anexo II) fornece uma ampla gama de informações detalhadas sobre o possível derrame, incluindo detalhes sobre as possíveis deteções (como coordenadas, área, comprimento, largura), uma lista de potenciais fontes poluidoras, dados de alerta personalizados e o nível de alerta.

A posição de cada satélite é estabelecida pela sua órbita à volta da Terra. Esta é determinada pela sua missão específica e pelo tipo de sensor que leve a bordo (Zhu et al., 2018). Os satélites podem ser colocados em diversas órbitas em redor da Terra, nomeadamente em órbitas Geoestacionária (aproximadamente entre os 20.000 km e os 36.000km) e em órbitas quase Polares ou Heliossíncronas (entre os 400 km e os 1.200 km).

Os tipos de satélites utilizados para a monitorização da poluição no mar, são colocados em órbitas polares (Figura 1.9). O CSN colabora neste momento com 4 satélites SAR em órbita polar: *Sentinel-1A*, *TerraSAR-X/TanDEM-X*, *PAZ* e *Radarsat-2* (Figura 1.10). Estes apresentam uma média de período de revisita para cada satélite de cerca de 12 dias. A maioria dos satélites que descrevem esta órbita são também Heliossíncronas, o que significa que cobrem sempre a mesma zona do planeta a uma determinada hora local. A sua órbita total é dividida entre ascendente (sul para norte) e descendente (norte para sul)(Figura 1.9).

Cada satélite, dependendo da sua missão, é equipado com um sensor. Existem dois tipos de sensores, os sensores passivos que são aqueles que usam a energia natural do sol e os sensores ativos que são aqueles que fornecem a sua própria fonte de energia.

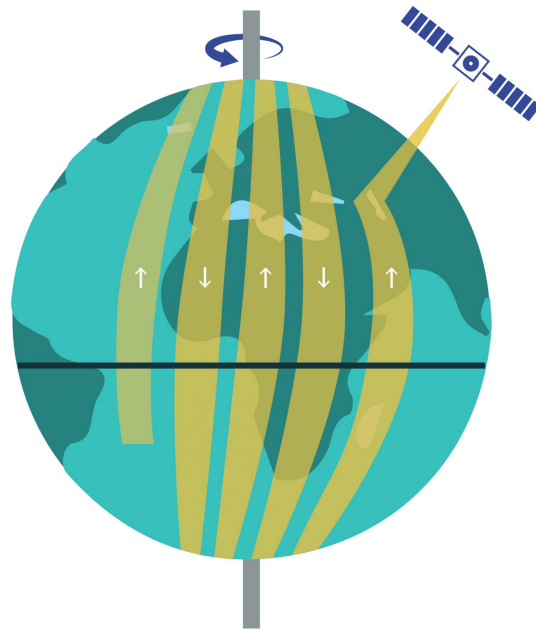


FIGURA 1.9: Órbita Quase-Polar ou Heliossíncrona. Fonte: Sophia, 2022



FIGURA 1.10: Satélites SAR do catálogo *CleanSeaNet*

1.4.1 Sensores Passivos

Os sensores passivos são sistemas que dependem da radiação solar no espectro visível, *Infrared* (IR) térmico e micro-ondas do Espectro Eletromagnético. Permitem, assim, avaliar propriedades como temperatura da superfície da terra e do mar, vegetação, nuvens, aerossóis e outros aspetos físicos (Woodhouse, 2017). Embora seja útil, este sensor apresenta limitações que afetam a sua eficiência. Uma das limitações está relacionada com a dependência da intensidade de radiação solar, limitando o seu funcionamento somente durante o dia. Temos, como exceção, as medições de energia emitida (IR térmico) que podem ser realizadas à noite. Existe, também, outra limitação causada pelas interferências das condições meteorológicas adversas, como chuvas e cobertura de nuvens. Este é o tipo de sensor que é utilizado quando são capturadas imagens óticas pelo CSN.

1.4.2 Sensores Ativos

Os sensores ativos possuem a sua própria fonte de iluminação e são capazes de emitir radiação diretamente para o objeto a ser observado. Eles conseguem funcionar a qualquer hora do dia, independentemente das condições meteorológicas. Consequentemente, são úteis para medir perfis verticais de aerossóis, topografia da superfície do mar e gelo, estrutura florestal, precipitação e ventos, entre outros (Fu, 1982; Woodhouse, 2017).

Um dos tipos mais conhecidos de sensores ativos é o SAR, que é a principal fonte de dados do CSN. As imagens radar são de alta resolução e permitem uma cobertura eficiente na detecção de poluição marítima. Isto devido à sua capacidade de penetrar nuvens e diferenciar substâncias como o petróleo, que suaviza a superfície do mar e reduz o sinal de radar (Figura 1.11). Assim, o sinal de radar é transformado numa imagem em que os derrames de petróleo aparecem como áreas escuras, enquanto os navios e outras estruturas *offshore* (incluindo plataformas de petróleo e gás) aparecem como pontos brilhantes. Apesar deste detalhe, as imagens carecem sempre de análise por operadores experientes. Por este motivo é importante referir as limitações intrínsecas do sensor SAR e do mecanismo de detecção aplicado. Este é baseado na análise radiométrica de imagem (Saatchi, 2019), ou seja, no contraste entre as áreas de mar limpo e das áreas cobertas por óleo.

Quando se tratam de imagens obtidas sobre o mar, as interações mais surpreendentes são com as ondas capilares (na gama dos centímetros). Estas ondas formam-se na superfície da água devido ao vento. A interação referida faz com que a radiação refletida pela superfície dependa da rugosidade do mar. Consequentemente, o filme de óleo, ao atuar nessa rugosidade, suaviza a mesma. Assim, a superfície do mar torna-se num espelho, a radiação não é retornada ao sensor SAR, mas refletida na direção oposta. Isto resultará em *pixels* pretos (ausência de sinal). Já os navios, por serem feitos de metal, têm uma alta reflexão, aparecendo como *pixels* brancos (Figura 1.11).

No entanto, existem diferentes limitações na detecção do sensor SAR. Uma das limitações é o facto de uma imagem de óleo ser somente identificável dentro de certos limites de vento. Isto porque em condições de água muito calma ou agitada não há contrastes suficientes. Outra limitação é a ocorrência de falsas deteções. Uma vez que alguns fenómenos naturais, como algas, pólen, gelo ou zonas sem vento, podem ser confundidos com óleo nas imagens. Além disso, não é possível determinar a composição do filme de óleo, que pode ser de origem mineral, vegetal,

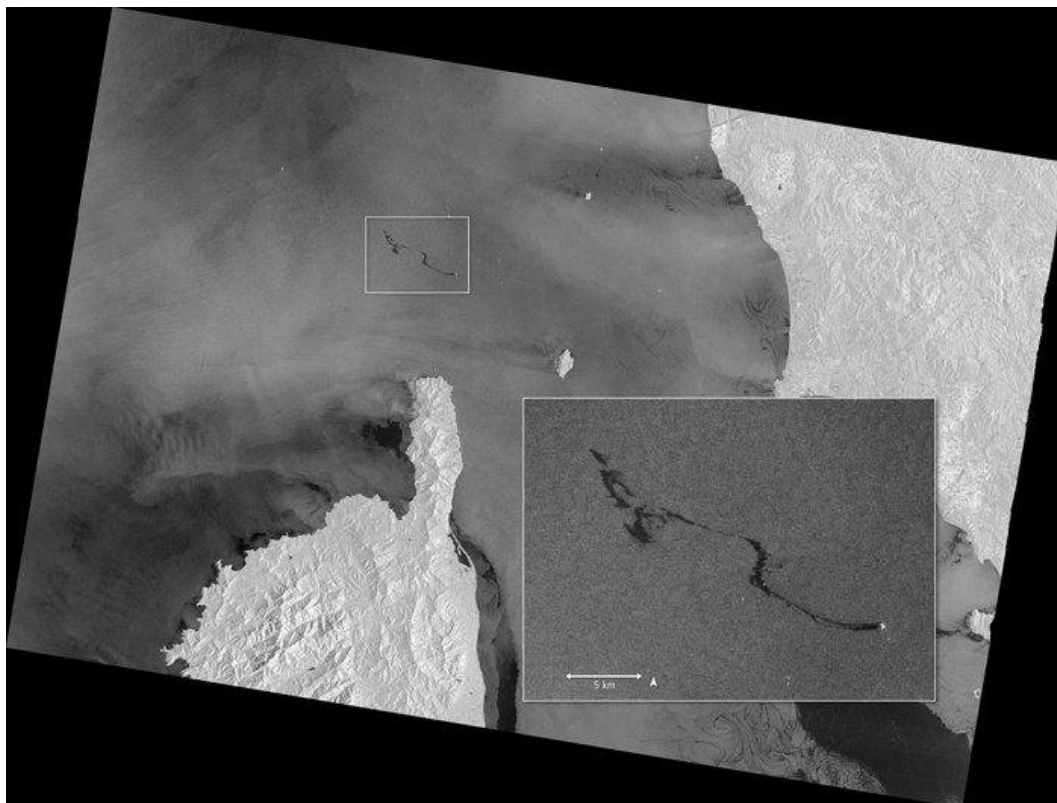


FIGURA 1.11: Imagem satélite da detecção de um derrame de óleo após a colisão entre duas embarcações no Mediterrâneo. Fonte: The Maritime Executive, 2018

animal ou outras substâncias químicas. No entanto, o CSN classifica as possíveis detecções em duas classes:

- De classe A, que apresenta o mais alto nível de confiança de que a característica em questão é óleo mineral;
- De classe B, que possui um nível de confiança menor de que o elemento em a questão seja um óleo mineral.

Desta maneira, independentemente de ter um grau de confiança mais elevado (Classe A) ou mais moderado (Classe B), as detecções do CSN devem sempre ser consideradas como um possível derrame, até que essas ocorrências sejam confirmadas por meio de verificações *in-situ*²⁰. Independentemente das eventuais limitações naturais decorrentes dos satélites e sensores, o sensor SAR é considerado o sensor ideal para a monitorização da poluição marítima a nível global e ao longo de todo o ano.

²⁰*In situ* é uma expressão latina que significa "no local" ou "no lugar". No contexto científico ou tecnológico, *in situ* é utilizada para descrever ações ou medidas realizadas no próprio local onde ocorre o fenómeno/condição, sem remoção ou transferência para outro ambiente (Copernicus, s.d.).

1.5 Modelos de deriva existentes

A capacidade de detecção remota é um instrumento essencial nos dias que decorrem, graças a ela conseguem-se obter, à distância, informações valiosas sobre o meio ambiente e de objetos. Esta é bastante útil em aplicações de monitorização de áreas remotas, observação de terrenos, investigação militar, análise de imagens satélite entre outras. Os modelos funcionam através da análise das imagens satélite, a partir delas consegue-se extrair informações da extensão e localização (De Padova et al., 2017) dos “possíveis” derrames no mar. Agilizando, desta forma, as medidas de resposta a implementar posteriormente (Anexo II).

A utilização de modelos de previsão de derrames de óleo é crucial para compreender a dinâmica dos objetos flutuantes no mar, permitindo-nos antecipar a sua trajetória. Ao tomar medidas preventivas estamos a contribuir para minimizar os impactos ambientais (Chang et al., 2014). Os modelos de previsão permitem a implementação de medidas pro-ativas de modo a minimizar o derrame e o seu impacto.

Nas últimas décadas tem ocorrido uma evolução constante dos modelos de derrame de óleo. Os primeiros modelos baseavam-se principalmente em observações de terreno e descrições teóricas simples. Atualmente, tem havido uma tendência crescente na utilização de modelos que especifiquem dados ambientais. Estes especificam, por exemplo, dados referentes à dinâmica do derrame. Sabe-se que esta dinâmica depende de boas estimativas de vento, corrente e campos de gelo, tanto espacial quanto temporalmente (Spaulding, 1988).

Uma vez que o petróleo atinge e/ou é derramado à superfície do mar, muitos são os fatores que afetam as suas propriedades de transporte e dispersão. Para uma melhor compreensão acerca do comportamento de um derrame de petróleo no ambiente marinho é importante perceber todos os seus processos. Estes são determinados tanto pelas propriedades do óleo derramado como pelas condições meteorológicas (ondas, ventos, correntes, radiação solar, etc.). Para além disso, as características de descarga (instantâneas/contínuas, de superfície/de profundidade) também são importantes a ter em consideração.

Os modelos para derrames de óleo utilizam uma abordagem baseada em partículas *Lagrangianas*, como pode ser observado na Figura 1.12. Estas partículas representam o óleo à superfície em gotículas, o que permite que o modelo tenha em consideração a mudança temporal e espacial na libertação, no transporte e no

destino do óleo (Spaulding, 2017). De seguida descrevem-se alguns dos modelos matemáticos de deriva existentes, assim como as principais componentes e variáveis.

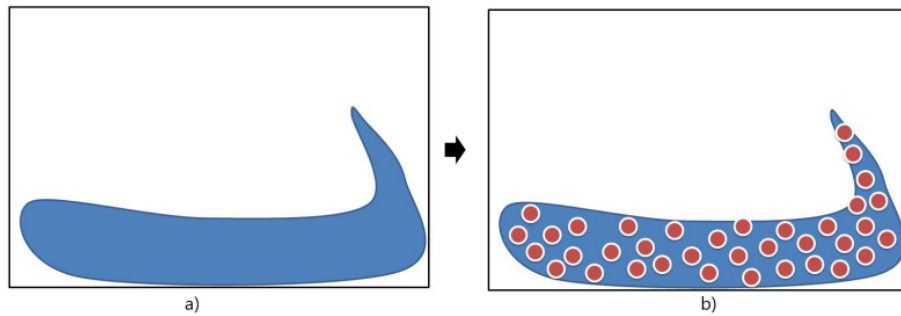


FIGURA 1.12: a) Cenário de uma simulação de um fluido. b) Abordagem *Lagrangiana*: modelo em partículas. Fonte: Vieira, 2008

1.5.1 OILMAP

O modelo avançado *Oil Spill Model and Response System Read*(OILMAP) é um sistema utilizado por empresas petrolíferas e governos internacionais em todo o mundo há mais de 25 anos. Este modelo auxilia na resposta a derrames de petróleo e na elaboração de planos de contingência de forma fácil e rápida. Uma das suas principais características é a sua plataforma gráfica intuitiva, que facilita e especifica cenários de derrames (RPS Ocean Science, 2016).

O sistema integra dados de vento e hidrodinâmica, permitindo prever o movimento do derrame de óleo. É capaz de fornecer previsões rápidas do movimento e destino das manchas de óleo derramado em 2D e 3D, independentemente de ser um derrame instantâneo ou contínuo. Com isso, consegue acompanhar os vários componentes de HC presentes na superfície da água, na coluna de água e no ar. É um modelo versátil e tem apoiado com sucesso nas respostas a derrames, na execução de planeamentos, e até mesmo em exercícios. Já conta com licenciamento em mais de 100 países (RPS Ocean Science, 2023).

O modelo padrão OILMAP (Figura 1.13) inclui algoritmos que calculam a trajetória e destinos de derrames de petróleo, considerando o tipo de óleo derramado e o seu impacto na distribuição da mancha ao longo do tempo. Uma das vantagens do OILMAP é a sua capacidade de utilizar um Sistema de Informação Geográfica (SIG²¹) totalmente integrado e compatível com outras ferramentas SIG. Este sistema permite a criação de mapas interativos com informações relevantes, como áreas sensíveis e instalações que serão afetadas pelo derrame. Além disso, o sistema oferece

²¹Um SIG oferece uma visualização detalhada, análise e interpretação de dados geográficos, permitindo revelar informações valiosos para tomadas de decisão informadas (ESRI, s.d.).

1.5. Modelos de deriva existentes

serviços *online* de mapeamento e dados ambientais em tempo real (RPS Ocean Science, 2016).

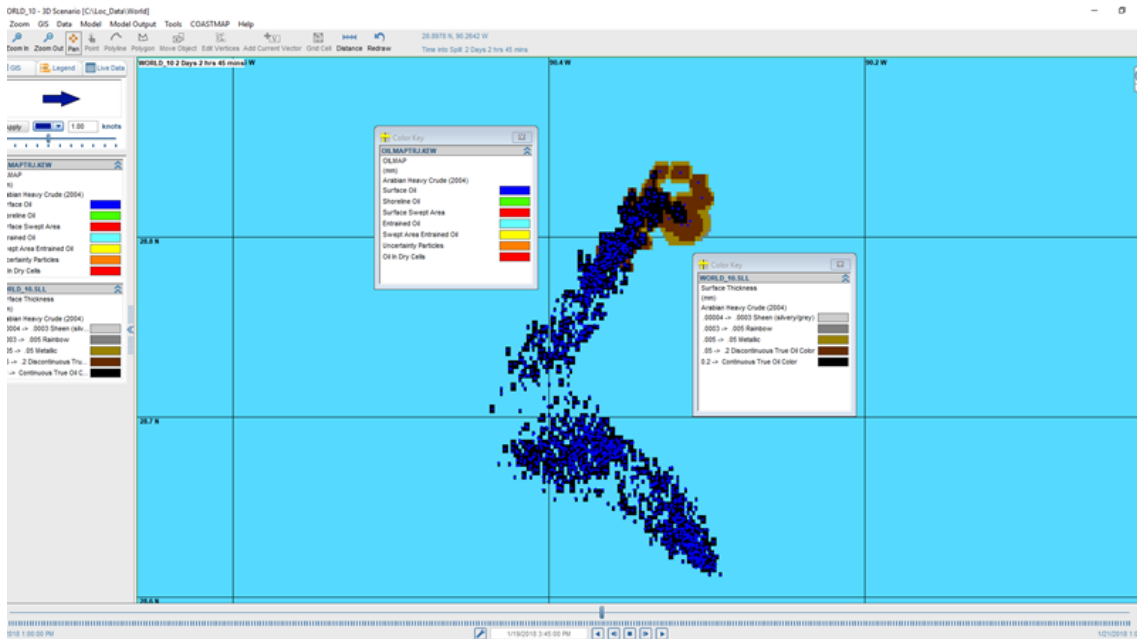


FIGURA 1.13: *OILMAP software*. Fonte: Etneca, 2021

Além do modelo padrão são também contemplados vários módulos adicionais disponíveis como (RPS Ocean Science, 2016):

- **Módulo de trajetória e destino:** modelo de longo alcance para derrames superficiais e sub-superficiais. Este modelo prevê a trajetória tridimensional e o destino do óleo em derrames instantâneos ou contínuos.
- **Módulo estocástico:** utilizado para avaliação de riscos e planejamento de contingência. Este auxilia na determinação dos caminhos de derrame mais prováveis e do tempo mínimo para o óleo atingir pontos específicos.
- **Módulo *OILMAPDeep*:** modelo de campo próximo utilizado para simular derrames sub-superficiais de óleo e gás. Este prevê as características da poluição em proximidade e as distribuições de tamanho de gotículas de óleo para um derrame específico.
- **Módulo *AIRMAP*:** modelo de dispersão atmosférica integrado ao *OILMAP*. Este prevê a trajetória e o destino do óleo na atmosfera.

1.5.2 *MIKE 21/3*

O modelo *MIKE 21/3* é uma ferramenta para estudar e responder a derrames acidentais de óleo. Este modelo simula o envelhecimento e o movimento do óleo representado por partículas discretas num campo de fluxo usando uma abordagem *Lagrangiana*²². Este também é capaz de simular a propagação do óleo dissolvido usando cálculos de advecção-dispersão, baseados na abordagem *Euleriana*²³. Tradicionalmente, os modelos de derrame de óleo utilizam uma combinação das abordagens *Euleriana* e *Lagrangiana*. Pois permite que a abordagem *Lagrangiana* siga as trajetórias individuais das partículas de óleo ao longo do tempo, enquanto que a abordagem *Euleriana* fornece informações sobre a concentração do óleo em pontos fixos (Wang & Stout, 2010).

O modelo de derrames de óleo pode ser aplicado em mar aberto, áreas costeiras, estuários, rios e lagos, em duas ou três dimensões. Recomenda-se, no entanto, a utilização de três dimensões quando se considera óleo dissolvido. A propagação de um derrame de óleo é calculada dividindo-o em partículas (Figura 1.14). Os movimentos das partículas são determinados pelo campo de fluxo hidrodinâmico (e opcionalmente pelo vento) e por componentes dispersivos resultantes de processos aleatórios, como a corrente marítima.

O modelo *MIKE 21/3* requer uma variedade de dados de entrada. Estes incluem informações ambientais como correntes, vento, ondas, gelo, perfis de corrente, coeficientes de dispersão e características do óleo. Os resultados gerados pelo modelo incluem mapas 2D ou 3D que apresentam valores instantâneos ou estatísticos dos parâmetros do óleo, como massa total, concentração e espessura da mancha de óleo. Também é possível obter um orçamento de massa ao longo do tempo e monitorizar partículas para entender a propagação dos derrames. Esses resultados são cruciais para analisar os efeitos do derrame e auxiliar na tomada de decisões relacionadas à limpeza e resposta de emergência.

1.5.3 *OpenDrift*

O *OpenDrift* é um código aberto baseado em *Python* para modelar partículas *Lagrangianas* em desenvolvimento no Instituto Meteorológico Norueguês. Este

²²A abordagem *Lagrangiana* representa uma mancha de óleo como um conjunto de partículas que seguem o caminho tomado por cada partícula de óleo enquanto ela se move em relação à Terra (Wang & Stout, 2010).

²³A abordagem Euleriana do movimento do óleo regista a concentração de manchas ou partículas que se deslocam passando por pontos fixos (Wang & Stout, 2010).

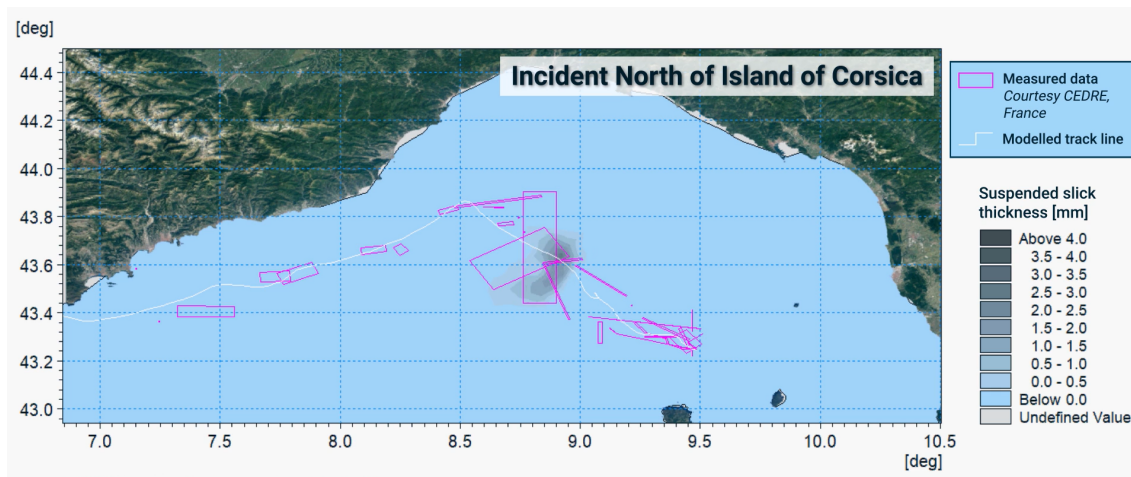


FIGURA 1.14: Simulação do *MIKE 21/3* de um incidente no Mar Mediterrâneo. Fonte: Mike, 2020

foi projetado para ser utilizado em qualquer tipo de cálculo de deriva no oceano ou na atmosfera. O *OpenDrift* é altamente flexível e modular, podendo ser utilizado em diferentes tipos de cálculos de deriva. Vários módulos já foram desenvolvidos e são utilizados diariamente como o modelo de deriva de óleo e um modelo de busca e salvamento (Dagestad et al., 2018).

O *OpenDrift* permite a incorporação de uma variedade de campos de forças (escalares e vetoriais) de diferentes fontes, como modelos oceânicos, atmosféricos e de ondas, além de medições ou estimativas subjetivas das mesmas variáveis. Este pode ser executado em ambientes *Linux*, *Mac* e *Windows*. É de fácil configuração e utilização, mesmo para usuários com pouca ou nenhuma experiência em *Python*. Para além disso, permite a realização de simulações com milhões de partículas num computador portátil. Ao contrário de outros modelos de trajetória existentes, o *OpenDrift* é altamente flexível e genérico, podendo ser adaptado para diferentes aplicações de deriva sem comprometer a qualidade. Não está limitado a um modelo *euleriano* específico e permite a utilização de dados de forças em diferentes formatos, como arquivos NetCDF ou GRIB, medições *in situ* e conjuntos de vetores. O *OpenDrift* foi projetado para ser independente da plataforma e de fácil instalação e utilização. Atualmente, o IH está a começar a testar o modelo *OpenDrift* em Portugal.

1.5.4 Modelo do Instituto Hidrográfico

Com o objetivo de prever as trajetórias de deriva de naufragos no âmbito de operações SAR, a Divisão de Oceanografia do IH desenvolveu um modelo próprio

chamado DERIVA (Bouças, 2017). Como o próprio nome indica, é utilizado para calcular a deriva superficial de diferentes cenários.

O modelo DERIVA segue uma abordagem física simples, baseada no cálculo da corrente superficial utilizando a dinâmica da Espiral de *Ekman*²⁴. O algoritmo do modelo DERIVA do IH é executado no *software MATLAB* e passou por várias atualizações ao longo dos anos. Podemos identificar três principais versões do modelo:

- **1º** - A versão clássica ou operacional, é o modelo mais antigo utilizado pelo IH. O cálculo da deriva é baseado na força do vento e considera o efeito do mesmo na superfície. Neste modelo são adotados valores padrão para diferentes cenários, tais como derrame de óleo, naufragos, balsas salva-vidas e contentores. De seguida será explicado como é efetuado o cálculo para cada caso específico. Sabendo que o Vento possui duas componentes, a Intensidade (I) e a Direção (D):

Onde,

$$Desvio \begin{cases} aI \\ D + b \end{cases} \quad (1.1)$$

Para Derrames de óleo utilizam-se os valores padrão:

$$\begin{cases} a = 0.03, \\ b = 45^\circ \end{cases}$$

Para Naufragos utilizam-se os valores padrão:

$$\begin{cases} a = 0.035 \\ b = 50^\circ \end{cases}$$

Para Balsas salva-vidas utilizam-se os valores padrão:

$$\begin{cases} a = 0.1 \\ b = 20^\circ \end{cases}$$

²⁴A espiral de *Ekman* é um fenómeno caracterizado pelo desvio das correntes oceânicas impulsionadas pelo vento, onde a corrente superficial é desviada para a direita (no Hemisfério Norte) ou para a esquerda (no Hemisfério Sul), e à medida que a profundidade aumenta, a velocidade da corrente diminui e a direção afasta-se ainda mais da direção do vento, seguindo uma espiral (Dritschel et al., 2020).

Para Contentores utilizam-se os valores padrão:

$$\begin{cases} a = 0.015 \\ b = 90^\circ \end{cases}$$

- **2º** - A próxima versão do modelo baseia-se apenas nos parâmetros da corrente marítima, tendo em consideração que a corrente é um resultado do vento.
- **3º** - Por último, os parâmetros desta versão mais recente são mais abrangentes, uma vez que se baseia em dados tanto de vento (1º) quanto de corrente (2º) (Figura 1.15).

