



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA

MARIA EDUARDA AMÉRICO ISHIMARU

**Modelagem numérica aplicada à dispersão de óleo na borda leste do
Nordeste do Brasil**

RECIFE

2022

Maria Eduarda Américo Ishimaru

MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À DISPERSÃO DE ÓLEO NA BORDA
LESTE DO NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Oceanografia da Universidade Federal de
Pernambuco como pré-requisito para a
conclusão do curso de Bacharelado em
Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia
Física

Orientador: Prof. Dr. Marcus André Silva

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ishimaru, Maria Eduarda Américo.

Modelagem numérica aplicada à dispersão de óleo na borda leste do nordeste do Brasil / Maria Eduarda Américo Ishimaru. - Recife, 2022.

94 : il., tab.

Orientador(a): Marcus André Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Oceanografia - Bacharelado, 2022.

1. Oceanografia. 2. Atlântico Tropical. 3. Modelagem Numerica. 4. Derrame de óleo. 5. MEDSLIK-II. I. Silva, Marcus André . (Orientação). II. Título.

550 CDD (22.ed.)

MARIA EDUARDA AMÉRICO ISHIMARU

**MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA À DISPERSÃO DE ÓLEO NA BORDA
LESTE DO NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Oceanografia da Universidade Federal de
Pernambuco como pré-requisito para a
conclusão do curso de Bacharelado em
Oceanografia

Aprovado em: 21/10/2022

Nota de Aprovação: 100

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus André Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Ma. Syumara Queiroz De Paiva E Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Márcio das Chagas Moura (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Ma. Paulo Estevão Lemos de Oliveira (Ex. Suplente Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho à memória de minhas avós, Miyoko Ishimaru e Maria do Carmo Aquino, duas grandes mulheres que me ensinaram a nunca desistir de estudar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família. Aos meus pais, Jorge e Ana Ishimaru, pelo amor e incentivo e por terem possibilitado tudo que conquistei até hoje, e ao meu irmão, Pedro Jorge Ishimaru, pelas conversas e compreensão, e todo apoio que alguém pode sonhar em ter.

Ao meu orientador, Marcus André Silva, e a Syumara Queiroz por todo o incentivo, inspiração e ensinamentos, por toda a paciência enquanto me ensinavam os caminhos da modelagem, pelo ombro amigo, pelos risos e conversas. A toda equipe do LOFEC-CEERMA, ter a oportunidade de trabalhar e aprender com vocês foi um dos melhores momentos da minha graduação.

Agradeço à meu companheiro, Eric Hayato, pelo apoio e carinho, por me ajudar com a revisão do texto, e por todo cuidado que teve, garantindo que eu não esquecesse de me alimentar quando focava demais no trabalho.

Aos amigos, que sempre me apoiaram. A Tarsila Lima, pelos risos, pelos puxões de orelhas quando necessários, pelas conversas e discursões sobre assuntos aleatórios e por não ter deixado eu desistir e sempre me motivado a continuar em frente. A Karla Queiroz, a Christyan Campos, a Kathleen Campos, a Arthur Nascimento, a Ingrid Taiacolo, a Rayanne Oliveira, a Eduardo Araújo, a Jaqueline Cassimiro, e a todas as pessoas que me acompanharam e acompanham durante minha jornada.

Agradeço à Agência Nacional do Petróleo (ANP), Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH-38.1-ANP-FINEP), FINEP e ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI) pelo apoio financeiro.

E finalmente, agradeço a todos os professores da Universidade Federal de Pernambuco, em especial aos professores do curso de Oceanografia e a André, secretario da Graduação, por todos os conhecimentos que adquiri durante essa jornada.

“O dia de amanhã pode ser um inferno, mas hoje foi um bom dia de escrita e nos bons dias de escrita nada mais interessa”. (GAIMAN, 2004)

RESUMO

O rápido crescimento da produção mundial de petróleo e gás natural é motivo de atenção devido ao aumento de risco de ocorrerem derrames acidentais para o meio ambiente. Uma importante ferramenta que pode ser utilizada para auxiliar na elaboração de planos de contingência para o atendimento de emergências envolvendo vazamentos é a modelagem numérica da dispersão óleo. Através da simulação de diversos cenários, o comportamento da pluma de óleo e gás pode ser determinado, proporcionando agilidade para os tomadores de decisão.

Neste trabalho foi realizado simulações com o modelo lagrangeano MEDSLIK-II, de código aberto, na região da Bacia de Camamu-Almada, situada na costa leste brasileira, entre as cidades de Salvador e Ilhéus, no estado da Bahia, uma vez que é uma região que apresenta atividades de exploração, além da circulação de embarcações com diversos tipos de produtos, incluindo petroleiros. Para analisar melhor a influência da sazonalidade das correntes da região e sua influência no transporte de diferentes tipos de óleo foram analisados cenários considerando um único ponto inicial para a ocorrência do derrame em quatro épocas do ano, e com óleos característicos de 12°API(Buncker), 21°API(Pesado), 27°API(Moderado) E 36°(Leve).

Diante dos resultados das simulações, verificou-se que o período de julho apresentou para todos os cenários uma menor taxa de evaporação, provavelmente devido a menor temperatura sazonal da superfície do oceano combinada aos fortes ventos de sudeste e leste que ocasionaram com que o processo de emulsificação inicial fosse mais rápida, a formação do mousse contribui para a diminuição da área superficial onde atua os processos evaporativos. O processo de advecção nos cenários avaliados, apresentou um maior significado do que os processos de intemperismo para o comportamento do derrame.

Em todos os cenários avaliados, o óleo atingiu a costa no litoral da ilha de Itaparica em Vera Cruz. Essa prevalência de chegada de óleo próximo a região de Vera Cruz, na ilha de Itaparica, corrobora com os cenários observados após o acidente de óleo de 2019 ocorrido ao largo da plataforma continental do nordeste do Brasil.

Palavras-chave: Atlântico Tropical; Modelagem Matemática; Derrame de óleo; MEDSLIK-II.

ABSTRACT

The fast growth in world production of oil and natural gas is matter of attention due to the increased risk of accidental spills to the ambient. An important tool that is used to assist in the elaboration of contingency plans responding emergencies involving spills is numerical modelling of oil dispersion. Through the simulation of several scenarios, the behavior of the oil and gas plume can be determined, providing agility for decision makers.

In this work, simulations were carried out using the open source Lagrangian model MEDSLIK-II, in the region of the Camamu-Almada Basin, located on the east coast of Brazil, between the cities of Salvador and Ilhéus, in the state of Bahia, once it is a region that presents exploration activities, added a high circulation of vessels with different types of products, including oil tankers. In order, to better analyse the influence of the seasonality of currents in this region and its influence on the transport of different oil types, scenarios were analysed considering a single starting point for the occurrence of the spill, at four times representing each one a season of year, with oils of 12°API (Bunker), 21°API(Heavy), 27°API(Moderate) AND 36°(Light).

The simulation results present July period with a lower evaporation rate for all scenarios, probably due to the combination of lower seasonal sea surface temperature with strong southeast and east winds. These winds promote an initial emulsification process faster, consequently the formation of mousse contributes to the reduction of the surface area where the evaporative processes act. The advection process, in all scenarios, presented a greater significance than weathering processes for the spill behavior.

In all scenarios evaluated, the oil reached the coast near Itaparica Island in Vera Cruz. This prevalence of oil arrivals in this region of Vera Cruz corroborates the scenarios observed after the 2019 oil accident that occurred off the continental shelf of northeastern Brazil.

Keywords: Tropical Atlantic; Mathematical Modeling; oil spill; MEDSLIK-II.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processos de intemperismo de um derrame de óleo.	24
Figura 2 - Metodologia do procedimento de solução do modelo MEDSLIK-II.	35
Figura 3 - Localização da Bacia de Camamu-Almada, com destaque para os blocos em estudo para a 16ª Rodada de Licitações da ANP (ANP).....	37
Figura 4 - Pontos Inicial de vazamento, representado por S.	38
Figura 5 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de janeiro de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.....	42
Figura 6 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Abril de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.....	43
Figura 7 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Julho de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.....	44
Figura 8 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Outubro de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.....	45
Figura 9 - Temperatura da superfície do mar ($^{\circ}C$) em Janeiro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	46
Figura 10 - Temperatura da superfície do mar ($^{\circ}C$) em Abril de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	47
Figura 11 - Temperatura da superfície do mar ($^{\circ}C$) em Julho de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	48
Figura 12 - Temperatura da superfície do mar ($^{\circ}C$) em Outubro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	49
Figura 13 - Direção e intensidade da corrente superficial ($m.s^{-1}$) em Janeiro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	50
Figura 14 - Direção e intensidade da corrente superficial ($m.s^{-1}$) em Abril de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.....	51
Figura 15 - Direção e intensidade da corrente superficial ($m.s^{-1}$) em Julho de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	52

Figura 16 - Direção e intensidade da corrente superficial ($m.s^{-1}$) em Outubro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.	53
Figura 17 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 12 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	54
Figura 18 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 12 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	56
Figura 19 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 12 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	57
Figura 20 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 12 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	58
Figura 21 - Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 12 nos meses de (a)janeiro, (b)abril, (c)julho e (d)outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.....	59
Figura 22 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 21 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c)432 horas e (d) 672 horas.....	61
Figura 23 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 21 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	62
Figura 24 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 21 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	63
Figura 25 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 21 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	64
Figura 26 - Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 21 nos meses de (a) Janeiro, (b) Abril, (c) Julho e (d) Outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.....	65
Figura 27 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 27 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c)432 horas e (d) 672 horas.....	67
Figura 28 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 27 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	68
Figura 29 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 27 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	69
Figura 30 - Concentração de óleo ($ton.km^{-2}$) °API 27 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c)432 horas e (d) 672 horas.....	70

Figura 31 - Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 27 nos meses de (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.....	71
Figura 32 - Concentração de óleo (ton.km ⁻²) °API 36 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	73
Figura 33 - Concentração de óleo (ton.km ⁻²) °API 36 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	74
Figura 34 - Concentração de óleo (ton.km ⁻²) °API 36 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	75
Figura 35 - Concentração de óleo (ton.km ⁻²) °API 36 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.....	76
Figura 36 - Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 36 nos meses de (a)janeiro, (b)abril, (c)julho e (d)outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.....	77
Figura 37 - Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S1, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro.....	80
Figura 38 - Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S2, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro.....	81
Figura 39 - Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S3, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro.....	82
Figura 40 - Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S4, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de diferentes tipos de petróleo bruto de acordo com o grau API e densidade específica.(PALIUKAITĖ, 2014).....	23
Tabela 2 - Variáveis de estado do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS et al., 2013a)	32
Tabela 3 – Características dos óleo utilizados para rodar o modelo.....	39
Tabela 4 – Dados obtidos a partir das simulações.	78

LISTA DE SÍMBOLOS

MEDSLIK-II

ρ, ρ_w	Densidade do óleo e da água [$kg \cdot m^{-3}$]
C_S, C_D, C_C	Concentração na superfície, disperso e na costa [$kg \cdot m^{-2}$]
V_S, V_D	Volume de óleo na superfície e na coluna d'água [m^3]
V^{TK}, V^{TN}	Volume de óleo na camada espessa e fina [m^3]
A^{TK}, A^{TN}	Área da camada espessa e fina do derrame [m^2]
T^{TK}, T^{TN}	Espessura da camada espessa e fina [m]
x_k, y_k, z_k	Coordenadas horizontais e vertical da partícula [m]
v_E, v_{NE}	Volume evaporativo e não evaporativo [m^3]
$\sigma(n_k, t)$	Índice do status da partícula
F	Fator padrão de área entre a camada fina e espessa
N	Número total de partículas liberadas no derrame
φ_{NE}	Percentual do componente não evaporativo
c	Taxa de variação da pressão de vapor [s^{-1}]
R	Constante dos gases [$bar \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]
V_{MOL}	Volume molar [$mol \cdot m^{-3}$]
$C_1^{(E)}$	Taxa de evaporação [$m \cdot s^{-1}$]
γ	Expoente da velocidade do vento
W_0	Escala do vento [$m \cdot s^{-1}$]
$K^{(E)}$	Fração evaporada na viscosidade do óleo
v_s	Velocidade de subida da gota pequena [$m \cdot s^{-1}$]
u_m	Espessura da nuvem de gotículas [m]
$C_1^{(D)}$	Velocidade de difusão para baixo das gotas pequenas [$m \cdot s^{-1}$]
$C_3^{(D)}$	Taxa de dispersão de todas as gotas pelas ondas [s^{-1}]
$C_4^{(D)}$	Dispersão a partir da camada espessa
η_{EM0}	Escala da viscosidade da emulsão [$m^2 \cdot s^{-1}$]
$C_5^{(D)}$	Dispersão a partir da camada fina
τ	Tensão superficial da interface (óleo/água) [$kg \cdot s^{-2}$]
τ_0	Escala da tensão superficial da interface (óleo/água) [$kg \cdot s^{-2}$]
$C_1^{(M)}$	Fração de água na viscosidade da emulsão
$C_2^{(M)}$	Taxa de aumento da fração de água [s^{-1}]
$C_3^{(M)}$	Fração máxima da água recíproca

T_0^{TK}	Escala de espessura da camada espessa [m]
$C_1^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada fina [s^{-1}]
$C_2^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada espessa [s^{-1}]
$C_3^{(S)}$	Dependência do espalhamento da camada fina [m]
ϵ	Offset da espessura [m]
c_s	Fração de gotas pequenas
S_{TK}	Fração de gotas pequenas abaixo da camada espessa
S_{TN}	Fração de gotas pequenas abaixo da camada fina
η	Viscosidade do óleo [$m^2 \cdot s^{-1}$]
η_0	Viscosidade inicial do óleo [$m^2 \cdot s^{-1}$]
η_{EM}	Viscosidade do mousse no processo de emulsificação [$m^2 \cdot s^{-1}$]
r	Número real aleatório
K_h, K_v	Difusividade turbulenta horizontal e vertical [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_C	Vetor do campo de velocidade Euleriano [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_W	Vetor de correção de correntes geradas pelo vento [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_S	Vetor de correntes geradas por ondas [$m \cdot s^{-1}$]
ϑ	Direção do vento
D_S	Direção de propagação da onda
ω	Frequência angular [$rad \cdot s^{-1}$]
k	Número de onda [m^{-1}]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivos específicos	20
2. PETRÓLEO E O INTEMPERISMO	21
2.1 Componentes	21
2.2 Classificação	22
2.3 Intemperismo	23
2.4 Consequências do derrame de óleo	27
3. METODOLOGIA	29
3.1 Descrição da Área de Estudo: Clima e Hidrodinâmica da Bacia de Camamu-Almada	29
3.2 Modelo de derramamento de óleo - MEDSLIK-II	30
3.3.1 Componentes do MEDSLIK II	30
3.3.2 Configuração do MEDSLIK-II	36
3.3 Dados Externos – Mercator E Cersat	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Circulação oceânica e campo de ventos	41
4.2 Evolução dos derrames	54
4.2.1 S1, Bunker, °API 12	54
4.2.2 S2, Pesado, °API 21	61
4.2.3 S3, Moderado, °API 27	67
4.2.4 S4, Leve, °API 36	73
4.2.5 O óleo na costa	78
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	84
REFERÊNCIA	86

1. INTRODUÇÃO

Derramamento de óleo no mar causados pela liberação acidental, tanto do petróleo bruto por navios-tanque, sondas de perfuração e poços, assim como o vazamento de produtos petrolíferos refinados e seus subprodutos, ocorrem com frequência, gerando impactos negativos aos ecossistemas oceânicos e comunidades costeiras (ALMEDA *et al.*, 2013; LEE *et al.*, 2015).

A poluição por óleo pode ocorrer não apenas na superfície do mar, mas também em águas mais profundas, levando a impactos ambientais ainda mais extensos.

Muitos derramamentos de óleo em grande escala na história resultaram em impactos catastróficos, como foi o caso do derramamento de óleo da Deepwater Horizon em 2010 no Golfo do México (492.000 a 627.000 toneladas de óleo) e o derramamento do campo de petróleo Penglai19-3 em 2011 no Mar de Bohai, China (cerca de 200 toneladas) (LIU *et al.* 2015b). Ambos resultantes da exploração contínua de reservas de petróleo em águas profundas, onde a instalação de oleodutos em águas profundas aumentam os riscos de liberação acidental de óleo por *blowouts* de poços e/ou rupturas de oleodutos. Outro caso marcante foi o derramamento de óleo ao largo da plataforma continental do nordeste do Brasil em 2019 (IBAMA, 2019; ZACHARIAS *Et al.*, 2021) de origem não identificada, que atingiu mais de 3000km ao longo da costa brasileira (IBAMA, 2019).

Mesmo vazamentos de pequena escala ainda podem ocasionar efeitos de longo prazo preocupantes, prejudicando o ecossistema e os organismos (ANDERSSON *et al.*, 2016; BURGESS, 2009; CRAVEIRO *et al.* 2021; YIM *et al.*, 2020). Devido ao transporte do material por correntes e ventos, independente dos vazamentos ocorrerem longe da costa, a região costeira ainda pode ser afetada, prejudicando o equilíbrio nesta região e podendo afetar áreas de sensibilidade ambiental como estuários e zonas de proteção ambiental (TANSEL, 2014; TANSEL; LEE, 2019).

São vários os fatores que condicionam o destino final da pluma de óleo, desde o ponto em que ocorreu a liberação, o tipo de óleo (leve, médio ou pesado), a quantidade derramada, duração de derramamento, até mesmo a estação do ano e condições meteoceanográficas da região influenciam no transporte, e também na magnitude dos impactos que irão gerar (ETKIN, 2017). Por o petróleo bruto apresentar uma grande variedade de compostos, sendo que cada um apresenta

características únicas, dependendo da porcentagem de cada composto presente, este pode apresentar uma grande variedade de propriedades. Os constituintes principais do petróleo bruto podem ser saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos(GAD, 2014). O petróleo leve contém uma porcentagem maior de hidrocarbonetos saturados e aromáticos, enquanto o petróleo pesado contém mais resinas e asfaltenos (FAN; BUCKLEY, 2002).

Para responder com rapidez e sucesso a um derramamento de óleo em uma área geográfica definida, é necessário um plano de contingência incluindo informações e processos para contenção e limpeza do mesmo. Uma parte importante do desenvolvimento do plano deve envolver a avaliação de risco que, além de avaliar a probabilidade de ocorrer um derramamento de óleo para uma área específica, deve determinar os ambientes costeiros que seriam mais gravemente danificados ou, em outras palavras, a vulnerabilidade. Com base nessas informações, estratégias de proteção podem ser desenhadas. A avaliação da vulnerabilidade ao derramamento de óleo em ambientes costeiros é uma questão fundamental no planejamento de uma resposta ao acidente , pois é um dos componentes-chave da determinação de risco.

Nos últimos anos houve uma intensificação das atividades petrolíferas nacionais. Em 2020, a produção nacional de petróleo apresentou alta de 5,7% na comparação anual, atingindo 1,1 bilhão de barris (média de 2,9 milhões de barris por dia), sendo que a produção de óleo no pré-sal passou de 634 milhões de barris em 2019 para 746,7 milhões de barris em 2020, representando 69,4% da produção nacional total (ANP, 2020). Diante desse aumento, novas ferramentas de modelagem computacional de derramamentos são fundamentais para lidar com os potenciais acidentes de derramamento de óleo, assim como observações e monitoramentos precisos em tempo real são considerações críticas para os órgãos de segurança marítima com dados de climatologia, meteorologia, vento, correntes e óleo derramado (MARTA-ALMEIDA *et al.*, 2013).

Modelos de previsão de transporte de petróleo foram desenvolvidos e usados durante nos últimos anos, apresentando grandes avanços com melhorias na previsão de trajetória e nos processos de intemperismo do óleo (KERAMEA *et al.*, 2021). Alguns modelos de deriva de óleo incluem OSCAR (REED , 1995), OILMAP (HOWLETT; JAYKO; SPAULDING, 1993), GULFSPILL (AL-RABEH; LARDNER; GUNAY, 2000), ADIOS (LEHR *et al.*, 2002), MOHID (CARRACEDO *et al.*, 2006)

MEDSLIK II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a,b), GNOME (BEEGLE-KRAUSE, 2001) e OILTRANS (BERRY; DABROWSKI; LYONS, 2012). Esses modelos geralmente são forçados por uma série temporal de correntes oceânicas, vetores de vento na superfície do oceano, temperatura do mar etc. Os resultados da simulação podem fornecer aconselhamento consultivo crucial às autoridades de resposta a emergências para prever ou mitigar efetivamente os impactos negativos no ambiente marinho.

Neste trabalho foi realizado simulações com o modelo lagrangeano MEDSLIK-II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a,b), de código aberto, na região da Bacia de Camamu-Almada, situada na costa leste brasileira, entre as cidades de Salvador e Ilhéus, no estado da Bahia. A região foi escolhida por apresentar atividades de exploração, além da circulação de embarcações com diversos tipos de produtos, incluindo petroleiros, além de ter sido uma das regiões afetadas no caso do derrame de 2019 (IBAMA, 2019; ZACHARIAS *Et al.*, 2021). Para analisar melhor a influência de diferentes condições das correntes da região e sua influência no transporte de diferentes tipos de óleo foram analisados cenários, considerando um único ponto inicial para a ocorrência do derrame em quatro épocas do ano, e com óleos característicos de 12°API (Bunker), 21°API (Pesado), 27°API (Moderado) e 36°API (Leve).

1.1 Objetivos

Aplicar para uma determinada região do litoral NE brasileiro, inserido na região tropical do Atlântico Sul, uma metodologia utilizando-se de modelagem matemática visando caracterizar a dispersão de óleo bruto na superfície e coluna d'água.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Identificar uma região de importância ecológica, econômica e social localizada na Margem Equatorial Brasileira para a simulação de derrames de óleo nos seus entornos;
2. Avaliar como as condições ambientais características da região podem influenciar na dispersão de gás-óleo.
3. A partir dos resultados da simulação com MEDSLIK-II, identificar as regiões de vulnerabilidade.

2. PETRÓLEO E O INTEMPERISMO

O petróleo pode ser definido como uma mistura natural de compostos de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos, podendo apresentar outros compostos tais quais enxofre, nitrogênio, oxigênio, metais e outros elementos (SPEIGHT, 2014).

Em derramamentos de óleo, o modo no qual ocorre o processo de dispersão que atua na pluma de óleo depende de uma série de processos químicos, físicos e biológicos complexos, que são determinados tanto pelas propriedades do óleo, quanto pelas condições ambientais e hidrometeorológicas, os quais devem ser considerados na modelagem numérica.

De forma a compreender melhor esses processos atuantes, serão abordados no tópico a seguir alguns conceitos fundamentais, desde a composição do petróleo, até os impactos por ele causados em ecossistemas.

2.1 Componentes

O petróleo apresenta uma origem natural, sendo formado em escalas de tempo geológicas através da catagênese de um material rico em hidrocarbonetos chamado querogênio. Os óleos brutos, ou cru, diferem quanto a sua composição, o que os leva a apresentar uma grande variedade de propriedades, diferentemente do produto refinado, que por vezes são enriquecidos com determinados compostos, como as olefinas que se formam durante o processo de craqueamento, e passam a ter características bem definidas. (THOMAS, 2001)

A composição química e propriedades físicas do óleo cru variam de acordo com a sua origem, sendo basicamente composto por hidrocarbonetos de série homólogas e apresentando por vezes a presença de outros compostos (Sulfurados, nitrogenados, oxigenados e metálicos) (SPEIGHT, 2014). A quantidade relativa de cada série e de cada componente individual é o que explica as variações e diferenças nas propriedades físicas em óleos de diferentes origens, e justamente por ter uma composição complexa e variável que se encontram dificuldade para, por exemplo, o tratamento de áreas contaminadas por tais substâncias, como em acidentes de vazamentos.

Uma classificação bastante utilizada na petroquímica distingue os principais hidrocarbonetos do petróleo em dois grupos principais, os saturados e os aromáticos

(THOMAS, 2001). Os hidrocarbonetos parcialmente saturados (olefinas) são raros ou ausentes no óleo cru (SPEIGHT, 2014).

Frequentemente, é abordado com mais frequência na literatura os hidrocarbonetos saturados, alcanos ramificados selecionados (menos de 40 carbonos) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs de dois a seis anéis). Os saturados podem fornecer informações sobre os processos de evaporação e biodegradação. Os HPAs são amplamente estudados pela sua toxicidade e por poderem ser usados para impressões digitais de óleo e para obter informações sobre os processos de dissolução e fotodegradação (DIEZ *et al.*, 2007; PLATA; SHAPLESS; REDDY, 2008).

O grupo dos saturados representa a fração predominante no petróleo, sendo constituída por hidrocarbonetos de cadeia simples e ramificadas, por alcanos, também conhecidos como parafinas, e cicloalcanos. No grupo dos aromáticos, estão incluídos os compostos que apresentam, no mínimo, um anel benzênico (seis carbonos de cadeia cíclica e com três ligações duplas), como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, e aqueles com, no mínimo, dois anéis, como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) (THOMAS, 2001).

As olefinas são compostos insaturados que possuem, no mínimo, uma ligação dupla entre carbonos e apresentam quantidades significativas apenas nos produtos refinados. Os componentes do óleo classificados como polares são aqueles que possuem cadeias com ligações contendo enxofre, oxigênio ou nitrogênio, conferindo uma polaridade à molécula. Os compostos polares menores, denominados resinas, são amplamente responsáveis pela propriedade de adesão do óleo. Já os maiores são conhecidos como asfaltenos, uma vez que constituem grande parte do asfalto comumente utilizado na construção de estradas (FINGAS, 2011).

A distribuição e as características dessas espécies moleculares são responsáveis pela rica variedade de óleos brutos.