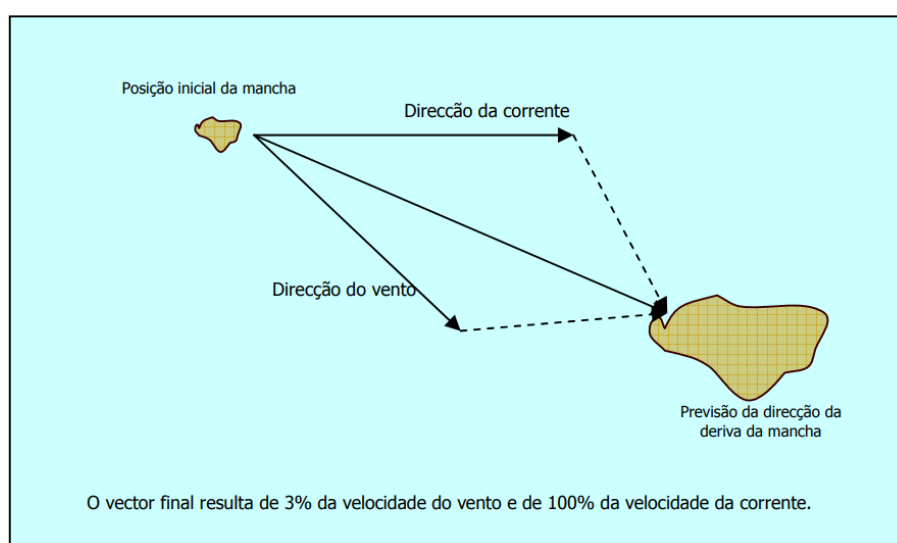


FIGURA 1.15: Modelo do cálculo empírico da deriva de substâncias.
Fonte: Autoridade Marítima, 2011

No contexto do combate à poluição no mar por HC, normalmente o *Maritime Rescue Coordination Centre* (MRCC) ²⁵ Lisboa ou Delgada solicita o cálculo da deriva quando ocorre um relato de alerta. Os relatos de alertas para episódios deste tipo podem ser emitidos por diferentes entidades e situações. Estes incluem os relatos de alerta CSN da EMSA, de aeronaves de patrulha da Força Aérea, de avistamentos relatados pela aviação civil e embarcações de pesca ou recreio.

Após se receber um alerta, o MRCC entra em contacto com o IH e solicita uma previsão da deriva. Essa solicitação deve incluir informações essenciais, como um Grupo-Data-Hora (GDH) do episódio e a posição inicial do derrame. O processo de obtenção da previsão de deriva começa com a obtenção de dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Com base nesses

²⁵Em língua portuguesa: Centros de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo.

dados, o oficial responsável do IH para lidar com as solicitações de deriva realiza os procedimentos necessários para realizar o cálculo da previsão de deriva.

1.6 Estado da Arte

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT):

A primeira utilização na História de VANTs foi em julho de 1849 através de balões por forças austríacas contra a cidade de Veneza. Durante a Primeira Guerra Mundial desenvolveram-se variações de aviões autônomos controlados por rádio. Atualmente, um veículo aéreo não tripulado, é todo e qualquer tipo de aeronave que pode ser controlada nos três eixos e que não necessita de piloto para ser conduzido (Figura 1.16) (Pereira et al., 2009).



FIGURA 1.16: Exemplo de um veículo aéreo não tripulado, denominado por *Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk* da Força Aérea dos Estados Unidos. Fonte: Gady, 2015

Lu et al. (2018) assumem que nas últimas décadas, os VANTs têm tido uma utilização cada vez mais popular. A investigação tem-se centrado principalmente em métodos baseados em sensores laser ou radar para navegação. No entanto, o rápido desenvolvimento da visão por computador tem mostrado vantagens. Uma das vantagens da sua utilização é o rápido desenvolvimento da visão por computador. Este inclui a localização visual, mapeamento, prevenção de obstáculos e planeamento de rotas. É também uma alternativa promissora para monitorização de alta resolução espacial do ambiente costeiro. Para tal, apresenta como vantagens a minimização dos efeitos atmosféricos e horários flexíveis (Kieu & Law, 2021).

O desenvolvimento de VANTs com foco em missões de impacto social está em constante crescimento, promovendo uma crescente autonomia e resistência nas novas gerações (Belcastro et al., 2017). A aplicação de VANTs apresentam vantagens para fins públicos e com diferentes aplicações civis. Estas incluem avaliar os danos de tornados e tempestades (DeBusk, 2010), com intenção de salvar vidas; agricultura; segurança; conservação ambiental; comunicações; entrega de encomendas e ajuda humanitária (O’Dor & Berghe, 2012). Neste tipo de aplicações o principal desafio reside na garantia da segurança das operações, devido à falta de relatório de incidentes e ao rápido crescimento de possíveis novas aplicações (Pereira et al., 2009).

Quanto à utilização de VANTs na indústria petrolífera e de gás, esta foi recentemente revista por Asadzadeh et al. (2022). Neste estudo está revisto o potencial dos VANTs em procedimentos de mapeamento, monitorização, inspeção e vigilância na indústria. As seis principais áreas de aplicação de deteção remota destes veículos na indústria descritas são a deteção de derrames de petróleo *offshore*; a monitorização de oleodutos, a inspeção de instalações remotas e exploração de petróleo (Asadzadeh et al., 2022).

Segundo Bayırhan e Gazioğlu (2020) os VANTs também podem ser uma forma eficaz e acessível de monitorizar derrames de petróleo. As técnicas óticas têm-se estabelecido como meios predominantes de deteção remota. Nos últimos anos, os sensores óticos demonstraram um papel fundamental para uma maior consciencialização da poluição marítima, com a deteção de derrames de HC utilizando VANTs. A aplicação destas técnicas óticas em VANTs possibilita a identificação visual de manchas de óleo na superfície do mar, contribuindo significativamente para a deteção precoce e eficaz de derrames de HC.

Segundo o estudo apresentado por Jiao et al. (2019) é possível dividir a tarefa de deteção de derrames de petróleo em três etapas:

1. Primeira, construir um modelo baseado numa rede neural para detetar rapidamente áreas suspeitas de derrame;
2. Segunda, filtrar obstáculos nas imagens com o algoritmo *Otsu*;
3. e utilizar o algoritmo *Maximally Stable Extremal Regions* para avaliar automaticamente a gravidade do derrame.

De salientar um sistema descrito na literatura baseado em VANT para monitorização da fluorescência induzida por laser do ambiente aquático. Neste sistema

as medições de demonstração de sensores remotos de alcance fixo foram realizadas, assim como gravações de campo da fluorescência da água natural do rio. As manchas de óleo e volumes de água foram marcadas com corantes a uma altura de voo do VANT de cerca de 10 metros. O fluorosensor utilizado, pesando apenas 1,5 kg e transportado por um VANT comercial, permitiu a detecção remota pelo ar. Este sistema mostrou-se eficiente e económico, no entanto, apenas pode ser aplicado em condições de baixa luminosidade ambiental (Duan et al., 2019).

Veículo de Superfície Não Tripulado (VSNT):

Embora os VSNTs tenham sido utilizados nas forças operacionais desde o início da Segunda Guerra Mundial, foi na década de 1990 que se sentiu um considerável avanço, impulsionado pelo avanço tecnológico e a mudança de foco da Marinha dos Estados Unidos da América em direção ao combate litoral e missões antiterrorismo (Figura 1.17) (Yan et al., 2010).

Atualmente, os VSNTs têm capacidade de desempenham missões como contra-medidas de minas, guerra antissubmarino e de superfície, segurança marítima, guerra eletrónica e apoio a operações de interdição marítima (Yan et al., 2010). Os VSNTs ampliam as possibilidades do navio, por exemplo, na aproximação e na varredura de áreas que sejam, inicialmente, de difícil acesso.



FIGURA 1.17: Exemplo de veículo de superfície não tripulado SAM (*Surface Autonomous Marine*). Fonte: SAAB, 2020

Os VSNTs apresentam vantagens em comparação a outros sistemas, tais como (Liu et al., 2016): a capacidade de realizar missões mais longas e perigosas; menor custo de manutenção e maior segurança do pessoal e maior autonomia e flexibilidade. Com o desenvolvimento de equipamentos de navegação e comunicação mais eficazes há maiores oportunidades de aplicações para os VSNTs. As aplicações incluem a investigação científica, missões ambientais e exploração de recursos oceânicos. No entanto, ainda há desafios a serem superados no desenvolvimento

de VSNTs totalmente autónomos, como a limitação de autonomia e viabilidade das funções de orientação, navegação e controlo automatizados (Liu et al., 2016).

A utilização de VSNTs também tem vindo a ser descrita na literatura (Kato et al., 2017; Klemas, 2015), para além da monitorização de derrames, estes veículos podem ter incorporados diversos sensores, nomeadamente sensores químicos. Estes auxiliam a detetar a fonte da poluição para, posteriormente, realizar a descontaminação. Assim, estes sistemas permitem não só a monitorização e remoção da poluição, mas também a limpeza (Klemas, 2015).

Outro estudo mais recente (Kato et al., 2017), descreveu um VSNT que permite a deteção e monitorização de derrames de petróleo e fugas de gás nas plataformas de produção de petróleo e gás *offshore*. Este veículo não só permite a monitorização das estruturas de petróleo e gás nas colunas de água, como também a medição das substâncias dissolvidas e dados oceanográficos. A combinação de dados do robô com simulação oceanográfica permite, desde forma, conhecer com precisão a estrutura 3D das plumas de petróleo e gás.

Mais recentemente foi descrito um Sistema Híbrido de Deteção e Limpeza de Monitorização (HMDCS-UV) para monitorizar e detetar zonas poluídas utilizando um VANT e limpá-las usando VSNT. Este sistema foi implementado num sistema em nuvem²⁶ e avaliado em diferentes cenários de simulação, tendo demonstrado uma boa capacidade de deteção e redução da poluição hidráulica, com um ganho significativo em termos de consumo de energia (Bella et al., 2021).

Métodos Cooperativos

Estudos mais recentes demonstram que é possível fazer uma utilização cooperativa entre VANTs e VSTNs. Segundo Bella et al. (2021), foi criado um sistema Híbrido para monitorizar e detetar e limpar áreas contaminadas. O sistema híbrido visa auxiliar as equipas a ter uma resposta ambiental e a conhecer rapidamente a localização e extensão de derrames de materiais perigosos, tais como petróleo. Neste sistema cooperativo, os VANTs desempenham o papel de monitorização e deteção, enquanto os VSNTs realizam a limpeza. Este estudo demonstrou que o sistema híbrido tem a capacidade de detetar e reduzir significativamente a poluição hidráulica

²⁶Sistema em nuvem é a entrega de serviços de computação – incluindo servidores, armazenamento, bases de dados, rede, software, análises e inteligência – pela Internet (“a nuvem”) para oferecer inovação mais rápida, recursos flexíveis e economias de escala (Windows, s.d.).

em regiões marítimas, com resultados positivos em termos de consumo de energia. Esta abordagem permite, assim, obter uma resposta mais eficiente e eficaz aos derrames de petróleo, contribuindo para a preservação do meio ambiente marinho.

Outro dos métodos cooperativos com VANTs é a utilização de navios para auxiliar na deteção do derrame de petróleo e na colheita de amostra em áreas afetadas com HC. Este método mostrou boa manobrabilidade, mecanismo de colheita confiável e deteção precisa de contaminação por HC (Al Maawali et al., 2019).

Foi também descrito um sistema de robótica cooperativo: veículo submarino autónomo e VSNT. Este sistema tem como principal objetivo a monitorização ambiental e auxiliar as equipas de resposta ambiental a entender rapidamente a localização e extensão de materiais perigosos. Trata-se de uma abordagem inovadora, *Human-on-the-loop* (HOTL), que permite obter uma medição quase em tempo real dos níveis de poluição, sem consumir muito tempo e/ou esforço humano. Neste sistema a VSNT mantém a localização e a comunicação de dados, enquanto o submarino autónomo recolhe amostras do oceano, corrigindo erros de cálculo do submarino autónomo. Esta proposta foi testada em missão em mar aberto com poluição intencional, em Cartagena (Espanha), no ano 2015 (Vasilijević et al., 2017). Em 2020, Bayırhan e Gazioğlu (2020) propõem um modelo que combina VANTs e simuladores do ambiente marinho (*Marine environment simulators* - MES), de modo a facilitar os dados colhidos pelos VANTs. Com este modelo o processamento de imagens recorrendo a programas informáticos multi-funcionais permite uma diminuição do tempo de resposta em emergências que requerem uma rápida tomada de decisão. Desta forma, modelo proposto aumenta a eficiência das operações de intervenção (Bayırhan & Gazioğlu, 2020).

No mesmo ano, De Kerf et al. (2020) descreveram uma nova abordagem utilizando VANTs e câmaras IR. Esta abordagem teve como principal objetivo detetar derrames de petróleo em ambientes portuários. As estruturas do mesmo consistem em 2 partes: formação e operação. Na formação imagens *Red Green Blue* (RGB) e IR são combinadas para criar um conjunto de dados – utilizado para treinar uma rede neural convulsional (*Convolutional Neural Network* - CNN). Várias arquiteturas de segmentação e extratos de diferentes características foram testados para encontrar a combinação mais adequada. Na parte operacional propõe-se um método para realizar a deteção em tempo real a bordo do VANT, com uma precisão de 89% (De Kerf et al., 2020).

De seguida apresenta-se o estado da arte de diferentes métodos utilizados para deteção e monitorização de derrames de petróleo, tais como espectorradiómetro,

SAR, e modelos de derrame de óleo.

Espetrorradiómetro

O espetrorradiómetro de imagem de resolução moderada é um método que se tem mostrado eficaz na monitorização tanto de derrames de longas duração e extensão, como de derrames menores durações e extensões. Trata-se de um método de fácil implementação, com processamento de dados semi-automatizado e, portanto, mais célere, permite a integração de aquisições diurnas e noturnas assim como a adaptabilidade a diferentes sensores (Maianti et al., 2014).

Método SAR

Na literatura o método SAR já me mostrou eficaz na cobertura de grandes áreas oceânicas (Solberg, 2012). O método SAR baseia-se em imagens de polarização única, permitindo uma melhor discriminação entre manchas de petróleo e manchas de óleo e películas biogénicas. Imagens SAR *dual-pol quad-pol* estão disponíveis a partir de vários satélites como *Cosmo Skymed* e *TerraSAR-X*. Além disso, utiliza dados óticos de sensores como *Aqua MODIS* e *MERIS*. No entanto, apenas se mostra eficiente em condições climáticas favoráveis, nomeadamente sem nebulosidade. Outra desvantagem é a frequente necessidade de observação por aeronaves para processar o poluidor e, em certos casos, para verificar o derrame de óleo.

Em 2016, Pisano et al. (2016) realizaram um estudo oceanográfico realizado a bordo do navio *R/V Urania* do Conselho Nacional de Pesquisa Italiano (CNR²⁷), com vista ao teste de um sistema inovador de monitorização de derrames de petróleo. Este sistema integrava, pela primeira vez, a deteção de derrames de petróleo por satélite (Módulo de Observação) e a previsão do deslocamento do petróleo após a deteção (Módulo de Previsão). Neste sistema, o Módulo de Observação baseia-se tanto na deteção por SAR como na deteção ótica por satélite, enquanto o Módulo de Previsão se baseia em modelos de circulação numérica *Lagrangiana* (Pisano et al., 2016).

Durante a viagem foram detetados vários derrames de petróleo pelos dois Módulos de Observação. Após o alerta dado pela imagem SAR e/ou ótica o navio chegou à posição da mancha pelas informações disponibilizadas pelos Módulos de Observação permitindo, assim, confirmar os derrames *in situ*. Os resultados confirmam uma boa capacidade de deteção de derrames de petróleo por SAR. Para além

²⁷Sigla em língua inglesa: *National Research Council*.

disso, indicam que os sensores óticos permitem detetar desde filmes finos derrames de petróleo até manchas contendo água altamente poluída. Os resultados confirmaram, também, o potencial útil dos modelos de previsão de derrames. Por outro lado, os autores alertam que será ainda necessário trabalho futuro na otimização dos parâmetros do modelo para rastrear *in situ* de derrame de óleo. Para tal, seria necessária uma simulação realista, incluindo experiências exaustivas realizadas no mar acerca de possíveis diferentes trajetórias (Pisano et al., 2016).

Modelos de derrame de óleo

Em 1984, Lehr et al. (1984), descreveram a importância de estimar o tamanho dos derrames de petróleo, por razões económicas, ambientais e legais. Anteriormente esta estimativa era realizada avaliando visualmente a extensão das cores e multiplicando as áreas pela espessura. Dada a subjetividade da análise visual, os resultados da técnica referida não se demonstraram satisfatórios, tendo sido posteriormente testadas fórmulas de espalhamento, tais como as fórmulas de *Blokker* e *Fay* (Lehr et al., 1984). No entanto, a utilização destas fórmulas apresenta como limitação a influencia das condições ambientais na taxa de espalhamento. Para ultrapassar esta limitação, os dados obtidos durante uma série de experiências na Arábia Saudita foram utilizados para modificar a fórmula de espalhamento de *Fay*. Esta fórmula modificada foi invertida de modo a obter uma fórmula para o volume inicial derramado, com resultados significativamente melhores comparativamente às áreas observadas de derrame de petróleo (Lehr et al., 1984).

Nas últimas décadas têm vindo a ser desenvolvidos modelos para descrever os principais processos físico-químicos que afetam o transporte de petróleo no mar. Estes modelos auxiliam no desenvolvimento de algoritmos com a finalidade de detetar e de prever as taxas destes processos. Para tal, torna-se também importante ter em consideração a relação entre as propriedades do petróleo, a sua degradação e destino e o desenvolvimento de modelos para avaliar as estratégias de resposta a derrames de petróleo. Na literatura existem diferentes abordagens no desenvolvimento de modelos numéricos para detetar e prever o comportamento e destino dos derrames de petróleo no ambiente marinho. As diferentes abordagens entre 1990 e 1999 estão revistas em Reed et al. (1999), sendo que vários modelos citados estão implementados atualmente, tais como modelos bidimensionais, tridimensionais, de dispersão, entre outros.

Capítulo 2

Modelos de Derrame de Óleo

O presente capítulo, abordará com foco especial o transporte superficial de HC. Com o objetivo central de compreender como é modelado o HC no mar e quais as variáveis mais determinantes em todo o processo. Após apresentar alguns dos modelos de deriva existentes no Capítulo 1, é essencial compreender os principais processos físicos envolvidos no transporte do óleo na água.

Entender o transporte dos HC é fundamental para prever a deriva dos derrames ao longo do tempo (Keramea et al., 2021; Reed et al., 1999). Para isso, é necessário considerar as correntes marítimas para a área do estudo, o mar português, pois elas desempenham um papel crucial em todo o processo. Será também abordado o Anticiclone dos Açores, onde iremos referir a importância que tem para a circulação do ar. A compreensão do funcionamento geral das correntes marítimas e da circulação do ar permitirá ter um conhecimento mais profundo para compreender a trajetória dos HC em Portugal.

Ao analisar os modelos de derrame de óleo, foram consideradas os trabalhos de Lehr et al. (1984), Spaulding (2017) e Keramea et al. (2021) referências importantes nesta área, e no qual contribuíram para fornecer *insights*²⁸ valiosos sobre a modelagem de derrames de óleo.

2.1 Principais processos do transporte do óleo

A trajetória e comportamento de um derrame pode ser influenciado pelos processos físico-químicos de envelhecimento do petróleo, sendo os principais processos: espalhamento, evaporação, emulsificação, dissolução, biodegradação, fotooxidação e sedimentação, conforme ilustrado na Figura 2.1 (Keramea et al., 2021).

²⁸"Insight" é um termo em inglês, que se refere a uma compreensão repentina ou uma percepção profunda e que traz clareza e entendimento sobre uma determinada situação, simbolizando um momento de iluminação ou epifania (Significados, s.d.).

Para a ocorrência destes processos alguns fatores, como o vento e as correntes marítimas, são determinantes para saber a direção e o ritmo a que uma mancha de HC se move e dispersa (Barker et al., 2020).

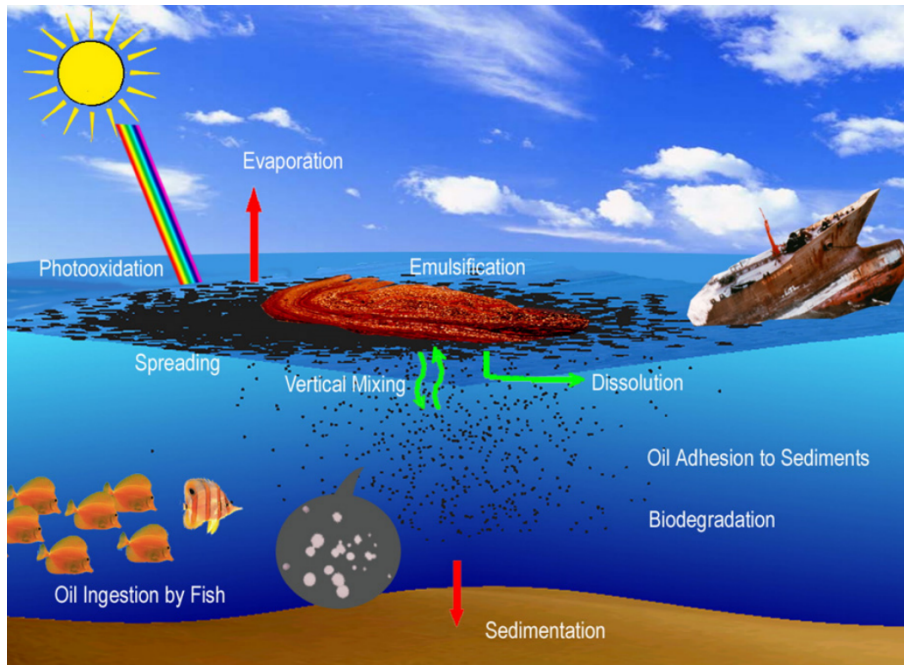


FIGURA 2.1: Processos de derrame de óleo. Fonte: Xie et al., 2007

De acordo com a Figura 2.2, a importância relativa dos processos de destino no equilíbrio de massa de um derrame de petróleo vai alterando ao longo do tempo (Wheeler, 1978). A evaporação, dispersão e emulsificação são os mais importantes inicialmente, no entanto a biodegradação, fotólise²⁹, sedimentação e a formação de bolas de alcatrão tornam-se mais relevantes posteriormente (E. David et al., 2014). Para ter uma melhor compreensão do papel de todos estes processos, será feita adiante uma descrição de cada um.

2.1.1 Evaporação

A evaporação é o principal processo natural de remoção de óleo da superfície do mar. A maior parte dessa evaporação é causada pelos compostos voláteis³⁰ do petróleo que se deslocam para a atmosfera em poucas horas e reduzem a toxicidade do ambiente marinho, porém a evaporação desses compostos voláteis resulta em restos de mancha mais densos e viscosos, tornando mais difícil a sua limpeza (Keramea

²⁹A fotólise é um processo de decomposição química que ocorre através da ação da luz (Ferreira, 2014).

³⁰Os compostos voláteis têm a particularidade de apresentar uma elevada pressão de vapor em condições normais, o que resulta na sua rápida evaporação quando expostos ao ar, sendo então liberados na atmosfera (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

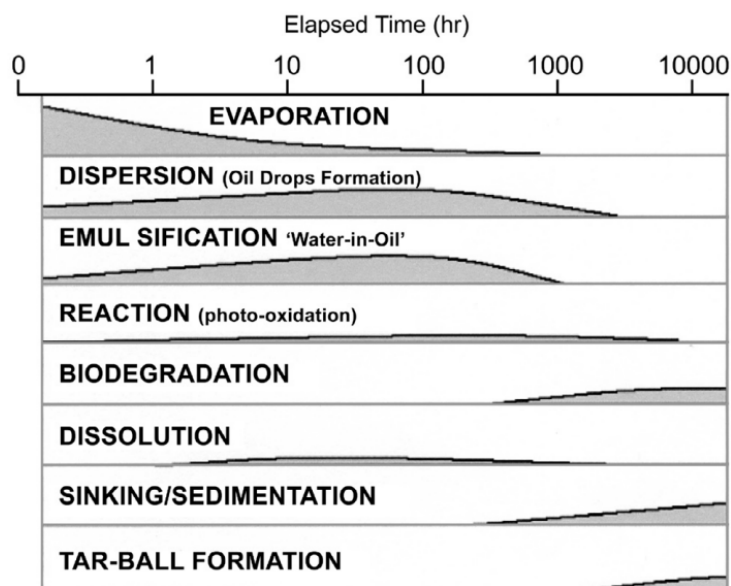


FIGURA 2.2: Representação da influência no processo de dispersão.
Fonte: Korotenko et al., 2010

et al., 2021; Mishra & Kumar, 2015). Quando estes compostos são transferidos para a atmosfera podem pôr em risco a vida marinha e humana, e os bens empenhados no combate à poluição no mar, pois podem gerar-se localmente, concentrações tóxicas e explosivas (Board et al., 2020).

Em poucos dias, o petróleo bruto leve pode perder até 75% do seu volume, o que tem um efeito profundo na densidade e viscosidade na mancha do HC. A taxa de evaporação do óleo é determinada pela pressão de vapor, que é afetada pela composição e temperatura, e pelas condições de transporte da camada limite do ar, principalmente influenciadas pelo vento. A pressão de vapor muda à medida que as frações de HC se perdem na atmosfera (E. David et al., 2014). A taxa de evaporação do óleo depende principalmente da composição do óleo. Quanto mais voláteis forem os componentes de um óleo ou combustível, maior será a extensão e taxa da sua evaporação. A extensão da evaporação é o fator mais importante para determinar as propriedades do óleo num determinado momento após o derrame e para alterar o comportamento do óleo. (Wang & Stout, 2010).

2.1.2 Dispersão Natural

A dispersão natural ocorre quando pequenas gotas de óleo são transferidas para a coluna de água por ação das ondas ou turbulência (Fingas, 2010). Gotículas menores são relativamente estáveis na água e permanecem assim por longos períodos

de tempo. No entanto, as gotas maiores tendem a subir e as maiores só irão permanecer na coluna de água por mais de alguns segundos. A dispersão natural depende tanto do tipo de óleo quanto das condições do mar. Óleos pesados como o petróleo bruto pesado não se dispersam naturalmente de forma significativa, enquanto petróleos leves e *diesel* podem se dispersar consideravelmente.

2.1.3 Emulsificação

A emulsificação é o processo pelo qual o petróleo é misturado com a água formando uma mistura conhecida como emulsão, que dá origem a uma aparência espumosa e castanho-clara (Figura 2.3). Estas emulsões, são também conhecidas como *mousse* de chocolate (Autoridade Marítima, 2011), e tornam a limpeza dos derrames de petróleo muito difícil (Council et al., 1985; Fingas, 2010). A formação da emulsão ocorre quando o petróleo é derramado no mar e as ondas do mar agitam o petróleo à superfície, empurrando partículas minúsculas de água, de cerca de 10 e 25 mm, para dentro do óleo (Fingas, 2010). Este processo é influenciado pelo tipo de HC e pela agitação marítima devido à quebra das ondas que causam turbulências na superfície do mar (Keramea et al., 2021). Quanto mais agitado for o mar, mais a taxa de emulsificação se expande. As gotículas emulsionadas podem permanecer na coluna de água por longos períodos, desde meses até anos. O principal efeito negativo da emulsificação é que a emulsão tem uma viscosidade e tamanho consideravelmente maior que o HC inicialmente derramado, resultando em complicações para os métodos de tratamento e limpeza da água (Keramea et al., 2021).

2.1.4 Espalhamento

O Espalhamento refere-se à criação de uma película fina, que se expande sobre a superfície do mar, assim que um derrame de HC é libertado. Os algoritmos de espalhamento desenvolvidos por Fay (1971) e Hault (1972) fornecem uma estimativa da espessura do derrame ou da área de superfície, utilizada para modelar muitos processos de transporte e destino, tais como evaporação, dispersão e emulsificação. A taxa de espalhamento e a espessura do derrame dependem da temperatura da superfície do mar, da viscosidade e da densidade do óleo (Keramea et al., 2021). O HC, sendo menos denso que a água, ao se espalhar sobre a superfície do mar, apresenta menor espessura à medida que a área da mancha aumenta, podendo até evaporar e diminuir ainda mais sua espessura. Desta forma, é possível estabelecer uma correlação entre o tempo e a área da mancha de HC, que permitirá estimar



FIGURA 2.3: Aspeto de uma emulsão de HC. Fonte: Ward e Overton, 2020

a espessura e o volume, tornando-se especialmente útil em situações em que se desconhece o volume do derrame (Autoridade Marítima, 2011).

2.1.5 Dissolução

Um HC pode-se dissolver na coluna de água a partir da camada superficial ou de gotículas de óleo dispersas. Quando há uma camada de óleo na superfície da água, a quantidade de HC dissolvidos na água aumenta inicialmente e, em seguida, diminui rapidamente após algumas horas devido à evaporação dos componentes. Embora a dissolução ocorra em simultâneo com a evaporação, os efeitos da dissolução são menos evidentes e difíceis de distinguir que os da evaporação (Fingas, 2010). Geralmente, a dissolução é mais significativa quando a evaporação é reduzida, sendo assim substancial para derrames de HC em camadas superficiais e para gotículas de óleo dispersas. Isto ocorre porque há pouca exposição atmosférica e uma maior área superficial de óleo disponível por unidade de volume. Os HC contêm quantidades muito pequenas de compostos solúveis (<1 mg/L) que se podem dissolver na água, mas ainda assim é considerado um processo importante. Dado que os HC aromáticos de peso molecular mais baixo, são altamente voláteis e solúveis, são os elementos mais tóxicos, podendo causar graves danos à vida marinha, especialmente em águas pouco profundas (Keramea et al., 2021).

2.1.6 Biodegradação

A biodegradação de HC é um dos principais processos de remoção no ambiente marinho, pelo qual determinados microrganismos nativos podem atenuar os efeitos ambientais dos derrames marinhos de petróleo a longo prazo (E. David et al., 2014). A água do mar contém uma gama de microrganismos marinhos capazes de degradar compostos petrolíferos. Esses microrganismos podem transformar o petróleo em fonte de energia e carbono que inclui bactérias, fungos, leveduras, bolores, algas unicelulares e protozoários. Embora possam ser encontrados em todo o oceano, eles são mais comuns em áreas que ficam próximas dos centros urbanos, onde ocorrem infiltrações naturais de petróleo ou onde a água do mar está poluída por descargas industriais e esgotos não tratados (Harayama et al., 1999).

O comportamento da biodegradação do petróleo na água é afetado pelas características do petróleo, disponibilidade de oxigênio e nutrientes, bem como pela temperatura. Vários tipos de microrganismos são necessários para degradar diferentes grupos de HC, e a comunidade de microrganismos torna-se mais complexa à medida que a degradação progride. A biodegradação só ocorre quando existe junção entre óleo/água (Fingas, 2010). Com a criação de gotículas de petróleo, seja por dispersão natural ou química, desenrolar-se-á um aumento da área de superfície disponível para a atividade biológica, o que fará acelerar a degradação.

2.1.7 Foto-oxidação

A foto-oxidação é um processo rápido que ocorre na superfície das manchas de óleo e é provocado pela luz solar. Quando os hidrocarbonetos reagem com o oxigênio, podem formar produtos solúveis ou alcatrões persistentes. Embora a luz solar promova a oxidação, este processo tem um impacto menor na dissipação do derrame em comparação com outros processos (Fingas, 2010). As finas películas de óleo decompõem-se lentamente, mesmo sob luz solar intensa, enquanto que as camadas espessas de óleo viscoso ou emulsões de água em óleo tendem a oxidar-se em vez de se degradarem, formando compostos de massa molecular elevada que criam uma camada superficial protetora. Isso explica a formação de crostas de óleo oxidado e sedimentos nas linhas costeiras.

2.1.8 Sedimentação

A sedimentação é o processo pelo qual o petróleo é depositado no fundo do mar ou em corpos de água. A maior parte da sedimentação ocorre quando as gotas

de petróleo interagem com a matéria mineral na coluna de água, atingindo uma densidade superior à da água. Isso faz com que as gotículas se tornem mais pesadas e lentamente afundem para o fundo do mar. Nas áreas costeiras rasas e em foz de rios e estuários, muitas vezes há muitas partículas em suspensão que se podem ligar às gotículas de petróleo, o que irá favorecer a sedimentação das partículas oleosas. Quando o petróleo está no fundo, normalmente é coberto por outros sedimentos e degrada-se muito lentamente. O petróleo pode permanecer no ambiente durante décadas, especialmente quando contém substâncias químicas que dificultam a sua degradação (Fingas, 2010).

2.2 Transporte à Superfície

De maneira a conseguir saber a localização do possível derrame de óleo, assim que é recebido o alerta de poluição, será adotado uma abordagem para o transporte de HC na superfície, utilizando uma formulação *Lagrangiana*. Com o objetivo de modelar o comportamento do derrame de óleo ao longo do tempo, é importante ter em consideração importantes fatores do transporte de óleo, como espalhamento, evaporação e dissolução. O transporte superficial resultante das correntes e do vento é modelado por meio de um algoritmo que estima a deriva do petróleo na superfície com base nas condições de vento e corrente.

Neste caso de estudo, é pretendido demonstrar um modelo de derrame de óleo simples que possa também vir a ser implementado num veículo autónomo. Além disso, é importante considerar a necessidade de uma resposta rápida em casos reais de poluição do mar. Se isso for garantido, chegaremos rapidamente à sua localização, e o erro do modelo, se existir, será irrelevante.

No método de Spaulding (2017), as correntes totais são representadas por um somatório vetorial de correntes devido a fluxos em grande escala, como as correntes induzidas pelo vento e pela corrente. Os dados de entrada sobre as correntes de superfície e sub-superfície são fornecidos por um modelo hidrodinâmico. Esta abordagem permitirá uma representação mais precisa do movimento das correntes induzidas, contribuindo para a eficácia do modelo na identificação e deslocamento de derrames de óleo no mar.

A Equação 2.1 apresenta a estrutura básica para simular derrames de óleo. O modelo requer diversos dados de entrada, como campos de velocidade da corrente superficial e do vento. O modelo de óleo é composto por dois principais componentes:

- i) Módulo de transporte, que utiliza o método de acompanhamento de partículas *Lagrangianas* para prever a trajetória do óleo na superfície;
- ii) Módulo de intemperismo, que tem o objetivo de prever o balanço de massa do óleo e a mudança das suas propriedades.

Normalmente, a componente de deriva induzida pelo vento, que é o fator mais importante na trajetória da mancha de HC, é 3% na maioria dos cálculos (Sebastiao & Soares, 1995). A velocidade de advecção (\vec{U}) do óleo pode ser expressa como uma combinação linear das velocidades da corrente e do vento, conforme abaixo:

$$\vec{U} = a_c \vec{U}_{\text{cur}} + a_w \vec{U}_{\text{wind}} \quad (2.1)$$

onde \vec{U}_{cur} é a velocidade da corrente marítima, \vec{U}_{wind} é a velocidade do vento a uma altura de 10 metros sobre a superfície, a_c é o fator corrente e como a velocidade da corrente é a velocidade da superfície é uma constante assumida como 1, a_w é o fator de deriva do vento, normalmente adotado como 0,03 (Chao et al., 2001). Assim, podemos estimar juntamente a possível trajetória do óleo ao longo do tempo, aproximando o derrame a uma elipse, com o eixo principal determinado pela direção do vento.

A formação de uma **Elipse** em derrames de óleo é um fenómeno complexo e desafiador de se compreender. O vento desempenha um papel crucial, de acordo com vários estudos já realizados, pois revela que a mancha de óleo tende a assumir uma forma mais ou menos elíptica, em vez de uma forma circular, com o eixo principal alinhado na direção do vento (Lehr et al., 1984). Para ter uma melhor compreensão sobre esta característica única da elipse, baseámo-nos em trabalhos importantes relacionados a esta questão, como o caso de Lehr et al. (1984) e Lardner et al. (1988).

O algoritmo de Fay (1969) é mencionado como a fórmula de espalhamento mais utilizada, que divide o espalhamento do petróleo em três fases, sendo a fase intermédia gravitacional-viscosa a mais importante para a simulação prática de derrames de HC (Lardner et al., 1988; Lehr et al., 1984). A fórmula de *Fay* nem sempre foi eficaz devido à sua concepção de apenas enfrentar cenários ideais de manchas circulares em mares calmos. Em casos reais de derrames, as condições meteorológicas desempenham um papel fundamental na definição da mancha (Lehr et al., 1984).



FIGURA 2.4: Elipse formada por um derrame de óleo. Fonte: Natália Mendonça, 2020

Com base nos estudos com derrames práticos na Arábia Saudita, houve uma melhoria significativa nos resultados obtidos na fase gravitacional-viscosa, graças à inclusão do vento no espalhamento do petróleo. O vento é um fator crítico, conforme comprovado por testes que demonstraram que as manchas de óleo geralmente assumem uma forma elíptica, em vez de circular, com o eixo maior alinhado na direção do vento (Lehr et al., 1984). Supondo-se que o óleo se espalha como uma elipse, com o eixo maior na direção do vento. A área da elipse é calculada através de:

1.

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) QR \quad (2.2)$$

onde Q e R são os comprimentos dos eixos menor e maior da mancha elíptica. O comprimento do eixo menor (Q) é proporcional a:

2.

$$Q = C_1 \left(\frac{(\rho_w - \rho_0)}{\rho_0}\right)^\alpha V^\beta t^\gamma \quad (2.3)$$

onde C_1 , α , β e γ são constantes a serem determinadas, ρ_w é a densidade da água, ρ_0 é a densidade do óleo, V é o volume total do derrame, t é o tempo em minutos e W é a velocidade do vento em nós.

O comprimento do eixo principal (R) é proporcional à soma do produto da Equação 2.3 com um produto de potências adequadas do vento W e do tempo t .

3.

$$R = C_1 \left(\frac{(\rho_w - \rho_0)}{\rho_0} \right)^\alpha V^\beta t^\gamma + C_2 W^\delta t^\varepsilon \quad (2.4)$$

onde C_2 , δ e ε são constantes positivas a serem determinadas.

Para que a fórmula melhorada se aproxime à fórmula de *Fay* em condições de vento nulo, as constantes β e γ são definidas como $\beta = \frac{1}{3}$ e $\gamma = \frac{1}{4}$. Como em todos os testes de derrames a dependência da área em relação ao tempo foi quase linear, conclui-se que $\varepsilon = \frac{3}{4}$. Com a velocidade do vento medida em nós, o tempo em minutos e a área em 10^3 m^2 , os valores empiricamente determinados para as outras constantes são $\alpha = \frac{1}{3}$, $\delta = \frac{4}{3}$, $C_1 = 1,7$ e $C_2 = 0,03$.

Assumindo que a mancha de óleo se expande de forma elíptica devido ao contrapeso das forças mecânicas, como a gravidade, tensão superficial, inércia e a viscosidade (Nagheby & Kolahdoozan, 2010). Onde o eixo principal alinhado na direção do vento, é possível expressar as equações de espalhamento propostas por Lehr et al. (1984), podendo ser estimados (Chao et al., 2003; Nagheby & Kolahdoozan, 2010):

$$L_{\max} = L_{\min} + 0.03 |\vec{U}_{\text{wind}}|^{\frac{4}{3}} t^{\frac{3}{4}} \quad (2.5)$$

$$L_{\min} = C_1 \left[\frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_0} \right]^\alpha + V^\beta t^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

onde L_{\max} e L_{\min} são os comprimentos máximo e mínimo da elipse, o ρ_0 e ρ_w é a densidade do água e do óleo, respetivamente, V o volume inicial do derrame, e $|\vec{U}_{\text{wind}}|$ é a velocidade do vento escalar à altura de 10 m sobre o mar (nós). Embora as constantes mencionadas tenham sido estimadas num estudo anterior por Lehr et al. (1984), no presente estudo, enfrentamos o problema de não ter conhecimento sobre os valores de ρ_w e V , por isso iremos ignorá-las.

Portanto, a Equação 2.6 pode ser simplificada para $L_{\min} = D_1 t^{\frac{1}{4}}$, onde D_1 será uma constante positiva e possível de estimar. Relativamente à possibilidade de entrar em contacto com um possível derrame e fazer a colheita de amostras do seu interior e da sua borda externa, podemos estimar o valor de D_1 assumindo que a dimensão da imagem do possível derrame, o valor de $|\vec{U}_{\text{wind}}|$ e considerando os valores de t permitirão a definição de uma estimativa.

Por meio destes dois modelos simplificados, será possível determinar o centro do possível derrame e o seu perímetro, que poderá ser atualizado ao longo do tempo,

com uma margem de erro aceitável, visto que foram ignoradas duas variáveis para uma equação mais simplificada.

2.3 Corrente Marítima em Portugal

A Corrente de Portugal (CP) é uma corrente oceânica significativa localizada ao largo da costa oeste da Península Ibérica. Esta corrente é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo ventos sazonais, descargas de água doce da Península Ibérica, topografia do fundo marinho e a presença de massas de água subjacentes. Além disso, outros elementos como os *Meddies*³¹ e fluxos de água do Mediterrâneo também desempenham um papel importante na dinâmica da corrente (Pérez et al., 2001).

O padrão dominante de circulação sobre a Margem Oeste da Península Ibérica é conhecido como CP e é geralmente considerado, juntamente com a Corrente das Canárias, como o ramo oriental do giro subtropical do Atlântico Norte (Martins et al., 2002). A CP é um sistema de circulação marítima na região da margem oeste da Península Ibérica, onde há um giro subtropical de rotação no sentido horário. Ela estende-se aproximadamente de 36°N a 46°N e das costas ibéricas até cerca de 24°W. O sistema da Corrente marítima em Portugal é influenciado nomeadamente por esse giro subtropical, conforme ilustrado na Figura 2.5. A corrente do golfo atua como uma fronteira a oeste do giro subtropical e desempenha um papel fundamental no abastecimento da Corrente do Atlântico Norte e da corrente dos Açores (Barton et al., 2001; Pérez et al., 2001). A Corrente dos Açores é responsável pela formação da CP e, mais ao sul, da Corrente das Canárias.

A CP é constituído pelas seguintes correntes principais:

- Corrente de Portugal: uma circulação superficial de grande escala, de movimento lento e variável, que flui para o sul entre Portugal continental e as Ilhas dos Açores;
- Contracorrente Costeira de Portugal (Portugal Coastal Countercurrent - PCCC): uma corrente superficial quente e salina que se dirige em direção ao pólo, observada ao norte de 41°N e ao longo da costa da Península Ibérica durante o outono, inverno e início da primavera (Frouin et al., 1990; Haynes & Barton, 1990);

³¹Os *Meddies* são remoinhos compostos da água do Mar Mediterrâneo para o Atlântico e têm uma presença significativa na região da CP (Pérez et al., 2001).

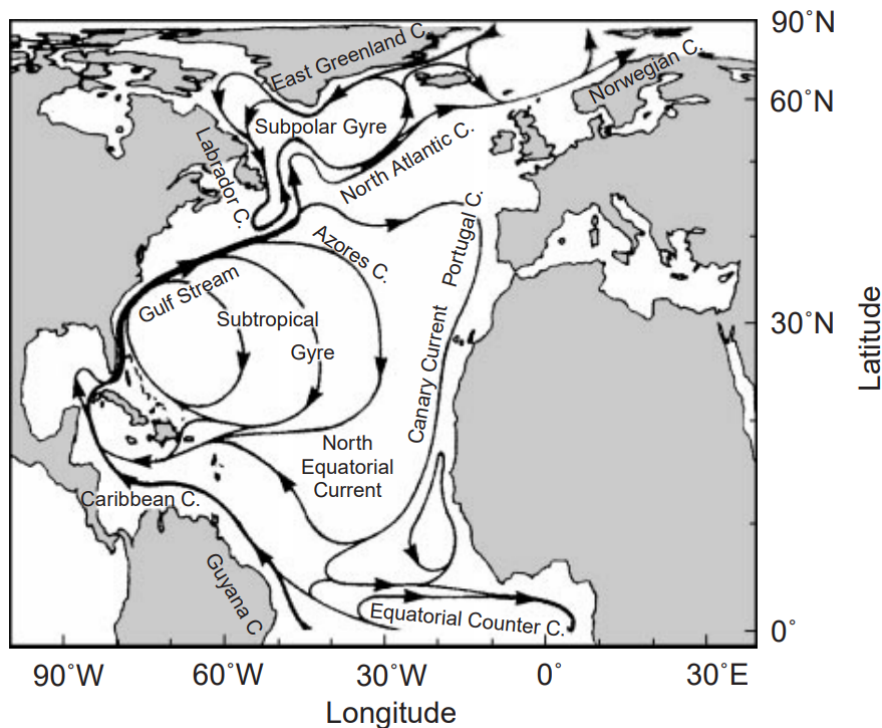


FIGURA 2.5: Esboço geral da circulação das correntes superficiais do Oceano Atlântico Norte. Fonte: Barton et al., 2001

- Corrente Costeira de Portugal (Portugal Coastal Current - PCC): uma corrente equatorial que flui para o sul ao longo da costa oeste de Portugal, como pode ser observada na (Figura 2.6).

Geralmente, o fluxo médio na superfície é em direção ao sul, no entanto, os ventos sazonais na região podem resultar em fluxos tanto para o norte quanto para o sul (Martins et al., 2002). O fluxo médio da coluna de água superficial (<600 m) varia de acordo com a estação do ano e mais ainda com a proximidade de costa, mas normalmente, esse fluxo é em direção ao norte no outono/inverno e em direção a oeste e sul na primavera/verão (Pérez et al., 2001).

Existe uma camada chamada Água Central do Atlântico Norte Oriental (Eastern North Atlantic Central Waters - ENACW) (Figura 2.6) de origem subtropical que se move em direção ao norte e de origem subpolar, que se move em direção ao sul. Existem ainda, uma camada de águas do Mediterrâneo (Mediterranean Water - MW), conhecida pela sua alta salinidade e temperatura, que ao entrar no oceano Atlântico através do Estreito de Gibraltar, se mistura com águas mais frias em diferentes profundidades e ao longo de diversas trajetórias. As principais trajetórias da água do mediterrâneo são em direção ao sul de Portugal continental e em direção à costa africana conforme a Figura 2.6.

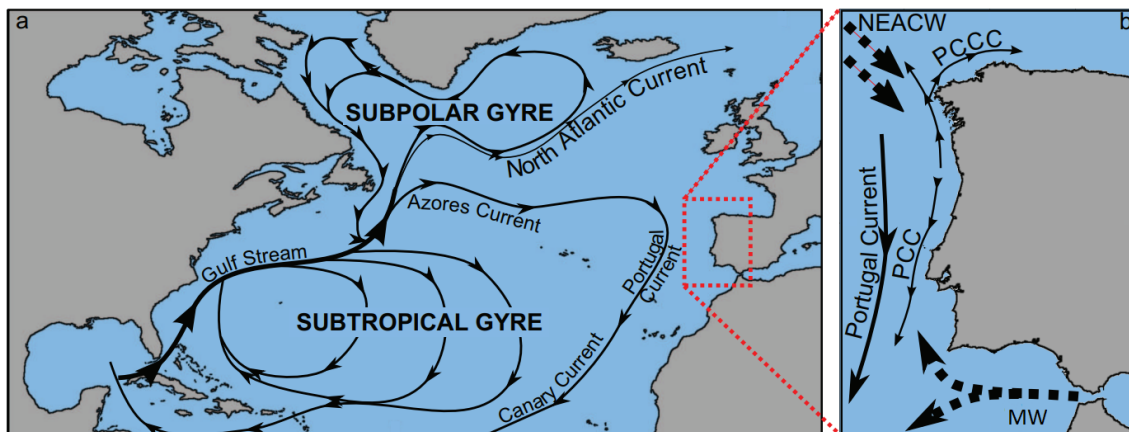


FIGURA 2.6: Esboço geral da circulação das correntes superficiais do Oceano Atlântico Norte (esquerda) e de Portugal (direita). Fonte: Dodet, 2013

2.4 Anticiclone dos Açores

O vento é considerado o fator de maior impacto em todo o processo do movimento de derrames no mar (Sebastiao & Soares, 1995). Para melhor compreender a dinâmica do ar em Portugal, é importante conhecer a influência significativa exercida pelo anticiclone dos Açores, que desempenha um papel fundamental na circulação atmosférica do país. Predominantemente, os ventos em Portugal são provenientes do norte (48%), enquanto que ventos do oeste e sudoeste contribuem com cerca de 17% do campo de ventos. Esta tendência persiste durante todo o ano, com um aumento de ventos de norte, conhecido como Nortada, nos meses de verão (Costas et al., 2012).

O anticiclone subtropical semi-permanente sobre a bacia do Atlântico Norte, o conhecido anticiclone dos Açores, exerce uma influência significativa no clima e nos padrões de vento de grande parte da América do Norte, Europa Ocidental e África Noroeste (Davis et al., 1997). Um anticiclone, por sua vez, é caracterizado por ser uma região de alta pressão atmosférica, em torno da qual o vento sopra no sentido dos ponteiros do relógio no hemisfério norte (e no sentido contrário no hemisfério sul). Este padrão ocorre devido à máxima pressão atmosférica no centro do anticiclone, que diminui à medida que a distância ao centro aumenta (IPMA, s.d.).

No verão (Figura 2.7), o anticiclone desloca-se para latitudes mais altas, criando impacto no clima europeu. Isso resulta nas ondas de calor no final do verão, com temperaturas elevadas e clima seco. No inverno (Figura 2.8), a distância entre

a Europa e o anticiclone permite a entrada de tempestades e ar frio, afetando o clima na Península Ibérica (Costas et al., 2012).

Nas Figuras 2.7 e 2.8, podemos observar o comportamento do vento à superfície em diferentes alturas do ano. No verão (Figura 2.7), verifica-se perfeitamente o anticiclone dos Açores, bem como uma intensificação dos ventos vindos de norte (Nortada). No inverno (Figura 2.8), verifica-se mais ventos vindos nordeste e leste.

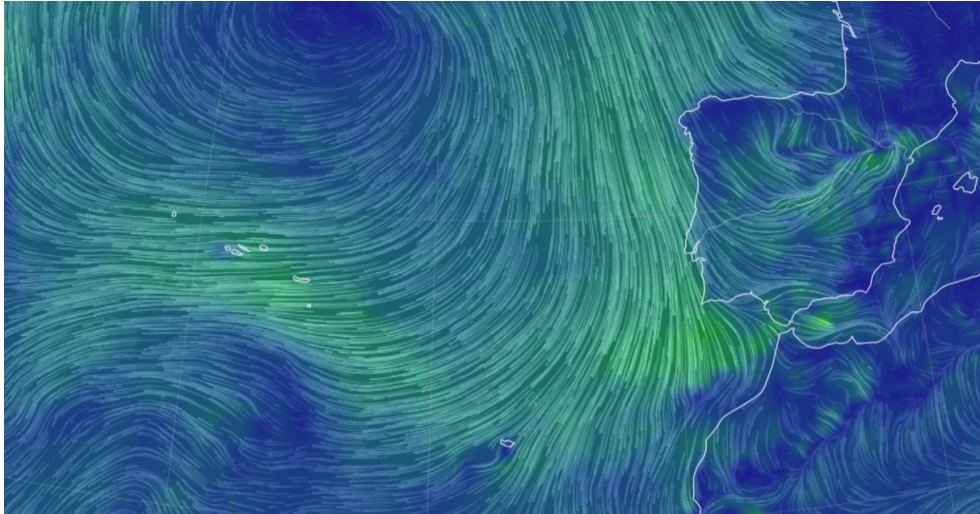


FIGURA 2.7: Ilustração do comportamento do Vento à Superfície em pleno Verão 2023. Fonte: Earth, 2023

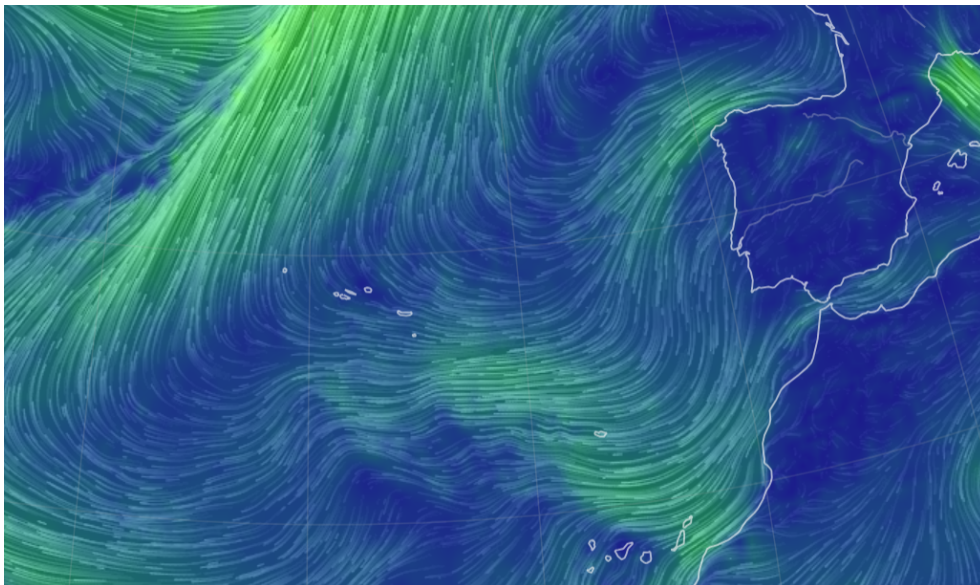


FIGURA 2.8: Ilustração do comportamento do Vento à Superfície em pleno Inverno 2023. Fonte: Earth, 2023

No capítulo seguinte, será demonstrada uma simulação da trajetória dos alertas do CSN, baseada na velocidade do vento e da corrente, por meio da Equação 2.1. O objetivo será representar a trajetória dos possíveis derrames, ao mesmo tempo que se conclui sobre as trajetórias comuns. Isto conforme o que foi apresentado anteriormente sobre as correntes marítimas e os ventos em Portugal. Além disto, será também conhecida mais sobre a área de estudo e todos os passos envolvidos no tratamento e análise dos dados.

Capítulo 3

Tratamento e Análise dos Dados

Neste capítulo, será descrito em detalhe a abordagem adotada para o tratamento e análise dos dados. Para começar, será dada a conhecer a área de estudo, para garantir uma melhor compreensão de toda a região para o processo de análise. De seguida, será explicado como a BD dos alertas CSN foi extraída, bem como outros dados importantes para o estudo, seguindo-se todo o procedimento inicial de processamento dos dados.

Por último será apresentada a simulação que prevê o possível deslocamento dos alertas CSN. Esta previsão levará em consideração as informações sobre as velocidades do vento e das correntes marítimas no local e período em análise.

3.1 Área do Estudo

A área geográfica abrangida neste estudo é a ZEE portuguesa (Figura 3.1), que é uma das maiores na UE (Santos et al., 2012).

Além de ser uma das maiores do mundo, a ZEE portuguesa assume uma notável relevância geoestratégica, dado que a sua localização se encontra perto de dois focos de convergência do comércio marítimo global, o que resulta num intenso tráfego marítimo em toda a região. Caso não se estabeleça um controle adequado sobre a ZEE de Portugal, o tráfego marítimo pode rapidamente evoluir e originar derrames ilícitos ou acidentais de substâncias tóxicas nos oceanos, resultando em sérias implicações adversas. É por isso determinante aplicar a legislação existente (Capítulo 1) para prevenir estes problemas.

O intenso tráfego marítimo exige uma vigilância constante e favorece o comércio marítimo, que representa mais de 80% do comércio de mercadorias a nível mundial (Rodrigue, 2013), devido à sua capacidade em transportar grandes cargas a baixo custos entre continentes (Stopford, 2008).

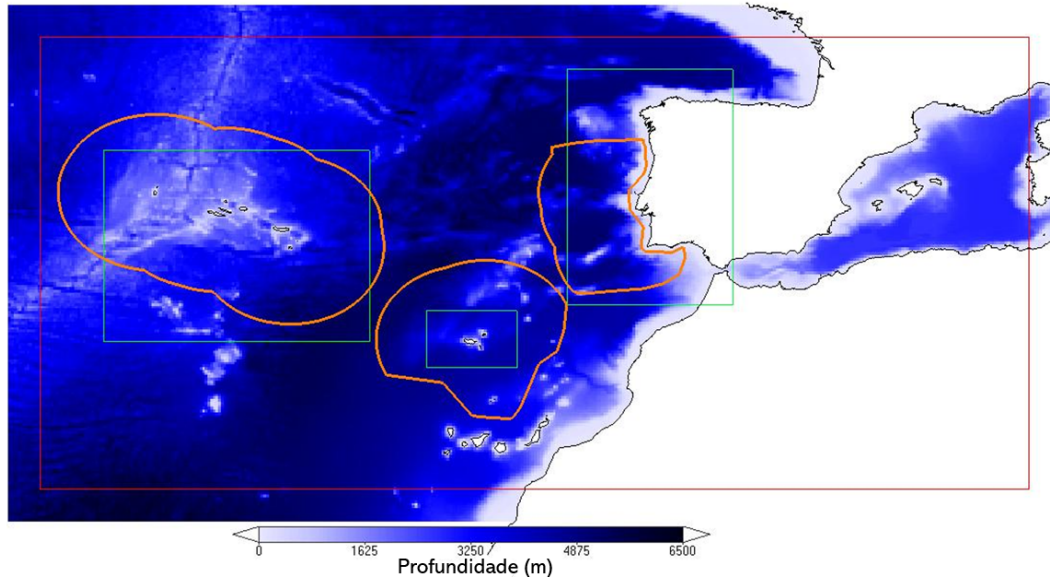


FIGURA 3.1: Zona Económica Exclusiva Portuguesa a laranja.
 Fonte: Campuzano et al., 2013

Portugal, como muitos outros países, depende significativamente deste setor para impulsionar o seu crescimento económico. Na atualidade, as principais rotas de navegação (Figura 3.2) estão centradas no transporte a granel de matérias-primas, incluindo minerais, grãos e produtos alimentares (café, cacau e açúcar) e principalmente no transporte de petróleo (J.-P. Rodrigue, 2020).