2.2 Classificação

As diferenças na composição química entre diferentes tipos de petróleos devido à sua origem e composição tem levado a diversos métodos analíticos de caracterização e classificação com o objetivo de medir características específicas de

uma maneira mais rápida, auxiliando na tomada de decisão mais eficiente (GARMARUDI, 2019),

Um parâmetro que tem sido amplamente utilizado para a classificação do petróleo e que tem demonstrado boa relação com outras propriedades físicas e químicas é o grau API (PASQUINI, 2007). Essa classificação foi estabelecida pelo *American Petroleum Institute* em conjunto com o National Bureau of Standards, e é um padrão adimensional que tem relação direta com a gravidade específica (densidade) do petróleo. Este parâmetro físico também tem sido correlacionado com a composição química do petróleo e é um dos principais indicadores de sua qualidade. O °API pode ser calculado de acordo com a equação 1 (UNITED STATES, 1936).

$$^{\circ}API = \left(\frac{141,5}{\text{Peso específico}} \right) - 131,5 \quad (1)$$

Logo, o °API é inversamente proporcional à densidade do óleo, determinando valores elevados para óleos mais leves, e determina o seu valor no mercado internacional, uma vez que para óleos mais leves o custo com processos posteriores de refino diminui. De acordo com as faixas de °API, o óleo pode ser classificado como leve, médio ou intermediário e pesado, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Comparação de diferentes tipos de petróleo bruto de acordo com o grau API e densidade específica.(PALIUKAITĖ, 2014)

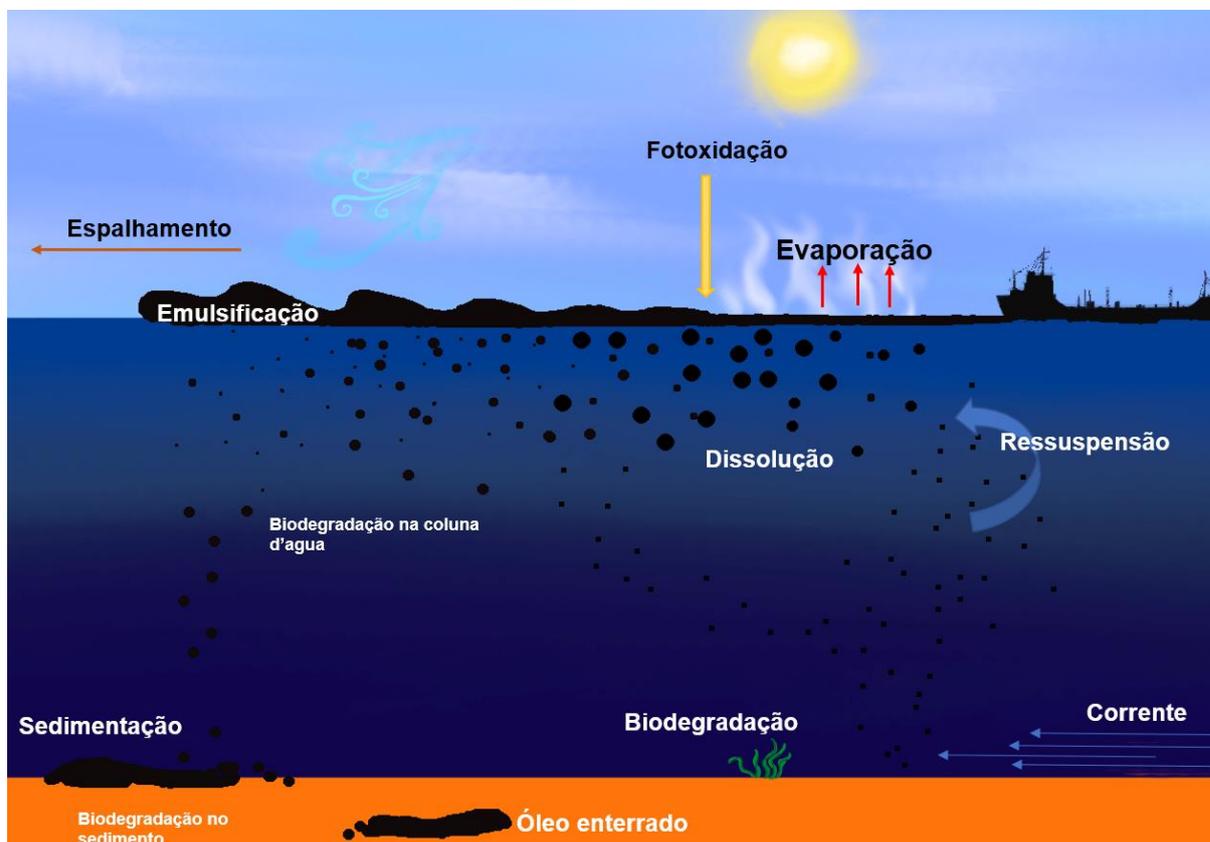
Tipo de óleo	Grau API	Densidade específica
Leve	>31,1 °	< 870 kg/m ³
Médio	22,3 - 31,1 °	870–920 kg/m ³
Pesado	<22,3 °	920–1000 kg/m ³
Extra pesado	<10 °	>1000 kg/m ³

2.3 Intemperismo

O destino e o comportamento de um derramamento de óleo podem ser influenciados pelos processos físico-químicos de intemperismo do óleo: espalhamento, evaporação, emulsificação, dissolução, foto-oxidação, biodegradação

e sedimentação, e os processos de transporte físico, como transporte e turbulência entre outros(LEE, *et al.* 2015) (Figura 1).

Figura 1- Processos de intemperismo de um derrame de óleo.



Fonte: Autoral.

Os processos ocorrem em diferentes taxas e com diferentes momentos de início, o que resulta em alterações progressivas da composição do óleo e seu comportamento após o derrame, de tal forma, a compreensão de como cada processo afeta um derramamento de óleo é importante para esforços de resposta eficientes e alocação de esforços de limpeza.

Os primeiros processos acontecem em um derrame de óleo são o espalhamento e a evaporação. O espalhamento refere-se à criação de um filme fino, que se expande sobre a superfície do mar, assim que o óleo é liberado, sendo que sua taxa de espalhamento e a espessura dessa camada dependem da temperatura da superfície do mar, viscosidade do óleo e densidade (BUIST; TWARDUS, 1984). Óleos com maiores quantidades de compostos de baixo peso molecular (LMW) tendem a se

espalhar mais rápido o que por sua vez aumenta a taxa do processo de evaporação dos compostos mais voláteis.

A evaporação é o principal processo de intemperismo que afeta as características do óleo durante as primeiras horas após um derramamento, quando os elementos mais voláteis do óleo passam para o estágio gasoso adentrando a atmosfera onde são diluídos e transportados, permanecendo assim, os componentes mais pesados no mar (STOUT; WANG, 2007). Os óleos pesados podem perder até 5% de seu volume devido à evaporação (FINGAS, 1997), sendo que a evaporação remove a maior parte das frações voláteis do óleo para a atmosfera em poucas horas, levando à redução da toxicidade do óleo no ambiente marinho (MISHRA; KUMAR, 2015; ZAFIRAKOU, 2018). No entanto, esses compostos são transferidos para a atmosfera e, em alguns casos (por exemplo, grandes derramamentos próximos a áreas densamente povoadas), os efeitos da evaporação podem ser mais tóxicos (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019). Em contrapartida, a viscosidade das “manchas intemperizadas” restantes aumenta, o que desencadeia efeitos físicos e químicos severos para o ecossistema marinho (ZAFIRAKOU, 2018).

A dissolução é outro processo que pode reduzir a massa de um derramamento de óleo, podendo reduzi-la em até 1 a 3% (STOUT; WANG, 2007). Embora isso seja muito menos significativo do que as perdas por evaporação, a dissolução é um processo importante uma vez que os hidrocarbonetos aromáticos de menor peso molecular (hidrocarbonetos aromáticos monoaromáticos e polinucleares, e HPAs), que são altamente voláteis e solúveis, são os elementos mais tóxicos do óleo para os organismos aquáticos. O óleo pode ser dissolvido na coluna de água a partir da mancha superficial ou de gotículas de óleo dispersas. Dissolução e evaporação são dois processos competitivos (ABIANEH; CHEN, 2012), embora a evaporação exiba taxas mais rápidas e afete partes maiores do derramamento. Geralmente, a dissolução é significativa quando a evaporação é baixa (HORN, 2018). Portanto a dissolução é substancial para derramamentos de óleo subterrâneos e gotículas de óleo dispersas.

Fotoxidação é um processo pouco compreendido que tende a formar radicais livres, na qual os hidrocarbonetos aromáticos (particularmente HPAs incluindo heterocíclicos com oxigênio, nitrogênio e enxofre) e algumas resinas com nitrogênio

ou enxofre reagem com o oxigênio na presença da luz solar gerando produtos oxigenados (YIM *et al.*, 2012). Esses produtos são mais resistentes à biodegradação e mais polares e, por consequência, mais solúveis em água (PAYNE; PHILLIPS, 1985). Como o potencial de fotoxidação dos HPAs é inversamente proporcional ao potencial de biodegradação, os HPAs com maior número de anéis são mais susceptíveis à fotoxidação e logo retirados do sistema, o que diminui a toxicidade crônica do derrame. Entretanto, a gama de produtos da reação não é totalmente conhecida, assim como seus efeitos na biota aquática (LEE *et al.*, 2015). Apesar da fotoxidação não contribuir significativamente para a perda de massa do derrame, o processo pode influenciar de maneira significativa os processos posteriores de intemperismo, alterando a viscosidade, contribuindo para a emulsificação e para a formação de “crostas” na superfície do derrame, que por sua vez diminuem o processo de evaporação (FINGAS, 2014; LEE *et al.*, 2015).

A emulsificação é o processo pelo qual a água é misturada ao óleo, ocorrendo devido à ação do vento e quebras das ondas na superfície que misturam a água ao óleo, criando um *mousse*. A composição do óleo, temperatura e viscosidade desempenham um papel significativo no processo. A emulsificação é extremamente importante, pois uma emulsão ou “mousse” estável com, por exemplo, 60-80% de água pode aumentar o volume do derrame em 2-5 vezes e a densidade em mais de 1000 vezes, diminuindo a evaporação e o espalhamento (FINGAS; FIELDHOUSE, 2014).

À medida que a viscosidade do óleo aumenta, uma quantidade maior de óleo é emulsificado e isso interrompe adicionalmente a taxa de evaporação. Em paralelo, a taxa de emulsificação se expande com o aumento da velocidade do vento e turbulência na superfície do mar (HORN, 2018). As gotículas emulsionadas podem permanecer na coluna de água por períodos mais longos (de meses a anos). O principal efeito da emulsificação é que ela cria uma emulsão de viscosidade consideravelmente aumentada, em comparação com o óleo inicialmente derramado, resultando em sérias implicações para os métodos de tratamento. Outro efeito negativo importante da emulsificação é que ela aumenta o volume e densidade da mancha; isso significa que os custos de limpeza são muito maiores (FINGAS, 2011).

Alguns dos processos descritos acima contribuem para a submersão, afundamento e sedimentação do óleo, como o aumento do peso devido a evaporação e/ou dissolução, emulsificação e a interação do óleo com o material particulado

inorgânico e orgânico. Com isso, aumenta dificuldade de recuperação do óleo e à toxicidade potencial associada (LEE *et al.*, 2015). Um exemplo da persistência do óleo no sedimento foi observado em algumas praias do Golfo do Alasca depois de 16 anos do derrame do Exxon Valdez (SHORT *et al.*, 2007).

2.4 Consequências do derrame de óleo

Assim que o óleo é lançado no mar, os processos de evaporação e dispersão na coluna de água se iniciam e o ambiente começa a ser impactado. A severidade de um derrame não está conectada somente a quantidade lançada no ambiente, mas também a toxicidade do óleo, tempo de exposição, eco-sensibilidade da região e capacidade de resposta dos responsáveis, que vão definir a severidade dos impactos ecológicos e sociais (CHANG *et al.* 2014).

Nos organismos, o óleo pode afetar diferentes espécies de inúmeras formas, desde o acúmulo de contaminantes nos tecidos, danos ao DNA, impactos no funcionamento imunológico, a disfunção cardíaca por exemplo (AGUILERA *et al.*, 2010; INCARDONA *et al.*, 2009; JUDSON *et al.*, 2010; KAZLAUSKIENE *et al.*, 2008; MA *et al.*, 2003; MAJOR; WANG, 2012; ORMSETH; BEN-DAVID, 2000; ROGERS *et al.*, 2002).

Diferentes espécies de organismos apresentam diferentes respostas a toxicidade devido a suas características morfológicas e fisiológicas. Desta forma a previsão de como as espécies locais responderão a um derramamento de óleo podem ser obtidas a partir de informações sobre o impacto de derramamentos anteriores em espécies geneticamente relacionadas, por exemplo. Entretanto, diferenças sutis entre espécies próximas podem resultar em respostas divergentes a eventos de óleo (NORTH, 1973).

A recuperação do ecossistemas variam de acordo com as características do derramamento, as espécies e tipo de habitat. No ambiente marinho, o tempo de residência do óleo depende do regime hidrodinâmico local e processos de degradação/remoção, e a partir do momento que o óleo atingi a linha de costa, o impacto dependera dependerá do substrato local e das condições hidrodinâmicas. Um exemplo foi o acidente do Exxon Valdez, no qual sedimentos e mexilhões em uma ampla área geográfica permaneceram contaminados com hidrocarbonetos de petróleo 6 anos após o derramamento de óleo e são uma potencial fonte crônica de

contaminação para espécies predadoras que consomem mexilhões, e apesar da tendência geral ser a diminuição da contaminação, uma contaminação significativa pode persistir em alguns locais por várias décadas dependendo da hidrodinâmica e substrato do local (CARLS *et al.*, 2001).

A resposta do ecossistema a um derramamento de óleo depende tanto dos impactos diretos nas espécies quanto dos impactos indiretos por meio de interações de espécies alteradas, assim como foi também observado após o acidente do derrame de óleo do Exxon Valdez, na qual se observou um aumento na abundância de ouriços devido à mortalidade em massa relacionada ao óleo de seu predador dominante, a lontra marinha (DEAN *et al.*, 2000). Por outro lado, a redução de interações positivas, ou seja, facilitação, também pode resultar em recuperação tardia (VAN TAMELEN *et al.*, 1997).

Os derramamentos de óleo podem trazer consequências desastrosas para a sociedade, afetando não somente o ecossistema, mas também as comunidades que dependem do mesmo para sua subsistência (SILVA, 2022). Quando ocorre um derramamento de óleo, a principal preocupação é a velocidade e a direção da deriva do óleo em relação à localização das áreas sensíveis. O intemperismo do óleo também é importante porque afeta o comportamento do óleo, bem como as eventuais consequências ambientais do derramamento (SILVA, 2022). O sucesso em tomar as melhores decisões de resposta é determinado por uma série de ações: Desde a capacidade de prever a propagação e trajetória do derramamento ao longo do tempo, a prever mudanças nas propriedades do mesmo para determinar um plano de ação.

3. METODOLOGIA

Nas seções a seguir serão apresentadas a descrição da área escolhida para a realização das simulações (3.1), a descrição do modelo e as configurações utilizadas(3.2) e os dados que serviram de forçante para rodar o modelo(3.3).

3.1 Descrição da Área de Estudo: Clima e Hidrodinâmica da Bacia de Camamu-Almada

A região escolhida para a aplicação do modelo foi a região da Bacia de Camamu-Almada.

A Bacia situa-se na costa leste brasileira, entre as cidades de Salvador e Ilhéus, no estado da Bahia, ocupando uma área total de 83.976,44 Km² em águas territoriais brasileiras (ANP, 2019). É uma região única, apresentando a plataforma continental reta mais estreita (17 km em média) ao longo da Costa Leste da América do Sul, assim como, está localizada numa região que apresenta forte influência, na circulação costeira, pela porção norte do giro subtropical do Atlântico Sul, onde a bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sSEC) (AMORIM, 2011) produz duas Correntes de Borda Leste: a Corrente Norte do Brasil (NBC) equatorial e a Corrente do Brasil (BC) polarizada (AGUIAR,2018).

Existem indícios de um sistema petrolífero especulativo nas águas profundas da Bacia de Camamu-Almada, por analogia com descobertas na porção sul da Bacia de Sergipe-Alagoas, e com a perfuração do poço 1-BP-10-BS, que amostrou rochas dessa seção e comprovou o potencial gerador através de análises geoquímica(ANP, 2019). Essa região apresenta também alto tráfego marinho, composto principalmente por navios petroleiros, sendo perto do Terminal Madre de Deus, principal ponto de escoamento da produção da Refinaria de Mataripe, cujos derivados abastecem as regiões Norte e Nordeste do Brasil (MARINETRAFFIC, 2022; PETROBRAS, 2022).

A Bacia de Camamu abriga em seu interior um rico ecossistema estuarino, com manguezais de 4 grande potencial pesqueiro, restingas, Mata Atlântica e inúmeras ilhas. Recentemente foram concedidos 18 blocos para exploração de petróleo e gás na plataforma continental adjacente à BC, sendo 6 blocos localizados em águas rasas (ANP, 2019). Os principais rios, cujas descargas fluviais tornam a Baía de Camamu um sistema estuarino, são o Serinhaém, Igrapiúna, Sorojó e Maraú(AMORIN, 2005).

A costa da Bahia apresenta um regime de ventos constante, influenciado pelos alísios, apresentando uma predominância de ventos de nordeste e de leste durante a primavera e verão, enquanto no outono e inverno os ventos são predominantemente de sul e sudeste (CIRANO; LESSA, 2007; DOMINGUEZ; ANDRADE; BITTENCOURT, 2009).

As variações sazonais dos ventos predominantes ocorrem devido a variações na intensidade e no posicionamento do Sistema de Alta Pressão Atmosférica do Atlântico Sul (SAHP), que está em fase com as migrações latitudinais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Durante o verão austral, a ZCIT é deslocada para o sul e o SAHP é mais forte e maior, resultando em ventos de nordeste mais fortes ao longo da costa leste brasileira. Na fase oposta (inverno austral), a ZCIT é deslocada para norte, o SAHP é mais fraco e os ventos de nordeste também (CIRANO; LESSA, 2007)

A disposição dos ventos vai ter influência direta na incidência de ondas ao longo da costa, então, da mesma forma, na primavera e verão predominam ondas de nordeste e leste com altura em torno de 1 m, enquanto no outono e inverno as ondas são de sudeste, com altura de 1,5 a 2 m (DOMINGUEZ; ANDRADE; BITTENCOURT, 2009).

3.2 Modelo de derramamento de óleo - MEDSLIK-II

O MEDSLIK-II é um modelo de óleo Lagrangeano que pode ser acoplado com modelos de circulação oceânica para solucionar os problemas do transporte, difusão e transformação do óleo na superfície do mar (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a,b). Ele calcula os processos de advecção-difusão usando uma abordagem lagrangeana discretizando uma mancha de óleo em um conjunto de partículas inicialmente adjacentes, cada uma das quais se move posteriormente devido a correntes, ventos, ondas e difusão turbulenta, dada pela saída do modelo atmosférico e oceânico forçante, que deslocam e espalham a mancha. Os processos de transformação do óleo na superfície são calculados por meio de parametrização que simulam intemperismo, evaporação e dispersão (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a). Além disso, o modelo simula a adsorção de partículas na costa e a probabilidade de que o óleo possa ser lavado de volta para a água (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a).

3.3.1 Componentes do MEDSLIK II

O código do modelo de derramamento de óleo MEDSLIK-II foi projetado de modo a prever o transporte e intemperismo de um derramamento de óleo (DE DOMINICIS *et al.*, 2013b,a). O MEDSLIK-II é um modelo Lagrangeano, o que significa que a mancha de óleo é representada por um número N de partículas constituintes que se movem por advecção e se dispersam por difusão turbulenta Lagrangeana. No ambiente marinho, a fórmula geral para a concentração de um *Tracer* é:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (2)$$

Na qual $\frac{\partial}{\partial t}$ é o operador local de taxa de variação do tempo; a componente U é o campo médio da corrente marítima com componentes (U, V, W); K é o tensor de difusividade que parametriza os efeitos turbulentos e $r_j(C)$ são as taxas de transformação M que modificam a concentração do traçador por meio de processos de transformação física e química.

Considerando o formalismo lagrangeano de que e as partículas constituintes não influenciam a hidrodinâmica e os processos da água, e se movem por deslocamentos infinitesimais sem inércia (como parcelas de água) e sem interagir entre si e aplicando na equação 2, a mesma será dividida em duas equações componentes:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^M r_j(x, C_1(x, t), t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \nabla C_1 + \nabla \cdot (K \nabla C_1) \quad (4)$$

No qual C_1 é a solução de concentração de óleo exclusivamente devido aos processos de intemperismo, enquanto a taxa de tempo final de mudança de C é dada pela advecção-difusão atuando em C_1 . Na equação (3) considerando os processos de transformação que atuam no volume total da mancha de óleo, são definidas as variáveis de estado da mancha de óleo. O formalismo de partículas lagrangeanas é então aplicado para resolver a equação 4, discretizando a mancha de óleo em partículas com variáveis de estado de partícula associadas, algumas delas deduzidas das variáveis de estado da mancha de óleo

No modelo, as variáveis de estado são divididos em 3 categorias (Tabela 2): a do tipo estrutural, as de derrame e as de partícula.

Tabela 2- Variáveis de estado do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS et al., 2013a)

Variável	Tipo de Variável	Nome da Varável	Unidade
$C_s(x, y, t)$	Estrutural	Concentração do óleo na superfície	Kg m ⁻²
$C_D(x, y, t)$	Estrutural	Concentração do óleo disperso	Kg m ⁻²
$C_C(x, y, t)$	Estrutural	Concentração do óleo na costa	Kg m ⁻¹
$C_B(x, y, t)$	Estrutural	Concentração do óleo no fundo	Kg m ⁻²
$V_S(x, y, t)$	Derrame	Volume do derrame na superfície	m ³
$V_D(x, y, t)$	Derrame	Volume do derrame na sub-superfície (Disperso)	m ³
$V^{TK}(x, y, t)$	Derrame	Volume da camada espessa do derrame superficial	m ³
$V^{TN}(x, y, t)$	Derrame	Volume da camada fina do derrame superficial	m ³
A^{TK}	Derrame	Área da camada espessa do derrame superficial	m ²
A^{TN}	Derrame	Área da camada fina do derrame superficial	m ²
$T^{TK}(x, y, t)$	Derrame	Espessura da camada espessa do derrame superficial	m
$T^{TN}(x, y, t)$	Derrame	Espessura da camada fina do derrame superficial	m
$x_k = (x_k, y_k, z_k)$	Partícula	Posição da partícula	m
$v_{NE}(n_k, t)$	Partícula	Volume não-evaporativo da partícula do derrame superficial	m ³
$v_E(n_k, t)$	Partícula	Volume evaporativo da partícula do derrame superficial	m ³
$\sigma(nk, t) = 0, 1, 2,$ < 0	Partícula	índice do status da partícula	-

As variáveis do tipo estruturais são definidas como as composições da concentração C , sendo elas: Concentração de óleo na superfície, C_s ; no subsolo, C_D ; adsorvido nas costas, C_C ; e sedimentado no fundo, C_B .

$$C_s = \frac{\rho}{A} V_s \quad (\mathbf{a}) \quad C_D = \frac{\rho}{A} V_D \quad (\mathbf{b}) \quad C_C = \frac{\rho}{L_C} V_C \quad (\mathbf{c})$$

As variáveis do tipo derrame são definidas pelos volumes de óleo superficial e disperso, V_s e V_d , que são alterados por processos de intemperismo. O V_s é dividido em duas parcelas, correspondente as uma camada de óleo espessa (V^{TK}) e uma camada fina (V^{TN}):

$$V_s = V^{TK} + V^{TN} \quad (5)$$

Os quais são expressos como:

$$V^{TK} = A^{TK}T^{TK} \quad (d) \quad V^{TN} = A^{TN}T^{TN} \quad (e)$$

Onde A^{TN} e A^{TK} são as áreas superficiais das camadas fina e espessa, respectivamente, e o T^{TN} e T^{TK} são as espessuras da camada fina espessa respectivamente.

Para resolver os processos de advecção-difusão na equação 4 e computamos C_s , C_D , e C_C , são definidas as variáveis de estado da partícula. De tal modo o volume de superfície VS é dividido em N partículas constituintes que são caracterizadas por um volume de partícula, $v(nk, t)$, por um índice de status de partícula, $\sigma(nk, t)$, e por um vetor de posição de partícula:

$$x_k(n_k, t) = (x_k(n_k, t), y_k(n_k, t), z_k(n_k, t)) \quad k = 1, N, \quad (6)$$

Na qual o n_k é o número de identificação da partícula. O volume da partícula é atualizado de acordo com a taxa de variação das variáveis de estado do tipo derrame devido ao intemperismo, e é dividido em evaporativo ($v_E(n_k, t)$), e não – evaporativo ($v_{NE}(n_k, t)$):

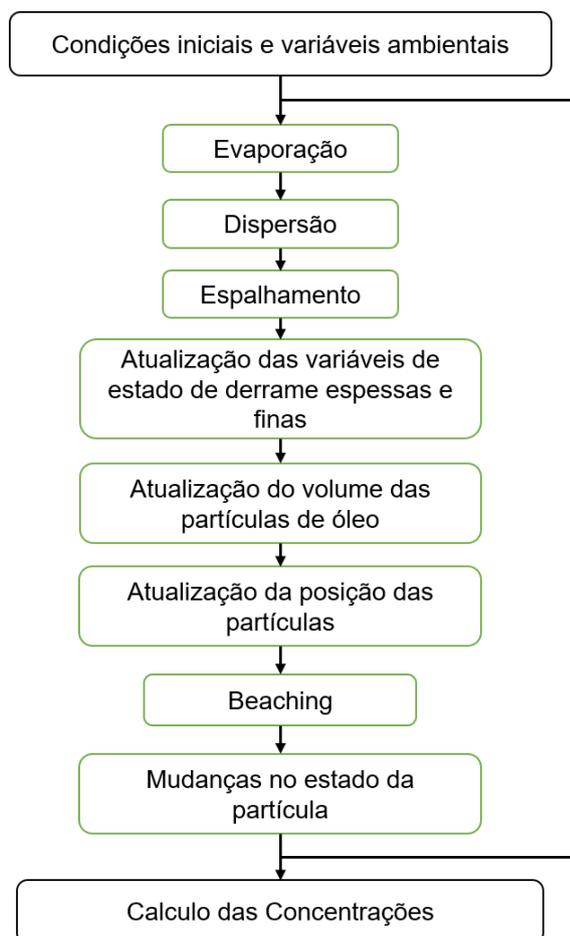
$$v(n_k, t) = v_E(n_k, t) + v_{NE}(n_k, t) \quad (7)$$

O índice de estado das partículas, $\sigma(nk, t)$, identifica as quatro classes de partículas correspondentes às quatro variáveis de estado estrutural: para partículas na superfície, $\sigma(nk, t) = 0$; para partículas subsuperficiais ou dispersas, $\sigma(nk, t) = 1$;

para partículas sedimentadas, $\sigma(nk,t) = 2$; e para partículas nas costas, $\sigma(nk,t) = -Li$, onde Li é um índice de segmento de linha de costa.