Desde muito cedo que Portugal é reconhecido pela sua posição geográfica privilegiada, que se tornou ao longa da história num importante ponto geoestratégico e grande potência marítima (Cunha, 2004). Como parcela mais ocidental da UE, ao redor de Portugal atravessam algumas das principais rotas marítimas mundiais, que fazem a ligação com os diferentes continentes (Cunha, 2004).

Através da análise da Figura 3.2, foi visualizado que existe uma intensa densidade de tráfego marítimo no Atlântico Norte e ao verificar-se Portugal, nota-se que fica entre dois importantes pontos críticos de convergência marítima: o Estreito de Gibraltar e o Canal da Mancha Inglês (Nunes et al., 2020; Rodrigue, 2013). Na figura seguinte (Figura 3.3), é possível observar com maior detalhe a densidade de tráfego no ano 2022:

Na Figura 3.3, são visíveis os Esquemas de Separação de Tráfego (EST)³² do Cabo Finisterra (Espanha), do Cabo Roca, e do Cabo São Vicente, além do

³²Os Esquemas de Separação de Tráfego (EST) destinam-se a disciplinar o tráfego marítimo em determinadas zonas com maior densidade de navegação. Na costa portuguesa temos o EST do Cabo da Roca e do Cabo de São Vicente (Instituto Hidrográfico, 2014).

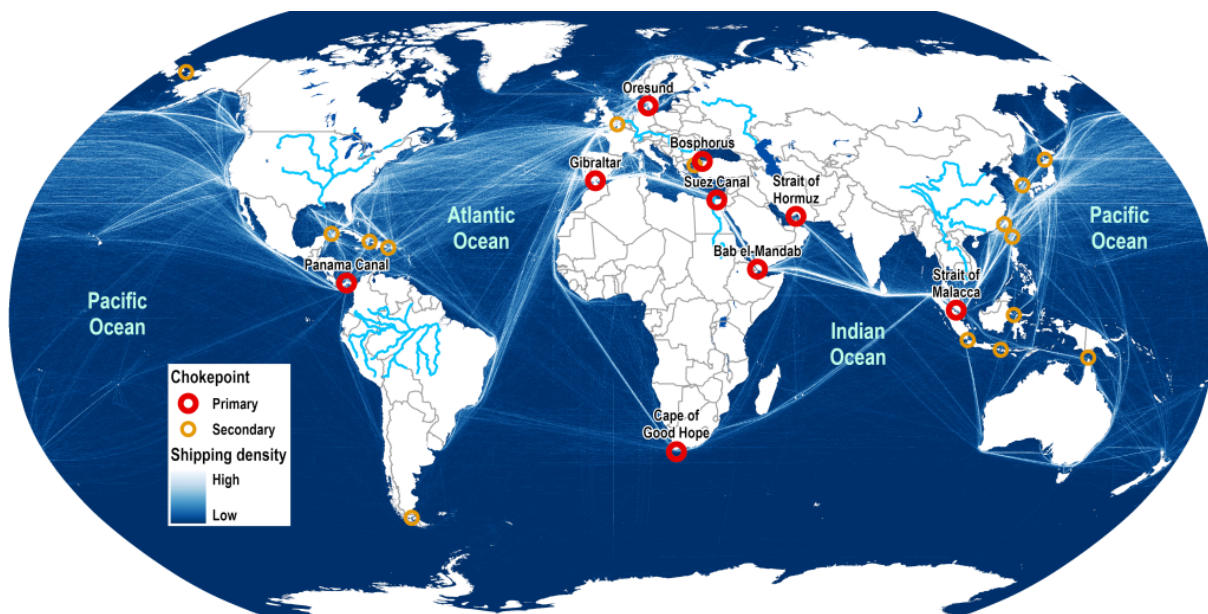


FIGURA 3.2: Densidade do Transporte Marítimo. Fonte: Rodrigue, 2013

chokepoint no estreito de Gibraltar. Estes locais têm um impacto significativo no fluxo de tráfego marítimo na zona. Assegurar a segurança nesta região é essencial, requerendo uma vigilância contínua em tempo real, com os meios apropriados, para um controlo eficaz dessas áreas.

3.2 Extração dos Dados

A primeira etapa deste estudo consistiu na recolha dos dados divulgados pelo CSN relativos ao território português entre os anos 2017-2021, fornecidos pela DCPM, organismo da Direção Geral de Autoridade Marítima (DGAM).

Importa referir que a BD fornecida contém dados de potenciais manchas de poluição identificadas pelo sistema de satélite CSN. As potenciais manchas de poluição são imagens captadas pelo satélite e identificadas pelo serviço como manchas de HC, no entanto, estas requerem confirmação, uma vez que existem por vezes outras substâncias e alguns fenómenos naturais que surgem nas imagens satélite com a aparência de um HC, que podem ser: óleos de peixe, algas, zonas sem vento, pólen e gelo (S. Antunes, 2020).

Quando um possível derrame é captado pelo satélite, as próprias imagens SAR, conforme mencionado no capítulo anterior, embora sejam utilizadas sobretudo para a deteção de navios e monitorização da poluição, não são capazes de identificar

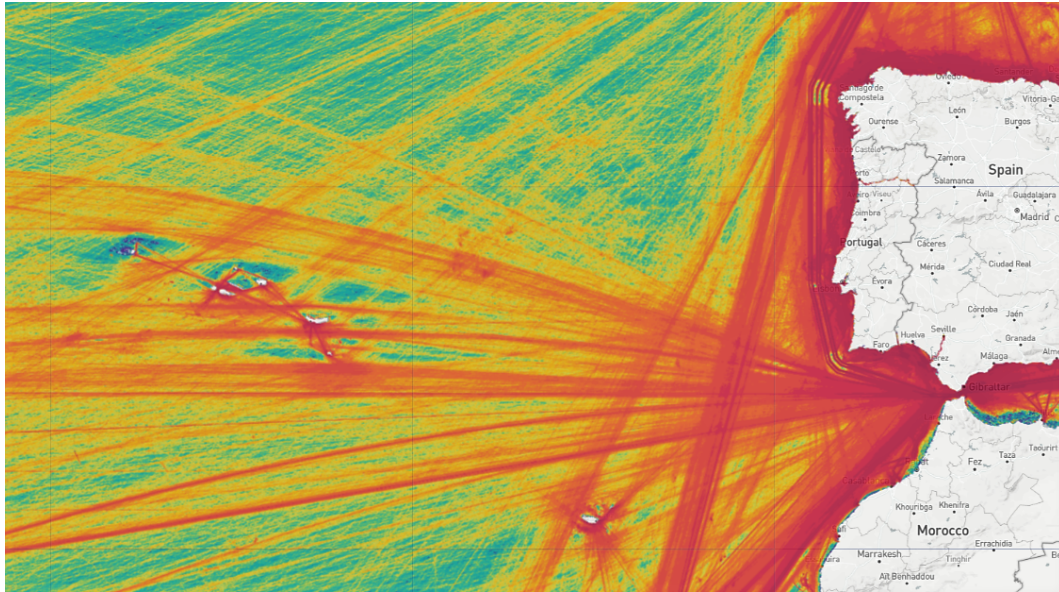


FIGURA 3.3: Densidade de Tráfego Marítimo em Portugal no ano 2022. Fonte: *Marine Traffic* MarineTraffic, 2022

com precisão a natureza de um derrame no mar. Por isso mesmo, após a aquisição da imagem, especialistas avaliam as imagens minuciosamente juntamente com informações complementares, como dados meteorológicos, oceanográficos e de deteção de embarcações (*Automatic Identification System - AIS*)³³, de forma a determinar a probabilidade da existência de poluição na superfície do mar e identificar a sua origem.

Quando a imagem é adquirida por satélite, ela é enviada num relatório de alerta juntamente com os detalhes da possível mancha e alguma informação adicional, como informações de potenciais fontes poluidoras (S. Antunes, 2020). No Anexo II, pode-se observar um exemplo do *CSN Alert Report*, enviado no dia 7 de junho de 2018, localizado em Portugal.

A BD disponibilizada pela DCPM continha a informação organizada em plataforma *Excel* da seguinte maneira (Figura 3.4): Por anos, e em cada ano continha a data, hora, coordenadas geográficas, área (km^2) e comprimento (km). A análise e tratamento dos dados foi efetuada com recurso à linguagem de programação *Python*.

Considerando os fatores mais determinantes no movimento do HC no mar (Barker et al., 2020; Leifer et al., 2012; Sebastiao & Soares, 1995), foi necessário

³³O AIS é uma norma internacional para a troca de informações entre navios e entre navios e terra, incluindo a identidade do navio, a posição, a velocidade, o rumo, o destino e outros dados de interesse para a segurança da navegação e a proteção do transporte marítimo (McFarlane & Sheffi, 2003).

3.2. Extração dos Dados

Data	Hora	Coordenadas geográficas (00°00'00.000 N - 000°00'00.000 W)	Área (km ²)	Comprimento (km)
02/01/2018	18:33:44	38° 58' 06" N 009° 43' 03" W	2,82	10,18
...

FIGURA 3.4: Ilustração da informação contida na BD.

que as variáveis da velocidade do ventos e da corrente fossem extraídas, para melhor compreender e prever o comportamento do HC no mar. Para obter as variáveis de velocidade do vento e da corrente, foi realizada uma extração específica numa região geográfica delimitada e no período de tempo abrangido pela BD do CSN. Essa delimitação foi feita impondo limites com coordenadas geográficas, conforme ilustrado na Figura 3.5. Esta extração foi realizada através do acesso a BD do *Marine Data Store Copernicus*, que é um programa da UE que disponibiliza informações com base em dados satélite e "in situ". Oferecendo um amplo catálogo de produtos com diversas variáveis, permitindo acesso a dados passados, atuais e previsões (Copernicus, s.d.).

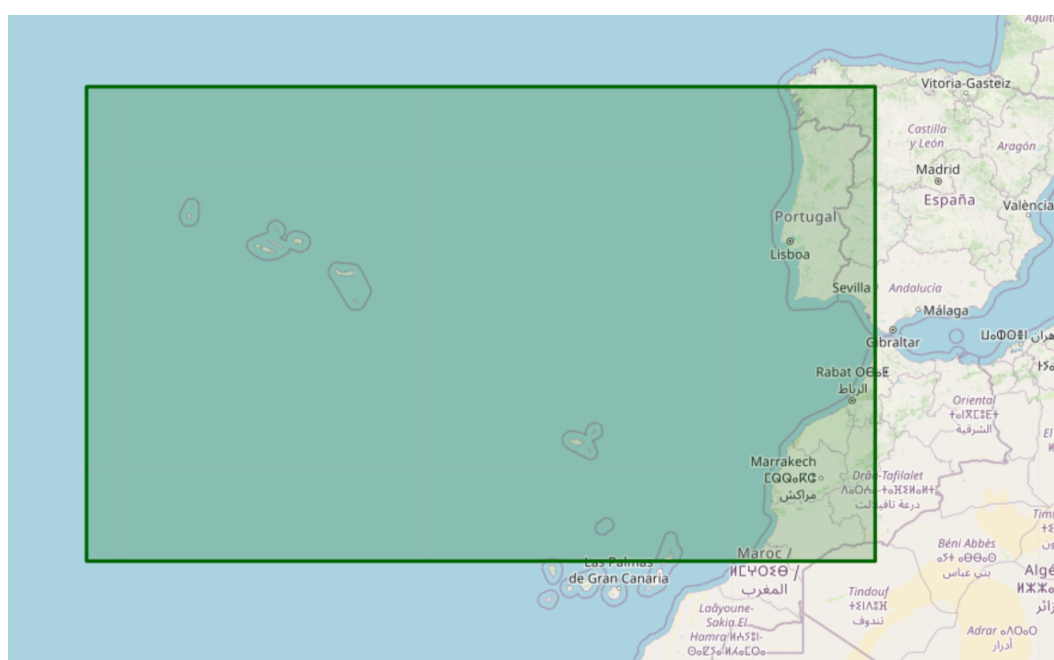


FIGURA 3.5: Caixa representativa dos limites geográficos utilizados para a extração dos dados.

A Figura 3.5 abrange as posições de toda a área dos alertas CSN presentes na BD, permitindo obter o conjunto das variáveis meteorológicas necessárias para a análise. Isto garante que as variáveis obtidas estejam diretamente relacionadas às áreas afetadas pelas possíveis manchas de HC. Os dados obtidos estão no formato

Network Common Data Form, version 4 (NetCDF4)³⁴ que possuem uma dimensão considerável, exigindo assim um processamento significativo.

3.3 Integração dos Dados

Para a integração dos dados, foi realizada uma análise detalhada dos alertas fornecidos pelo CSN ao longo de um período de cinco anos. Esse processo incluiu diversas tarefas e procedimentos necessários para preparar os dados antes de serem descritos de forma mais detalhada posteriormente. O pré-processamento dos dados foi também realizado utilizando a linguagem de programação *Python*.

Já com a extração dos dados meteorológicos concluída, antes de se proceder à explicação mais a fundo todo o processo de leitura, é essencial compreender as variáveis da velocidade do vento e da corrente.

- **Velocidade do Vento:** A velocidade do vento é medida em metros por segundo (*m/s*). Esta variável é repartida entre as variáveis *Eastward Wind* (vento para leste) e *Northward Wind* (vento para norte). A componente *Eastward Wind* mede a intensidade do vento na direção leste, enquanto a componente *Northward Wind* mede a intensidade do vento na direção norte. As expressões `'eastward_wind(time, lat, lon)'` e `'northward_wind(time, lat, lon)'` representam a estrutura e dimensões das variáveis do arquivo NetCDF.

Isso significa que os valores das variáveis são armazenados numa matriz tridimensional, onde a primeira dimensão é o tempo (`'time'`), a segunda dimensão é a latitude (`'lat'`) e a terceira dimensão é a longitude (`'lon'`). Esta estrutura tridimensional permite armazenar e obter os valores do vento em diferentes momentos no tempo e em diferentes localizações geográficas.

- **Velocidade da Corrente:** A velocidade da Corrente possui duas componentes principais: a variável na direção Norte-Sul (`'vo'`) e a variável na direção Este-Oeste (`'uo'`). As variáveis presentes no dicionário *current.variables* do arquivo NetCDF possuem uma estrutura e dimensões específicas que permitem armazenar e acessar informações sobre a corrente oceânica.

³⁴O NetCDF é usado para armazenar dados geográficos multi-dimensionais, como temperatura e velocidade do vento, recolhidos em áreas amplas como continentes. Isso ajuda a gerir eficientemente grandes volumes de dados associados a localizações geográficas específicas. Além disso, facilita a criação, acesso e partilha de dados científicos armazenados em matrizes N-dimensionais, junto com meta-dados descritivos (Hoyer & Hamman, 2017).

Duas dessas variáveis são chamadas de 'vo' e 'uo', representando as componentes meridional e zonal da velocidade da corrente, respectivamente. As variáveis vo e uo são medidas em metros por segundo (m/s) e possuem uma estrutura de quatro dimensões. Essas dimensões são as seguintes: tempo ('time'), profundidade ('depth'), latitude ('latitude') e longitude ('longitude').

A primeira dimensão, 'time', indica diferentes momentos no tempo, permitindo a representação da variação da corrente ao longo do período de observação. A segunda dimensão, 'depth', representa diferentes níveis de profundidade na coluna de água, fornecendo informações sobre a distribuição vertical da corrente. A terceira e quarta dimensão, 'latitude' e 'longitude', engloba diferentes latitudes e longitudes geográficas, permitindo analisar as variações da corrente em diferentes regiões da superfície terrestre.

Esta estrutura de quatro dimensões possibilita o armazenamento e acesso dos valores da velocidade da corrente em diferentes momentos no tempo, em diferentes profundidades, em diferentes latitudes e em diferentes longitudes.

Esta abordagem visa apreender informações precisas relacionadas à velocidade do vento e corrente na região de interesse. Fatores de maior interesse para entender o comportamento e o deslocamento do HC no mar. Estas variáveis desempenham um papel fundamental na avaliação dos potenciais riscos e no planejamento de medidas de resposta eficazes para combater a poluição por HC. Para atingir este propósito, foi desenvolvido um código em linguagem *Python* capaz de extrair automaticamente os dados de um arquivo, levando em consideração a localização e o período definidos na BD. Esta abordagem irá facilitar o uso destes dados no estudo subsequente, facilitando a análise e permitindo uma avaliação mais precisa das informações reunidas.

3.4 Fusão dos Dados

Os dados provenientes dos alertas reportados pelo CSN foram então combinados com os dados de velocidade do vento e da corrente, previamente extraídos e integrados. Esta combinação foi baseada nas mesmas três dimensões: **tempo**, **latitude** e **longitude**, utilizando a técnica de combinação de dados, conhecida como **data merge**, em linguagem *Python* (McKinney, 2012). O **data merge** foi realizado para unir e integrar todos os dados, de forma a obter um conjunto consolidado que incluísse todas as informações necessárias.

Inicialmente, houve necessidade de remover os registos [308, 309] da BD do CSN do *DataFrame*³⁵, uma vez que não correspondiam a nenhuma latitude e longitude presentes nos registos de vento na data de 27/11/2018.

Sendo que as coordenadas podiam não coincidir exatamente no mesmo tempo, latitude e longitude, foi necessário utilizar um algoritmo robusto que encontrasse os pontos do vizinho mais próximo, foi então utilizado o *KD-Tree* utilizando a distância Euclidiana³⁶, sendo o *KD-Tree* uma estrutura de dados que organiza pontos em espaços de múltiplas dimensões, sendo eficiente para realizar buscas do vizinho mais próximo em conjuntos de dados multi-dimensionais (Maneewongvatana & Mount, 1999).

A construção de uma *KD-Tree* envolve a divisão do espaço por hiperplanos ortogonais aos eixos dimensionais, garantindo subconjuntos equilibrados em tamanho ao dividir os pontos ao longo do eixo com maior dispersão (Bentley, 1975; Maneewongvatana & Mount, 1999). Após a combinação dos dados, eles foram compactados, onde ficaram disponíveis num ficheiro CSV com o nome `'data_anonimize'`. No entanto, foi retirada à BD do CSN a hora e data completa, para preservar informações confidenciais. Apenas o ano será partilhado na aplicação *online*, para estabelecer a ordem dos alertas dentro de cada mês, onde foi adicionado um contador mensal denominado de `'monthly_reg_order'`.

3.5 Criação de Variáveis

Após compilar todos os dados necessários no *DataFrame* `'data_anonimize'`, foi necessário criar novas variáveis que seriam aplicadas mais, nomeadamente o `'width'` (Largura) e o `'ratio'` (rácio). A variável `'width'` é calculada com base nos valores das colunas Área (`'area'`) e Comprimento (`'length'`) presentes na BD original, e representa a largura das áreas de derrame de HC. O cálculo foi realizado utilizando a fórmula da Elipse, de acordo com o descrito na Equação 2.2, e é dada por:

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) WL \Leftrightarrow W = \frac{4A}{\pi L} \quad (3.1)$$

³⁵O *DataFrame* é uma estrutura de dados tabular, orientada por colunas, com rótulos de linhas e colunas (McKinney, 2012).

³⁶A Distância Euclidiana é amplamente conhecido e utilizado para calcular a distância entre dois pontos (ArcGIS, s.d.).

3.5. Criação de Variáveis

onde W é a variável 'width', L o Comprimento ('length') e A a Área ('area'). Para cada dado no ficheiro, a largura é calculada e adicionada numa nova coluna chamada 'width' no *DataFrame* 'data_anonimize'. A largura fornece informações adicionais sobre a forma e o tamanho das áreas de derrame de HC, permitindo compreender sua extensão em relação ao comprimento.

Para fazer isso, foi criada uma variável chamada **ratio**, que considera a área e o comprimento do derramamento de HC. O objetivo é medir o quão eficientemente o derramamento se espalha em comparação com a dispersão ideal, onde a área seria igualmente distribuída em todas as direções, como uma esfera.

Além disso, foi criada a variável 'ratio', a qual foi calculada considerando a área e o comprimento do derrame de HC. O 'ratio' foi calculado para medir a relação entre a área real do derrame e a área que seria esperada caso esse derrame se dispersasse de forma elíptica. A variável 'ratio' é útil para avaliar o quanto o derrame se espalha em comparação com a dispersão ideal, onde a área seria igualmente distribuída em todas as direções, como uma esfera. Mas também pode ser utilizada para determinar a velocidade da embarcação que poderá ter sido a responsável pelo derrame.

Na Tabela 3.1 adiante, é possível observar uma amostra de todas as variáveis acabadas de referir, contidas no ficheiro CSV. 'data_anonimize'.

TABELA 3.1: Organização das variáveis presentes no DataFrame 'data_anonimize'.

year	registry_nr	coordinates		area	length
2017	91	38°50'56"N	030°29'57"W	0.65	2.39
2017	92	32°52'30"N	017°20'48"W	0.48	4.43
2017	93	37°51'03"N	009°28'52"W	1.38	4.85
2017	94	37°09'43"N	009°41'05"W	4.42	5.76

n_wind	e_wind	n_current_vo	n_current_uo
8	0.91	-0.077	0.08
-1.51	-2.92	0.164	0.016
-1.61	3.78	- 0.012	0.058
-4.58	4.38	0.036	- 0.004

monthly_reg_order	lat	lon	ratio	width
13	38.8489	-30.4992	0.145	0.3462785372710694
14	32.875	-17.3467	0.031	0.13795823509545782
15	37.8508	-9.4811	0.075	0.36228259211021124
16	37.1619	-9.6847	0.17	0.9770345117585797

3.6 Simulação do Deslocamento dos Derrames de Alerta *CleanSeaNet*

Nesta secção, temos como objetivo simular o deslocamento hipotético dos derrames da BD do CSN, recorrendo à aplicação da equação da velocidade advectiva. Isto será feito com base nos dados já extraídos relativos às velocidades dos ventos e das correntes marítimas. Através desta simulação, pretendemos avaliar a trajetória provável dos derrames, e adquirir uma compreensão geral das direções que os derrames poderiam seguir, conforme discutido no capítulo onde abordámos as características das correntes marítimas e dos ventos predominantes em Portugal.

3.6.1 Conversões e Ajustes nas Unidades:

Para que as informações fossem coerentes, foi necessário que as variáveis do vento e das correntes marítimas estivessem todas com as mesmas unidades de medida, para o caso em graus por segundo.

Neste caso, realizámos uma projecção de coordenadas para 1 hora e 2 horas após a hora referida no relatório de alerta CSN. Para uma melhor análise do mapa gerado, dividimo-lo entre Portugal Continental (Figura 3.6 e as Ilhas (Figuras 3.7 e 3.8)). Cada trajetória é representada por cores para distinguir os diferentes segmentos de tempo e direção do possível derrame. A cor vermelha corresponde à linha de tempo após 1 hora desde a aquisição da imagem pelo satélite, e a cor azul corresponde à linha de tempo a partir da 1 hora até às 2 horas.

A partir da análise dos mapas gerados, foram confirmadas direções predominantes para os potenciais derrames dos alertas CSN, onde, de seguida serão apresentadas as conclusões obtidas:

- Em Portugal Continental, os resultados confirmam-se, em grande parte, as direções associadas aos ventos dominantes, que geralmente sopram entre norte e oeste. Como resultado, os derrames tendem a ser deslocados seguindo essa direção, salvo algumas exceções, entre o setor sul e este. Além disso, as correntes marítimas também tendem a apresentar um fluxo médio em direção ao sul na superfície. No entanto, importa referir que na Figura 3.6, entre as latitudes 39° e 40° são apresentadas diferentes trajetórias, bem como a sul de Portugal Continental que podem variar devido à influência das águas provenientes do Mediterrâneo, que se dirigem tanto para o sul do território continental português (Noroeste) quanto para a costa africana (Sudoeste).

- Nas ilhas dos Açores e da Madeira, as direções predominantes dos derrames revelam uma tendência leste-oeste. Essa inclinação é possivelmente resultado da influência exercida pelo Anticiclone dos Açores.

No próximo capítulo, iremos abordar os veículos não tripulados utilizados na proposta da Rede Nacional. Onde serão discutidas as suas principais características. Posteriormente, será feita uma avaliação e combinação dos possíveis locais estratégicas para a implementação dos veículos não tripulados na rede nacional.