De modo a resolver coerentemente as diferentes concentrações usando as equações do derrame do óleo e das variáveis de estado da partícula, o modelo segue um método de solução sequencial, representado na Figura 2.

Figura 2 - Metodologia do procedimento de solução do modelo MEDSLIK-II.



Fonte: De Dominicis *et al.*, (2013a)

Como observado na Figura 2, inicialmente são definidas as condições iniciais e variáveis ambientais.

As condições iniciais são definidas de acordo com as forçantes meteoceanográficas e as características do derramamento. A liberação de óleo na superfície pode ser instantânea ou contínua. No caso do derrame ser contínuo, com o período de vazamento variando de horas à meses, pode ocorrer do volume inicial derramado ser transportado para fora do local de liberação inicial, de tal modo para modelar o intemperismo o modelo divide o volume total (V_s) do derrame em NS sub-derrames liberados em cada intervalo de tempo TC de forma que $VS = RC TC$, onde RC é a taxa de liberação do derrame em $m^3 \cdot s^{-1}$. O número de sub-derrames é dado

pela razão entre a duração da liberação do óleo e o intervalo de tempo entre os derrames TC .

Após definir as condições iniciais para variáveis de partículas e variáveis de derrame na superfície, o modelo resolve os processos de transformação (evaporação, dispersão, e espalhamento). Os processos de intemperismo são relações empíricas entre o volume da mancha de óleo, o vento a 10 m da superfície do mar, e a temperatura da superfície do mar. Em seguida, os volumes das partículas, $vNE(nk, t)$ e $vE(nk, t)$, são atualizados, para então ser calculada a mudança das posições das partículas e ocorrer a atualização do índice de status de partículas. Por último, o modelo MEDSLIK-II calcula a concentração de óleo na Superfície discreta CS , e dispersa CD pelas equações:

$$CS(x_T, y_T, t) = \frac{\rho}{\delta x_T \delta y_T} \sum_{n_k \in I_S} v(n_k, t) \quad (8)$$

$$CD(x_T, y_T, t) = \frac{\rho}{\delta x_T \delta y_T} \sum_{n_k \in I_D} v(n_k, t) \quad (9)$$

E calcula a concentração de óleo para partículas nas costas, $CC(L_i, t)$, usando $IC(L_i, t)$, que é o conjunto de partículas “encalhadas” no segmento costeiro L_i :

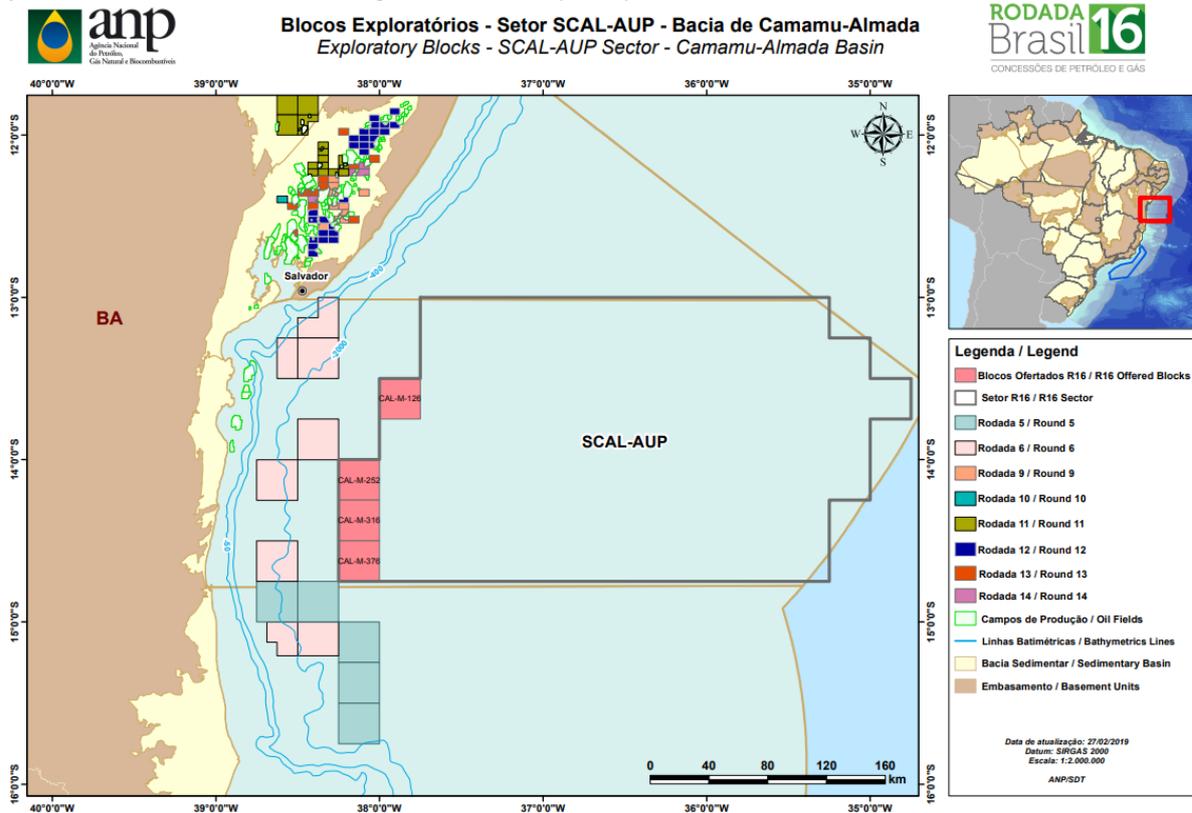
$$I_C(L_i, t) = \{n_k; \sigma(n_k, t) = -L_i\} \quad (10)$$

$$C_C(L_i, t) = \frac{\rho}{\delta L_i} \sum_{n_k \in I_C} v(n_k, t) \quad (11)$$

3.3.2 Configuração do MEDSLIK-II

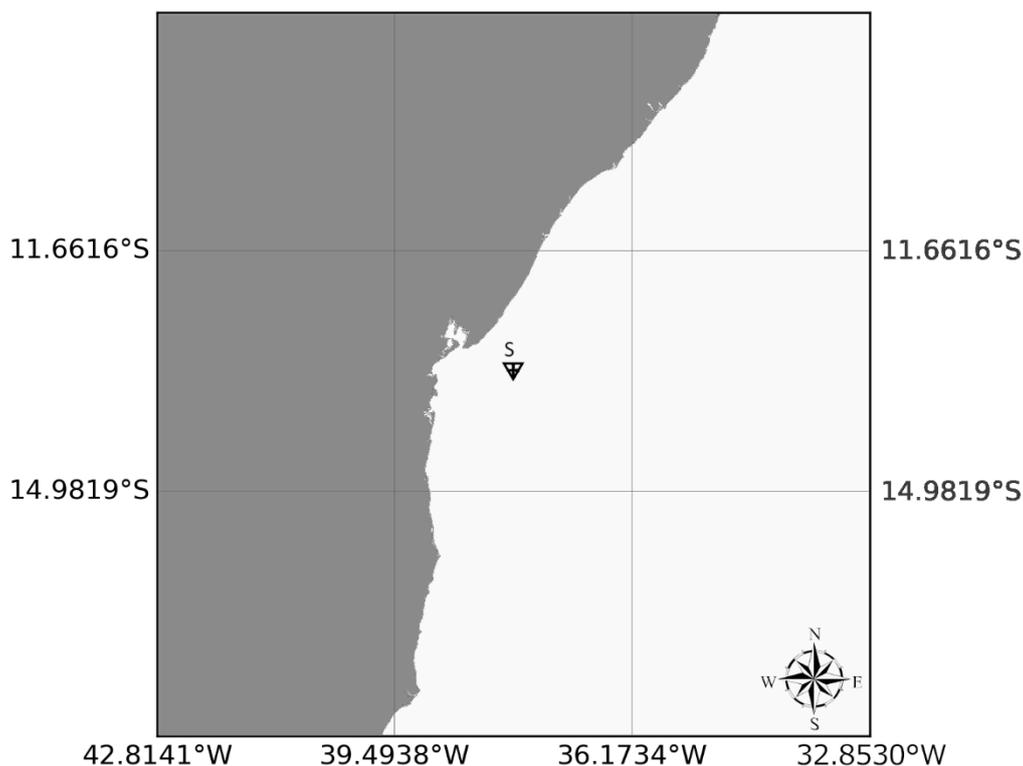
Levando em conta os blocos em oferta na bacia de Camamu-Almada e o setor SCAL-AUP (Figura3), foi determinado o ponto S (Figura 4) com localização 13°19.333' S, 37°50.046'W, para ser o local inicial do vazamento.

Figura 3- Localização da Bacia de Camamu-Almada, com destaque para os blocos em estudo para a 16ª Rodada de Licitações da ANP (ANP)



Fonte: Agência Nacional do Petróleo (2019).

Figura 4- Pontos Inicial de vazamento, representado por S.



Fonte: Autoral.

O derrame foi definido como contínuo com taxa de derrame de $45 \text{ tons} \cdot \text{hr}^{-1}$, com 4 horas de duração, totalizando 180 toneladas. Foram realizados cenários com 4 possibilidades de tipos de óleo: Bunker, com 12°API (**S1**); Pesado, com 21°API (**S2**); Moderado, com 27°API (**S3**); E leve, com 36°API (**S4**) (Tabela 3). Essa configuração permite a compreensão de como as características meteoceanográficas da região vão atuar sobre os processos de intemperismo e dispersão de diferentes tipos de óleo. Adicionalmente, para verificar a influência da sazonalidade das forçantes meteoceanográficas sobre o transporte do óleo derramado, foram escolhidos quatro períodos de simulação, sendo estes, janeiro, abril, julho e outubro, do ano de 2020. Resultando em um total de dezesseis cenários avaliados, com saídas horárias, do início do derrame até 672h.

Todos os parâmetros e constantes do MEDSLIK-II foram utilizados de acordo com os valores padrão e a deriva de Stokes foi ativada como recomendado por De Dominicis *et al.* (2013a).

Tabela 3 – Características dos óleo utilizados para rodar o modelo.

°API	Densidade do óleo	Densidade Residual do óleo	Percentual Residual do óleo	Viscosidade	Temperatura na qual a Viscosidade foi determinada	Pressão de Vapor (bar)
12.1	0.985	0.998	90.12	3	50	0.183
20.7	0.93	0.966	69.78	1	38	0.303
26.7	0.894	0.93	69.67	26	38	0.31
35.9	0.845	0.9	54.35	3.1	50	0.39

3.3 Dados Externos – Mercator E Cersat

Os dados de corrente de vento e água para o modelo foram obtidos do Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), que é o componente marinho do Programa Copernicus da União Europeia, que foi fundada pela Comissão Europeia e implementada pelo Mercator Ocean International.

O CMEMS fornece produtos e serviços oceanográficos para segurança marítima, ambiente costeiro e marinho, previsão do clima e do tempo e usuários de recursos marinhos. Uma combinação de observações oceânicas (medidas no mar), imagens de satélite de sensoriamento remoto e modelos de previsão oceânica compõem o catálogo de mais de 150 produtos específicos disponibilizados aos usuários pelo CMEMS. O CMEMS visa disponibilizar rotineiramente produtos de qualidade garantida no estado passado, presente e futuro do oceano para aplicações que incluem resposta a derramamentos de óleo, previsões de proliferação de algas nocivas, inundação costeira e condições de ondas no mar, avaliações ambientais e estudos climáticos, entre outros.

Para a realização do trabalho, foram utilizados o produto WIND_GLO_WIND_L4_NRT_OBSERVATIONS_012_004, do Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la mer / CERSAT, para a obtenção da forças de vento. Esse produto fornece análise do vento para o oceano global, Blended ASCAT-SSM/I, com médias a cada 6 horas.

Para as forças de corrente, foi utilizado o produto GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024, do Mercator Ocean. Esse produto inclui arquivos médios diários e mensais de temperatura, salinidade, correntes, nível do mar, profundidade da camada mista e parâmetros de gelo do topo ao fundo do

oceano global. Também inclui campos de superfície média horária para altura do nível do mar, temperatura e correntes. Os arquivos de saída do oceano global são exibidos com uma resolução horizontal de 1/12 graus com projeção equiretangular de longitude/latitude regular, com 50 níveis verticais que variam de 0 a 5500 metros. Este produto também oferece um conjunto de dados especial para a corrente de superfície, que também inclui deriva de ondas e marés chamada SMOC (Surface merged Ocean Current).

Para obter a realização da batimetria, foram utilizado dados do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), resultado de um trabalho conjunto da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) e da Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO (COI), idealizado em 1903, para a construção de um conjunto de produtos cartográficos abrangendo todos os mares e oceanos, alicerçados na compilação de dados batimétricos fornecidos voluntariamente pelos Serviços Hidrográficos, e para a realização da Linha da Costa foram utilizados dados GHSSH.

As simulações foram executadas com os produtos com saída a cada 6 horas do mercator para correntes e temperatura do mar e CERSAT para vento, representando as condições meteoceanograficas pretéritas na região.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções a seguir serão apresentadas inicialmente os campos de corrente e de vento que serviram como forçantes para rodar o modelo de dispersão de óleo (4.1), seguidos dos resultados de espalhamento da pluma lançada (4.2).

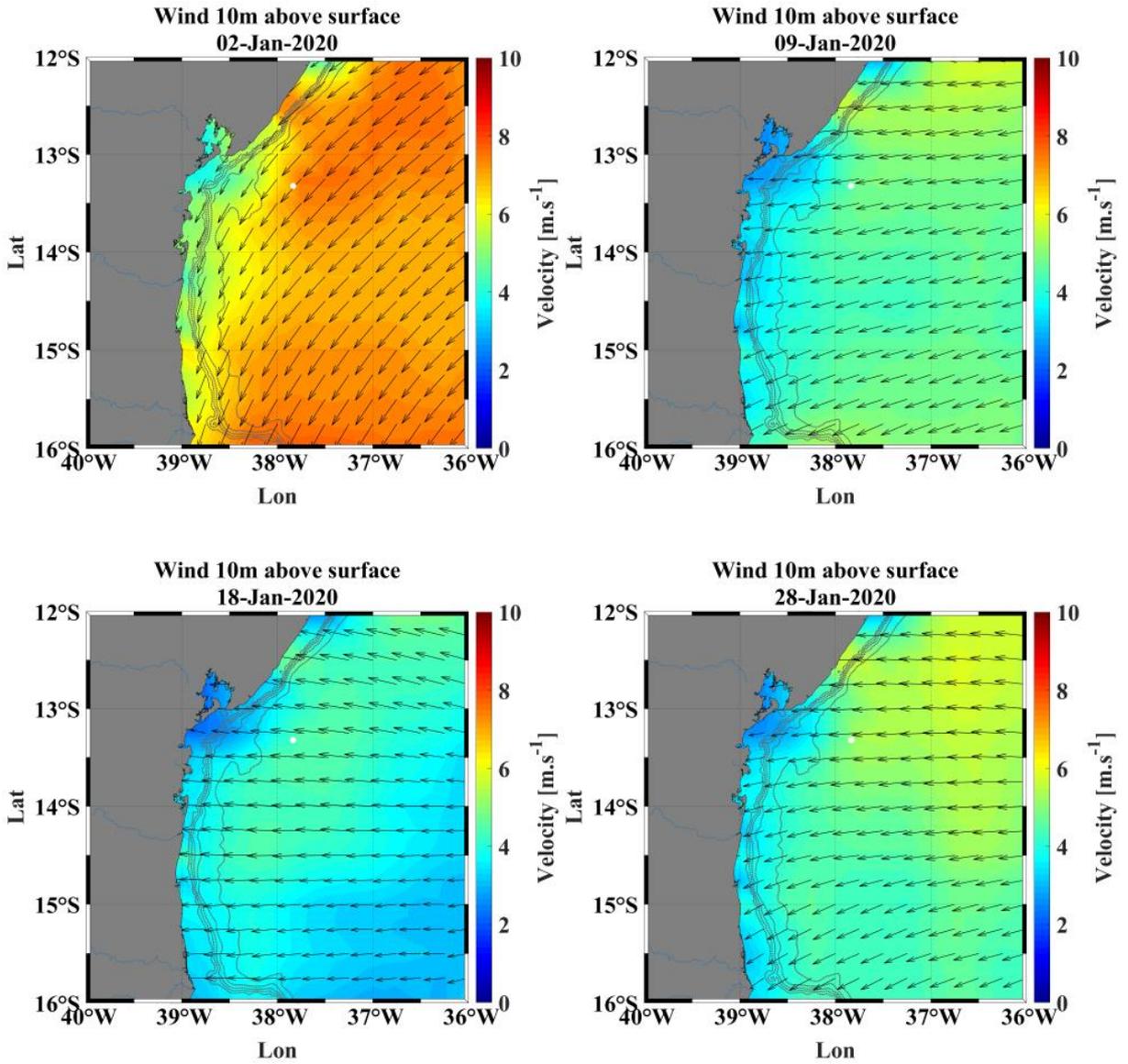
Todas as profundidades dos dados de correntes foram utilizados como forçantes para o modelo.

4.1 *Circulação oceânica e campo de ventos*

Nas Figuras 5,6,7 e 8, podemos observar a direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar para os meses de janeiro, abril, julho e outubro respectivamente.

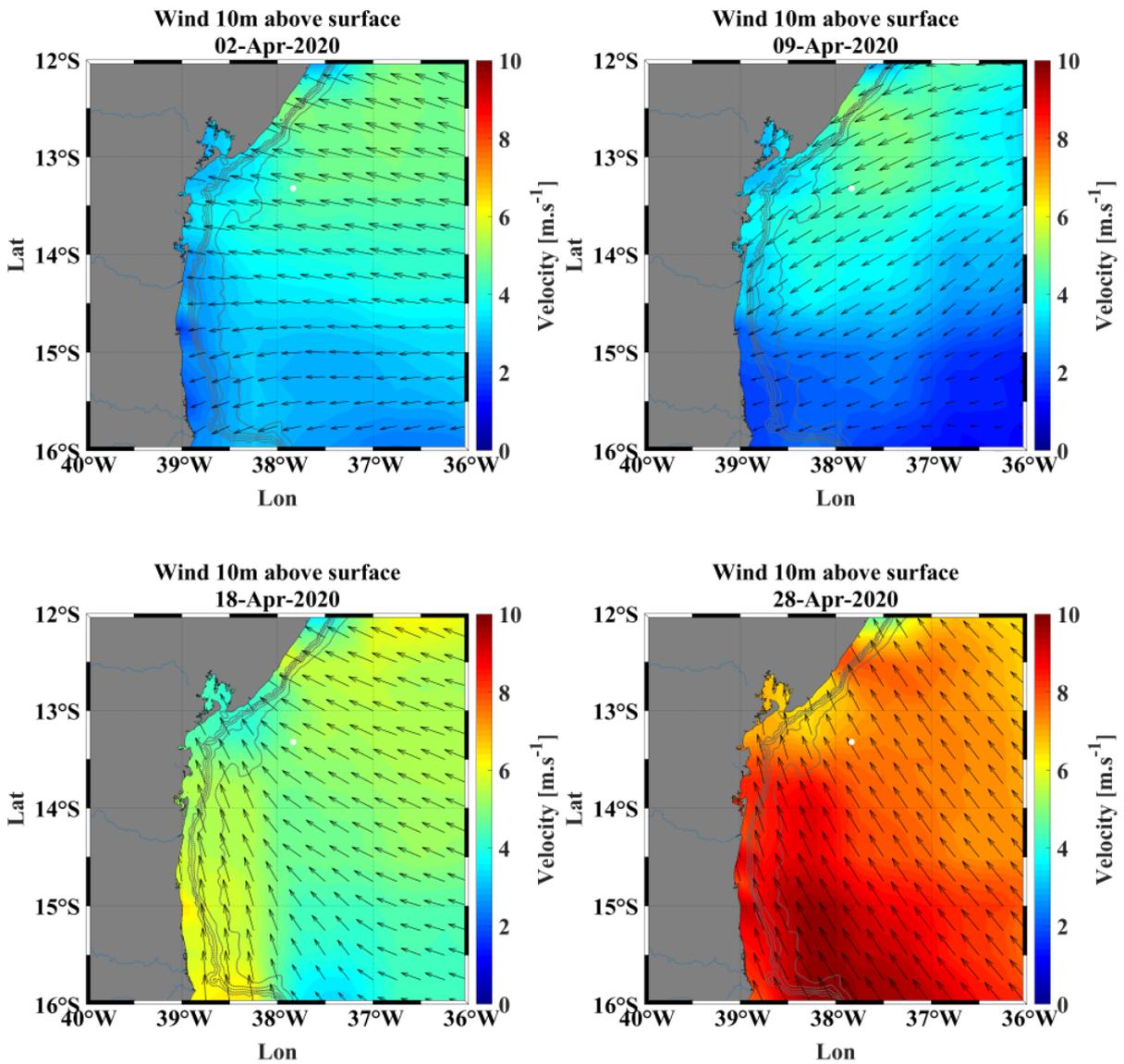
Foi possível observar uma predominância de ventos de nordeste no período de janeiro, com a intensidade variando em média de 4 a 6 $m.s^{-1}$ (Figura 5). No período de abril observou uma predominância de ventos de leste no início do mês, e presença de ventos de sudeste no fim do mês (Figura 6). O período de julho apresentou a maior intensidade de vento observada, apresentando ventos de sudeste (Figura 7). Outubro, assim como julho apresentou ventos fortes, no entanto teve uma predominância maior de ventos de nordeste e leste (Figura 8). De tal modo o comportamento do vento observado esteve de acordo com o padrão esperado, soprando de NE durante o verão e de E-SE durante o outono(CIRANO, LESSA, 2007).

Figura 5 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de janeiro de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.



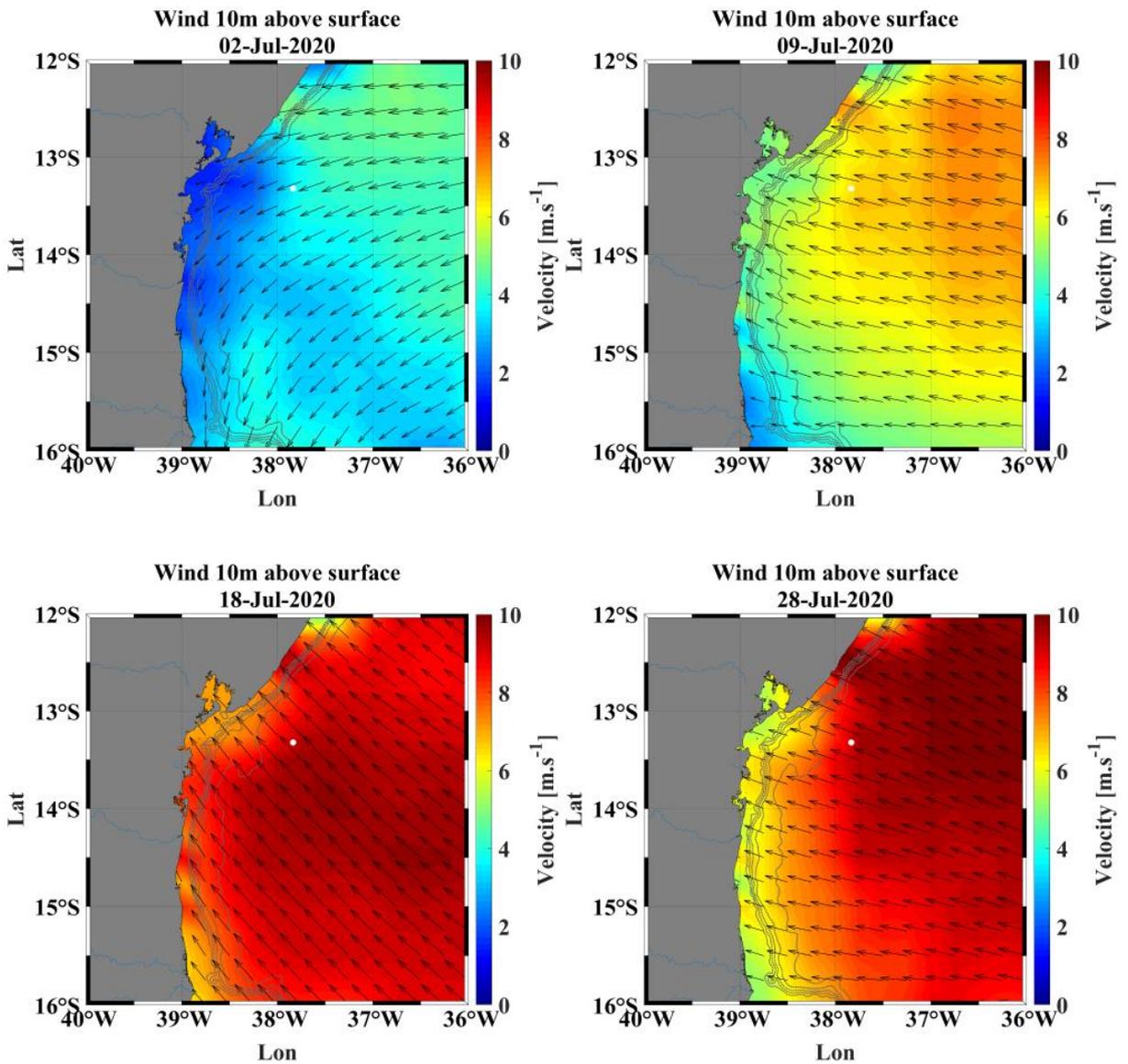
Fonte: Autoral.