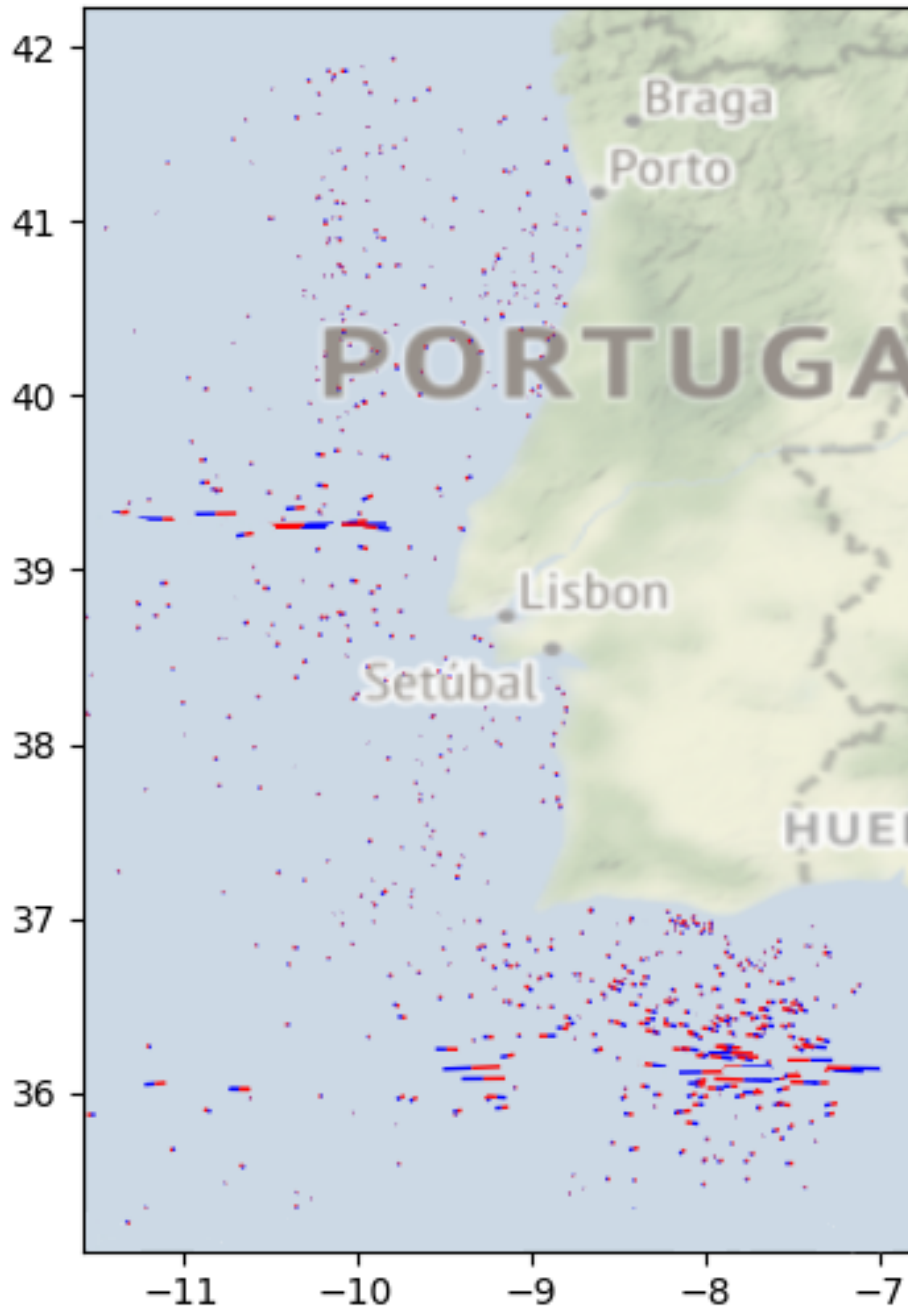


FIGURA 3.6: Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN em Portugal Continental

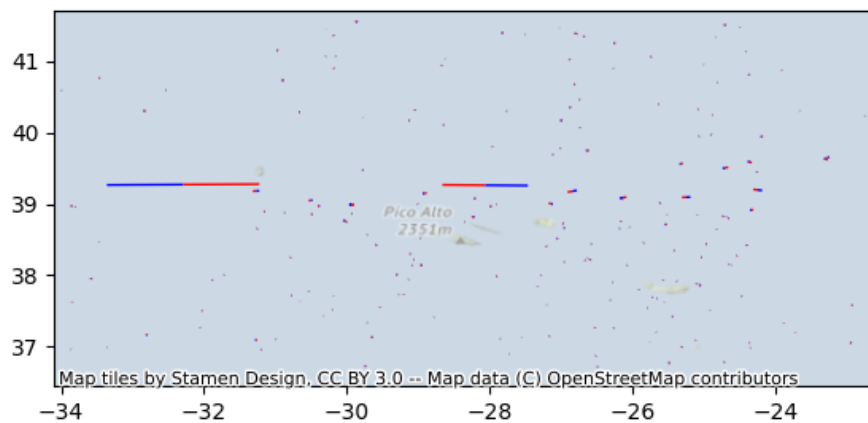


FIGURA 3.7: Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN nas Ilhas dos Açores

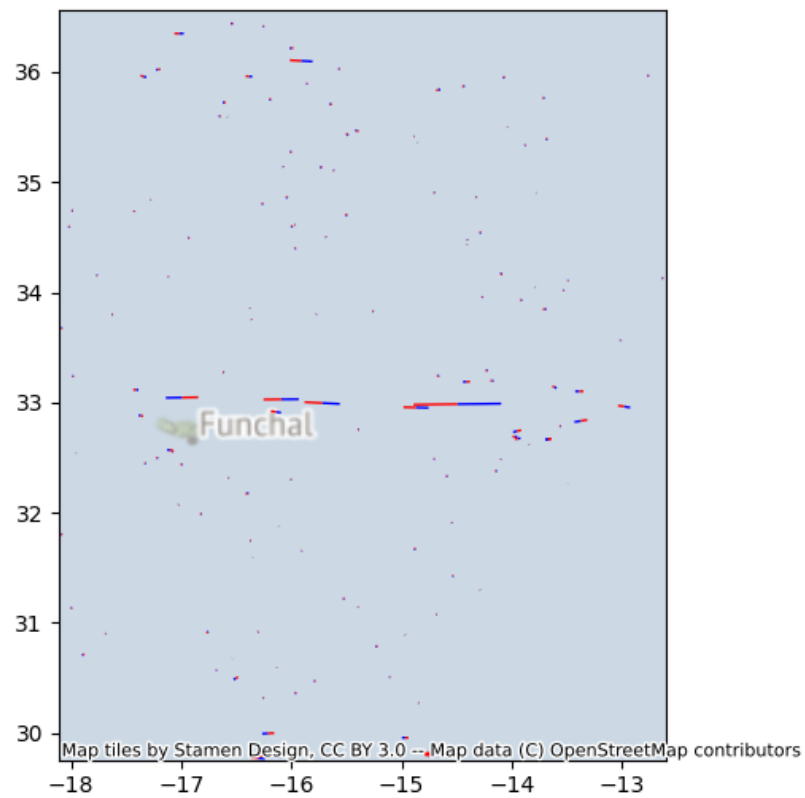


FIGURA 3.8: Simulação possível do deslocamento dos derrames de Alerta CSN nas Ilhas da Madeira

Capítulo 4

Rede Nacional de Veículos Não Tripulados

Este capítulo tem como objetivo apresentar os veículos não tripulados utilizados na criação da Rede Nacional. Serão discutidas as suas principais características, destacando as suas capacidades e funcionalidades específicas. Além disso, será abordada a identificação e avaliação de locais estratégicos em Portugal Continental e Ilhas para a possível implementação desses veículos não tripulados.

Por último, será explorada então a criação da rede nacional, no qual combinámos as características dos veículos não tripulados com os locais estratégicos previamente identificados.

4.1 Silver Marlin

O *Silver Marlin* é um VSNT desenvolvido pela empresa Israelita *Elbit Systems* (Pastore & Kessel, 2009). Foi projetado para missões de patrulhamento marítimo, vigilância e reconhecimento, que utiliza vários sensores e sistemas de armas. Algumas das suas aplicações típicas são a proteção de forças e antiterrorismo e missões de SAR, varredura de minas, avaliação de poluição e reconhecimento (AHMED, s.d.).

O VSNT tem aproximadamente 10,6 metros de comprimento e pesa quatro toneladas (4000 kg), das quais 2,5 toneladas correspondem à sua capacidade de carga útil. O equipamento conta com sensores eletro-óticos que auxiliam na deteção e prevenção de obstáculos. Em relação ao armamento, o VSNT dispõe de uma estação de armas estabilizada controlada remotamente de 7,62 mm. Este veículo é propulsionado por meio de dois motores a diesel, cada um com 315 CV capazes de

chegar à velocidade máxima de 45 nós (83 km/h), além de que tem uma autonomia de 24 a 36 horas e um alcance de até 500 MN (926 km) (Heo et al., 2017).



FIGURA 4.1: Silver Marlin. Fonte: Ruslan Zhir, s.d.

O *Silver Marlin* pode ser monitorizado tanto da costa como de embarcações navais, graças ao seu sistema de controlo operacional de missão comum, que é conectado por meio de comunicação por satélite. Esse sistema permite, o controle remoto do veículo em simultâneo com VANTs, oferecendo uma ampla gama de possibilidades para as operações navais (Heo et al., 2017).

As razões para a seleção do *Silver Marlin*, foi pela autonomia que apresenta e pela sua capacidade de atuar como um excelente sistema de deteção e tratamento em cenários de poluição marítima. Com a sua tecnologia avançada, pode também ser utilizado como uma plataforma flexível e eficiente para a operação em cenários de combate a incêndios (TELEFUNKEN RACOMS, 2012) e com capacidade de atuar em conjunto com VANTs.

Face a todas as características e vantagens apresentadas, e considerando os objetivos deste capítulo, o *Silver Marlin* foi o VSNT selecionado mais apropriado para servir como modelo para a execução da rede nacional. Com a sua autonomia, alcance e velocidade, o *Silver Marlin* está preparado para realizar missões complexas com grande eficiência e precisão. Além do mais que dispõe de uma vantagem fulcral para este estudo, a sua capacidade de detetar e combater poluição marítima.

4.2 Tekever AR5

O AR5 é um VANT de asa fixa dos mais avançados na indústria da vigilância marítima. Foi desenvolvido pela *Tekever*, empresa de tecnologia situada em Portugal, especializada no desenvolvimento de sistemas autónomos. Em 2017, foi anunciado que o seu sistema aéreo não tripulado AR5 tinha sido o eleito pela EMSA

para atuar como o primeiro sistema europeu de vigilância marítima e monitorização do meio ambiente (Csernatoni, 2018).



FIGURA 4.2: Veículo Aéreo Não Tripulado da Tekever AR5. Fonte: MarineLink, 2020

O AR5 da *Tekever* é um sistema projetado para missões de vigilância marítima, SAR, vigilância em áreas amplas, monitorização de poluição, inspeção de pescas e missões de retransmissão de comunicações. O AR5 tem uma tecnologia avançada que pode processar dados de diferentes sensores, como radar, AIS e sistemas EO/IR (Bauk et al., 2020). Também é equipado com câmaras altamente precisas e equipamentos de vídeos, os dados são coletados em tempo real pelos sensores e câmaras e retransmitidos para a estação de controle para análise posterior. Com a capacidade de detetar vários padrões sensoriais, o AR5 pode realizar vigilância autónoma de grandes áreas terrestres e marítimas. Permitindo uma visão completa da situação, independentemente das condições de luminosidade. Estes sistemas são capazes de capturar imagens de longo alcance e estabilizá-las, normalmente são usados em aeronaves ou veículos para identificar e avaliar ameaças à distância e em condições ambientais difíceis.

Uma das vantagens mais significativas do AR5 é sua autonomia, que pode durar até 20 horas, dependendo obviamente do tipo de missão, carga que transporta e das condições de voo. O que significa que o sistema pode cobrir grandes distâncias e áreas por períodos prolongados, fornecendo capacidades de vigilância aprimoradas às autoridades marítimas. O AR5 tem uma velocidade de cruzeiro de 100 km/h, com 7,3 m de largura e comprimento de 4 m e capacidade de carga útil disponível

de até 50 kg. O seu alcance operacional de 1.000 km (621 milhas e 540 MN), o que o torna particularmente útil para missões oceânicas de longo alcance ou em áreas terrestres vastas e remotas, como desertos e áreas selvagens (Tekever, 2011).

Sendo o primeiro sistema europeu de vigilância marítima, o AR5 oferece capacidades avançadas tanto para a monitorização de grandes áreas como para missões próximas de costa. Algumas das suas principais aplicações incluem (Bauk et al., 2020):

- Vigilância autónoma de grandes áreas terrestres e marítimas;
- Capacidade para detetar derrames de HC;
- Apoio a várias missões, como proteção de fronteiras, monitorização de incêndios e infraestruturas;
- Operações de SAR;
- Missões de controle de tráfego marítimo e combate à pirataria;
- Apoio à pesca.

A seleção do VANT AR5 foi um processo relativamente mais simples do que a do VSNT. Isto deveu-se, em parte, ao facto de ser utilizado pela EMSA para vigilância marítima, incluindo a deteção de óleo no mar e por também por ser desenvolvido pela empresa portuguesa *Tekever*.

Em resumo, o AR5 é uma tecnologia inovadora na indústria de vigilância marítima. As suas capacidades avançadas e maior autonomia tornam-no num recurso valioso para as autoridades marítimas de modo a garantir a segurança dos seus oceanos. A transmissão em tempo real dos fluxos de dados dos sensores, a capacidade de voo autónomo e as características de deteção de alvos tornam-no uma ferramenta altamente eficiente e eficaz em várias missões.

4.3 Identificação e Avaliação de Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de Veículos Não Tripulados

Antes de estabelecer a rede nacional de veículos não tripulados em Portugal, é necessário identificar e avaliar possíveis locais estratégicos, tendo em consideração fatores como infraestruturas, segurança, potenciais aplicações e restrições. Apesar de Portugal já desenvolver com empresas locais, veículos não tripulados, é necessário

continuar a modernizar e expandir este setor, especialmente para fortalecer as FFAA (Ministério da Defesa Nacional, 2020). Embora os custos de implementação desta tecnologia possam ser mais altos numa fase inicial de aquisição de veículos, construção de infraestrutura e especializações dos operadores, a longo prazo poderemos otimizar mais os recursos e alcançar uma maior eficiência.

Em Portugal, já dispomos de algumas empresas dedicadas a este campo, como *UAVISION*³⁷. Nas FFAA portuguesas também já dispomos de desenvolvimento de veículos não tripulados (U. Porto, 2011). Especificamente na Marinha Portuguesa, está localizado nas instalações Navais de Tróia, o Centro de Experimentação Operacional da Marinha (CEOM), da Célula de Experimentação Operacional de Veículos não tripulados (CEOV) (T. Dias, 2018). O CEOM tem como objetivo impulsionar o avanço tecnológico focado no oceano, particularmente em sistemas não tripulados. Este centro desempenha um papel importante para organizações internacionais, como a NATO, com as quais Portugal colabora.

Para determinar a cobertura de cada local, foram avaliados os requisitos técnicos necessários para a operação bem-sucedida dos veículos não tripulados em diferentes aspetos, como autonomia de voo, alcance, capacidade de carga, resistência a condições climáticas adversas, entre outros (Tabela 4.1).

Os resultados desta análise revelaram a identificação de diversos locais estratégicos em Portugal Continental e ilhas para a implementação de veículos não tripulados. Cada local possui características únicas que o tornam adequado para um determinado setor de aplicação. Esses locais para Portugal Continental foram selecionados e divididos geograficamente, abrangendo as regiões norte, centro e sul (Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4).

A identificação e avaliação de locais estratégicos foram passos fundamentais na proposta da rede nacional, otimizando ao máximo o uso dos veículos. Isto levou à identificação de locais estratégicos para veículos não tripulados, maximizando a cobertura em Portugal e no território marítimo. Estes locais estratégicos poderão impulsionar a inovação no país e otimizar a eficiência das operações, contribuindo também para o desenvolvimento sustentável em Portugal.

³⁷A *UAVision Aeronautics* é uma empresa portuguesa com mais de 15 anos de experiência no desenvolvimento de VANTs. Eles fornecem VANTs em diversos países, onde colaboram com a UE e as FFAA portuguesas (UAVISION, s.d.).

Superfície - <i>Silver Marlin</i>	Aéreo - AR5
 <p>Velocidade cruzeiro de 45 nós</p> <p>Autonomia de 24 - 36 horas</p> <p>Carga útil: 2500 kg</p> <p>Alcance de até 500 MN (926 km)</p>	 <p>Velocidade cruzeiro de 100 km/h</p> <p>Autonomia de 20 horas</p> <p>Carga útil: até 50 kg</p> <p>Alcance de até 1000 km (621 milhas e 540 MN)</p>

TABELA 4.1: Tabela Síntese dos Veículos Não-Tripulados *Silver Marlin* e AR5.

4.4 Criação da Rede Nacional: Combinação entre os Veículos Não Tripulados com os Locais Estratégicos

Neste momento, já temos as informações sobre os locais estratégicos em Portugal Continental, bem como as características e capacidades de cada veículo não tripulado. Para o demonstrar, desenvolvemos em *Python* uma combinação eficiente desses dados para mapeá-los visualmente e obter a cobertura e o alcance dos veículos não tripulados em relação aos locais estratégicos.

Para os dados de entrada, utilizámos as coordenadas do centro do círculo (local estratégico), o raio do círculo em quilómetros e a cor desejada para a representação de cada veículo. Esta função utiliza a fórmula de *Haversine*³⁸ para converter o raio de quilómetros para graus de longitude e latitude.

O resultado final foi um mapa interativo, semelhante ao representado na Figura 4.3, que ilustra a cobertura e o alcance dos veículos não tripulados em relação

³⁸A fórmula de *Haversine* é um método utilizado para calcular a distância entre dois pontos diferentes (Winarno et al., 2017).

4.4. Criação da Rede Nacional: Combinação entre os Veículos Não Tripulados com os Locais Estratégicos

Pista	Local	Coordenadas
Aeródromo de Espinho	Norte	40°58'25"N - 008°38'40"W
Base Aérea nº8 - Ovar	Norte	40°54'95"N - 008°38'76"W
Aeródromo da Maia	Norte	41°16'45" N - 008°31'02"W
Tekever - Ponte de sôr	Centro	39°12'42"N - 008°03'28"W
Base Aérea nº1 - Sintra	Centro	38°50'26"N - 009°20'37"W
Tróia - CEOM	Centro	38°28'31"N - 008°52'15"W
Base Aérea nº6 - Montijo	Centro	38°42'30"N - 009°02'25"W
Aeródromo de Portimão	Sul	37°08'58"N - 008°35'02"W
Pista de Lagos	Sul	37°07'19"N - 008°40'44"W

TABELA 4.2: Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de VANT

Porto	Local	Coordenadas
Porto de Leixões	Norte	41°10'42"N - 008°42'18"W
Figueira da Foz	Norte	40°08'50"N - 008°51'35"W
Cascais	Centro	38°41'37"N - 009°24'53"W
Oeiras	Centro	38°40'35"N - 009°19'02"W
Sesimbra	Centro	38°26'26"N - 009°06'37"W
Alfeite - CEOV	Centro	38°40'23"N - 009°08'46"W
Sines	Sul	37°56'43"N - 008°53'17"W
Portimão	Sul	37°07'04"N - 008°31'35"W
Albufeira	Sul	37°04'57"N - 008°15'37"W
Vilamoura	Sul	37°04'24"N - 008°07'19"W

TABELA 4.3: Locais Estratégicos em Portugal Continental para a Implementação de VSNT

aos locais estratégicos. Os círculos representam as áreas de atuação dos veículos não tripulados, destacando a sua capacidade de monitorização e resposta em cada região.

Esta ferramenta de visualização desempenhou um papel fundamental na criação da rede nacional, permitindo uma visualização eficiente combinação entre os veículos não tripulados e os locais estratégico. No capítulo seguinte, serão apresentados os resultados de toda a investigação, detalhando o desenvolvimento da aplicação *online*. Além disso, serão mapeados os incêndios ocorridos em 2021 e 2022, assim como as operações SAR em Portugal, para evidenciar a aplicabilidade da rede nacional em diversos cenários. O capítulo será concluído, com uma análise SWOT para avaliar todo este projeto, o que contribuirá para as conclusões finais deste trabalho e melhorias para o futuro.

Local	Coordenadas		Tipo
Aeroporto João Paulo II	37°44'32"N	025°41'56"W	VANT
Aeroporto do Funchal	32°41'41"N	016°46'36"W	VANT
Porto do Funchal	32°38'43"N	016°54'29"W	VSNT
Porto de Ponta Delgada	37°44'33"N	025°40'13"W	VSNT
Porto das Lajes	39°25'40"N	031°10'37"W	VSNT

TABELA 4.4: Locais Estratégicos nas Ilhas para a Implementação de Veículos Não Tripulados

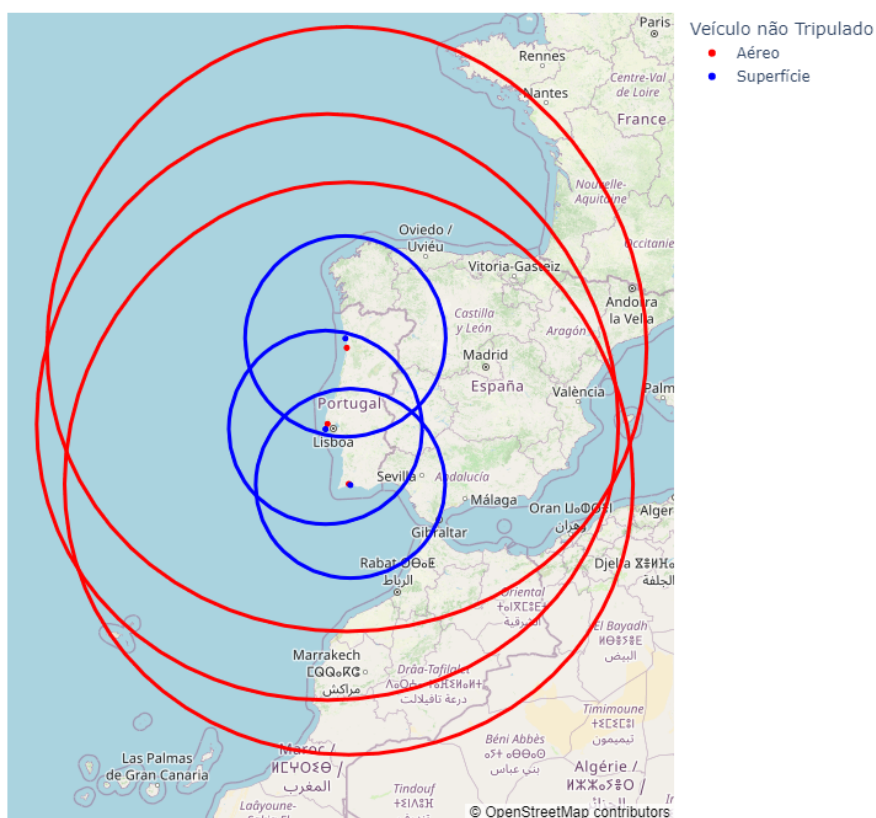


FIGURA 4.3: Alcance em Portugal Continental dos Veículos Não Tripulados.

Capítulo 5

Apresentação dos Resultados e Análise SWOT

Neste capítulo, será apresentada uma matriz SWOT que tem como objetivo identificar e avaliar os pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças de uma determinada situação ou projeto (Panagiotou, 2003). Para auxiliar na elaboração da matriz SWOT, será apresentada uma aplicação *online* desenvolvida com base nos dados dos alertas de poluição CSN para a ZEE portuguesa nos veículos não tripulados.

Posteriormente, será demonstrada a análise realizada às bases de dados dos Incêndios ocorridos em Portugal Continental em 2021 e 2022 e as operações SAR na ZEE portuguesa entre 2013-2021. Esta análise servirá de complemento para demonstrar a possível aplicabilidade da rede nacional em diferentes cenários.

Por fim, e com base em toda a informação recolhida com este estudo, será apresentada a análise SWOT. Com o objetivo de identificar características que poderão ajudar o futuro desenvolvimento da rede nacional de veículos não tripulados.

5.1 Desenvolvimento da Aplicação *online*

Para facilitar a visualização e análise dos dados dos alertas CSN entre 2017 e 2021, foi criada uma aplicação interativa *online* para aceder a todos os resultados. Esta aplicação para além de ser de fácil acesso, irá contribuir para uma melhor compreensão dos dados. De seguida será explicado como o aplicativo foi criado e o que pode ser visualizado nele.

O aplicativo foi construído usando uma biblioteca do *Python* designada de *Dash*, que permite criar aplicativos *online*. Ele é executado usando um servidor

web embutido e fornecido pela biblioteca. O aplicativo possui uma estrutura de separadores ('Tabs'), cada uma expondo as seguintes funcionalidades:

- A primeira 'Tab' chamada 'Map' (Mapa), apresenta um mapa interativo com pontos que representam os alertas CSN. É possível escolher entre exibir os pontos com base na área do derrame ou na razão entre a área real e a área assumindo que o derrame é uma elipse (Figura 5.1). Além disso, é possível selecionar um intervalo de meses e anos para exibir apenas os alertas ocorridos nesse período;

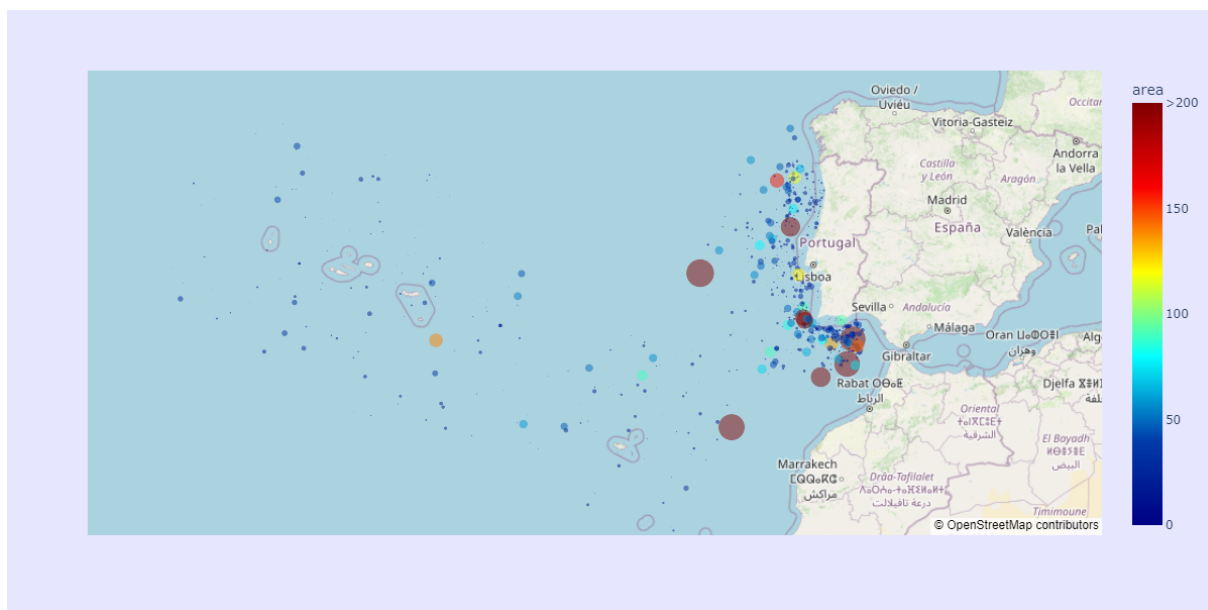


FIGURA 5.1: Análise do mapa com os Alertas CSN na Aplicação Online, baseado na Área.

- A segunda 'Tab', determinada como '*Table of selected data*' (Tabela dos dados selecionados), exibe uma tabela com os dados dos alertas CSN selecionados de acordo com o intervalo de tempo escolhido na 'Tab' anterior. A tabela é atualizada automaticamente conforme as seleções feitas no mapa, pois o aplicativo é executado em modo 'debug', utilizando o parâmetro 'debug=True' fornecido à função 'run_server()'. Ou seja, isto permite fazer alterações e ver os resultados imediatamente, sem a necessidade de reiniciar o servidor;
- A terceira 'Tab', determinada como 'Stations' (Estações), exibe uma tabela com as possíveis estações para os veículos não-tripulados, apresentadas no capítulo anterior. É possível ainda, selecionar individualmente as estações desejadas na tabela e visualizá-las no mapa.

Conclusões da visualização do Mapa dos Alertas *CleanSea-Net*:

Para obter outra perspectiva, realizámos uma diferente análise dos alertas CSN, os quais estão representados como pontos, conforme apresentado na Figura 5.2. A partir desta análise, apresentaremos algumas conclusões resultantes da avaliação estatística dos alertas CSN.

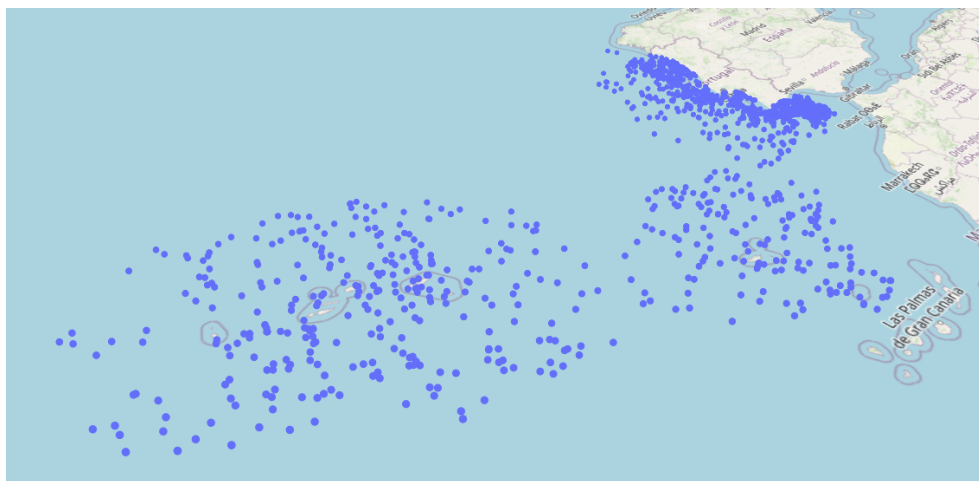


FIGURA 5.2: Análise do mapa com os Alertas CSN, onde as coordenadas das possíveis ocorrências de derrames de HC são indicadas por pontos.

A análise dos mapas revelou conclusões importantes sobre a ocorrência dos possíveis derrames de HC ao longo da costa portuguesa. Um padrão evidente é a concentração significativa de ocorrências no sul do país. Essa observação pode ser atribuída principalmente à localização do sul de Portugal próximo a rotas marítimas intensas. A proximidade dessas rotas aumenta a probabilidade de episódios de derramamento de petróleo nessa região (Rodrigue, 2013).