Figura 6 - Direção e intensidade da velocidade do vento (m.s^{-1}) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Abril de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.



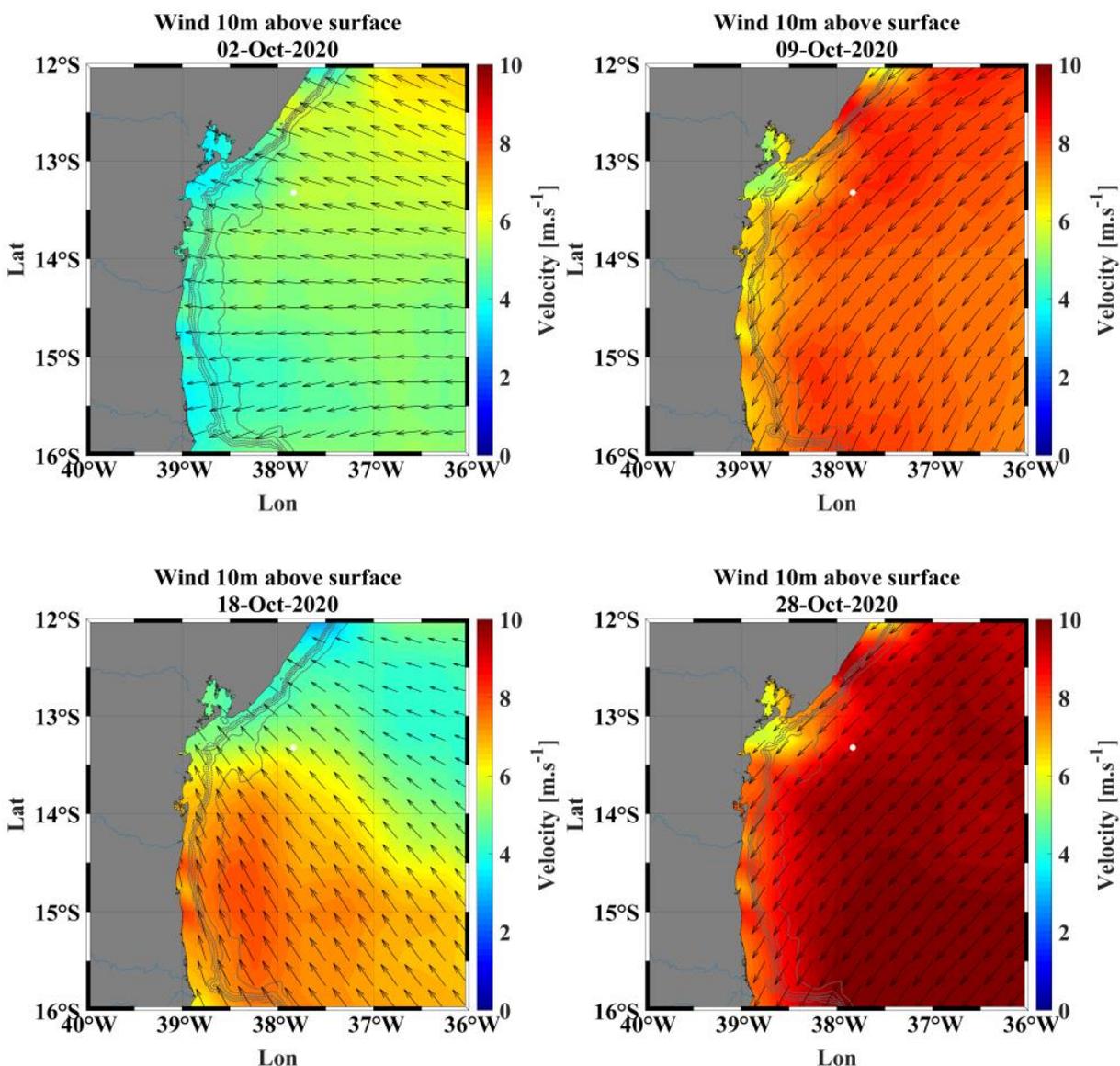
Fonte: Autoral.

Figura 7- Direção e intensidade da velocidade do vento (m.s^{-1}) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Julho de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.



Fonte: Autoral.

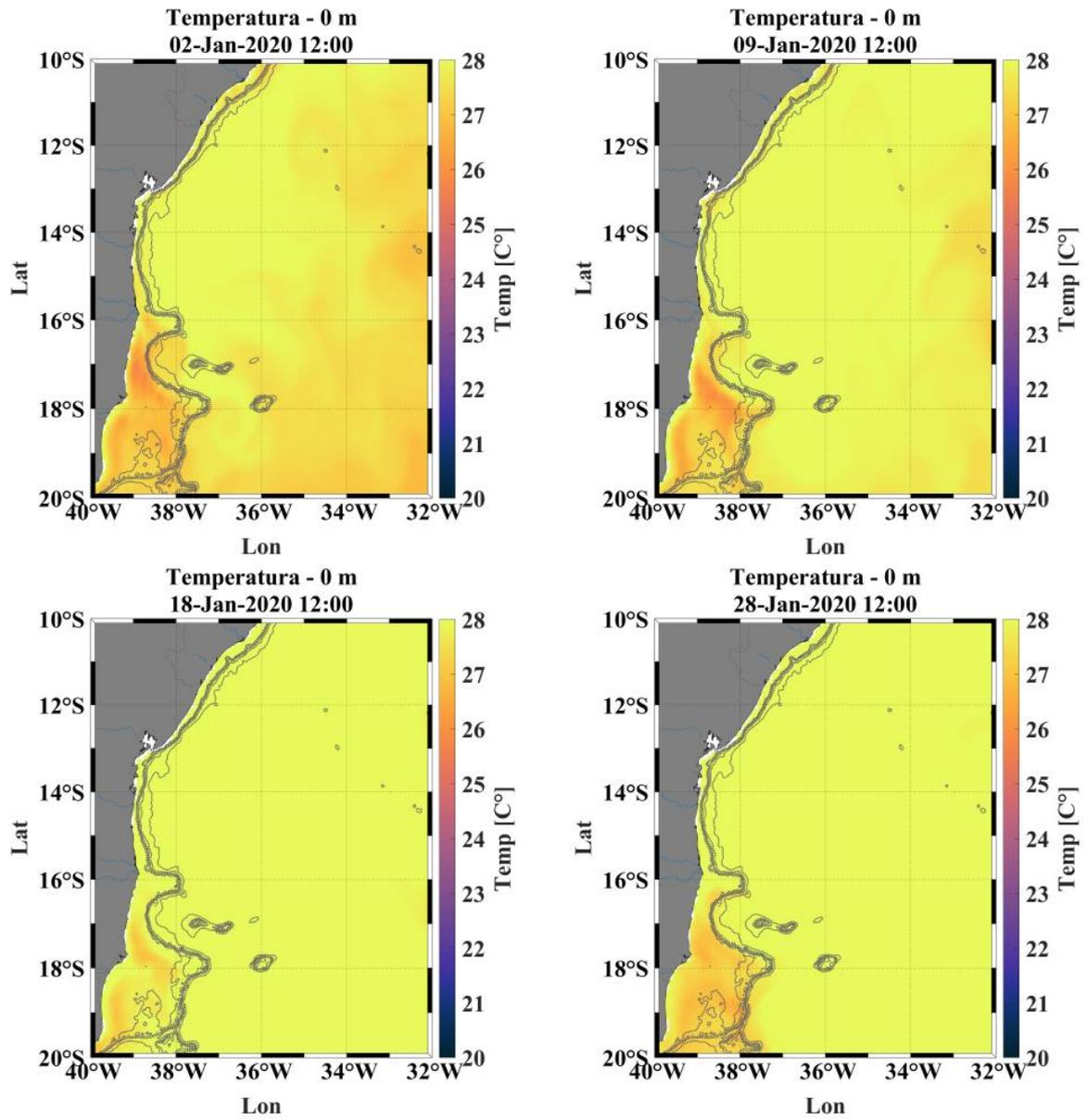
Figura 8 - Direção e intensidade da velocidade do vento (m.s^{-1}) 10 metros acima da superfície do mar nos dias 02, 09, 18 e 28 de Outubro de 2020, sendo o ponto em branco o local inicial de vazamento.



Fonte: Autoral.

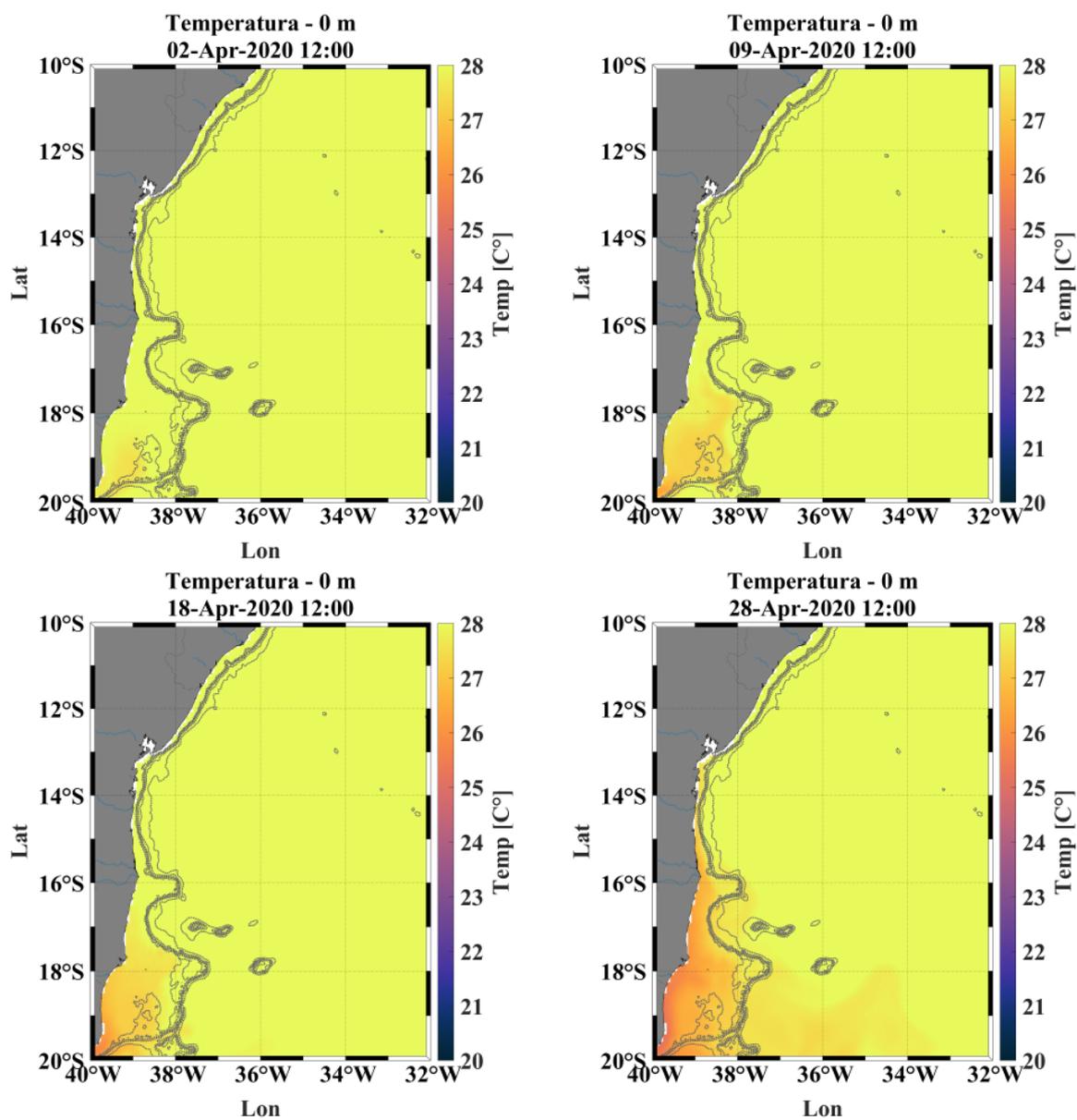
Nas Figuras 9, 10, 11 e 12, observa-se a temperatura da superfície do mar (TSM)($^{\circ}\text{C}$) para os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro respectivamente. Nessas imagens podemos notar que no período de julho e outubro apresentaram uma TSM menor quando comparados com janeiro ou abril.

Figura 9 - Temperatura da superfície do mar (°C) em Janeiro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



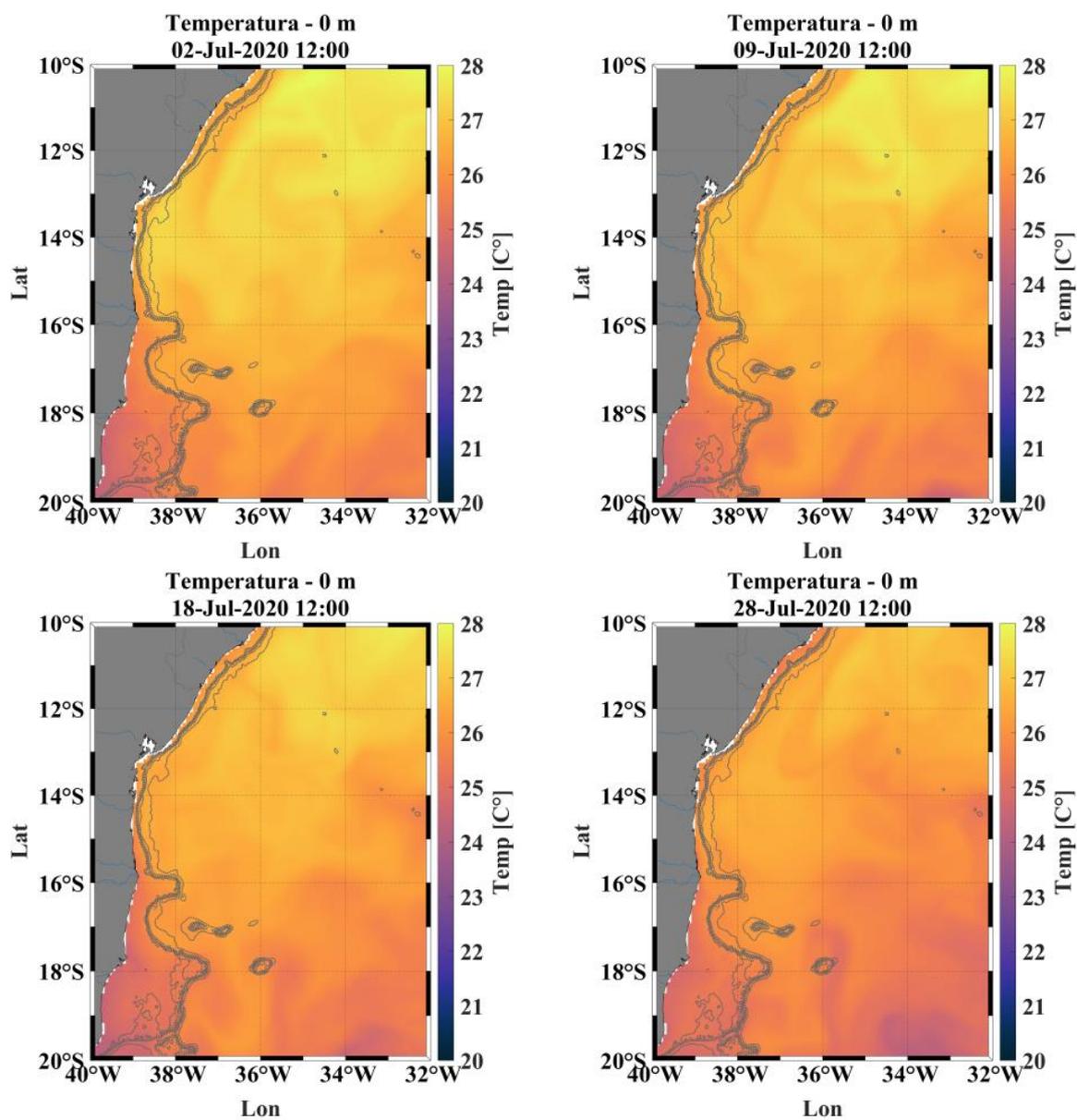
Fonte: Autoral.

Figura 10 - Temperatura da superfície do mar (°C) em Abril de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



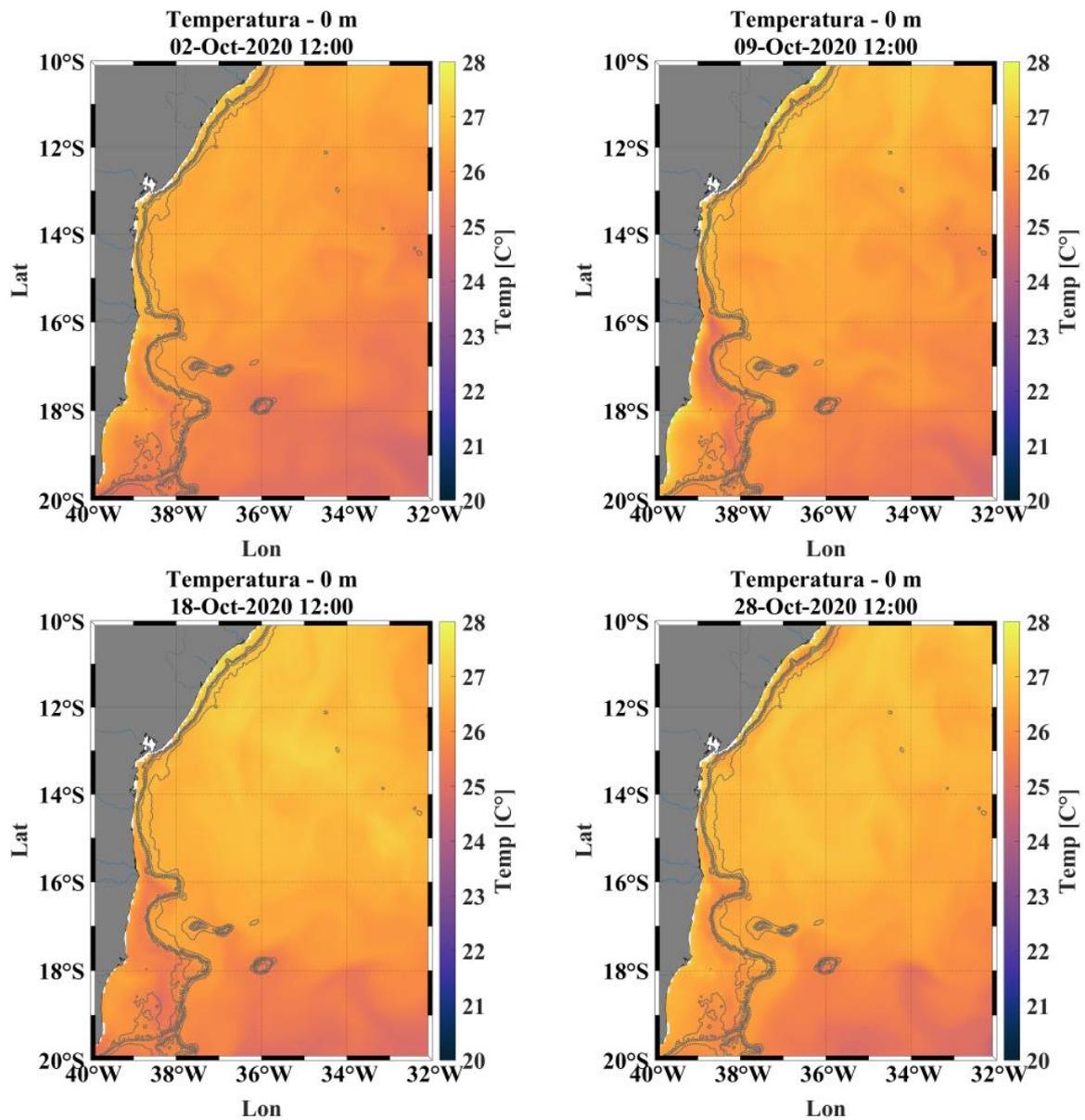
Fonte: Autoral.

Figura 11 - Temperatura da superfície do mar (°C) em Julho de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



Fonte: Autoral.

Figura 12 - Temperatura da superfície do mar (°C) em Outubro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.

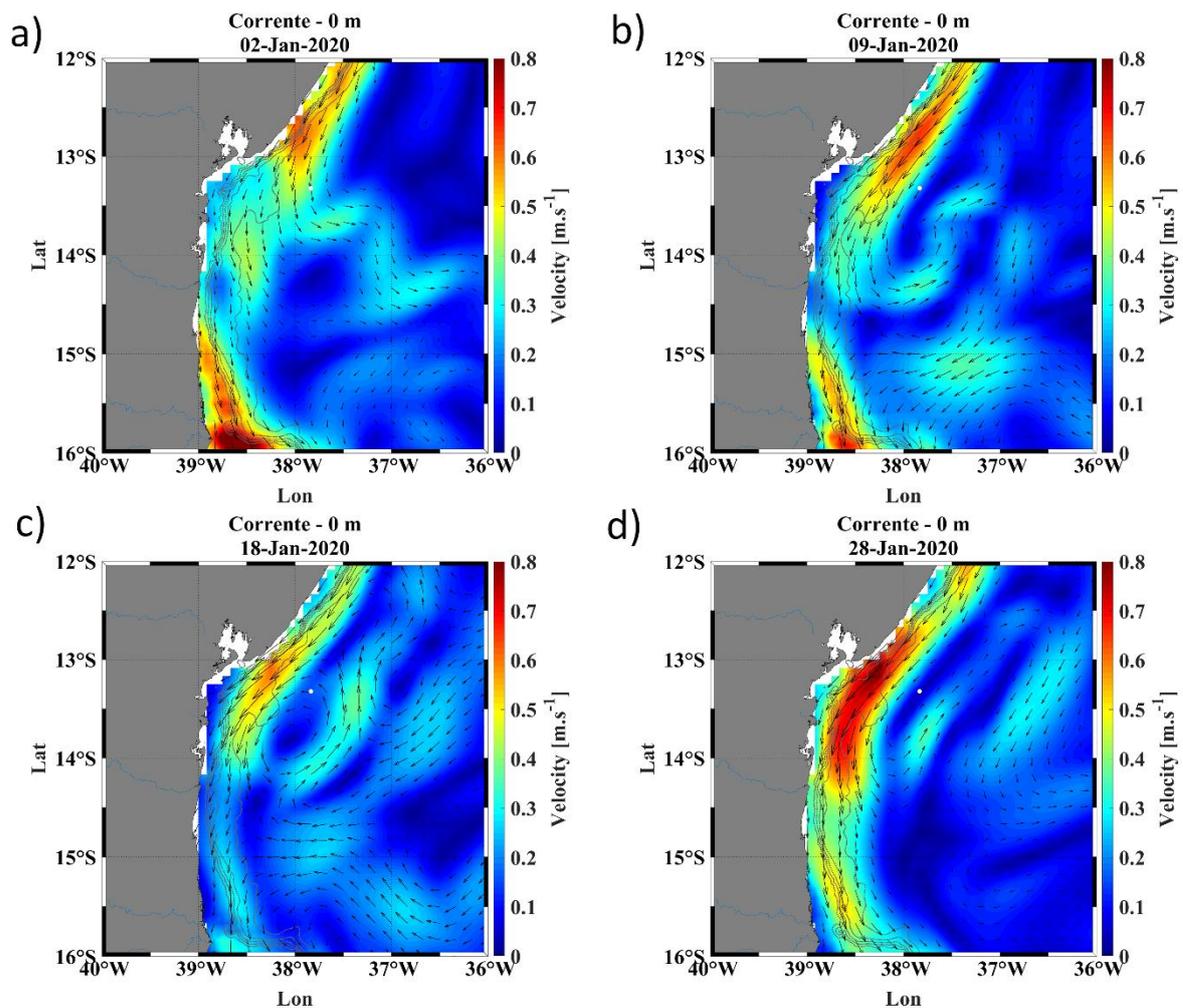


Fonte: Autoral.

A direção e intensidade da corrente superficial ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) pode ser observada nas Figuras 13, 14, 15 e 16. Nessas imagens podemos observar o fluxo da Corrente do Brasil (CB) em Janeiro para o sul, enquanto em Julho apresentou um fluxo para o norte, da Sub-corrente Norte do Brasil (SCNB). A circulação costeira possui como maior forçante o padrão de ventos de uma região, no entanto a circulação de meso-escala também pode influenciar no padrão de correntes da plataforma continental (AMORIM,2011).

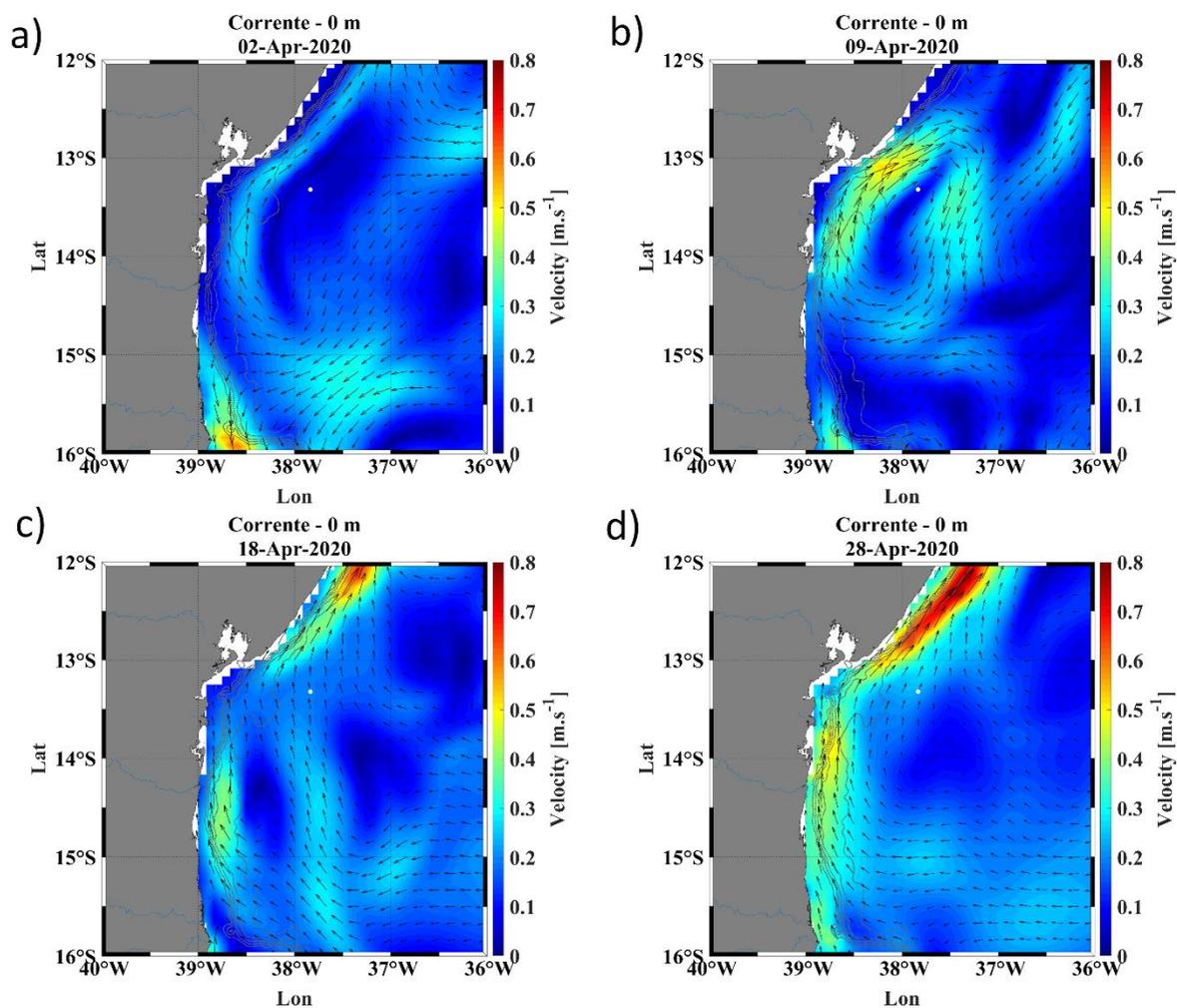
Segundo Cirano *et al* (2006) a sCSE ao atingir a região do talude continental e da quebra da plataforma, dá origem a SCNB, que flui para norte e pode ser observada, de uma forma mais organizada, em latitudes inferiores a 10°S, e origina também a CB, que flui para sul, e em latitudes superiores a 15°S. Nessas imagens podemos observar a variação latitudinal da bifurcação da corrente Sul Equatorial. De acordo com Rodrigues *et al.* (2007), Silva *et al.* (2009) e Veeda *et al.* (2011) a bifurcação atinge sua posição mais austral no período compreendido entre maio e julho, quando o sistema SNB/CNB intensifica-se e a CB fica mais fraca, como o que pode ser observado nas figuras 14 e 15. Entre outubro e dezembro, a bifurcação atinge sua posição mais ao norte, e o sistema SCNB/CNB enfraquece-se e a CB flui com mais intensidade, como é possível observar na Figura 16.

Figura 13 - Direção e intensidade da corrente superficial (m.s^{-1}) em Janeiro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



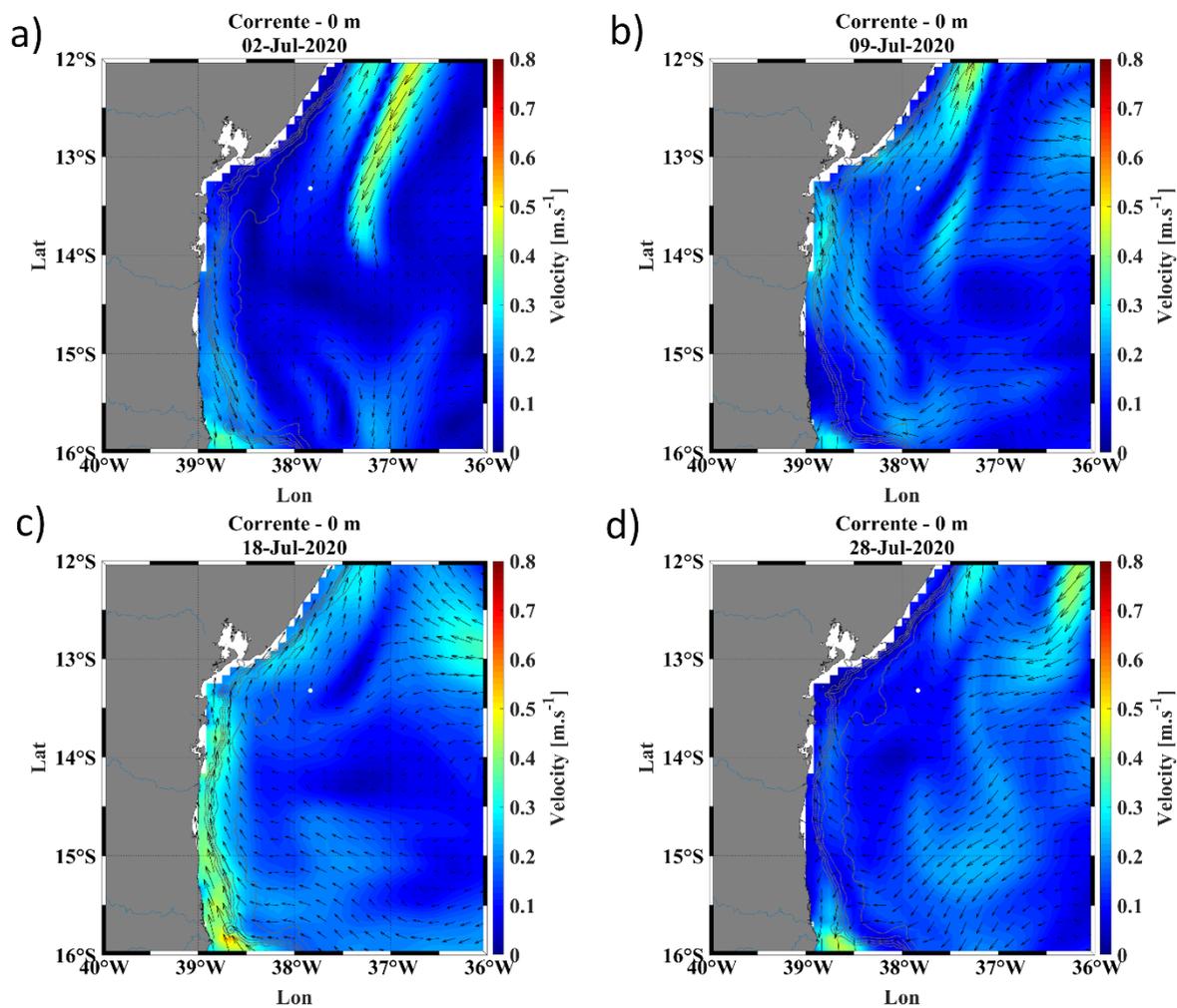
Fonte: Autoral.

Figura 14 - Direção e intensidade da corrente superficial ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) em Abril de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



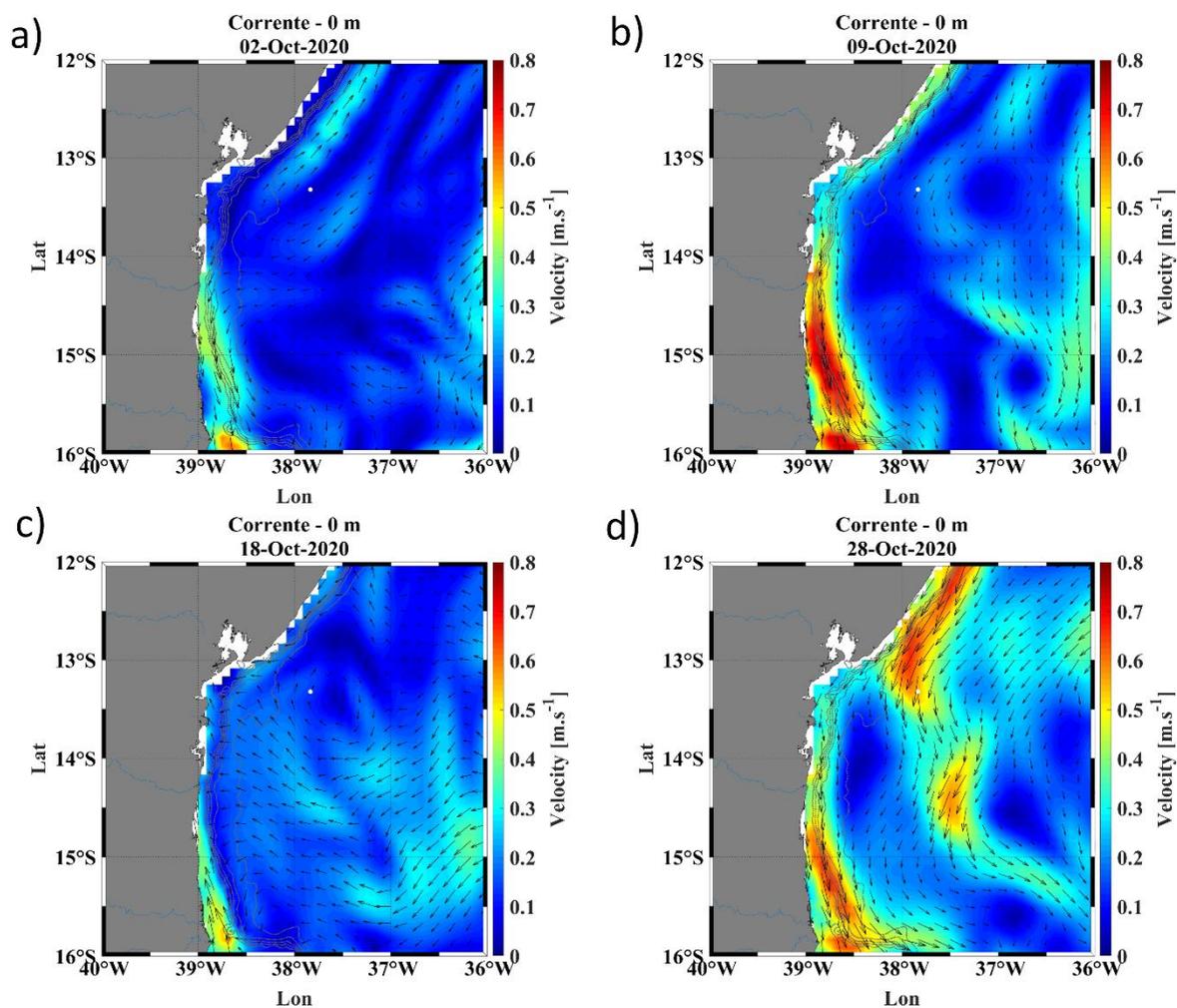
Fonte: Autoral.

Figura 15 - Direção e intensidade da corrente superficial (m.s^{-1}) em Julho de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



Fonte: Autoral.

Figura 16 - Direção e intensidade da corrente superficial ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) em Outubro de 2020, nos dias 02, 09, 18 e 28.



Fonte: Autoral.

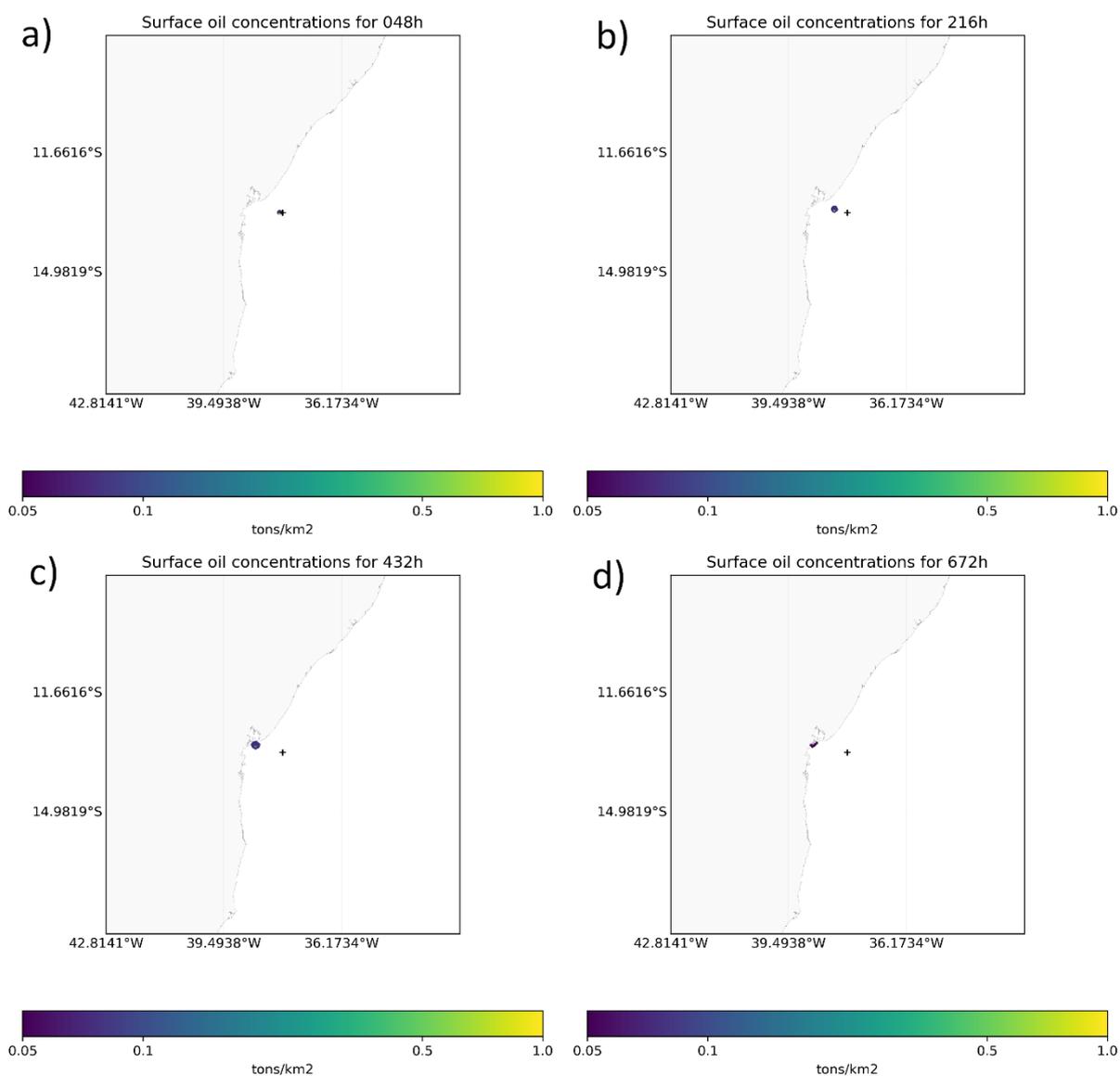
4.2 Evolução dos derrames

Para o comportamento geral das simulações aqui apresentadas observa-se os seguintes aspectos.

4.2.1 S1, Bunker, °API 12

As Figuras 17,18,19 e 30 apresentam as concentrações do óleo (ton.km^{-2}) para o derrame no cenário S1 para os meses de Janeiro, Abril, Julho e outubro respectivamente.

Figura 17- Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 12 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



No cenário S1, com °API 12, observasse um padrão semelhante para o deslocamento da pluma ao longo dos períodos, no qual a mancha se transportou em rumo Leste atingindo o mesmo ponto da costa no primeiro toque. No mês de janeiro (Figura 17), a pluma se espalhou sentido Noroeste até o nono dia de simulação, momento na qual tomou rumo oeste, até o momento que atingiu a costa. Em abril (Figura 18) a pluma seguiu um rumo oeste. Em julho (Figura 19) o deslocamento ocorreu semelhante a janeiro, no entanto aconteceu de maneira mais rápida, provavelmente devido a maior intensidade dos ventos no período (Figura 7), o mesmo ocorrendo para o período de outubro (Figura 8).

Figura 18 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 12 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas

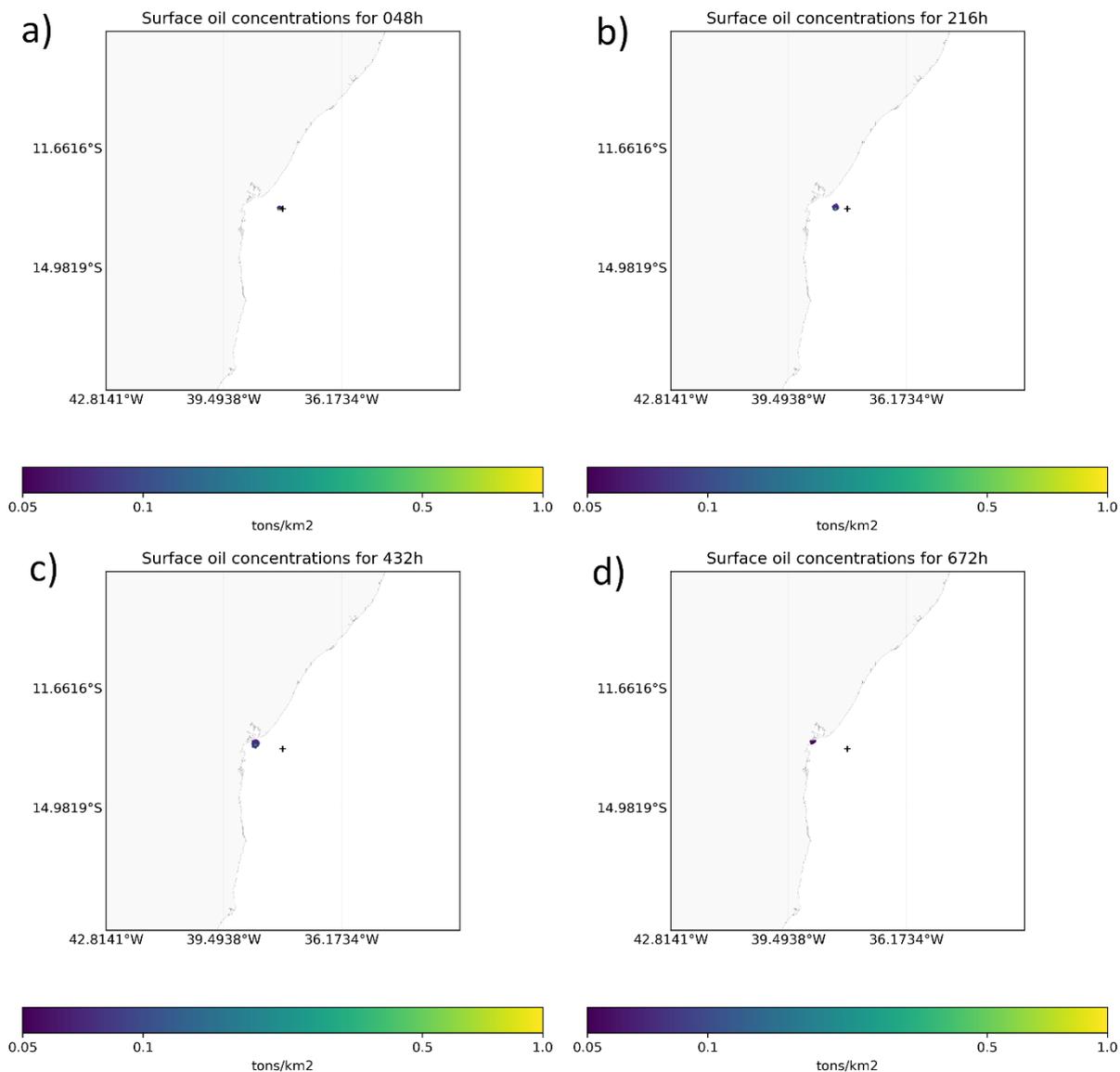
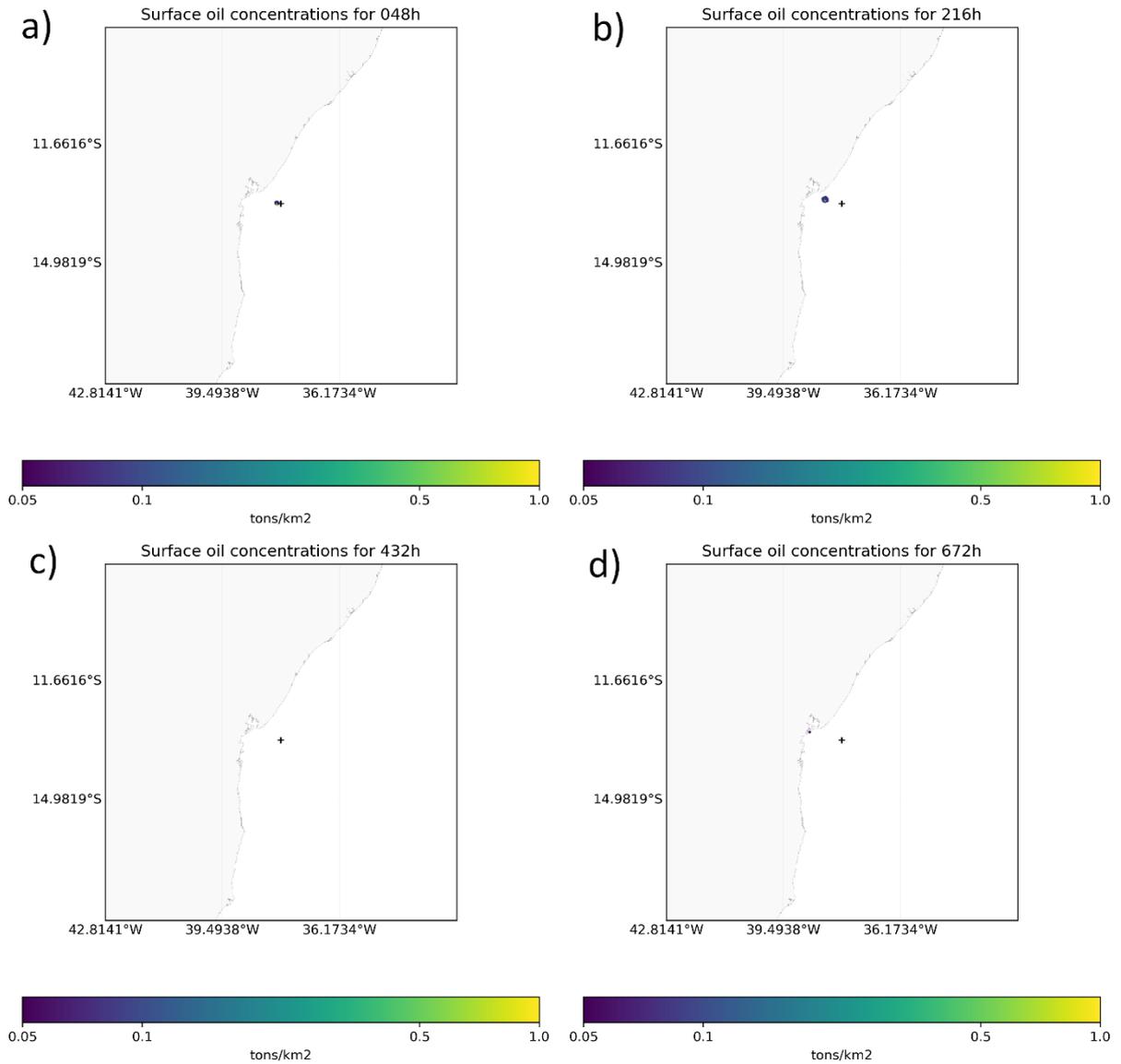
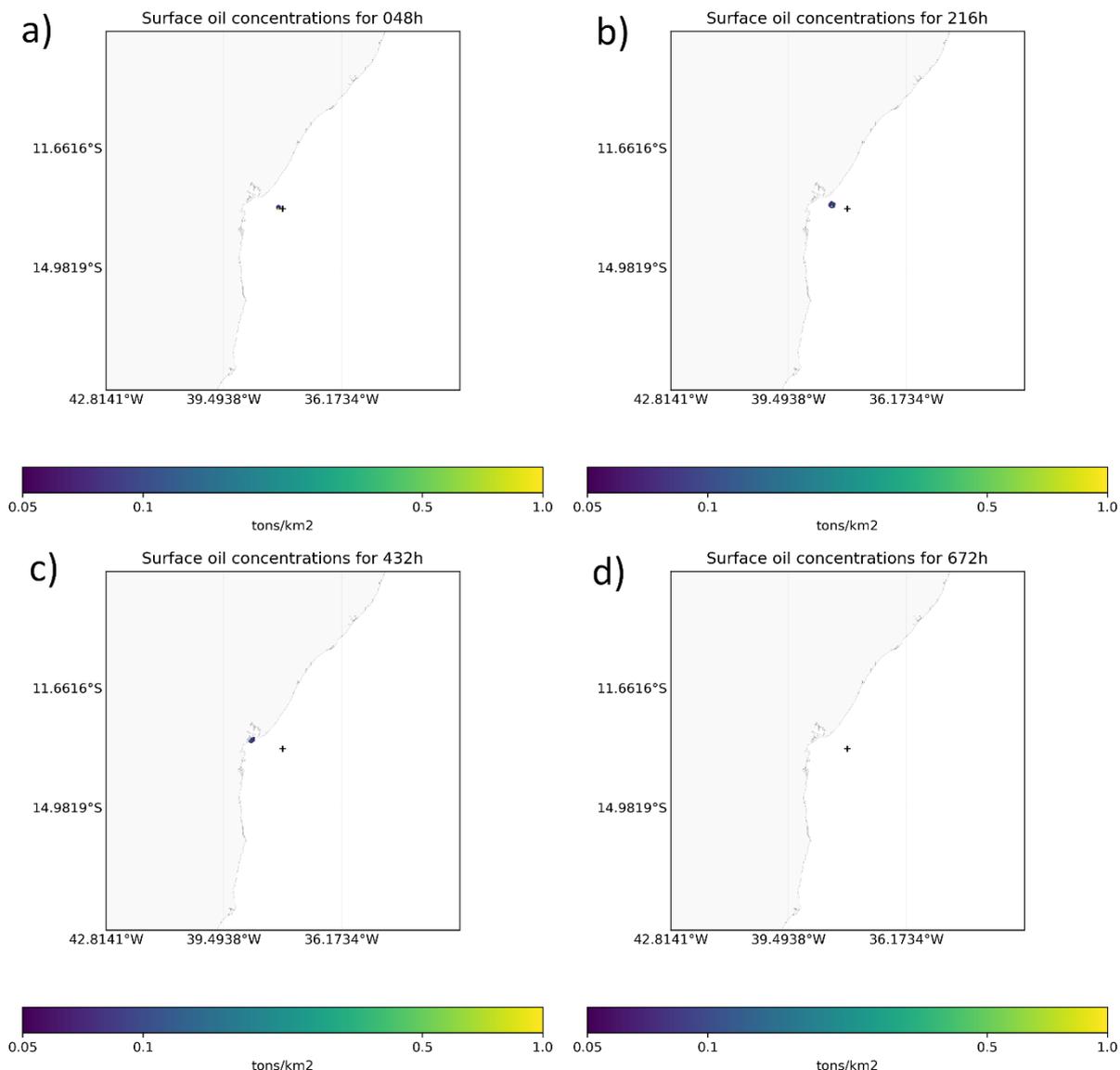


Figura 19 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 12 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



A viscosidade da emulsão que começou a ser formada em meia hora nos períodos foram de $134,44 \text{ m}^2/\text{s}$ em janeiro, $101,56 \text{ m}^2/\text{s}$, em Abril, $158,17 \text{ m}^2/\text{s}$ em Julho e $111,40 \text{ m}^2/\text{s}$ em Outubro. Atingindo em todos os períodos o valor de $698,40 \text{ m}^2/\text{s}$ ao se estabilizar, o que ocorreu com 21h de simulação para Janeiro e Abril, e 12h para Julho, e 13,5h em Outubro.