Além disso, destaca-se um número significativo de ocorrências próximas às ilhas dos Açores e da Madeira. Essas ilhas são parte da região da Macaronésia (Figura 5.3) (Andrade & Robertson, 2010), um destino turístico popular que atrai um grande fluxo de tráfego marítimo. Esse aumento no tráfego marítimo, por sua vez, aumenta a probabilidade de ocorrência de derrames de petróleo ao redor dessas ilhas. Esta ligação entre turismo e tráfego marítimo destaca a importância de monitorizar e implementar medidas preventivas também nessas regiões.

Entre as ilhas dos Açores e da Madeira, os Açores destacam-se pelo maior número de ocorrências registadas. Isso deve-se em grande parte ao facto de ser a

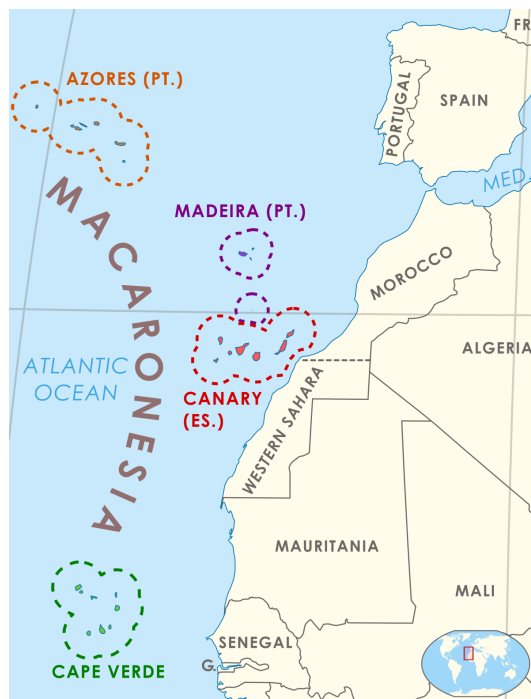


FIGURA 5.3: Região da Macaronésia. Fonte: Arnold Platon, s.d.

ilha mais distante das outras ilhas atlânticas, que acaba por ser aproveitada como ponto de atracação para viagens transatlânticas (Andrade & Robertson, 2010).

Outro fator relevante e que requer monitorização contínua, é a prática de lavagem de tanques (J. A. Dias, 2003; Neves, 2015). Muitos navios aproveitam as áreas de alto tráfego marítimo para descartar as suas águas contaminadas por HC diretamente no oceano. Esse comportamento é observado também na ZEE portuguesa, com vários casos relatados (J. A. Dias, 2003). A lavagem de tanques emerge como um dos fatores explicativos para essas ocorrências e exige ações efetivas para controlar e prevenir tais práticas prejudiciais ao meio ambiente.

Estas conclusões, obtidas por meio da análise do mapa, fornece um panorama claro sobre as áreas mais afetadas pelos alertas de possíveis derrames de HC, ao longo da costa portuguesa.

5.1.1 Proposta da Rede Nacional

Após realizar uma análise com as características e os locais estratégicos para os veículos não tripulados, foi determinada a quantidade necessária de veículos não tripulados para cobrir ao máximo o território português. Tendo como critérios, as características dos veículos, como a velocidade e autonomia. Por essa razão, de

seguida será apresentada a proposta final da rede nacional de veículos não tripulados e identificado quantos veículos seriam ideais adquirir para alcançar a máxima cobertura possível (Figura 5.4).

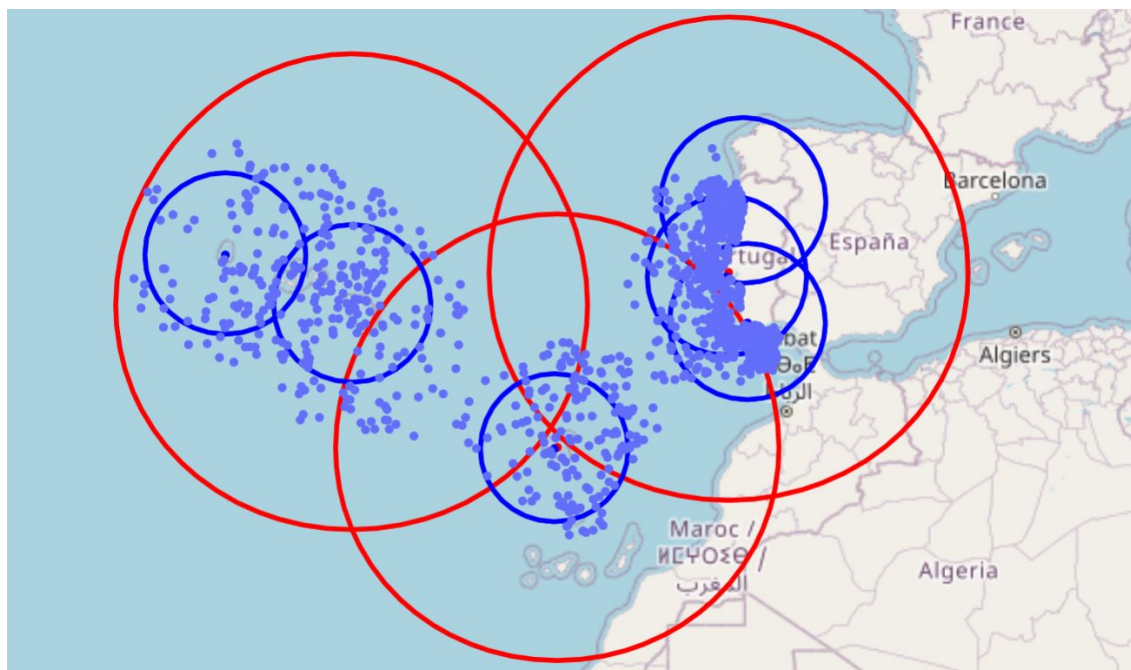


FIGURA 5.4: Áreas cobertas baseada nas características dos Veículos não tripulados.

Conforme demonstrado na Tabela 5.1 e Figura 5.4, a estratégia ideal seria aplicar um VANT no continente e um em cada ilha, assegurando uma cobertura completa da ZEE portuguesa e de todo o território terrestre.

Em relação aos VSNTs, devido ao tráfego marítimo intenso ao longo de toda a costa continental portuguesa, optou-se por posicionar três VSNTs no continente: no norte, no centro e no sul. Nas ilhas, a proposta conta com um VSNT nas ilhas da Madeira e dois nas ilhas dos Açores, a fim de cobrir o máximo de território marítimo.

TABELA 5.1: Possíveis locais para bases de VANT e VSNT.

Local	Coordenadas		Tipo
Base Aérea n.º 1 - Sintra	38°50'26"N	009°20'37"W	VANT
Aeroporto João Paulo II	37°44'32"N	025°41'56"W	VANT
Aeroporto do Funchal	32°41'41"N	016°46'36"W	VANT
Porto de Cascais	38°41'37"N	009°24'53"W	VSNT
Porto de Portimão	37°07'04"N	008°31'35"W	VSNT
Porto de Leixões	41°10'42"N	008°42'18"W	VSNT
Porto do Funchal	32°38'43"N	016°54'29"W	VSNT
Porto de Ponta Delgada	37°44'33"N	025°40'13"W	VSNT
Porto das Lajes	39°25'40"N	031°10'37"W	VSNT

De destacar, que apesar dos VSNTs possuírem um alcance menor em comparação com os VANTs, os VSNTs apresentam uma vantagem única em relação aos VANTs: a sua capacidade de realizar operações de limpeza de derrames de HC.

Embora esta proposta seja uma análise preliminar fundamentada nas características dos veículos não tripulados e nos alertas CSN, cria oportunidade para estudos futuros que poderão abranger elementos adicionais. Entre esses elementos, destacam-se uma análise dos custos financeiros relacionados à implementação deste projeto a nível nacional, bem como a realização de testes práticos com os próprios veículos não tripulados nos diferentes locais estratégicos.

5.1.2 Mapeamento dos Incêndios e Operações SAR em Portugal

Com o objetivo de explorar o potencial dos veículos não tripulados em diversas aplicações, foi realizada uma análise abrangente aproveitando duas BD relacionadas com os incêndios em Portugal Continental e eventos SAR na ZEE portuguesa. Esta análise foi obtida a partir do uso de linguagem *Python*, criando mapas de dispersão.

Os incêndios florestais anualmente causam perdas consideráveis de hectares de áreas florestais nos países do sul da Europa, resultando em danos de ordem social, ambiental e económica significativos (Ribeiro, 2021). Para enfrentar este desafio e mitigar os impactos, é essencial procurar soluções preventivas, como a implementação de vigilância em áreas mais suscetíveis a incêndios, por meio da proposta da rede nacional de veículos não tripulados.

Esta iniciativa poderia transformar-se numa aliada de grande valor para os profissionais envolvidos, especialmente durante os períodos de calor intenso, quando uma vigilância completa por vezes se torna inviável. Além disso, apresentaria uma vantagem de duplo investimento, já que o VANT não só monitorizava na deteção de incêndios, mas também fortalecia a capacidade de monitorização das operações na ZEE portuguesa.

Para mapear os locais e a dispersão dos incêndios ocorridos em 2021 e 2022, foi desenvolvido um mapa interativo em *Python*, presente na Figura 5.5. Neste mapa, foi definida uma legenda para identificar as diferentes causas de incêndio, cada uma representada por cores específicas.

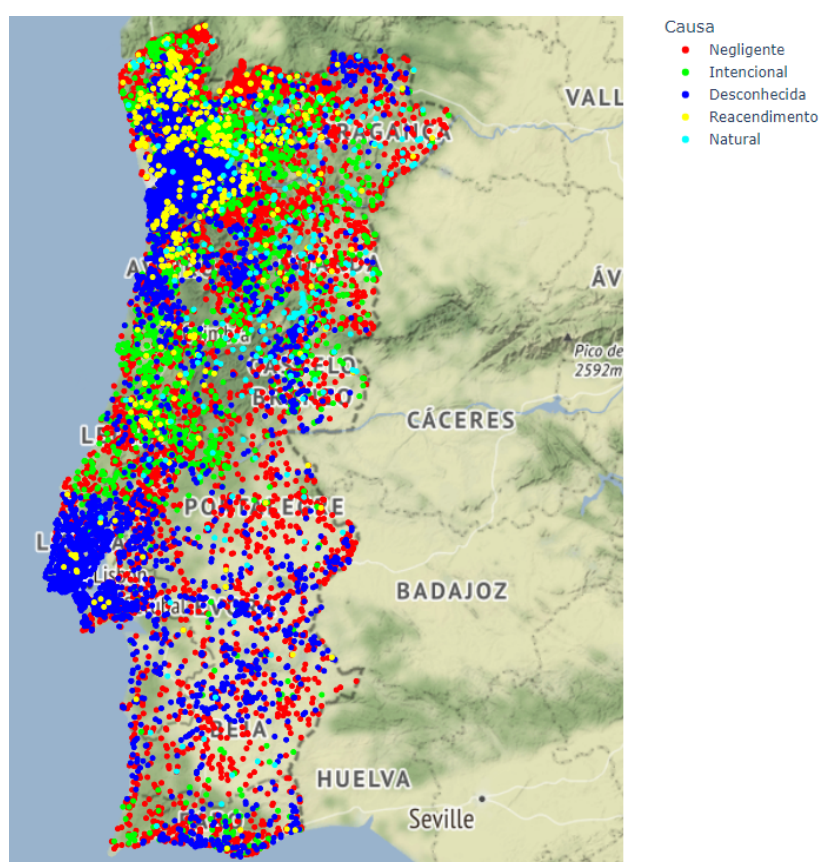


FIGURA 5.5: Incêndios ocorridos em 2021 e 2022.

A seguir, apresentamos uma definição simples de cada uma das causas de incêndios mencionadas na Figura 5.5 (Lourenço et al., 2012):

- **Negligente:** Resulta da falta de cuidado ou atenção, seja por descuido ao manipular fogo, negligência na manutenção de equipamentos ou por não seguir regras de segurança;

- **Intencional:** Causado de forma deliberada e premeditada com o propósito de causar danos ou destruição, sendo classificado como crime grave;
- **Desconhecida:** Quando a origem do incêndio não pode ser identificada devido a evidências insuficientes ou destruição das pistas;
- **Reacendimento:** Fenômeno em que um incêndio, aparentemente controlado, volta a propagar-se devido a áreas não completamente apagadas e condições ambientais desfavoráveis;
- **Natural:** Ocorre devido a causas naturais como raios, erupções vulcânicas ou combustão espontânea, não havendo intervenção humana direta.

Conforme mencionado anteriormente (Capítulo 3), o extenso território marítimo de Portugal possui uma diversidade considerável de atividades e tráfego marítimo, o que aumenta a probabilidade de acidentes que exigem uma resposta rápida e eficiente.

O Serviço de Busca e Salvamento Marítimo (SBSM), sob responsabilidade da Marinha, é encarregado de conduzir operações SAR relacionadas a acidentes com navios ou embarcações, coordenando as ações por meio do MRCC em todo o país (Tavares, 2022). Atualmente, os veículos não tripulados têm-se destacado em aplicações militares e civis, sendo promissores aliados nas operações SAR, minimizando vulnerabilidades, reduzindo o tempo de resposta a emergências e aumentando a segurança em ambientes hostis. A BD contém informações do período entre 2013 e 2021, com dados recolhidos da ZEE portuguesa (Figura 5.6).

Neste mapa (Figura 5.6), foi igualmente definida uma legenda para identificar os diferentes observações dos eventos SAR:

Para melhor compreensão da legenda presente na Figura 5.6, de seguida serão fornecidas breves definições para cada termo:

- **Embarcação em *Overdue*:** Situação em que uma embarcação não chega ao seu destino ou ponto de chegada dentro do prazo previsto, levantando preocupações sobre a sua segurança;
- **Homem ao Mar:** Ocorrência de uma pessoa que caiu ou foi lançada ao mar e requer assistência imediata;
- ***Telemedical Assistance Service (TMAS)*:** Serviço de assistência médica remota fornecido a bordo de uma embarcação em situação de emergência médica;

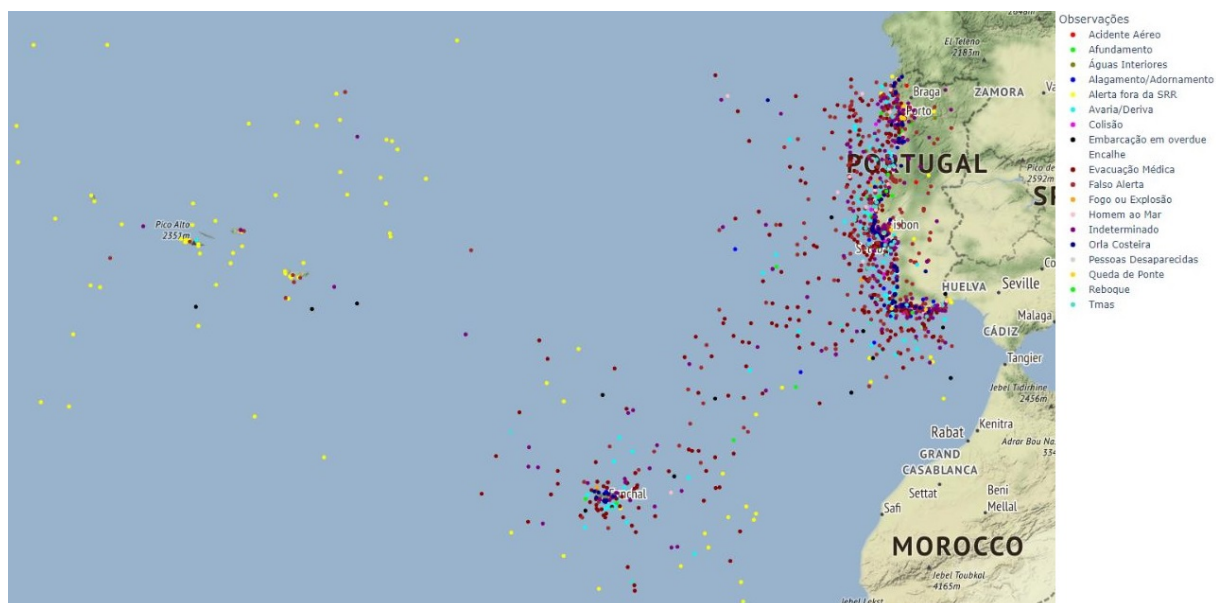


FIGURA 5.6: Eventos SAR na ZEE portuguesa ocorridos entre 2013 e 2021.

- **Águas Interiores:** Áreas navegáveis dentro de um país, incluindo rios, lagos, lagoas e outras vias navegáveis internas;
- **Falso Alerta:** Alerta ou chamada de socorro que não corresponde a uma situação real de emergência;
- **Afundamento:** Evento em que uma embarcação ou estrutura submerge completamente sob a água;
- **Encalhe:** Situação em que uma embarcação fica presa em bancos de areia ou recifes;
- **Orla Costeira:** Área costeira ou faixa de terra adjacente ao mar;
- **Avaria/Deriva:** Embarcação com problemas mecânicos que resultam na incapacidade de manobrar normalmente ou deriva involuntária devido a condições climáticas;
- **Alagamento/Adornamento:** Ingresso indesejado de água na embarcação, levando a uma situação de perigo;
- **Colisão:** Acidente envolvendo a colisão de duas ou mais embarcações ou objetos;
- **Queda de Ponte:** Incidente que envolve a queda de uma ponte ou parte dela;

- **Alerta Fora da *Search and Recue Region* (SRR)³⁹:** Alerta de emergência emitido fora da área de responsabilidade do serviço de busca e salvamento;
- **Fogo ou Explosão:** Ocorrência de incêndio ou explosão em embarcação ou estrutura;
- **Indeterminado:** Situação ou alerta cuja natureza ou detalhes não são conhecidos ou especificados;
- **Acidente Aéreo:** Incidente que envolve a queda ou colisão de uma aeronave;
- **Reboque:** Atividade de auxílio, onde uma embarcação é puxada ou assistida por outra;
- **Pessoas Desaparecidas:** Caso em que pessoas estão desaparecidas em alto mar ou em áreas aquáticas, exigindo operações de busca e salvamento.

Através da análise dos mapas apresentados, explorámos problemas bastante presentes em Portugal, como os incêndios e as operações de SAR. Esta rede representaria um investimento de duplo uso, pois não só enfrentaria desafios relacionados à poluição marítima, mas também desempenharia um papel fundamental em diversos cenários, incluindo a vigilância de áreas com alto risco de incêndio utilizando (VANT) e a busca por pessoas desaparecidas no mar com VSNT e VANT.

5.2 Análise SWOT

A análise SWOT é uma técnica estratégica muito utilizada globalmente que permite identificar e avaliar os pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças de uma determinada situação ou projeto. Segundo Panagiotou (2003), essa análise desempenha um papel significativo no processo de tomada de decisão.

A análise SWOT, envolve uma avaliação minuciosa do ambiente interno e externo de uma empresa ou projeto específico. É com esta avaliação que será possível reconhecer os pontos fortes internos para aproveitar as oportunidades externas, evitando as ameaças externas e possíveis ameaças internas (Panagiotou, 2003), que poderão influenciar o desempenho e o desenvolvimento futuro do projeto. Para realizar uma análise SWOT de forma mais eficaz, serão explicadas de seguida estas importantes etapas-chave (F. R. David et al., 2019):

- No **Ambiente Interno** é necessário para determinar as nossas próprias forças e fraquezas. As forças representam as áreas em que o nosso projeto se destacou,

³⁹Em língua portuguesa: Regiões de Busca e Salvamento.

enquanto que as fraquezas são aspetos que podem limitar o desempenho da rede nacional, como a falta de recursos, baixa qualidade dos produtos ou falhas nos meios tecnológicos. Identificar estes fatores internos irá ajudar-nos a traçar estratégias informadas, baseadas nas próprias capacidades e limitações. Isto possibilita a maximização das forças enquanto se trabalha para mitigar as fraquezas, o que é fundamental para aprimorar a eficácia estratégica e alcançar um desempenho sustentável a longo prazo.

- No **Ambiente Externo**, o foco está em identificar oportunidades e ameaças decorrentes de variadas tendências socioeconómicas, culturais, legais, ambientais, políticas e tecnológicas competitivas. Estes fatores, escapam ao controlo direto do nosso projeto, podendo ter um impacto significativo no seu futuro. As oportunidades podem beneficiar o projeto, e ser aproveitadas para impulsionar o sucesso, como tendências de mercado favoráveis ou avanços tecnológicos. Por outro lado, as ameaças são fatores externos negativos que podem afetar o nosso projeto, como concorrência competitiva, mudanças na procura do mercado ou instabilidade económica. A avaliação criteriosa deste ambiente é essencial para a formulação de estratégias eficazes, permitindo que se tomem decisões informadas e nos adaptemos às mudanças externas de forma adequada.

A proposta de análise SWOT que será apresentada de seguida, organiza os pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças num formato visual, permitindo uma análise mais clara e estruturada. A ideia é aproveitar as oportunidades identificadas, superar as ameaças, maximizar os pontos fortes e mitigar as fraquezas. Estas estratégias devem ser claras, realistas e alinhadas aos objetivos de cada projeto. Ao realizar a análise SWOT, é fundamental compreender que esse processo não é estático nem isolado. A dinâmica dos mercados e dos ambientes empresariais está em constante evolução e sujeito a mudanças. Por isso mesmo, fatores novos poderão surgir e o impacto dos pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças poderá alterar ao longo do tempo.

De seguida, será apresentada a análise SWOT a ser aplicada ao nosso projeto, presente nas Tabelas 5.2 e 5.3:

Com base na proposta da análise SWOT apresentada anteriormente, foi possível destacar as estratégias a curto, médio e longo prazo:

Curto Prazo:

TABELA 5.2: Ambiente Interno

Forças	<ul style="list-style-type: none"> • Criação de uma aplicação <i>online</i> que integra dados do <i>CleanSeaNet</i> para a Zona Económica Exclusiva portuguesa; • Implementação de uma rede nacional de veículos não tripulados: visando melhorar operações de monitorização e controlo em diversos cenários. A longo prazo, apresenta-se como uma abordagem mais económica em relação com os métodos convencionais; • Redução da dependência de recursos humanos: Com a aquisição dos veículos não tripulados para a monitorização na rede nacional, a dependência de presença humana contínua ou intervenção direta é reduzida em comparação com os métodos convencionais; • Capacidade de desenvolver infraestruturas para veículos não tripulados a longo prazo; • Capacidade de formar especialistas na área de veículos não tripulados.
Fraquezas	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento inicial necessário para a criação da rede nacional; • Necessidade de colaborações com empresas privadas para angariar financiamento; • Dependência tecnológica: O sucesso do sistema de monitorização por satélite CSN e da rede de veículos não tripulados está sujeito à disponibilidade e confiabilidade das tecnologias utilizadas; • Possíveis falhas ou interrupções dos sistemas autónomos, podem comprometer a eficácia das ações, como a não autorização pelo controlo aéreo para descolar um VANT.

Para um período imediato, a partilha e maior desenvolvimento da aplicação *online* que integra dados do *CleanSeaNet* para a ZEE portuguesa e melhorar estruturas já existentes para veículos aéreos. É também recomendável aprofundar a investigação, divulgando o projeto em conferências junto a empresas nacionais. Podendo resultar em parcerias estratégicas e apoios financeiros.

Médio Prazo:

No médio prazo, é importante focar na implementação eficaz da rede nacional de veículos não tripulados, investindo nos benefícios da redução da dependência de recursos humanos e na formação de pessoas especializadas. Seria de considerar também adquirir veículos não tripulados para a realização de testes reais. Para o caso do VANT AR5, a sua utilização pela EMSA poderia facilitar e tornar mais acessível a sua aquisição para testes. Quanto ao VSNT, seria necessário estabelecer contato com a empresa *Silver Marlin* a fim de realizar testes subsequentes.

Longo Prazo:

TABELA 5.3: Ambiente Externo

Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do uso de veículos não tripulados; • Melhoria no tempo de resposta e eficácia nas ações; • Desenvolvimento da indústria Nacional; • Versatilidade de Aplicações: A rede nacional tem o potencial de ser aplicada numa variedade de cenários; • Estímulo à inovação sustentável; • Projeto com viabilidade de ser adaptado para outros países.
Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em constante desenvolvimento; • Infraestruturas para VSNTs não tripulados menos desenvolvidas que para os VANTs; • Risco do investimento; • Vulnerabilidade à utilização de veículos não tripulados devido a condições meteorológicas desfavoráveis, podendo comprometer o sucesso da missão; Segurança Cibernética: A rede nacional está sujeita a riscos de segurança cibernética, como ataques de <i>hackers</i>, que podem comprometer a integridade das operações; • Restrições legais e operacionais: A implementação de um sistema de monitorização de veículos não tripulados está sujeita a regulamentações e restrições legais, a nível de segurança podem ser impostas limitações ao uso destas tecnologias.

Na perspectiva de longo prazo, seria estabelecer as infraestruturas necessárias para suportar veículos de superfície. Após edificar essas infraestruturas, seguia-se a implementação nacional da rede de veículos não tripulados, explorando diversas aplicações e contextos variados. Isto inclui a vigilância de derrames de HC no mar, de áreas de maior risco a incêndios, a busca por pessoas desaparecidos no mar, entre outras situações. Além disso, o projeto pretende contribuir para o avanço da indústria internacional e abrir a possibilidade de adaptação deste modelo para outros países.

Para um futuro desenvolvimento e implementação desta proposta da rede nacional, é importante lembrar que a análise SWOT precisa de ser constantemente atualizada e adaptada. Conforme o projeto avance, certos pontos deixam de ser relevantes e novos surgem, tornando necessário reformular e ajustar a estratégia. Através deste esforço contínuo de avaliação e ajuste, o projeto poderá atingir todo o seu potencial e trazer benefícios duradouros para o país.

Conclusões

O presente estudo abordou o problema da poluição marítima por HC, uma preocupação global podendo ser originado pelo intenso tráfego marítimo que é realizado em todo o mundo. Para solucionar esta questão na ZEE portuguesa, foi necessário criar ações e soluções inovadoras. Nesse contexto, a proposta da criação de uma Rede Nacional de Veículos Não Tripulados, revelou-se como uma estratégia promissora para a monitorização do território marítimo e terrestre.

Os objetivos do estudo foram inicialmente delineados para garantir uma interpretação lógica ao longo do desenvolvimento da investigação. Desta forma, esta conclusão abordará cada um desses objetivos de maneira sequencial, focando os pontos essenciais de cada um.

Inicialmente, para o cumprimento do primeiro objetivo, foi essencial contextualizar o serviço CSN para compreender o processo de deteção de manchas de HC no mar e salientar as limitações próprias dos satélites. Para contextualizar toda a análise estatística posterior, foi relevante conhecer a posição geoestratégica de Portugal e a sua extensa ZEE, pela qual atravessa um intenso tráfego marítimo anualmente. Com a análise dos alertas CSN foram revelaram resultados de concentrações notáveis, especialmente no sul de Portugal Continental. Isso deve-se, em parte, à proximidade do *chokepoint* no Estreito de Gibraltar e à importante rota marítima que passa ao longo da costa portuguesa. Já nas ilhas também foi revelado algumas concentrações, possivelmente por serem regiões turísticas que atraem bastante fluxo de tráfego marítimo.

No segundo objetivo, explorámos o modelo do comportamento dos derrames de HC ao longo do tempo, considerando fatores como ventos e correntes marítimas. Foram apresentados alguns modelos existentes, de destacar o modelo DERIVA do IH, utilizado em Portugal quando solicitado pelo MRCC para calcular as derivas de diferentes cenários. De seguida, foi apresentado como estimar a velocidade advectiva da possível trajetória de HC, utilizando as velocidades do vento e das correntes. Além disso, foi também apresentado como estimar o volume inicial do derrame com

base na área identificada nos alertas CSN. Concluindo que o óleo tende a espalhar-se de forma elíptica, com o eixo principal determinado conforme a direção do vento (fator de maior peso). Demonstrou-se que, a partir dos dados do CSN, é possível utilizar uma fórmula simplificada para simular o comportamento do óleo, embora tenham sido ignoradas duas variáveis, a margem de erro foi aceitável. Por fim, foi elaborada uma simulação da possível trajetória dos alertas CSN, utilizando a equação da velocidade advectiva, para duas horas após o horário indicado no relatório de alerta. Concluindo que a maioria dos alertas em Portugal segue principalmente uma direção sul-sudoeste, conforme os ventos predominantes entre os setores norte-oeste e correntes em direção ao sul, fora algumas exceções.