Figura 20 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 12 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.

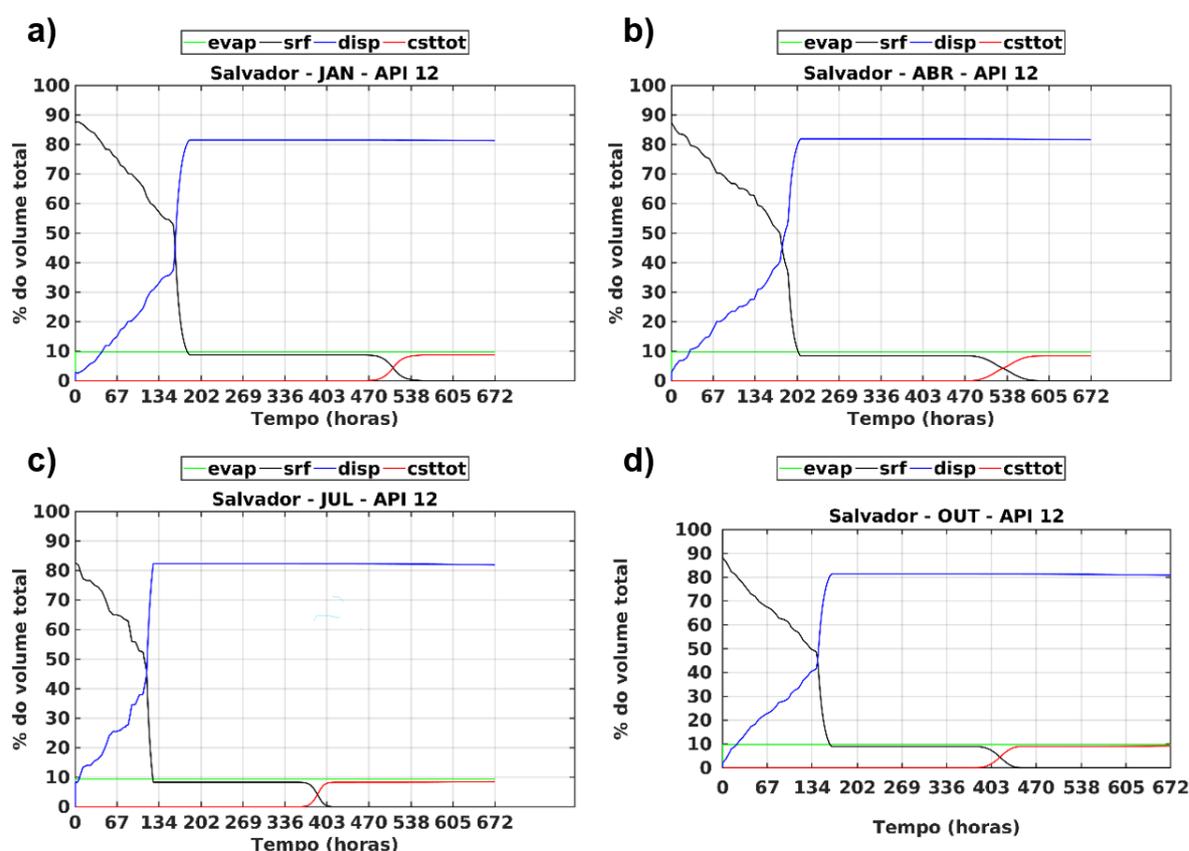


Nesse cenário S1, o derrame alcança a costa, atingindo a Ilha de Itaparica, com diferentes horários para cada período. Em janeiro, ocorreu com 444 horas percorridas (aproximadamente 18 dias), restando 8,74% do óleo na superfície, devido ao percentual de partículas dispersas na coluna d'água, que no mesmo período estava em 81,49%. Em abril, o material chegou a costa com 465h de simulação (aproximadamente 19 dias), restando 8,42% do óleo na superfície, sendo 81,83% do valor disperso na coluna d'água. Julho foi o período simulado em que o material chegou mais rápido na costa, com 344h de simulação (aproximadamente 14 dias), restando 8,32% na superfície, e também foi o período que apresentou maior valor disperso na coluna d'água, com 82,24%. Em outubro, o material chegou com 362h

de simulação(aproximadamente 15 dias), restando 8,90% na superfície e 81,32% disperso na coluna d'água.

Ao final da simulação, o percentual do material na costa foram de Janeiro a Outubro, respectivamente de 8,66%, 8,24%, 8,42% e 9,05%.

Figura 21- Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 12 nos meses de (a)janeiro, (b)abril, (c)julho e (d)outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.



Fonte: Autoral.

A evolução do derramamento ao longo do tempo pode ser observado na figura 21, onde se tem o percentual do óleo evaporado, na superfície do mar, dissolvido e por último o percentual que chegou a costa. Em janeiro nos primeiros 8 dias de simulação a quantidade dispersa aumentou de 5% para 82%. Em abril, com 9 dias de simulação, essa quantidade aumentou de 7% para 82%. Em julho, com 5 dias de simulação, o aumento foi de 14% para 82%, e em outubro, com 7 dias, o aumento foi de 10% para 82%. Estes resultados sugerem que o intemperismo do óleo

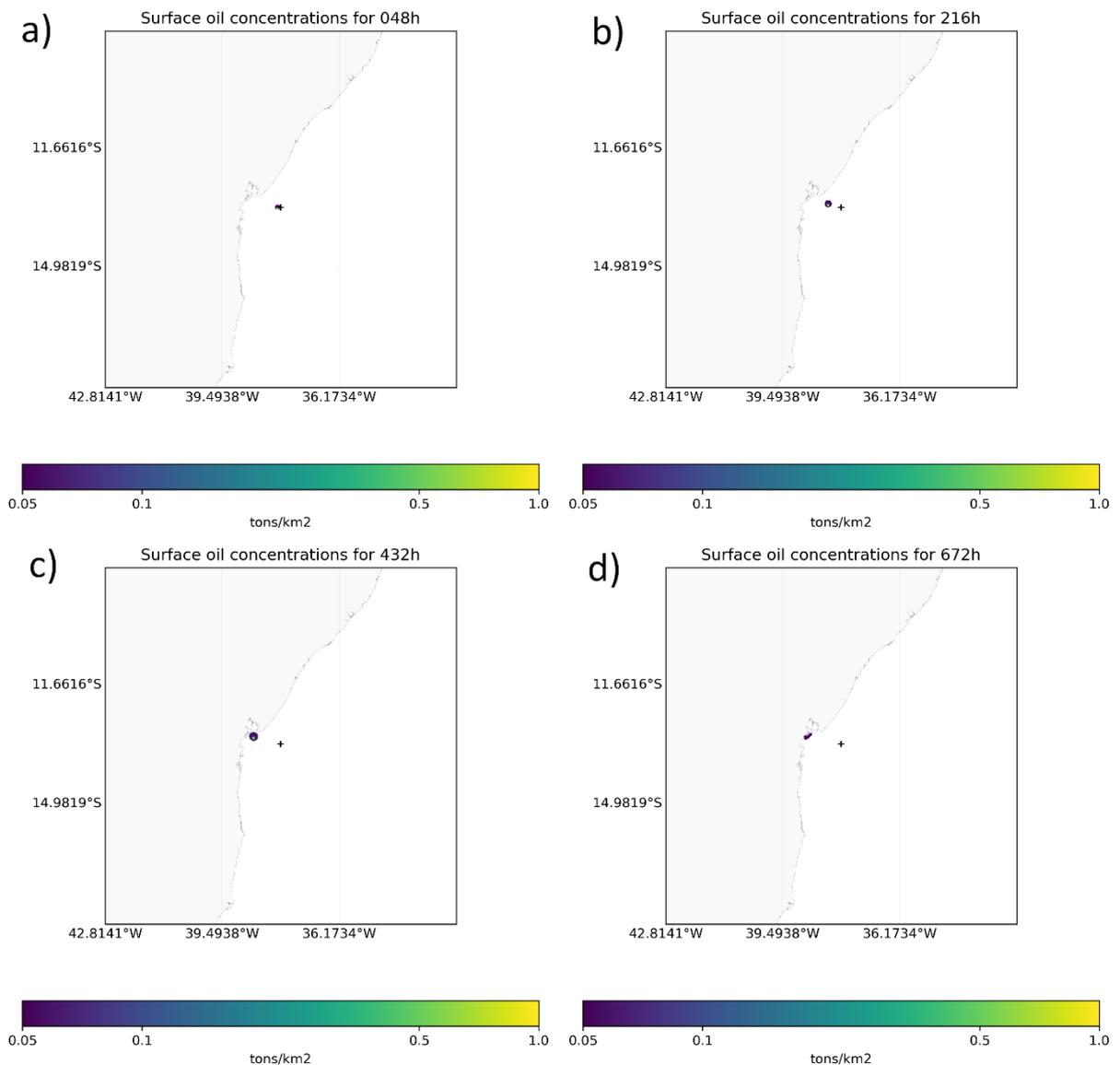
proporcionou, provavelmente, uma dispersão mecânica das gotículas, seguido de uma submersão, reduzindo a quantidade de óleo presente na superfície depois de 7 dias aproximadamente.

Com meia hora de simulação foi observado um percentual evaporado de 9,73%, 9,74%, 9,41% e 9,77% em Janeiro, Abril, Julho e outubro respectivamente. Em todos os períodos foi atingido o percentual máximo da fração evaporativa em 5 horas, o período de Julho apresentou o menor percentual evaporado com 9,43%, e Outubro teve a maior taxa evaporativa com 9,77%. Os meses de Janeiro e Abril apresentaram respectivamente 9,76% e 9,73%.

4.2.2 S2, Pesado, °API 21

As figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam as concentrações do óleo (ton.km⁻²) para o derrame no cenário S2 para os meses de Janeiro, Abril, Julho e outubro respectivamente.

Figura 22 - Concentração de óleo (ton.km⁻²) °API 21 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



No cenário S2, com °API 21, o padrão de deslocamento da pluma ao longo dos períodos foi semelhante ao observado no cenário S1.

Figura 23 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 21 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas

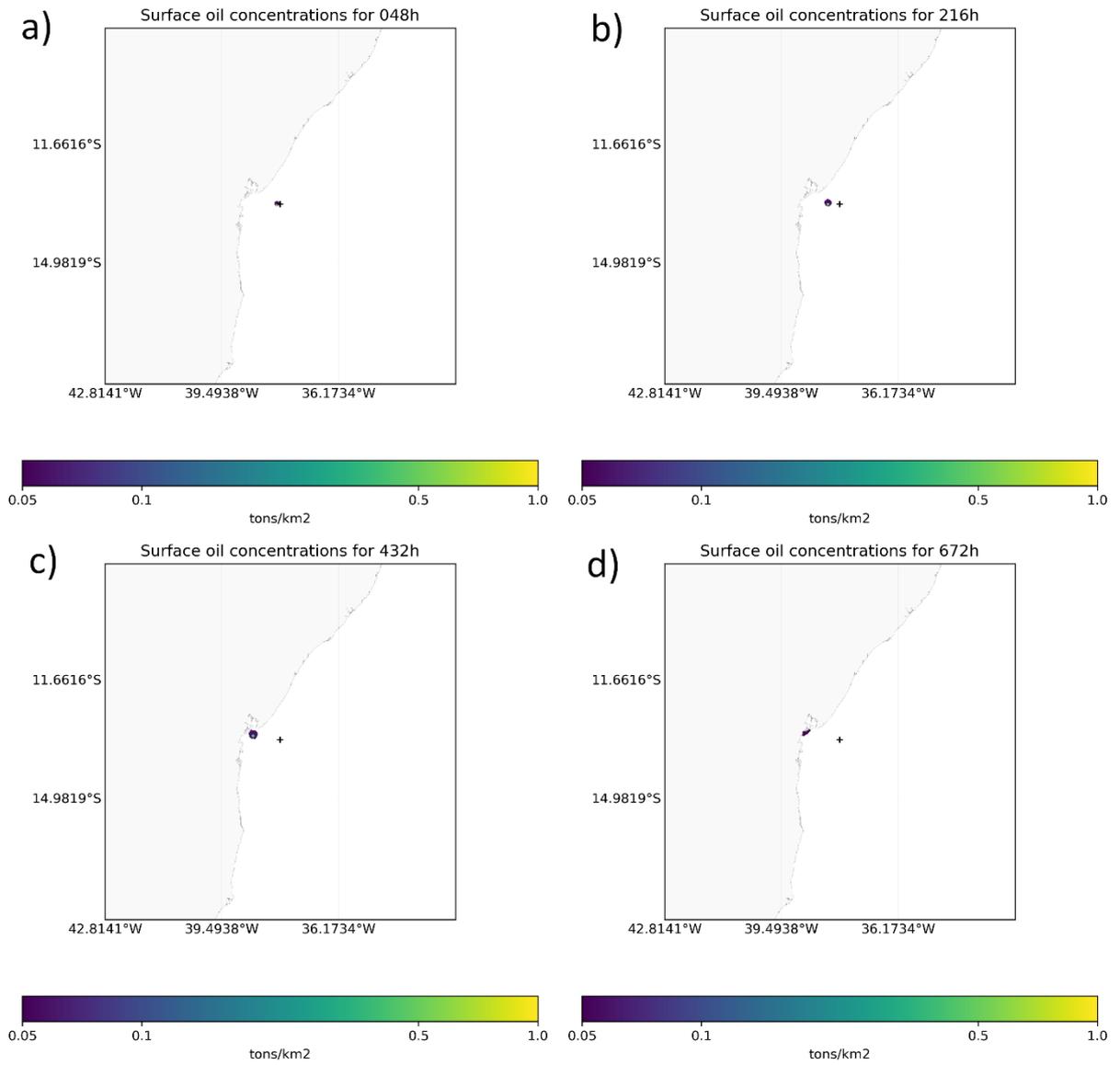
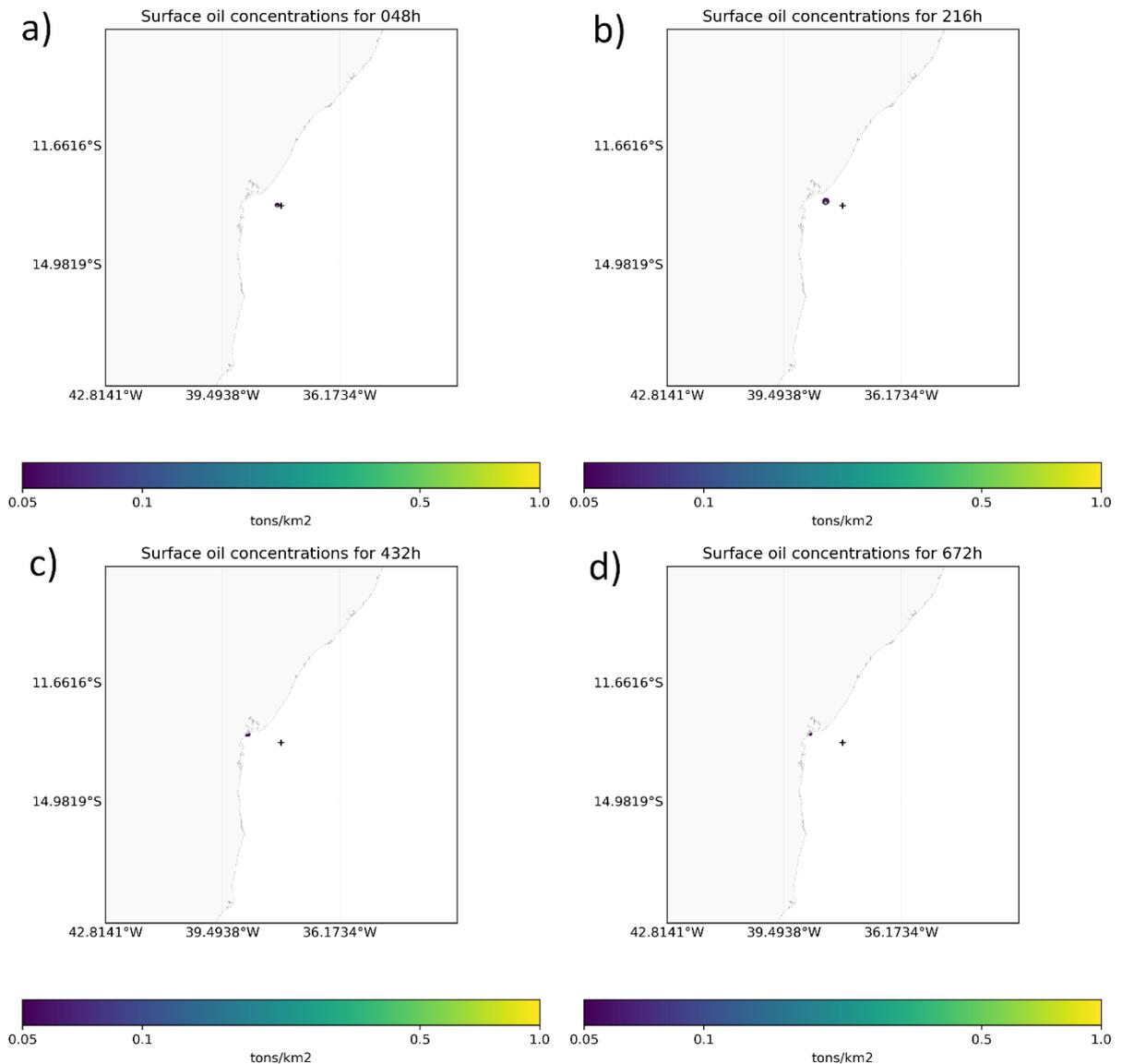
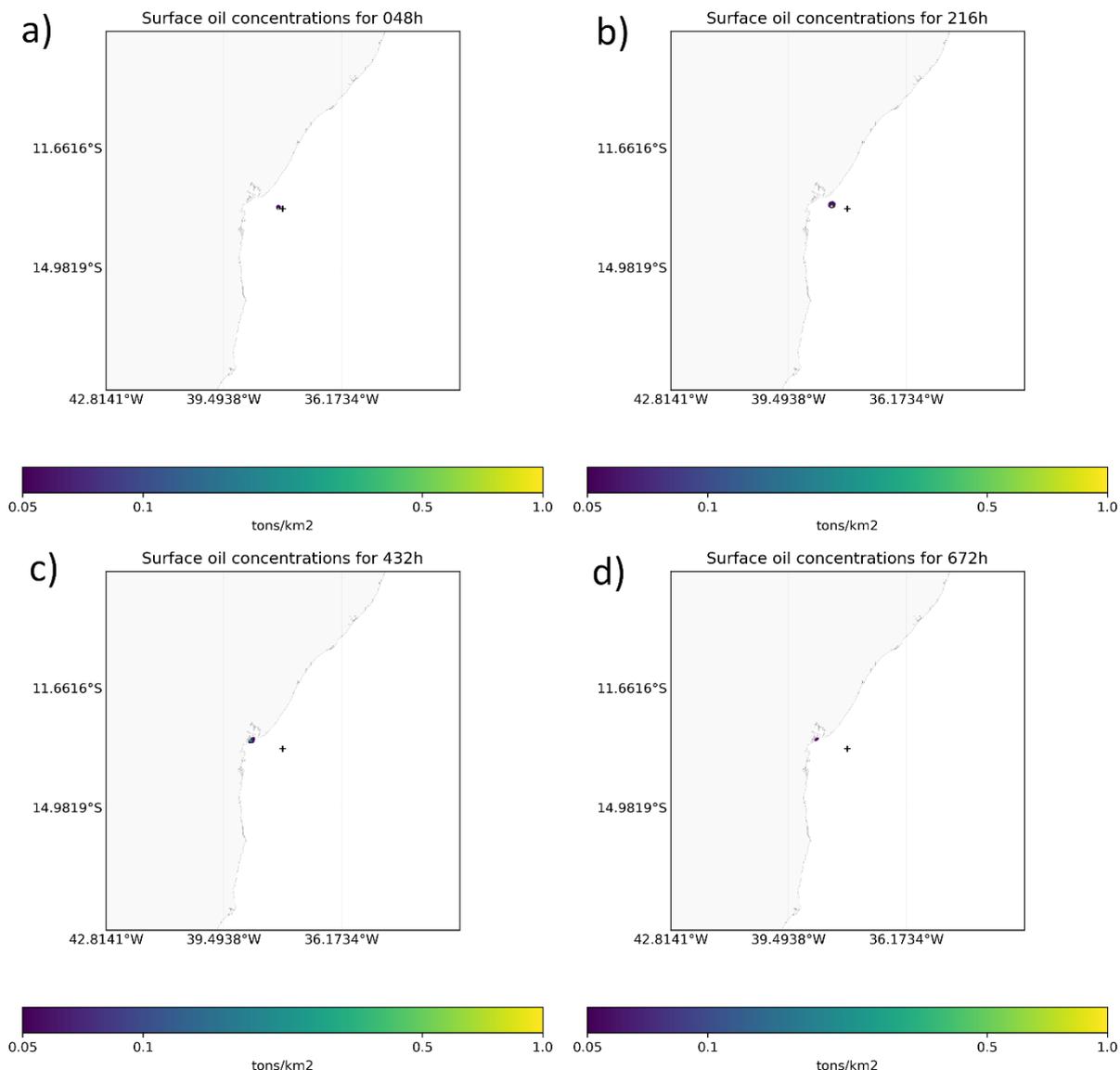


Figura 24 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 21 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



A viscosidade da emulsão formada em meia hora nos períodos foram de 55,85 m^2/s em janeiro, 40,78 m^2/s , em Abril, 66,68 m^2/s em Julho e 45,44 m^2/s em Outubro. Atingindo em todos os períodos o valor de 475,05 m^2/s ao se estabilizar, o que ocorreu com 28h de simulação para Janeiro e Abril, e 14,5h para Julho, e 16,5h em Outubro. O valor de emulsificação ser menor quando comparado aos outros cenários deve-se possivelmente ao fator de óleos viscosos, tendem a absorver água mais lentamente do que óleos mais fluidos.

Figura 25 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 21 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.

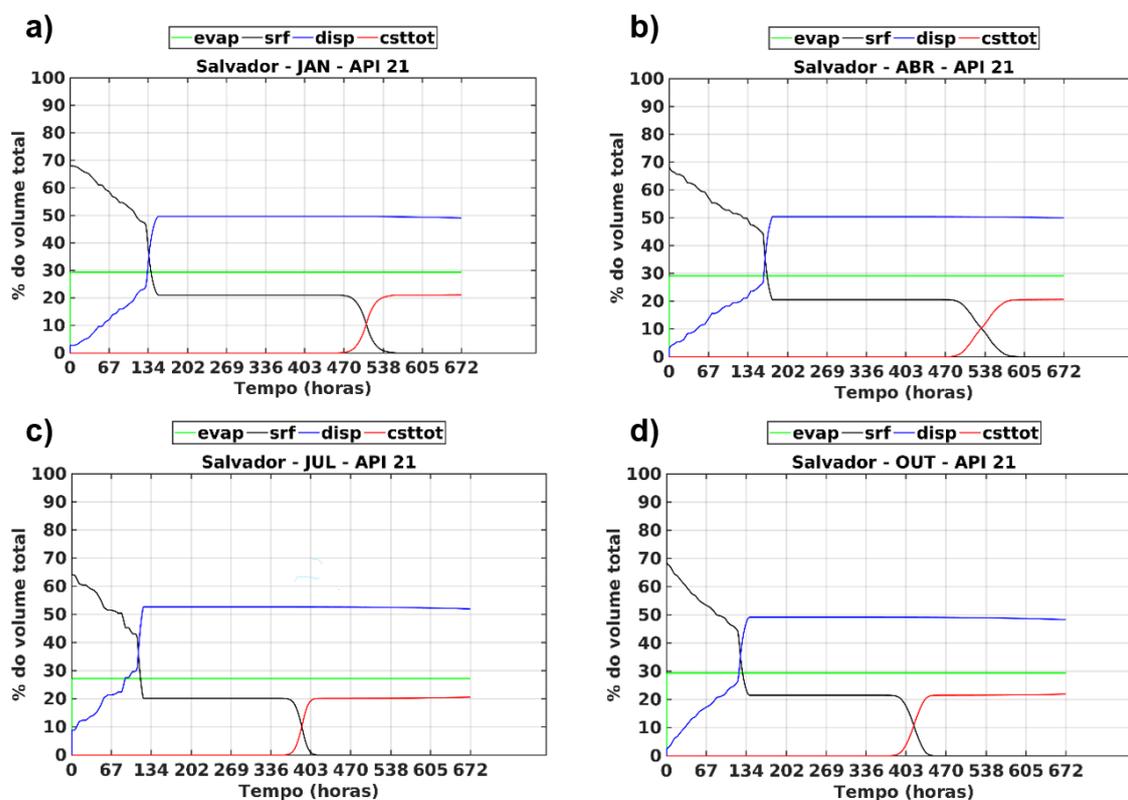


No tempo de simulação o derrame alcança a costa, atingindo o litoral Ilha de Itaparica, com diferentes horários para cada período. Em Janeiro, ocorreu com 442h de simulação (aproximadamente 18 dias), restando 21,06% do óleo na superfície, e um percentual de partículas dispersas na coluna d'água de 49,58%. Em abril, o material chegou a costa com 456h de simulação (aproximadamente 19 dias), restando 20,54% do óleo na superfície, sendo 50,36% do valor disperso na coluna d'água. Julho foi o período simulado em que o material chegou mais rápido na costa, com 346h de simulação(aproximadamente 14dias), restando 20,17% na superfície, e também foi o período que apresentou maior valor disperso na coluna d'água, com

52,62%. Em outubro, o material chegou com 363h de simulação (aproximadamente 15 dias), restando 21,50% na superfície e 49,15% disperso na coluna d'água.

Ao final da simulação, o percentual do material na costa, em janeiro, abril, julho e outubro, foi respectivamente de 20,63%, 19,79%, 19,61% e 21,46%.

Figura 26- Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 21 nos meses de (a) Janeiro, (b) Abril, (c) Julho e (d) Outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.



Fonte: Autoral.

A evolução do derrame pode ser observado na figura 26 onde pode-se observar a evolução ao longo do tempo do percentual do óleo evaporado, na superfície do mar, dissolvido e por último o percentual que chegou a costa. Quando comparado com o S1 o cenário S2 apresentou um aumento menor da quantidade dispersa, provavelmente essa diferença surge do tipo de óleo que é mais leve. Em janeiro nos primeiros 6 dias de simulação a quantidade dispersa aumentou de 5% para 50%. Em abril, com 7 dias de simulação, essa quantidade aumentou de 6% para 50%. Em julho, com 5 dias de simulação, o aumento foi de 12% para 52%, e em outubro, com 6 dias, o aumento foi de 8% para 49%. Estes resultados sugerem que o intemperismo do óleo

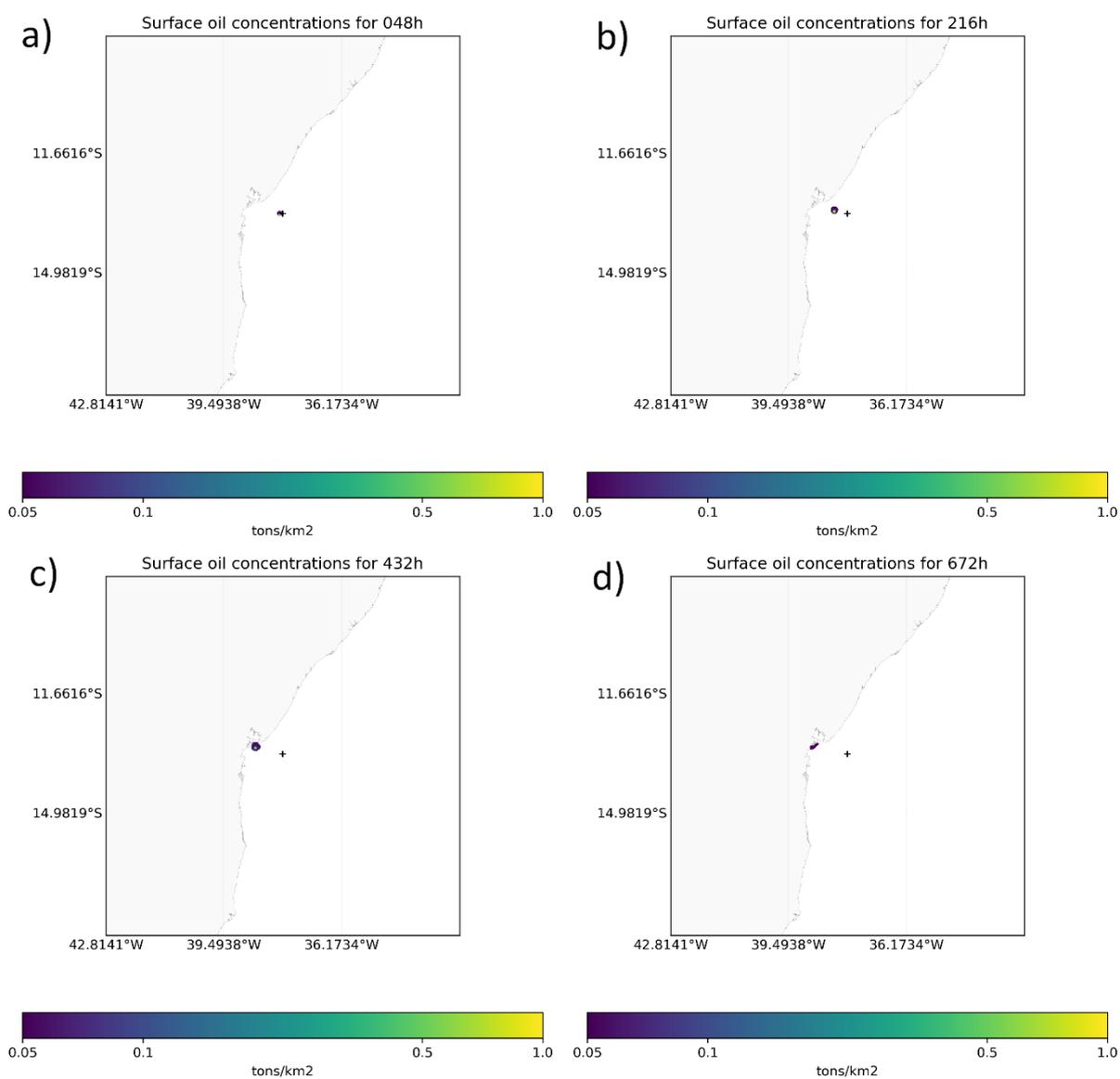
proporcionou, provavelmente, uma dispersão mecânica das gotículas, seguido de uma submersão, reduzindo a quantidade de óleo presente na superfície depois de 6 dias aproximadamente.

Após meia hora do início da simulação, um percentual evaporado de 29,05%, 28,58%, 27,03% e 29,06% em janeiro, abril, julho e outubro respectivamente foi observado. Em todos os períodos atingiu-se o percentual máximo da fração evaporativa em 5 horas, o mesmo tempo obtido no cenário S1. O período de julho apresentou o menor percentual evaporado com 27,20%. Ambos os meses de janeiro e outubro apresentaram um percentual de 29,34% de evaporação, e abril apresentou 29,08%.

4.2.3 S3, Moderado, °API 27

AS figuras 27, 28, 29 e 30 apresentam as concentrações do óleo (ton.km⁻²) para o derrame no cenário S3 para os meses de janeiro, abril, julho e outubro respectivamente.

Figura 27- Concentração de óleo (ton.km⁻²) °API 27 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



No cenário S3, com °API 27, o padrão de deslocamento da pluma ao longo dos períodos foi semelhante ao observado no cenário S1 e S2.

Figura 28- Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 27 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.

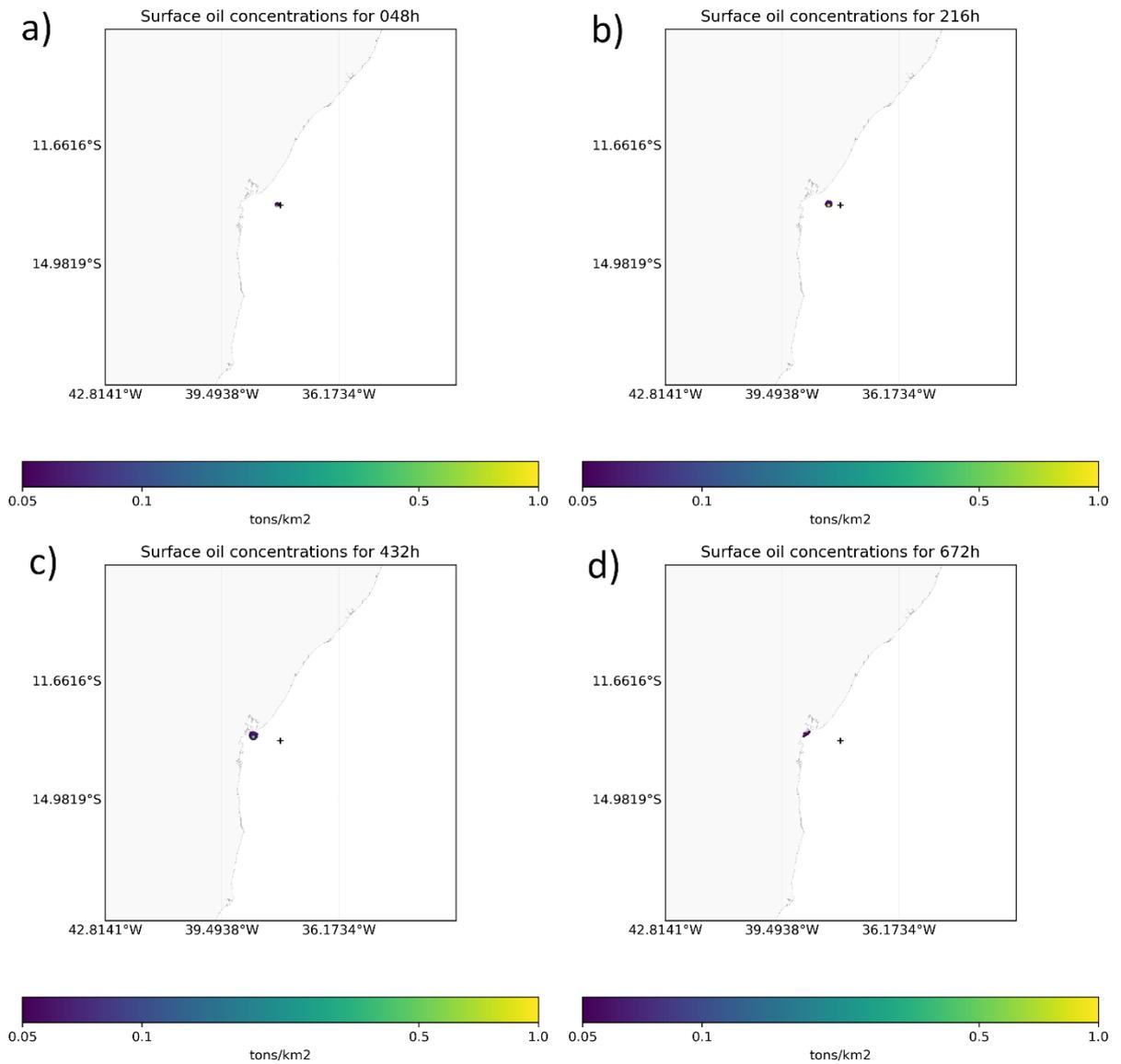
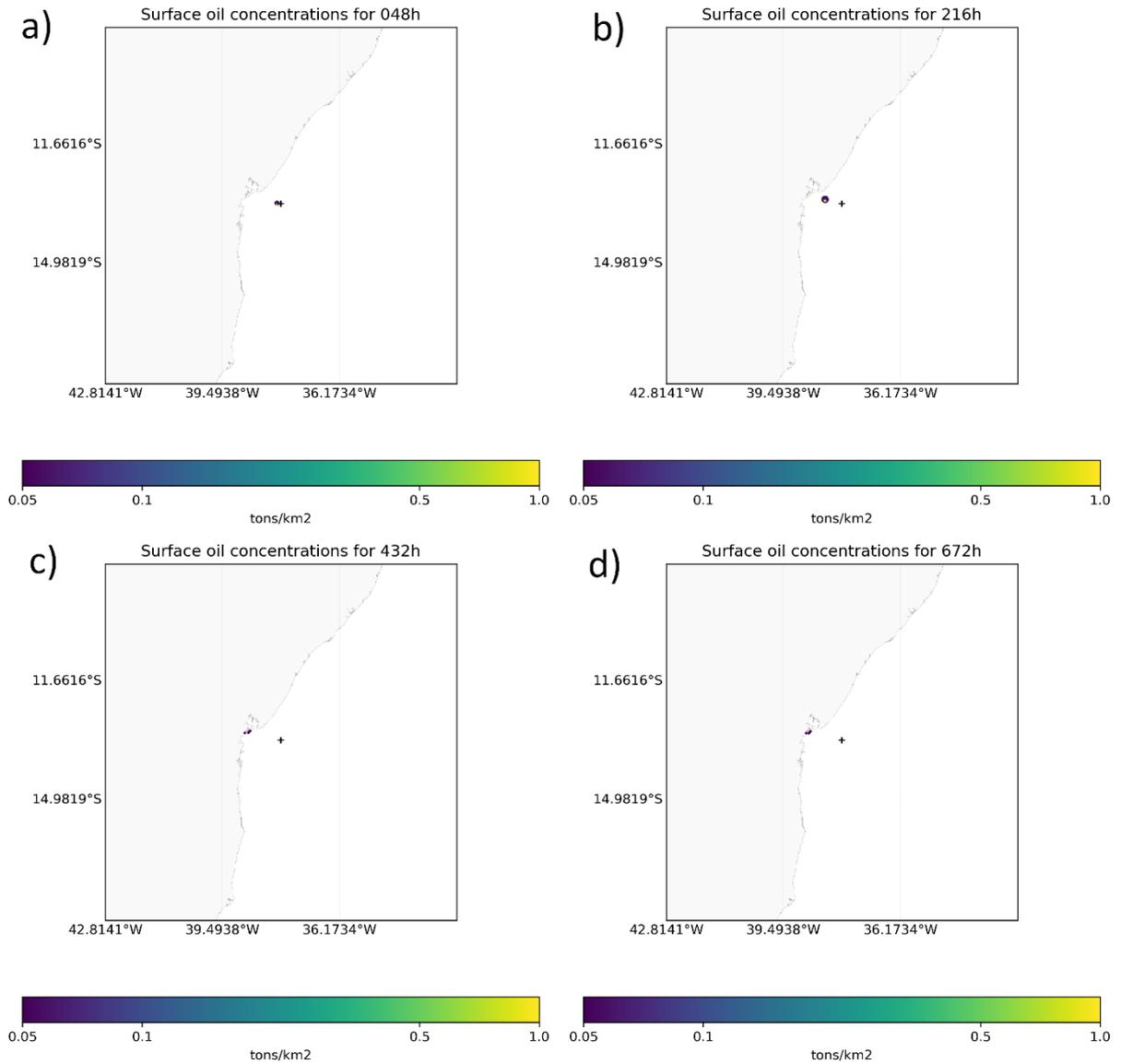
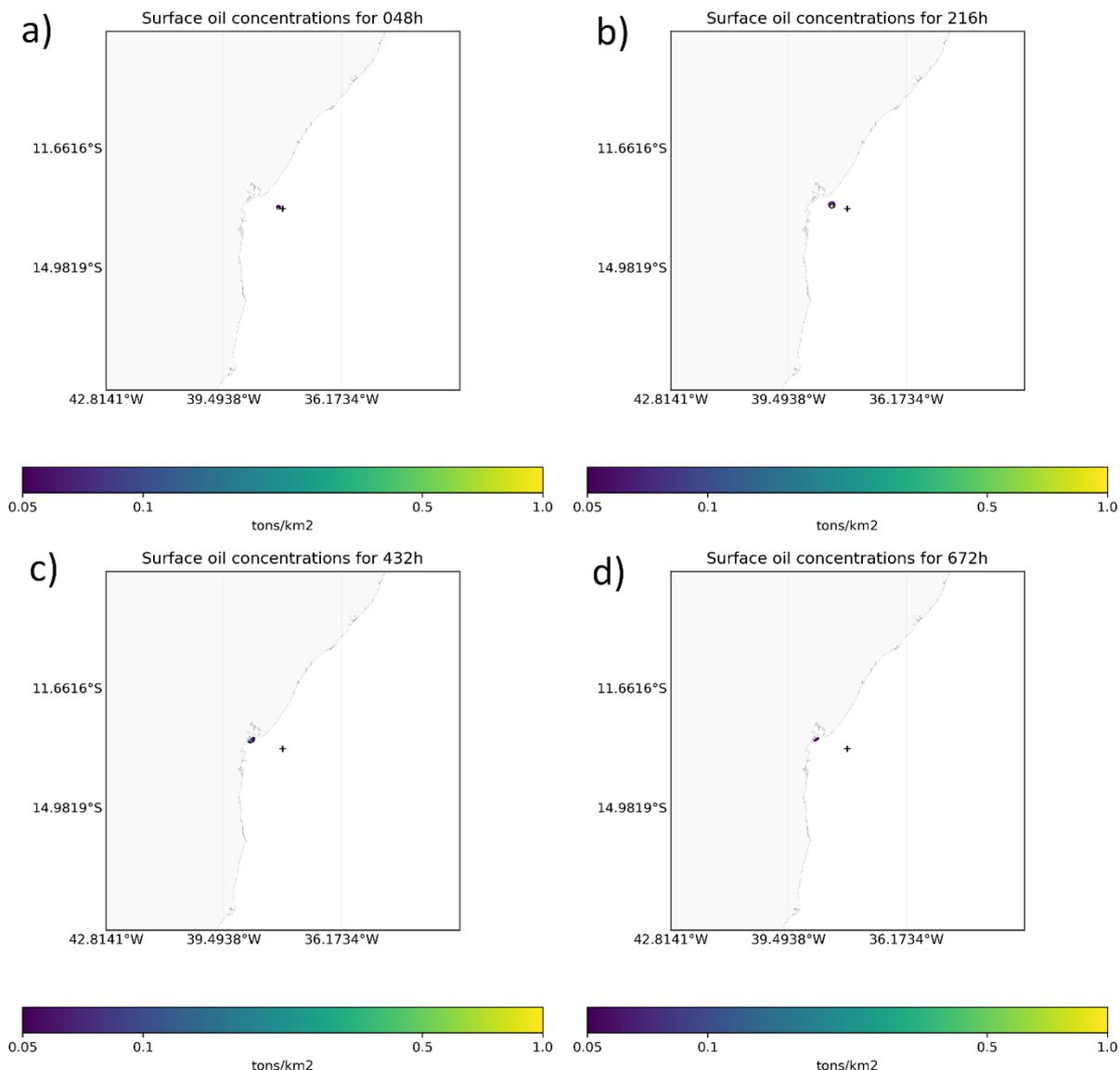


Figura 29- Concentração de óleo ($\text{ton}\cdot\text{km}^{-2}$) °API 27 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



A viscosidade da emulsão formada em meia hora nos períodos foram de $1471,52 \text{ m}^2/\text{s}$ em janeiro, $1063,85 \text{ m}^2/\text{s}$ em Abril, $1768,56 \text{ m}^2/\text{s}$ em Julho e $1189,72 \text{ m}^2/\text{s}$ em Outubro. Atingindo em todos os períodos o valor de $18110,62 \text{ m}^2/\text{s}$ ao se estabilizar, o que ocorreu com 37,5 horas de simulação para Janeiro, 35 horas em Abril, 20,5 horas em Outubro, e Julho foi o período em que o emulsificado se estabilizou mais rápido, com 18 horas de simulação.

Figura 30- Concentração de óleo (ton.km⁻²) °API 27 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.

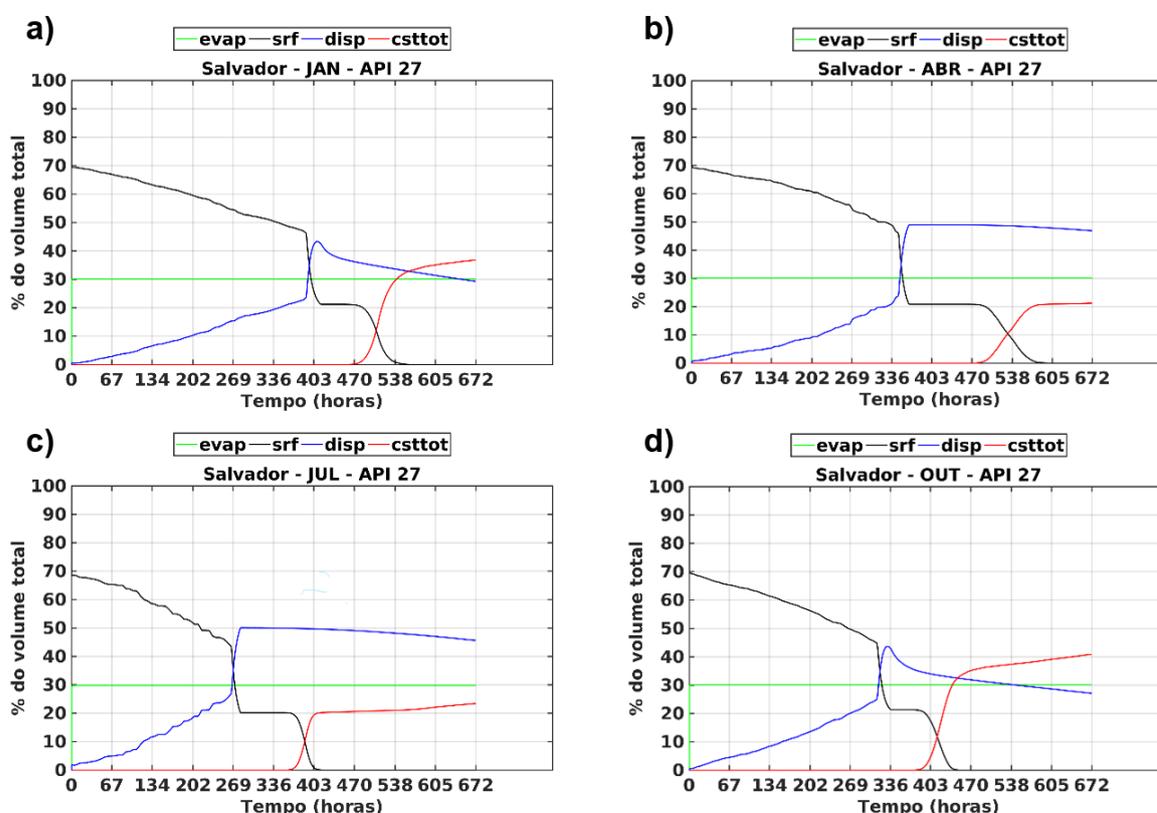


Na simulação o derrame alcança a costa, atingindo o litoral Ilha de Itaparica, com diferentes horários para cada período. Em Janeiro, ocorreu com 431 horas de simulação (aproximadamente 18 dias), restando 21,19% do óleo na superfície, e um percentual de partículas dispersas na coluna d'água de 38,77%. Em Abril, o material chegou a costa com 464,5 horas de simulação (aproximadamente 19 dias), restando 20,85% do óleo na superfície, sendo 48,96% do valor disperso na coluna d'água. Julho foi o período simulado em que o material chegou mais rápido na costa, com 349h de simulação (aproximadamente 14 dias), restando 20,19% na superfície, e também foi o período que apresentou maior valor disperso na coluna d'água, com

49,93%. Em outubro, o material chegou com 363h de simulação (aproximadamente 15 dias), restando 21,31% na superfície e 26,35% disperso na coluna d'água.

Ao final da simulação, o percentual do material na costa respectivamente de 36,41%, 20,54%, 22,57% e 39,84%.

Figura 31- Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 27 nos meses de (a) janeiro, (b) abril, (c) julho e (d) outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.



A evolução do derrame pode ser observado na figura 31 onde pode-se observar a evolução ao longo do tempo do percentual do óleo evaporado, na superfície do mar, dissolvido e por último o percentual que chegou a costa.