No terceiro e último objetivo, que complementa os anteriores, consistiu na proposta da rede nacional de veículos não tripulados (aéreos e de superfície), passando por uma seleção dos veículos e identificação estratégica de locais. Os veículos não tripulados selecionados serviram de suporte para a rede, com base nas suas características e capacidade de monitorizar derrames no mar. Embora o foco do estudo seja a monitorização de poluição por HC no mar, estes veículos dispõem de diferentes aplicações. Posteriormente, e baseados na análise dos alertas CSN, identificámos os locais estratégicos para implementar os veículos não tripulados, visando a máxima cobertura terrestre e marítima. A proposta da rede nacional superou as nossas expectativas ao cobrir grande parte do território nacional (marítimo e terrestre), embora não se tenha comprovado com testes práticos. Além disso, o estudo também evidenciou a aplicabilidade da rede nacional em diferentes cenários, como monitorizar áreas de alto risco de incêndio e operações SAR.

Por fim, e agrupando todos os objetivos num só, foi realizada a proposta de análise SWOT, onde se refletiu que este projeto poderá servir de base para ser, efetivamente, mais desenvolvido e posto em prática no futuro. Apesar de não terem sido abordados aspetos financeiros ou testes práticos, o projeto revelou potencial para poder incentivar empresas a investirem numa rede nacional de veículos não tripulados, promovendo a inovação e a sustentabilidade em todo o país.

Trabalhos Futuros:

Considerando o foco central deste estudo, que se concentra na importância da monitorização e controlo da poluição marítima através da proposta de uma rede nacional de veículos não tripulados na ZEE portuguesa, propõe-se que no futuro sejam desenvolvidos estudos com potencial de poder aprofundar a compreensão deste

tema. Posto isto, serão agora apresentados os trabalhos futuros recomendados, visando aperfeiçoar e enriquecer esta investigação:

- Estudo da Eficiência, testando o potencial da Rede Nacional de Veículos Não Tripulados para Monitorização. Neste estudo, seriam realizados testes reais com os veículos não tripulados sob diferentes condições ambientais para avaliar a eficiência e o potencial real da Rede Nacional de Veículos Não Tripulados para a monitorização;
- Aperfeiçoar a otimização de maneira mais abrangente, implica considerar os aspetos financeiros envolvidos. A criação de uma rede nacional de veículos não tripulados, representa um investimento substancial, abrangendo não só a aquisição dos próprios veículos, como também a necessidade de desenvolver infraestruturas em todo o país. Esta etapa é fundamental para obter um entendimento claro dos custos associados, antes de qualquer realização, permitindo uma avaliação abrangente dos recursos necessários.

Bibliografia

- Admin. (2014). Could Magnets Be The Solution To Cleaning Up Oil Spills? <https://www.apexmagnets.com/news-how-tos/could-magnets-be-the-solution-to-cleaning-up-oil-spills/>
- Agardy, T. (2010). *Ocean zoning: making marine management more effective*. Earthscan.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2021). Compostos Orgânicos Voláteis (COV). <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/compostos-organicos-volateis-cov>
- AHMED, A. M. (s.d.). MARITIME UNMANNED SURFACE VEHICLES (USVS) A COMPREHENSIVE REVIEW ON DEVELOPMENT, MISSIONS AND CHALLENGES. *Cairo, Egypt*, 54.
- Al Maawali, W., Al Naabi, A., Al Yaruubi, M., Saleem, A., & Al Maashri, A. (2019). Design and implementation of an unmanned surface vehicle for oil spill handling. *2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS)*, 1–6.
- Andrade, C., & Robertson, M. H. (2010). Turismo de Cruzeiros: perspectivas para a Macaronesia. *Revista Turismo & Desenvolvimento*, 2(13/14), 485–498.
- Antunes, S. (2020). 2020 2030 Uma década de Investimento. *Nesta Edição*, 4.
- Antunes, T. L., Santos, N. P., & Moura, R. P. (2022). Poluição no Mar: Análise e Monitorização utilizando Veículos não Tripulados.
- Antunes, T. L., Santos, N. P., Moura, R. P., & Lobo, V. (2023). Sea Pollution: Analysis and Monitoring using Unmanned Vehicles. *2023 IEEE Underwater Technology (UT)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/UT49729.2023.10103429>
- ArcGIS. (s.d.). Distância Euclidiana. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/euclidean-distance.htm>
- Arnold Platon. (s.d.). Extensão da Macaronesia. https://pt.wikipedia.org/wiki/Macaronesia/media/Ficheiro:Macaronesia_location.svg
- Asadzadeh, S., de Oliveira, W. J., & de Souza Filho, C. R. (2022). UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109633.

- Autoridade Marítima. (2011). Guia de apoio ao combate à poluição do mar por hidrocarbonetos e outras substâncias perigosas (Vol. 1).
- Autoridade Marítima Nacional. (s.d.). Bases Logísticas. <https://www.amn.pt/DCPM/Paginas/Bases.aspx>
- Barker, C. H., Kourafalou, V. H., Beegle-Krause, C., Boufadel, M., Bourassa, M. A., Buschang, S. G., Androulidakis, Y., Chassignet, E. P., Dagestad, K.-F., Danmeier, D. G., et al. (2020). Progress in operational modeling in support of oil spill response. *Journal of marine science and engineering*, 8(9), 668.
- Barton, E., Steele, J., Turekian, K., & Thorpe, S. (2001). Canary and Portugal currents. *Ocean Currents*, 330–339.
- Bauk, S., Kapidani, N., Sousa, L., Lukšić, Ž., & Spuža, A. (2020). Advantages and disadvantages of some unmanned aerial vehicles deployed in maritime surveillance. *Maritime Transport VIII: proceedings of the 8th International Conference on Maritime Transport: Technology, Innovation and Research: Maritime Transport'20*, 91.
- Bayrhan, İ., & Gazioglu, C. (2020). Use of unmanned aerial vehicles (UAV) and marine environment simulator in oil pollution investigations. *Balt J Mod Comput*, 8(2), 327–336.
- Belcastro, C. M., Newman, R. L., Evans, J., Klyde, D. H., Barr, L. C., & Ancel, E. (2017). Hazards identification and analysis for unmanned aircraft system operations. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 3269.
- Bella, S., Belalem, G., Belbachir, A., & Benfriha, H. (2021). HMDCS-UV: A concept study of Hybrid Monitoring, Detection and Cleaning System for Unmanned Vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102(2), 44.
- Bentley, J. L. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18(9), 509–517.
- Board, O. S., National Academies of Sciences, E., Medicine et al. (2020). *The use of dispersants in marine oil spill response*. National Academies Press.
- Bouças, M. H. C. d. R. (2017). *Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos* (tese de doutoramento).
- Campuzano, F., Juliano, M., Fernandes, R., Pinto, L., & Neves, R. (2013). Down-calling from the deep ocean to the estuarine intertidal areas: an operational framework for the portuguese exclusive economic zone. *6th SCACR–International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, 1–9.
- Carpenter, A. (2016). European maritime safety agency CleanSeaNet activities in the North Sea. *Oil Pollution in the North Sea*, 33–47.

- Carrington, D. (2021). Takeaway food and drink litter dominates ocean plastic, study shows. <https://www.theguardian.com/environment/2021/jun/10/takeaway-food-and-drink-litter-dominates-ocean-plastic-study-shows>
- Cava, F., Schoedinger, S., Strang, C., & Tuddenham, P. (2005). Science content and standards for ocean literacy: A report on ocean literacy.
- Chang, S. E., Stone, J., Demes, K., & Piscitelli, M. (2014). Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. *Ecology and Society*, 19(2).
- Chao, X., Shankar, N. J., & Cheong, H. F. (2001). Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters. *Ocean engineering*, 28(12), 1557–1573.
- Chao, X., Shankar, N. J., & Wang, S. S. (2003). Development and application of oil spill model for Singapore coastal waters. *Journal of hydraulic engineering*, 129(7), 495–503.
- Chapman, R. L. (2013). Algae: the world’s most important “plants”—an introduction. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18, 5–12.
- Chaudhry, F. N., & Malik, M. (2017). Factors affecting water pollution: a review. *J. Ecosyst. Ecography*, 7(1), 225–231.
- Chisholm, S. W., Falkowski, P. G., & Cullen, J. J. (2001). Dis-crediting ocean fertilization.
- Choudhary, M., Peter, C., Shukla, S. K., Govender, P. P., Joshi, G. M., & Wang, R. (2020). Environmental issues: a challenge for wastewater treatment. *Green Materials for Wastewater Treatment*, 1–12.
- Circular N°107. (2007). *POLREP*. Autoridade Marítima Nacional. https://www.amn.pt/DCPM/Documents/Circular%20107_alt%204.pdf
- Circular n°123/2007. (2007). *Recolha de Amostras*. Autoridade Marítima Nacional. <https://www.amn.pt/DCPM/Documents/Circular%20n.%C2%BA%20123-2007.pdf>
- Clark, R. B., Frid, C., Attrill, M., et al. (1997). *Marine pollution* (Vol. 4). Clarendon press Oxford.
- Coe, J. M., & Rogers, D. (2012). *Marine debris: sources, impacts, and solutions*. Springer Science & Business Media.
- Commission, O. (2019). The North-East Atlantic. <https://www.ospar.org/convention/the-north-east-atlantic>
- Copernicus. (s.d.). Ocean Monitoring and Forecasting Models. <https://marine.copernicus.eu/pt/explainers/operational-oceanography/monitoring-forecasting/in-situ>

- Costas, S., Jerez, S., Trigo, R. M., Goble, R., & Rebêlo, L. (2012). Sand invasion along the Portuguese coast forced by westerly shifts during cold climate events. *Quaternary Science Reviews*, *42*, 15–28.
- Council, N. R., et al. (1985). *Oil in the sea: inputs, fates, and effects* (Vol. 1). National Academies Press.
- Csernatoni, R. (2018). Constructing the EU's high-tech borders: FRONTEX and dual-use drones for border management. *European Security*, *27*(2), 175–200.
- Cunha, T. P. (2004). A importância estratégica do mar para Portugal. *Nação e Defesa*.
- 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.
- David, E., Dietrich, B., Malcolm, J., & Korotenko, K. A. (2014). *Oil Spill Risk Management: Modeling Gulf of Mexico Circulation and Oil Dispersion*. Malcolm J. Bowman, Konstantin A. Korotenko, and M. Hamish E. Bowman. Dietrich. John Wiley; Sons, Incorporated.
- David, F. R., Creek, S. A., & David, F. R. (2019). What is the key to effective SWOT analysis, including AQCD factors. *SAM Advanced Management Journal*, *84*(1), 25–32.
- Davis, R. E., Hayden, B. P., Gay, D. A., Phillips, W. L., & Jones, G. V. (1997). The north atlantic subtropical anticyclone. *Journal of Climate*, *10*(4), 728–744.
- De Kerf, T., Gladines, J., Sels, S., & Vanlanduit, S. (2020). Oil spill detection using machine learning and infrared images. *Remote sensing*, *12*(24), 4090.
- De Padova, D., Mossa, M., Adamo, M., De Carolis, G., & Pasquariello, G. (2017). Synergistic use of an oil drift model and remote sensing observations for oil spill monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 5530–5543.
- DeBusk, W. (2010). Unmanned aerial vehicle systems for disaster relief: Tornado alley. Em *AIAA Infotech Aerospace 2010* (p. 3506).
- Decreto do Governo nº 79/1983. (1983). *Diário Da República — I Série*. Ministério da Defesa Nacional. <https://bit.ly/3snp9eZ>
- Decreto nº 59/1997 de 31 de outubro. (1997). *Diário Da República — I Série-A*. Ministério dos Negócios Estrangeiros. <https://bit.ly/3E9SwnO>
- Diário Da República — I Série-A*. (2002). Ministério da Defesa Nacional. <https://bit.ly/3swlMCg>
- Dias, J. A. (2003). Portugal e o mar: importância da Oceanografia para Portugal. *Universidade do Algarve*.

- Dias, T. (2018). Sistemas não tripulados de aquisição de dados hidrográficos como potenciadores da capacidade hidrográfica das Forças Armadas.
- Directiva 2009/123/CE. (2009). *Jornal Oficial da União Europeia*. Parlamento Europeu e do Conselho da UE de 21 de Outubro de 2009. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:280:0052:0055:PT:PDF>
- Dodet, G. (2013). *Morphodynamic modelling of a wave-dominated tidal inlet: the Albufeira Lagoon* (tese de doutoramento). La Rochelle.
- Dom Phillips. (2013). Brazilian police investigating oil spill on Paranoá lake. <https://www.theguardian.com/environment/2013/oct/18/brazilian-police-oil-spill-paranoa-lake>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1, 169–192.
- Dritschel, D. G., Paldor, N., & Constantin, A. (2020). The Ekman spiral for piecewise-uniform viscosity. *Ocean Science*, 16(5), 1089–1093.
- Duan, Z., Li, Y., Wang, J., Zhao, G., & Svanberg, S. (2019). Aquatic environment monitoring using a drone-based fluorosensor. *Applied Physics B*, 125, 1–8.
- Earth. (2023). Um mapa global do vento, tempo e condições do oceano. https://earth.nullschool.net/pt/current/ocean/primary/waves/overlay=significant_wave_height/orthographic=-16.25,35.65,2749/loc=-32.958,10.195
- Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H., & Daily, G. C. (1993). Food security, population and environment. *Population and development review*, 1–32.
- EMSA. (2018). CleanSeaNet Alert Report. <https://sentinel.esa.int/web/success-stories/-/cleanseanet-alert-report>
- ESRI. (s.d.). *O que são os SIG?* ESRI Portugal. <https://www.esri-portugal.pt/pt-pt/o-que-sao-os-sig/overview>
- Etneca. (2021). RPS - Oil Spill Model System (OILMAP). <http://www.etneca.co.th/index.php/component/spsimpleportfolio/item/55-rps-oil-spill-model-system-oilmap>
- Fay, J. A. (1969). The spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the Sea: Proceedings of a symposium on the scientific and engineering aspects of oil pollution of the sea, sponsored by Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution and held at Cambridge, Massachusetts, May 16, 1969*, 53–63.
- Fay, J. A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. *International oil spill conference, 1971* (1), 463–467.
- Ferreira, S. A. P. (2014). *Aplicação de Filmes de Óxido de Titânio na Degradação de Corantes* (tese de doutoramento). Universidade da Beira Interior (Portugal).

- Fingas, M. (2011). Physical spill countermeasures. Em *Oil spill science and technology* (pp. 303–337). Elsevier.
- Fingas, M. (2010). *Oil spill science and technology*. Gulf professional publishing.
- Fleming, L., Broad, K., Clement, A., Dewailly, E., Elmir, S., Knap, A., Pomponi, S., Smith, S., Gabriele, H. S., & Walsh, P. (2006). Oceans and human health: emerging public health risks in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 53(10-12), 545–560.
- Frouin, R., Fiúza, A. F., Ambar, I., & Boyd, T. J. (1990). Observations of a poleward surface current off the coasts of Portugal and Spain during winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C1), 679–691.
- Fu, L.-L. (1982). *Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar* (Vol. 81). California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.
- Gady, F.-S. (2015). US Approves Sale of 3 Global Hawk Drones to Japan. <https://thediplomat.com/2015/11/us-approves-sale-of-3-global-hawk-drones-to-japan/>
- Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2013–2025.
- Groenleer, M., Kaeding, M., & Versluis, E. (2010). Regulatory governance through agencies of the European Union? The role of the European agencies for maritime and aviation safety in the implementation of European transport legislation. *Journal of European Public Policy*, 17(8), 1212–1230.
- Hail, O. (2022). Don't blame water companies for river pollution, says research conducted among water companies. <https://www.proactiveinvestors.com/companies/news/984243/don-t-blame-water-companies-for-river-pollution-says-research-conducted-among-water-companies-984243.html?region=ca>
- Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K. L., Samhuri, J. F., Katona, S. K., Kleisner, K., Lester, S. E., O'Leary, J., Ranelletti, M., et al. (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488(7413), 615–620.
- Hammer, J., Kraak, M. H., & Parsons, J. R. (2012). Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 1–44.
- Harayama, S., Kishira, H., Kasai, Y., & Shutsubo, K. (1999). Petroleum biodegradation in marine environments. *Journal of molecular microbiology and biotechnology*, 1(1), 63–70.

- Haynes, R., & Barton, E. D. (1990). A poleward flow along the Atlantic coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C7), 11425–11441.
- Heo, J., Kim, J., Kwon, Y., et al. (2017). Analysis of design directions for unmanned surface vehicles (USVs). *Journal of Computer and Communications*, 5(07), 92.
- Hoult, D. P. (1972). Oil spreading on the sea. *Annual review of fluid mechanics*, 4(1), 341–368.
- Hoyer, S., & Hamman, J. (2017). xarray: ND labeled arrays and datasets in Python. *Journal of Open Research Software*, 5(1).
- Infopédia. (s.d.). Porto Editora – querosene. <https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/querosene>
- Instituto Hidrográfico. (2014). Ministério da Defesa Nacional. <http://anavnet.hidrografico.pt/AvisosPDF/GrupoPDF.aspx?Ano=2014&Grupo=0>
- IPMA. (s.d.). Anticiclones. <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao.numerica/index.htmlpage=ecmwf.anticiclone.xml>
- Jackson, J. B., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J. A., et al. (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *science*, 293(5530), 629–637.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- Jiao, Z., Jia, G., & Cai, Y. (2019). A new approach to oil spill detection that combines deep learning with unmanned aerial vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 1300–1311.
- Kato, N., Choyekh, M., Dewantara, R., Senga, H., Chiba, H., Kobayashi, E., Yoshie, M., Tanaka, T., & Short, T. (2017). An autonomous underwater robot for tracking and monitoring of subsea plumes after oil spills and gas leaks from seafloor. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 386–396.
- Katsanou, K., & Karapanagioti, H. K. (2019). Surface water and groundwater sources for drinking water. *Applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Drinking Water Treatment*, 1–19.
- Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of marine science and engineering*, 9(2), 181.

- Kieu, H. T., & Law, A. W.-K. (2021). Remote sensing of coastal hydro-environment with portable unmanned aerial vehicles (pUAVs) a state-of-the-art review. *Journal of Hydro-environment Research*, *37*, 32–45.
- Klemas, V. V. (2015). Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. *Journal of coastal research*, *31*(5), 1260–1267.
- Korotenko, K. A., Bowman, M. J., & Dietrich, D. E. (2010). High-Resolution Numerical Model for Predicting the Transport and Dispersal of Oil Spilled in the Black Sea. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, *21*(1).
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., et al. (2020). Human health and ocean pollution. *Annals of global health*, *86*(1).
- Lardner, R., Lehr, W., Fraga, R., & Sarhan, M. (1988). A model of residual currents and pollutant transport in the Arabian Gulf. *Applied mathematical modelling*, *12*(4), 379–390.
- Lehr, W., Fraga, R., Belen, M., & Cekirge, H. (1984). A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula. *Marine Pollution Bulletin*, *15*(9), 326–329.
- Leifer, I., Lehr, W. J., Simecek-Beatty, D., Bradley, E., Clark, R., Dennison, P., Hu, Y., Matheson, S., Jones, C. E., Holt, B., et al. (2012). State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. *Remote Sensing of Environment*, *124*, 185–209.
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, *41*, 71–93.
- Lourenço, L., Fernandes, S., Bento-Gonçalves, A., Castro, A., Nunes, A., & Vieira, A. (2012). Causas de incêndios florestais em Portugal continental. Análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010). *Cadernos de Geografia*, (30-31), 61–80.
- Lu, Y., Xue, Z., Xia, G.-S., & Zhang, L. (2018). A survey on vision-based UAV navigation. *Geo-spatial information science*, *21*(1), 21–32.
- Maianti, P., Rusmini, M., Tortini, R., Dalla Via, G., Frassy, F., Marchesi, A., Rota Nodari, F., & Gianinetto, M. (2014). Monitoring large oil slick dynamics with moderate resolution multispectral satellite data. *Natural Hazards*, *73*, 473–492.
- Maneewongvatana, S., & Mount, D. M. (1999). Analysis of approximate nearest neighbor searching with clustered point sets. *arXiv preprint cs/9901013*.

- MarineLink. (2020). Drones Deployed for Maritime Surveillance off France. <https://www.marinelink.com/news/drones-deployed-maritime-surveillance-off-482264>
- MarineTraffic. (2022). <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-17.9/centery:37.8/zoom:6>
- MARPOL. (2009). *MARPOL - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. Lloyd's Register Rulefinder 2005 – Version 9.4. <http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/IMO-Conventions%20%28copies%29/MARPOL.pdf>
- Martins, C. S., Hamann, M., & Fiúza, A. F. (2002). Surface circulation in the eastern North Atlantic, from drifters and altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *107*(C12), 10–1.
- McFarlane, D., & Sheffi, Y. (2003). The impact of automatic identification on supply chain operations.
- McKinney, W. (2012). *Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. "O'Reilly Media, Inc."
- Mike. (2020). MIKE 21/3 Oil Spill | Simulate Movement of Oil on the Water Surface and in the Water Column. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/sediments/oil-spill>
- Ministério da Defesa Nacional. (2020). *Conceito Estratégico da Defesa Nacional 2020 (CEDN 2020)*. <https://bit.ly/3E7BdU7>
- Mishra, A. K., & Kumar, G. S. (2015). Weathering of oil spill: modeling and analysis. *Aquatic Procedia*, *4*, 435–442.
- Nagheby, M., & Kolahdoozan, M. (2010). Numerical modeling of two-phase fluid flow and oil slick transport in estuarine water. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *7*, 771–784.
- Natália Mendonça. (2020). Vazamento de óleo e seus perigos. <https://portalworldcruises2.com/2020/02/vazamento-de-oleo-e-seus-perigos.html>
- Neves, A. A. S. (2015). *Oil spill risk assessment and management for the Coast of Algarve, Southern Portugal* (tese de doutoramento). Universidad de Cádiz.
- Nunes, R. A., Alvim-Ferraz, M., Martins, F. G., Calderay-Cayetano, F., Durán-Grados, V., Moreno-Gutiérrez, J., Jalkanen, J.-P., Hannuniemi, H., & Sousa, S. I. (2020). Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(15), 9473–9489.
- O'Dor, R., & Berghe, E. V. (2012). Hidden Beneath the Seas. *World Policy Journal*, *29*(3), 101–108.

- Panagiotou, G. (2003). Bringing SWOT into focus. *Business strategy review*, 14(2), 8–10.
- Parlamento Europeu e do Conselho da UE. (2019). *Diretiva (UE) 2019/904 do Parlamento Europeu e do Conselho*. Jornal Oficial da União Europeia. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904>
- Pastore, T. J., & Kessel, R. T. (2009). Unmanned surface vessels for surface and subsurface threats in harbours: background and practical lessons.
- Pereira, E., Bencatel, R., Correia, J., Félix, L., Gonçalves, G., Morgado, J., & Sousa, J. (2009). Unmanned air vehicles for coastal and environmental research. *Journal of Coastal Research*, 1557–1561.
- Pérez, F. F., Castro, C. G., Álvarez-Salgado, X. A., & Rios, A. F. (2001). Coupling between the Iberian basin—scale circulation and the Portugal boundary current system: a chemical study. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(6), 1519–1533.
- Pessanha Santos, N., Moura, R., Lourenço Antunes, T., & Lobo, V. (2023). Addressing Sea Pollution Using Unmanned Vehicles: The Portuguese Case Study. Available at SSRN 4517682.
- Pisano, A., De Dominicis, M., Biamino, W., Bignami, F., Gherardi, S., Colao, F., Coppini, G., Marullo, S., Sprovieri, M., Trivero, P., et al. (2016). An oceanographic survey for oil spill monitoring and model forecasting validation using remote sensing and in situ data in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 133, 132–145.
- Pita, C., & Gaspar, M. (2020). Small-Scale Fisheries in Portugal: current situation, challenges and opportunities for the future. *Small-Scale Fisheries in Europe: Status, Resilience and Governance*, 283–305.
- Priberam. (s.d.). ratificação. <https://dicionario.priberam.org/ratificar>
- Rayner, R., Jolly, C., & Gouldman, C. (2019). Ocean observing and the blue economy. *Frontiers in Marine Science*, 6, 330.
- 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.
- Resolução Conselho Ministros n.º 25/1993. (1993). *Diário da República, Série I-B de 1993-04-15*. Presidência do Conselho de Ministros. <https://bit.ly/47BPwhg>
- Rhodes, C. J. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science progress*, 101(3), 207–260.

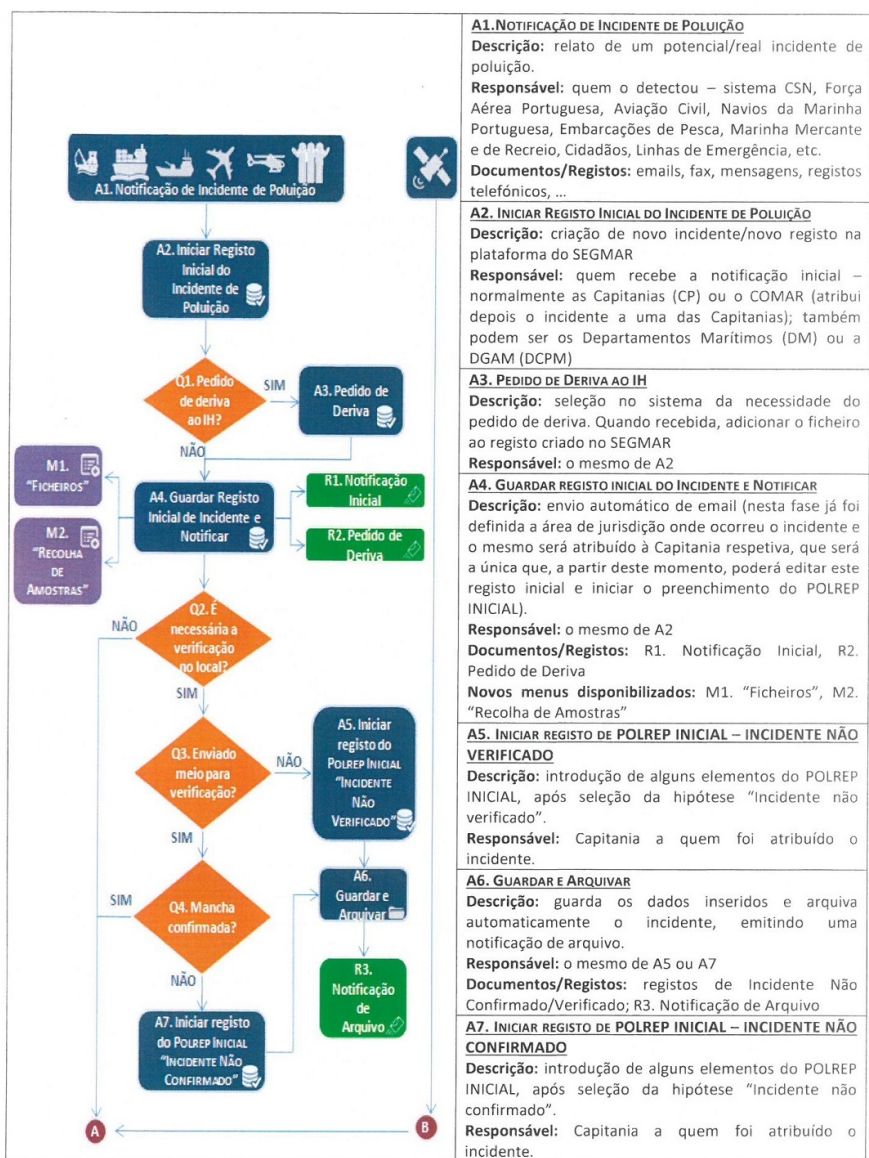
- Ribeiro, N. K. C. (2021). *Os incêndios em Portugal Continental numa perspetiva da Teoria de Valores Extremos* (tese de doutoramento).
- Rodrigue. (2013). *The Geography of Transport Systems* (3rd). Routledge.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems*. Routledge.
- RPS Ocean Science. (2016). *OILMAP*. RPS Group. https://www.rpsgroup.com/media/4500/oilmap_final.pdf
- RPS Ocean Science. (2023). *RPS Oil Spill Trajectory and Fates Modeling software*. RPS Group. https://7262490.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7262490/OILMAPv7.4.0_ReleaseNotes_August23-FINAL.pdf
- Ruslan Zhir. (s.d.). Silver Marlin boat. https://dj_rus.artstation.com/projects/3KZB2
- SAAB. (2020). Veículos não-tripulados: alta tecnologia na superfície do mar. <https://www.saab.com/pt-br/markets/brasil/historias/2020/veiculos-nao-tripulados-alta-tecnologia-na-superficie-do-mar>
- Saatchi, S. (2019). SAR methods for mapping and monitoring forest biomass. *SAR handbook: comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation*, 207–246.
- Santos, C. F., Teixeira, Z. G., Janeiro, J., Gonçalves, R. S., Bjorkland, R., & Orbach, M. (2012). The European marine strategy: contribution and challenges from a Portuguese perspective. *Marine Policy*, 36(5), 963–968.
- Sebastiao, P., & Soares, C. G. (1995). Modeling the fate of oil spills at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2(2-3), 121–131.
- Seckler, D. W., et al. (1998). *World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues* (Vol. 19). Iwmi.
- Significados. (s.d.). O que significa Insight. <https://www.significados.com.br/insight/>
- Solberg, A. H. S. (2012). Remote sensing of ocean oil-spill pollution. *Proceedings of the IEEE*, 100(10), 2931–2945.
- Sophia. (2022). Detecção Remota: Temperatura da Superfície do Mar e Cor do Oceano. https://www.sophia-mar.pt/pt/recursos_pedagogicos/1
- Spaulding, M. L. (1988). A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling. *Oil and Chemical Pollution*, 4(1), 39–55.
- Spaulding, M. L. (2017). State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), 7–19.
- Stopford, M. (2008). *Maritime economics 3e*. Routledge.
- SurferToday.com. (s.d.). What is offshore drilling? <https://www.surfertoday.com/environment/what-is-offshore-drilling>

- Tavares, A. (2022). Utilização de sistemas não tripulados no apoio às operações de busca e salvamento marítimo em regiões costeiras.
- Team, T. E. (2021). Remembering Titanic: The tragedy behind SOLAS. <https://safety4sea.com/cm-remembering-titanic-the-tragedy-behind-solas/>
- Tekever. (2011). TEKEVER, VIASAT TO EXPAND DRONE-BASED INTELLIGENCE-AS-A-SERVICE GLOBALLY. <https://www.tekever.com/news/tekever-viasat-to-expand-drone-based-intelligence-as-a-service-globally/>
- TELEFUNKEN RACOMS. (2012). Silver Marlin. <https://www.yumpu.com/en/document/read/4398493/silver-marlin-telefunken-racoms>
- The Maritime Executive. (2018). Ro/Ro and Boxship Finally Separated, Days After Collision. <https://maritime-executive.com/article/ro-ro-and-boxship-separated-days-after-collision>
- U. Porto. (2011). U.Porto desenvolve submarinos e aviões não tripulados das Forças Armadas Portuguesas. https://sigarra.up.pt/up/pt/noticias_geral.ver_noticia?p_nr=11268
- UAVISION. (s.d.). About Us. <https://www.uavision.com/about-us>
- UNCLOS. (1998). *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*. União Europeia. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623\(01\)&from=EL](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:21998A0623(01)&from=EL)
- Vargas, J. (s.d.). Aromáticos. <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/aromaticos.htm>
- Vasiljević, A., Nađ, Đ., Mandić, F., Mišković, N., & Vukić, Z. (2017). Coordinated navigation of surface and underwater marine robotic vehicles for ocean sampling and environmental monitoring. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 22(3), 1174–1184.
- Vieira, M. B. (2008). Simulação de Fluidos.
- Wang, Z., & Stout, S. (2010). *Oil spill environmental forensics: fingerprinting and source identification*. Elsevier.
- Ward, C. P., & Overton, E. B. (2020). How the 2010 Deepwater Horizon spill reshaped our understanding of crude oil photochemical weathering at sea: a past, present, and future perspective. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(5), 1125–1138.
- Wheeler, R. (1978). The fate of petroleum in the marine environment.
- Winarno, E., Hadikurniawati, W., & Rosso, R. N. (2017). Location based service for presence system using haversine method. *2017 international conference on innovative and creative information technology (ICITech)*, 1–4.

- Windows. (s.d.). what-is-the-cloud. <https://azure.microsoft.com/pt-pt/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-the-cloud/>
- Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.
- Xie, H., Yapa, P. D., & Nakata, K. (2007). Modeling emulsification after an oil spill in the sea. *Journal of Marine Systems*, 68(3-4), 489–506.
- Yan, R.-j., Pang, S., Sun, H.-b., & Pang, Y.-j. (2010). Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 9, 451–457.
- Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., Haggren, H., et al. (2018). A review: Remote sensing sensors. *Multi-purposeful application of geospatial data*, 19–42.

Anexo I - Circular nº107/2005

PROCEDIMENTO – SEGMAR (Parte 1)



A1. NOTIFICAÇÃO DE INCIDENTE DE POLUIÇÃO
Descrição: relato de um potencial/real incidente de poluição.
Responsável: quem o detectou – sistema CSN, Força Aérea Portuguesa, Aviação Civil, Navios da Marinha Portuguesa, Embarcações de Pesca, Marinha Mercante e de Recreio, Cidadãos, Linhas de Emergência, etc.
Documentos/Registos: emails, fax, mensagens, registos telefónicos, ...

A2. INICIAR REGISTO INICIAL DO INCIDENTE DE POLUIÇÃO
Descrição: criação de novo incidente/novo registo na plataforma do SEGMAR
Responsável: quem recebe a notificação inicial – normalmente as Capitánias (CP) ou o COMAR (atribuído depois o incidente a uma das Capitánias); também podem ser os Departamentos Marítimos (DM) ou a DGAM (DCPM)

A3. PEDIDO DE DERIVA AO IH
Descrição: seleção no sistema da necessidade do pedido de deriva. Quando recebida, adicionar o ficheiro ao registo criado no SEGMAR
Responsável: o mesmo de A2

A4. GUARDAR REGISTO INICIAL DO INCIDENTE E NOTIFICAR
Descrição: envio automático de email (nesta fase já foi definida a área de jurisdição onde ocorreu o incidente e o mesmo será atribuído à Capitania respetiva, que será a única que, a partir deste momento, poderá editar este registo inicial e iniciar o preenchimento do POLREP INICIAL).
Responsável: o mesmo de A2
Documentos/Registos: R1. Notificação Inicial, R2. Pedido de Deriva
Novos menus disponibilizados: M1. "Ficheiros", M2. "Recolha de Amostras"

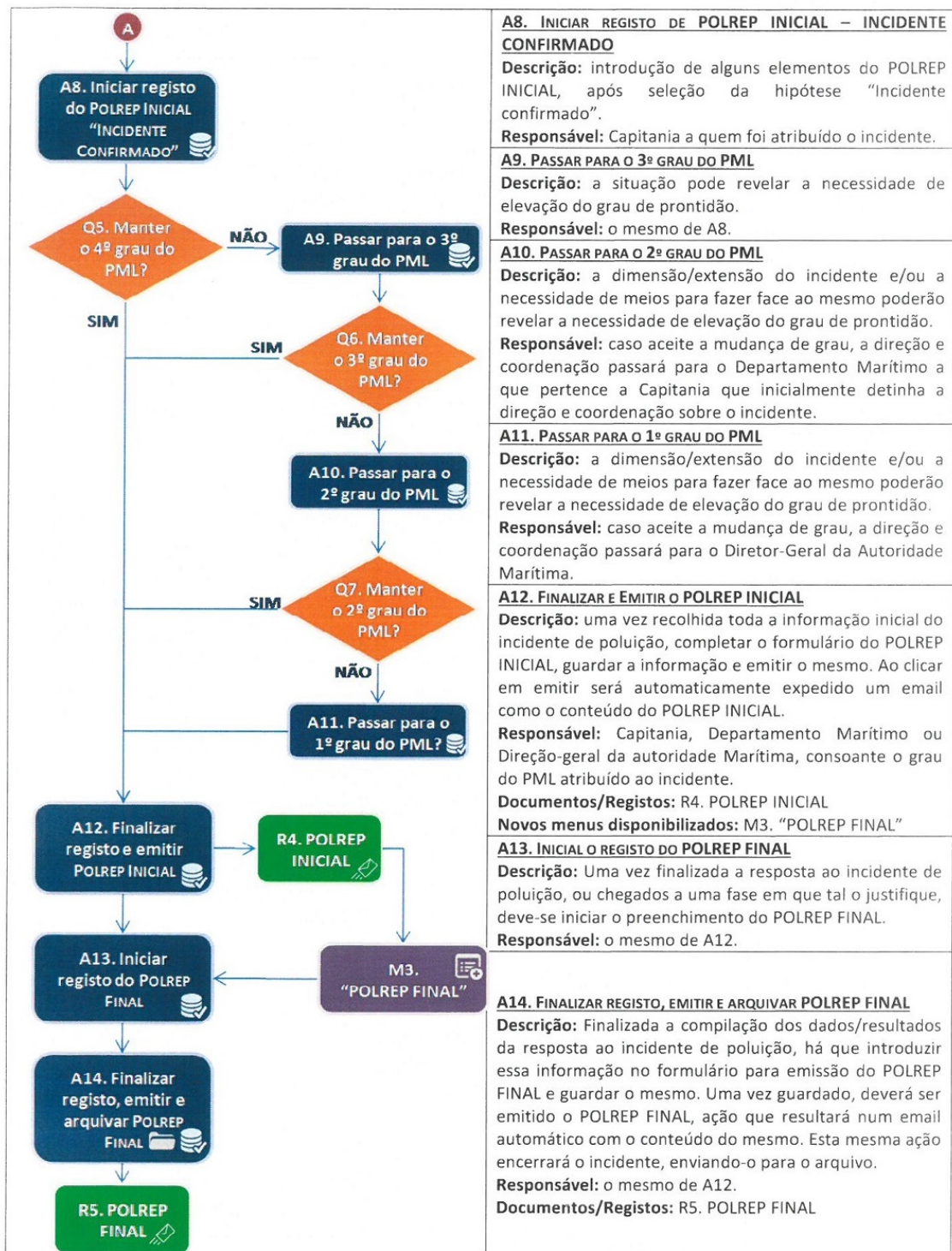
A5. INICIAR REGISTO DE POLREP INICIAL – INCIDENTE NÃO VERIFICADO
Descrição: introdução de alguns elementos do POLREP INICIAL, após seleção da hipótese "Incidente não verificado".
Responsável: Capitania a quem foi atribuído o incidente.

A6. GUARDAR E ARQUIVAR
Descrição: guarda os dados inseridos e arquiva automaticamente o incidente, emitindo uma notificação de arquivo.
Responsável: o mesmo de A5 ou A7
Documentos/Registos: registos de Incidente Não Confirmado/Verificado; R3. Notificação de Arquivo

A7. INICIAR REGISTO DE POLREP INICIAL – INCIDENTE NÃO CONFIRMADO
Descrição: introdução de alguns elementos do POLREP INICIAL, após seleção da hipótese "Incidente não confirmado".
Responsável: Capitania a quem foi atribuído o incidente.

FIGURA I.1: Fluxograma de procedimentos SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição (A1 a A7). Fonte: Circular Nº107, 2007

PROCEDIMENTO – SEGMAR (Parte 2)



A8. INICIAR REGISTO DE POLREP INICIAL – INCIDENTE CONFIRMADO

Descrição: introdução de alguns elementos do POLREP INICIAL, após seleção da hipótese “Incidente confirmado”.

Responsável: Capitania a quem foi atribuído o incidente.

A9. PASSAR PARA O 3º GRAU DO PML

Descrição: a situação pode revelar a necessidade de elevação do grau de prontidão.

Responsável: o mesmo de A8.

A10. PASSAR PARA O 2º GRAU DO PML

Descrição: a dimensão/extensão do incidente e/ou a necessidade de meios para fazer face ao mesmo poderão revelar a necessidade de elevação do grau de prontidão.

Responsável: caso aceite a mudança de grau, a direção e coordenação passará para o Departamento Marítimo a que pertence a Capitania que inicialmente detinha a direção e coordenação sobre o incidente.

A11. PASSAR PARA O 1º GRAU DO PML

Descrição: a dimensão/extensão do incidente e/ou a necessidade de meios para fazer face ao mesmo poderão revelar a necessidade de elevação do grau de prontidão.

Responsável: caso aceite a mudança de grau, a direção e coordenação passará para o Diretor-Geral da Autoridade Marítima.

A12. FINALIZAR E EMITIR O POLREP INICIAL

Descrição: uma vez recolhida toda a informação inicial do incidente de poluição, completar o formulário do POLREP INICIAL, guardar a informação e emitir o mesmo. Ao clicar em emitir será automaticamente expedido um email como o conteúdo do POLREP INICIAL.

Responsável: Capitania, Departamento Marítimo ou Direção-geral da autoridade Marítima, consoante o grau do PML atribuído ao incidente.

Documentos/Registos: R4. POLREP INICIAL

Novos menus disponibilizados: M3. “POLREP FINAL”

A13. INICIAR O REGISTO DO POLREP FINAL

Descrição: Uma vez finalizada a resposta ao incidente de poluição, ou chegados a uma fase em que tal o justifique, deve-se iniciar o preenchimento do POLREP FINAL.

Responsável: o mesmo de A12.

A14. FINALIZAR REGISTO, EMITIR E ARQUIVAR POLREP FINAL

Descrição: Finalizada a compilação dos dados/resultados da resposta ao incidente de poluição, há que introduzir essa informação no formulário para emissão do POLREP FINAL e guardar o mesmo. Uma vez guardado, deverá ser emitido o POLREP FINAL, ação que resultará num email automático com o conteúdo do mesmo. Esta mesma ação encerrará o incidente, enviando-o para o arquivo.

Responsável: o mesmo de A12.

Documentos/Registos: R5. POLREP FINAL

FIGURA I.2: Fluxograma de procedimentos SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição (A8 a A14). Fonte: Circular N°107, 2007

PROCEDIMENTO – SEGMAR (Parte 3) – REPORT CSN

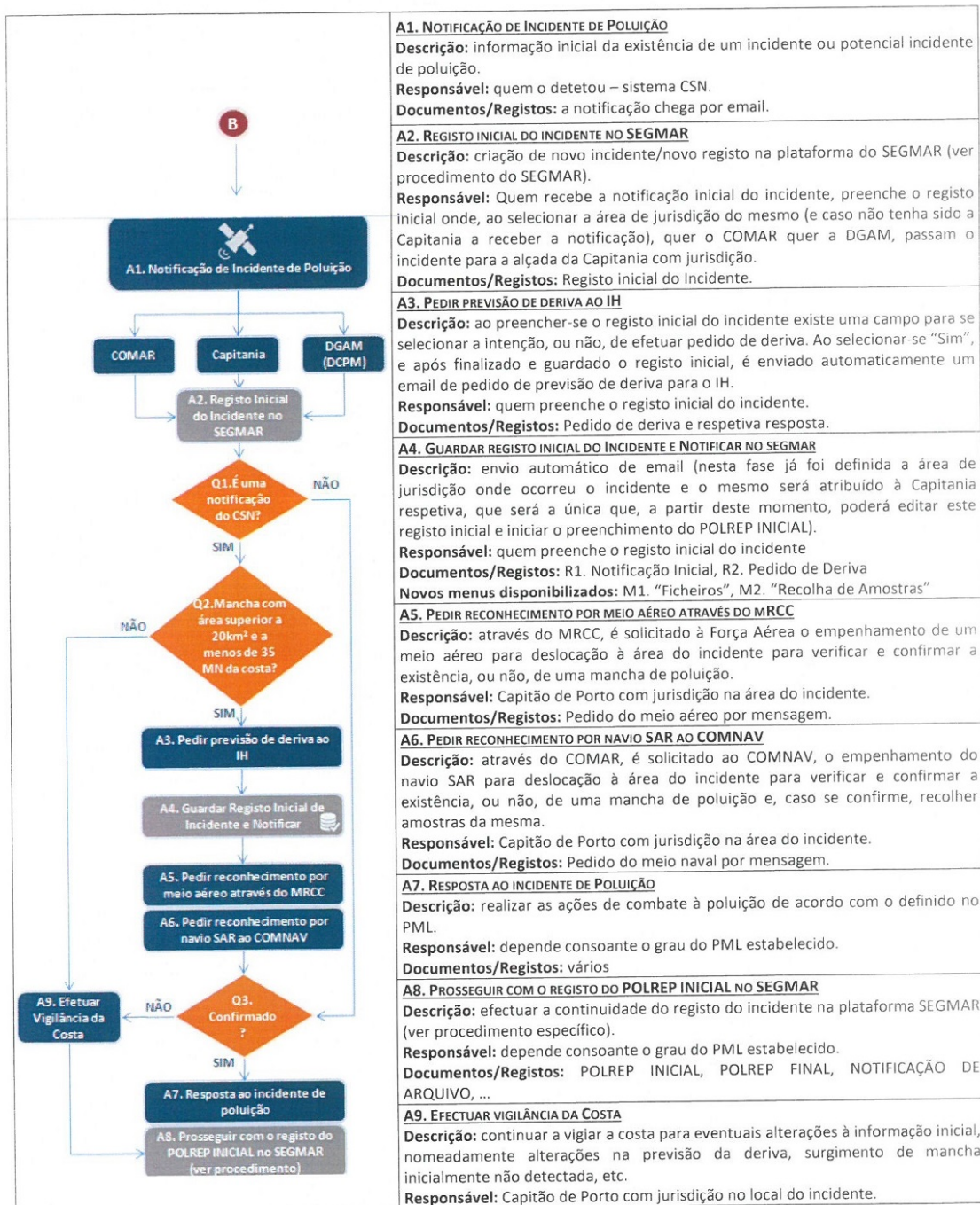


FIGURA I.3: Fluxograma de procedimentos de relatório SEGMAR - A seguir em caso de Detecção de um episódio de Poluição. Fonte: Circular N°107, 2007

Anexo II - Relatório de Alerta *CleanSeaNet*

Este relatório de alerta CSN, apresenta um alerta amarelo com um resumo das informações calculadas sobre uma detecção de um possível derrame identificado pelo satélite *Copernicus Sentinel-1* perto do cabo de São Vicente, a 7 de junho de 2018. Detalhes relevantes, como latitude, longitude, área, comprimento e largura, que são calculados automaticamente após a aquisição e análise da imagem.

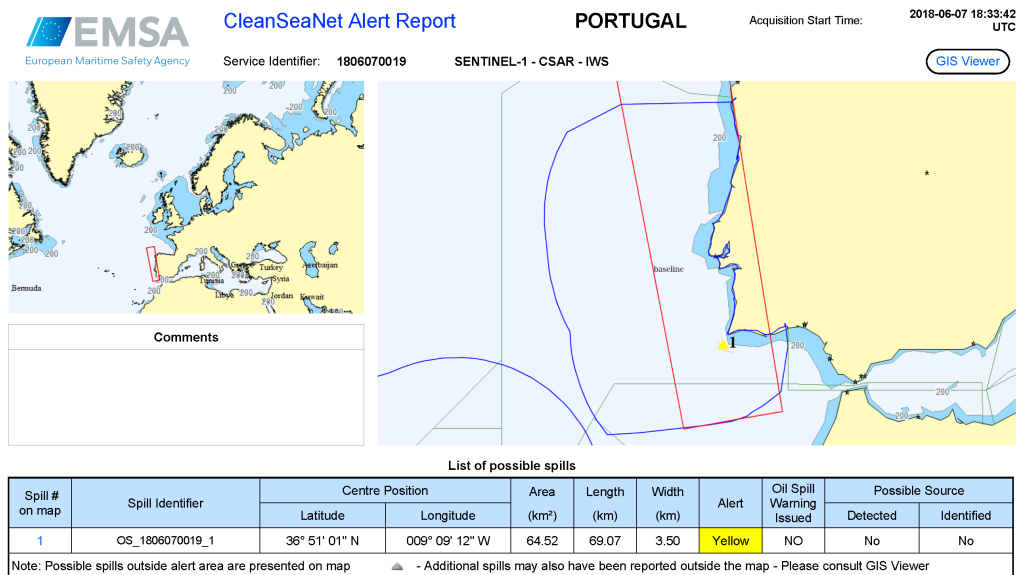


FIGURA II.1: Relatório de Alerta *CleanSeaNet*. Fonte: EMSA, 2018

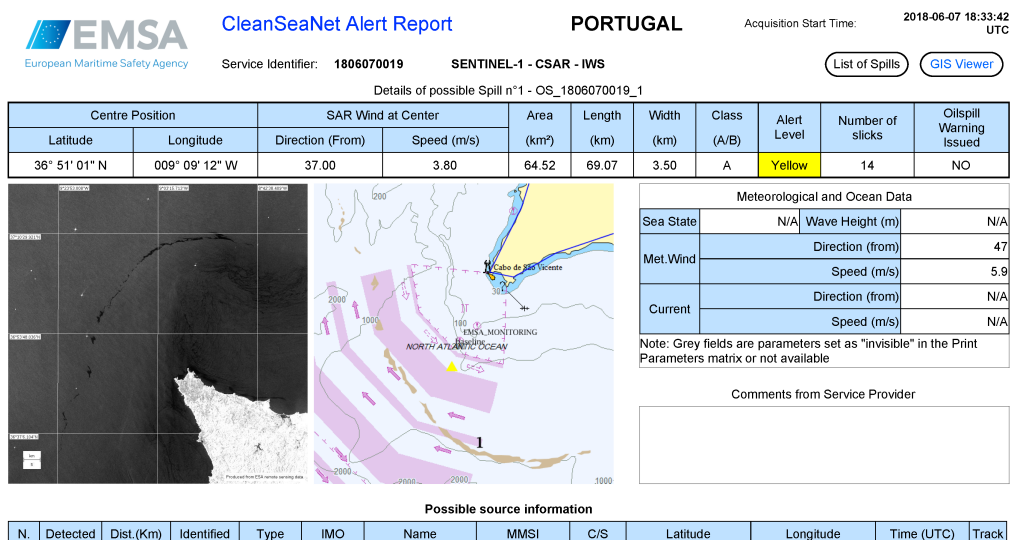


FIGURA II.2: Relatório de Alerta *CleanSeaNet*. Fonte: EMSA, 2018

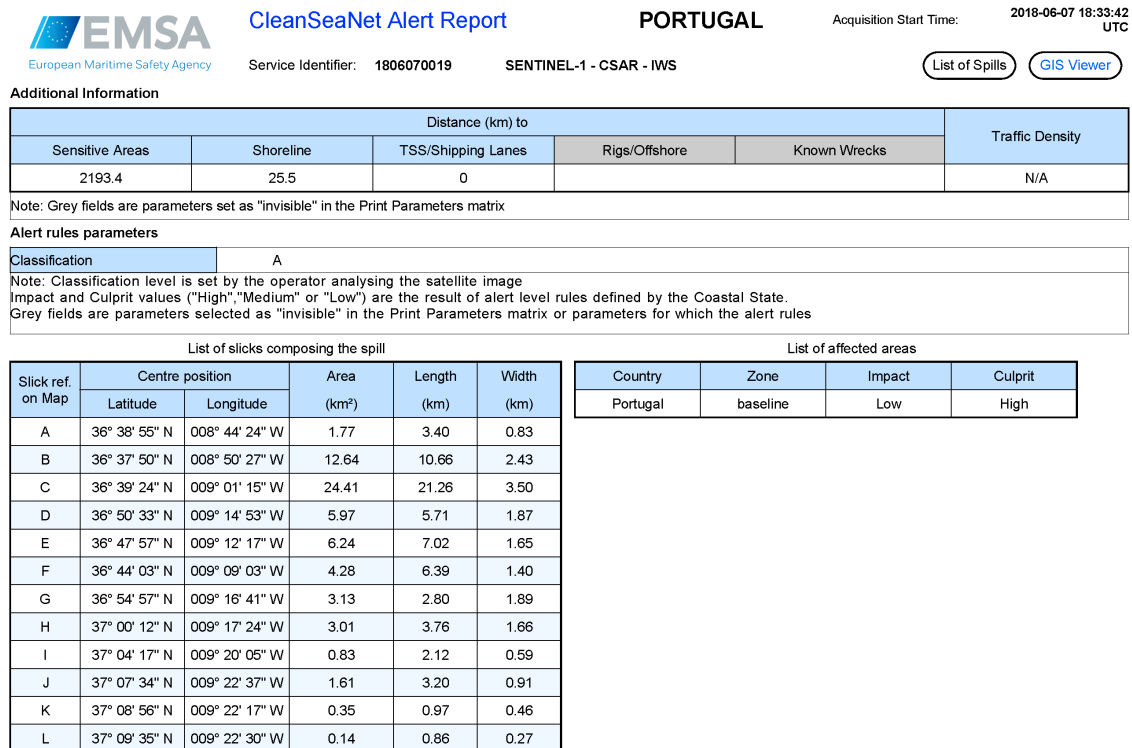


FIGURA II.3: Relatório de Alerta *CleanSeaNet*. Fonte: EMSA, 2018

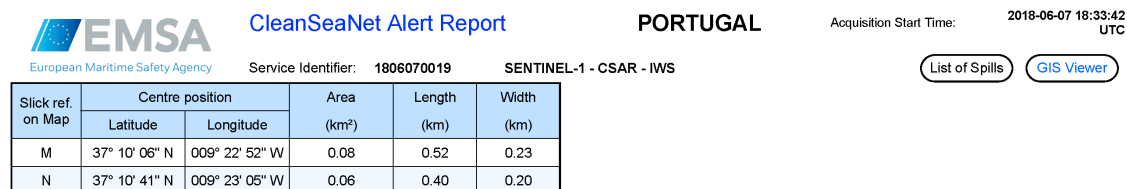


FIGURA II.4: Relatório de Alerta *CleanSeaNet*. Fonte: EMSA, 2018

Anexo III - Configurações das Barreiras

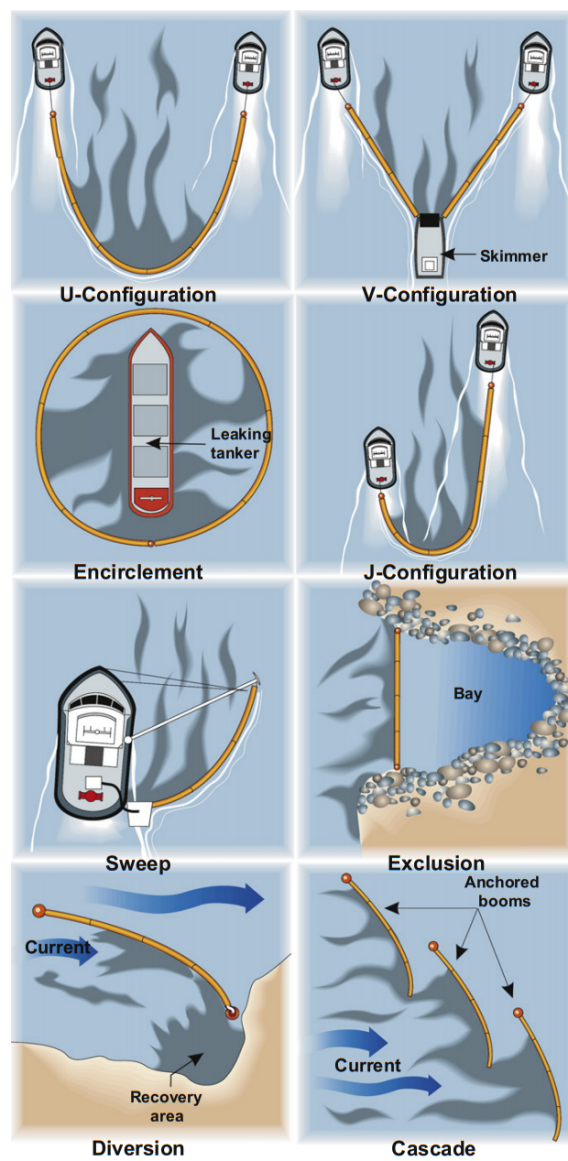


FIGURA III.1: Ilustração de várias configurações utilizadas na implementação de barreiras. Fonte: Fingas, 2011