Neste cenário de simulação de derrame de óleo, foi observado após meia hora do seu início um percentual evaporado de 29,92%, 29,42%, 29,56% e 29,75% em Janeiro, Abril, Julho e outubro respectivamente. Em todos os períodos foi atingido o percentual máximo da fração evaporativa em 5 horas, o período de Julho apresentou

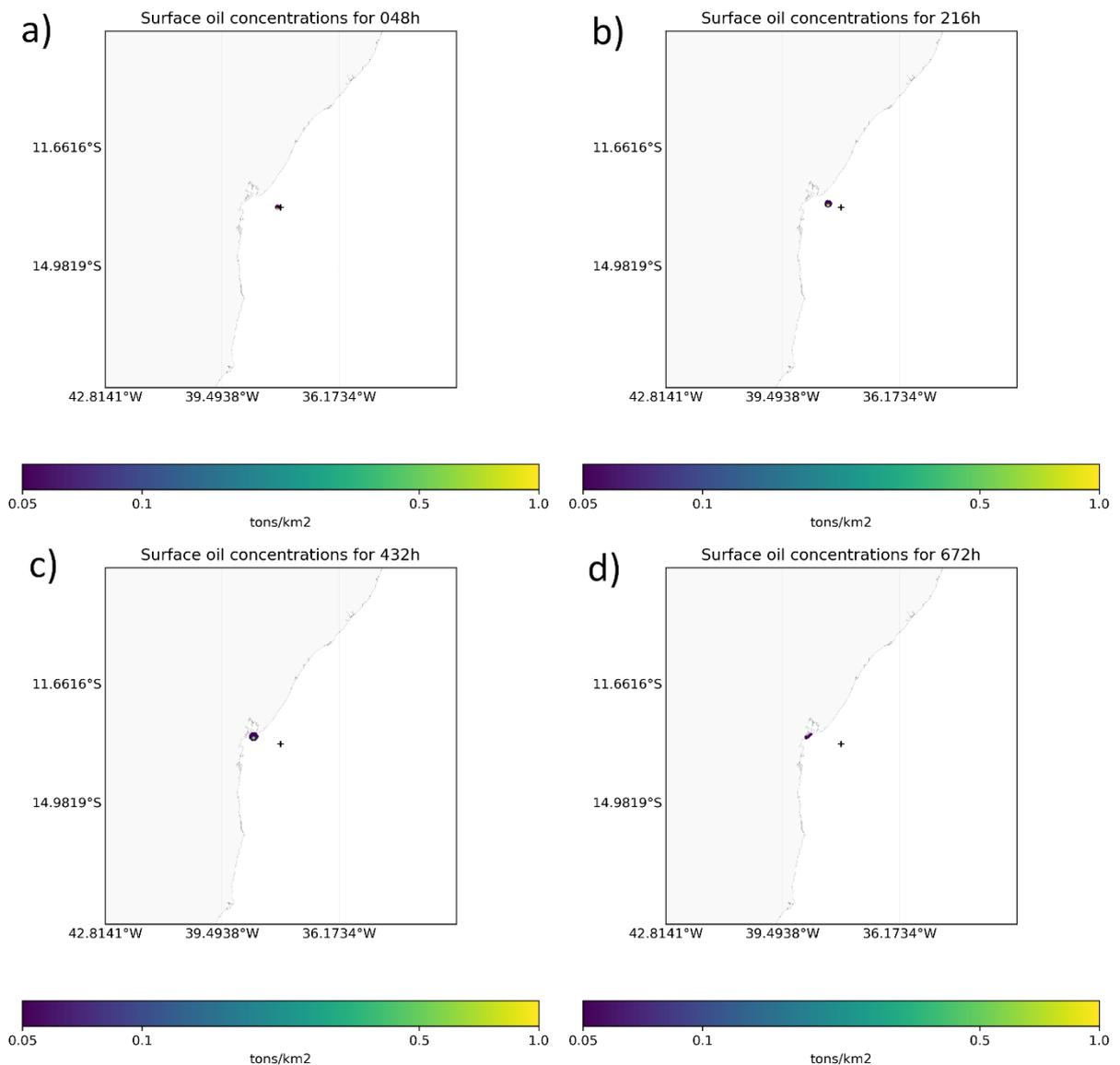
o menor percentual evaporado com 29,72%. Ambos os meses de Janeiro e Outubro apresentaram um percentual de 30,17% de evaporação, e Abril apresentou 30,12%.

Com 403 horas de simulação em Janeiro é possível observar uma diminuição do volume total de óleo disperso na coluna d'água, isso possivelmente se deve a uma sedimentação do material, provavelmente ocasionado pela diferença de temperatura comparando as figuras de localização e concentração da pluma de óleo de Janeiro (Figura 27, letra c) com a figura correspondente para temperatura na superfície do mar em Janeiro (Figura 9, dia 18). O mesmo pode ser observado para o mês de Outubro. Se a densidade do petróleo exceder a da água do mar, provavelmente afundaria.

4.2.4 S4, Leve, °API 36

As Figuras 32, 33, 34, e 35 apresentam as concentrações do óleo (ton.km⁻²) para o derrame no cenário S3 para os meses de janeiro, abril, julho e outubro respectivamente.

Figura 32- Concentração de óleo (ton.km⁻²) °API 36 no mês de Janeiro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



Assim como nas simulações anteriores, o S4, com °API 27, apresentou o padrão de deslocamento da pluma ao longo dos períodos semelhante ao observado no cenário S1.

Figura 33 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 36 no mês de Abril após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.

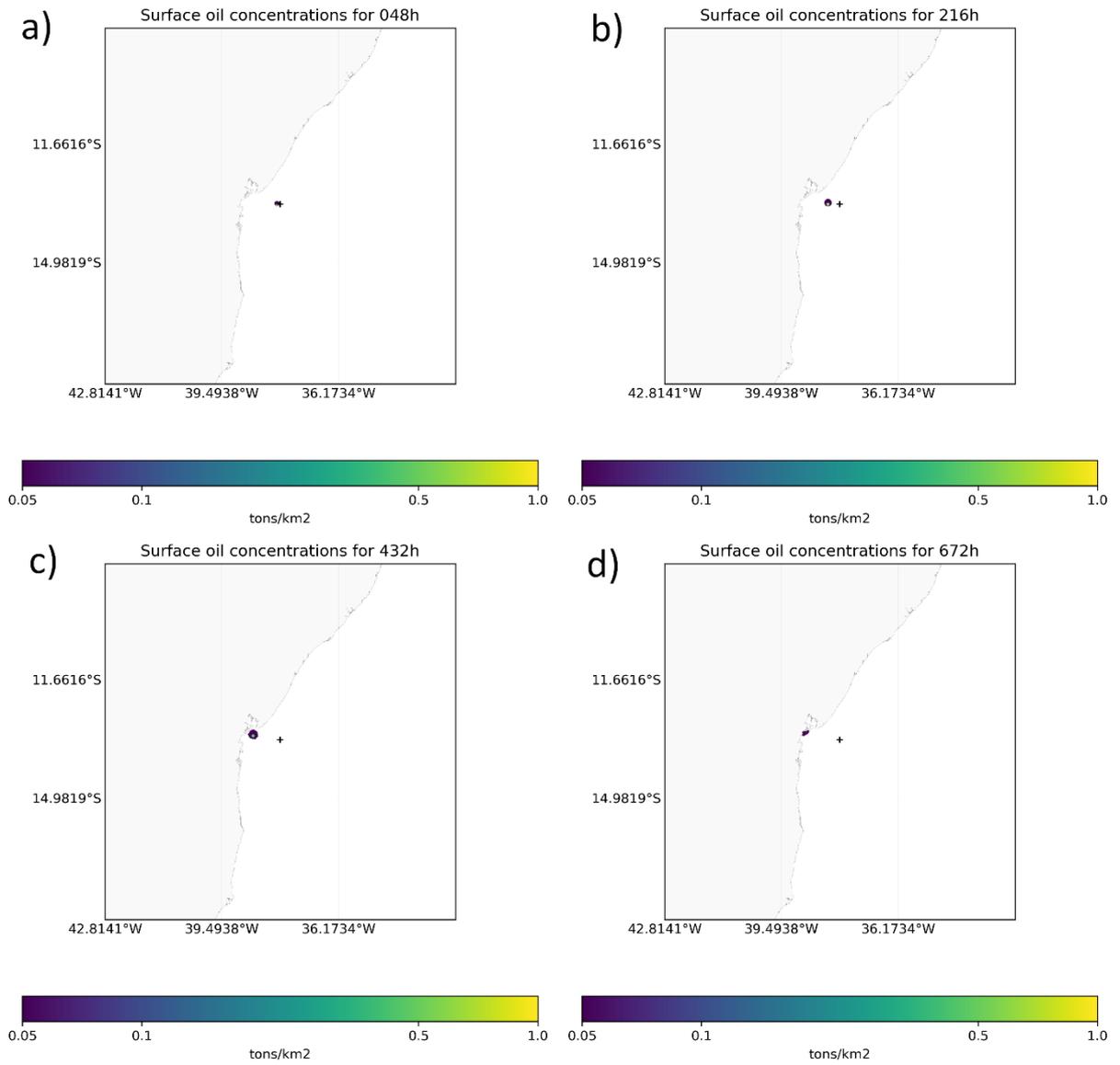
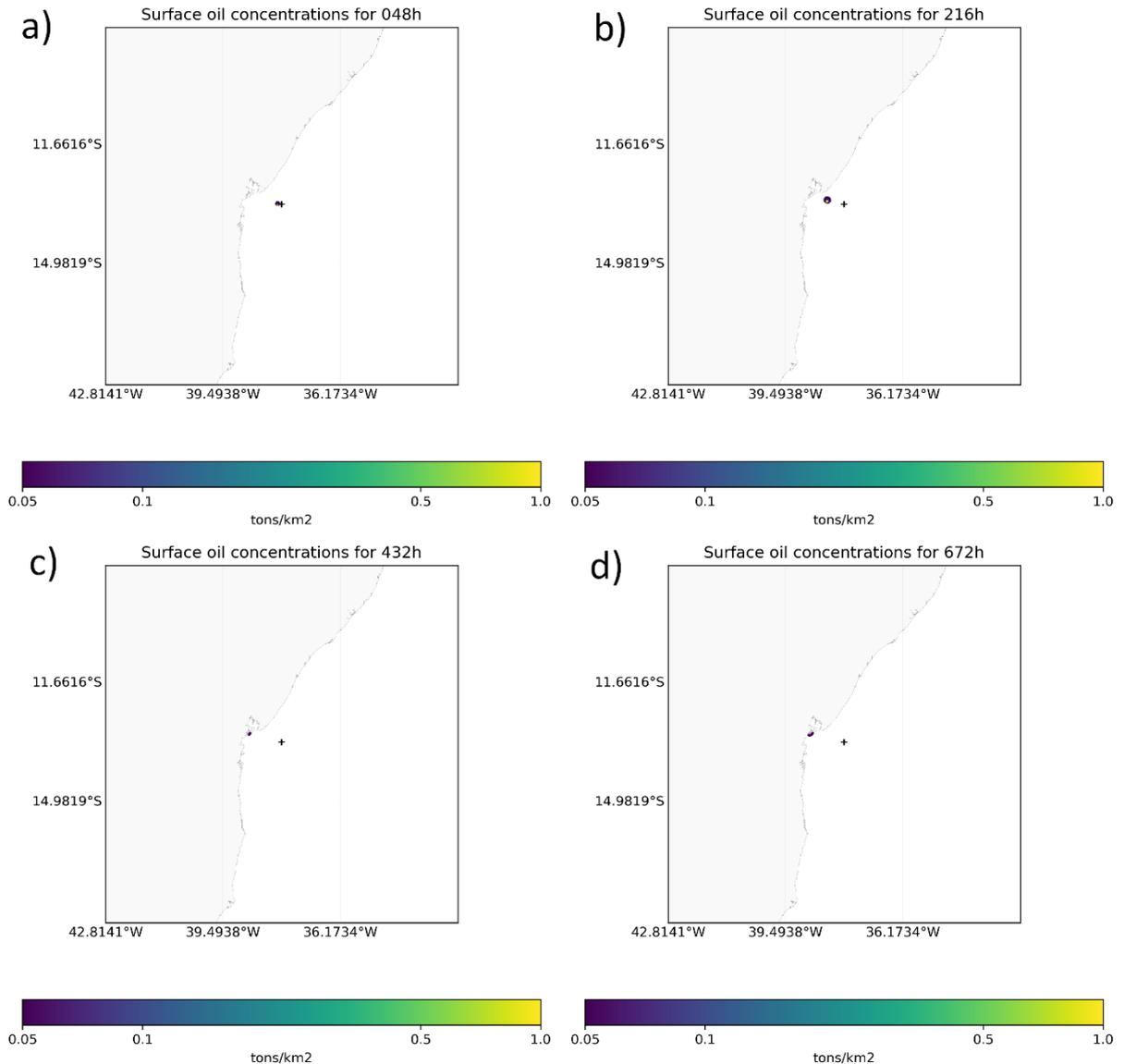
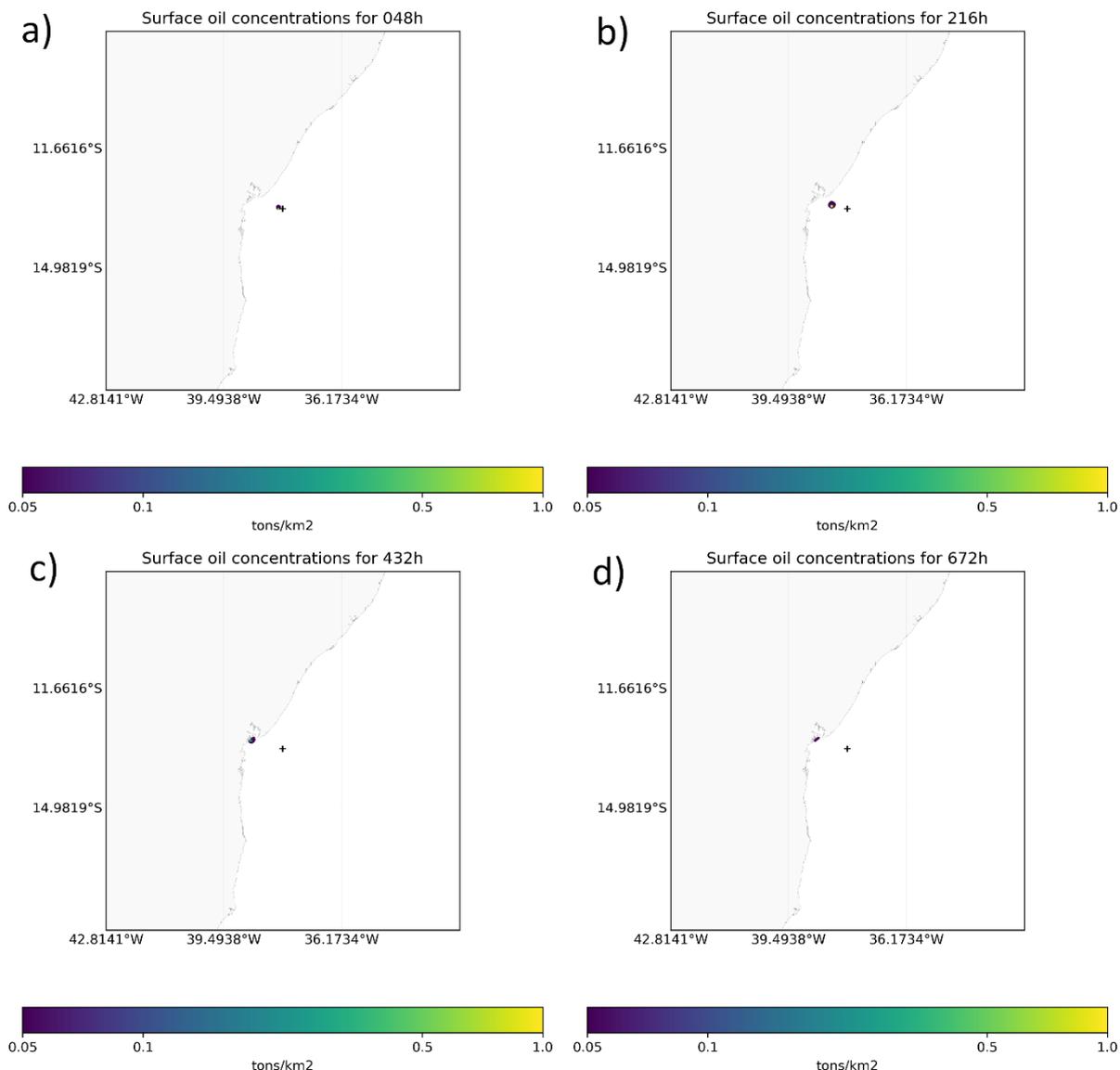


Figura 34 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 36 no mês de Julho após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



A viscosidade da emulsão formada em meia hora nos períodos foram de 376,22 m^2/s em janeiro, 250,39 m^2/s em Abril, 474,51 m^2/s em Julho e 287,79 m^2/s em outubro. Atingindo em todos os períodos o valor de 14725,83 m^2/s ao se estabilizar, o que ocorreu com 42,5 horas de simulação para Janeiro, 40 horas em abril, 23,5 horas em outubro, e julho foi o período em que o emulsificado se estabilizou mais rápido, com 21,5 horas de simulação.

Figura 35 - Concentração de óleo (ton.km^{-2}) °API 36 no mês de Outubro após (a) 48 horas, (b) 216 horas, (c) 432 horas e (d) 672 horas.



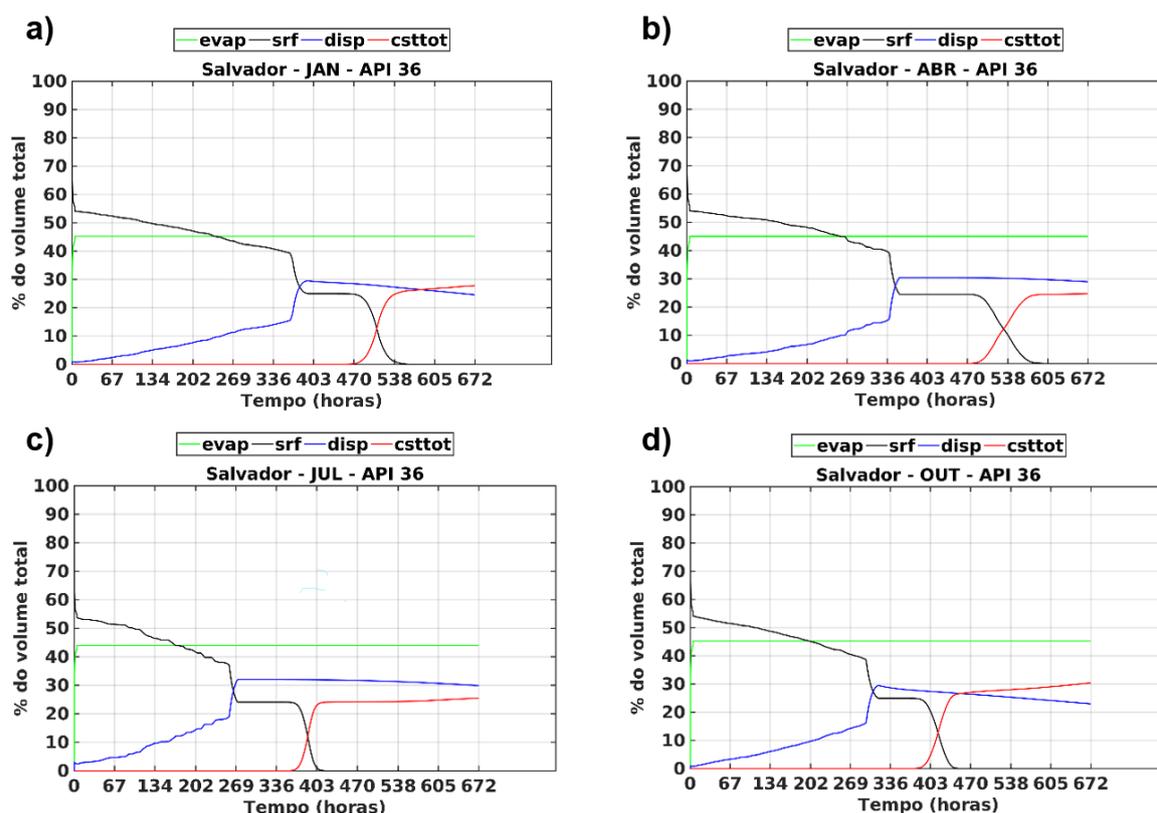
Em todos os cenários simulados o derrame alcança a costa, atingindo o litoral Ilha de Itaparica, com diferentes horários para cada período. Em janeiro, ocorreu com 439 horas de simulação (aproximadamente 18 dias), restando 24,97% do óleo na superfície, e um percentual de partículas dispersas na coluna d'água de 28,81%. Em abril, o material chegou a costa com 462 horas de simulação (aproximadamente 19 dias), restando 24,53% do óleo na superfície, sendo 30,39% do valor disperso na coluna d'água. Julho foi o período simulado em que o material chegou mais rápido na costa, com 345 horas de simulação (aproximadamente 14 dias), restando 24,05% na superfície, e também foi o período que apresentou maior valor disperso na coluna d'água, com 31,96%. Em outubro, o material chegou com 363h de

simulação(aproximadamente 15 dias), restando 24,96% na superfície e 27,99% disperso na coluna d'água.

Ao final da simulação, o percentual do material na costa respectivamente de 26,81%, 23,82, 24,38% e 29,45%.

A evolução do derrame pode ser observado na Figura 28 onde é possível observar a evolução ao longo do tempo do percentual do óleo evaporado, na superfície do mar, dissolvido e por último o percentual que chegou a costa.

Figura 36 - Evolução ao longo do tempo da simulação com óleo °API 36 nos meses de (a)janeiro, (b)abril, (c)julho e (d)outubro. Em verde temos o percentual evaporado, em preto o percentual na superfície, em azul o disperso na coluna d'água, e em vermelho, o percentual que chegou na costa.



A evolução do derrame pode ser observado na Figura 36 onde é possível observar a evolução ao longo do tempo do percentual do óleo evaporado, na superfície do mar, dissolvido e por último o percentual que chegou a costa

Neste cenário de simulação de derrame de óleo, foi observado após meia hora do seu início um percentual evaporado de 34,13%, 31,72%, 34,14% e 32,79% em janeiro, abril, julho e outubro respectivamente. O percentual máximo de evaporação

foi atingida para todos os períodos em 6 horas, uma hora a mais quando comparado com as outras simulações, S1, S2 e S3. Janeiro apresentou o maior percentual de evaporação com 45,24% , abril apresentou 45,05%, julho apresentou o menor percentual evaporado com 43,95%, e outubro teve 45,22% do volume evaporado.

Tabela 4 – Dados obtidos a partir das simulações.

Nº Sim.	Período	Vis. Emulsão 30min	Vis. Emulsão ao Estabilizar	Hora Emulsificado Estabilizou	% Evaporado 30min	% Evaporado Total	Hora Max. Evaporado	Hora primeiro Toque	% vol. na costa ao fim (672h)
S1	Janeiro	134,44 m ² /s	698,40 m ² /s	21h	9,73%	9,76%	5h	444h	8,66%
	Abril	101,56 m ² /s	698,40 m ² /s	21h	9,74%	9,73%	5h	465h	8,24%
	Julho	158,17 m ² /s	698,40 m ² /s	12h	9,41%	9,43%	5h	344h	8,42%
	Outubro	111,40 m ² /s	698,40 m ² /s	13,5h	9,77%	9,77%	5h	362h	9,05%
S2	Janeiro	55,85 m ² /s	475,05 m ² /s	28h	29,05%	29,34%	5h	442h	20,63%
	Abril	40,78 m ² /s	475,05 m ² /s	28h	28,58%	29,08%	5h	456h	19,79%
	Julho	66,68 m ² /s	475,05 m ² /s	14,5h	27,03%	27,20%	5h	346h	19,61%
	Outubro	45,44 m ² /s	475,05 m ² /s	16,5h	29,06%	29,34%	5h	363h	21,46%
S3	Janeiro	1471,52 m ² /s	18110,62 m ² /s	37.5h	29,92%	30,17%	5h	431h	36,41%
	Abril	1063,85m ² /s	18110,62 m ² /s	35h	29,42%	30,12%	5h	464.5h	20,54%
	Julho	1768,56 m ² /s	18110,62 m ² /s	20.5h	29,56%	29,72%	5h	349h	22,57%
	Outubro	1189,72 m ² /s	18110,62 m ² /s	18h	29,75%	30,17%	5h	363h	39,84%
S4	Janeiro	376,22 m ² /s	14725,83 m ² /s	42.5h	34,13%	45,24%	6h	439h	26,81%
	Abril	250,39 m ² /s	14725,83 m ² /s	40h	31,72%	45,05%	6h	462h	23,82%
	Julho	474,51 m ² /s	14725,83 m ² /s	21.5h	34,14%	43,95%	6h	345h	24,38%
	Outubro	287,79 m ² /s	14725,83 m ² /s	23.5h	32,79%	45,22%	6h	363h	29,45%

Diante dos resultados das simulações, verificou-se que o período de julho apresentou para todos os cenários uma menor taxa de evaporação, como pode ser observado na Tabela 4, isso ocorreu provavelmente devido aos fortes ventos de sudeste e leste que ocasionaram com que o processo de emulsificação inicial fosse mais rápida, a formação do mousse contribui para a diminuição da área superficial onde atua os processos evaporativos. O baixo percentual evaporado obtido no S1 quando comparado a outros cenários(Tabela 4) se deve ao fato de óleos pesados serem compostos principalmente de componentes não voláteis e de alto peso molecular que são não-evaporativos(SPEIGHT, 2014). Do mesmo modo, óleos mais leves, como o do cenários S4, tem em sua composição frações, componentes, mais voláteis de óleo, com alta pressão de vapor, que evaporam facilmente e constituem a maior parte do volume de óleo evaporado(SPEIGHT,2014). O cenário S3, composto de um óleo moderado, apresentou um percentual evaporado próximo ao cenário S2, com o óleo pesado. Uma possível razão para isso pode ser a rápida formação da emulsão estável, diminuindo a evaporação.

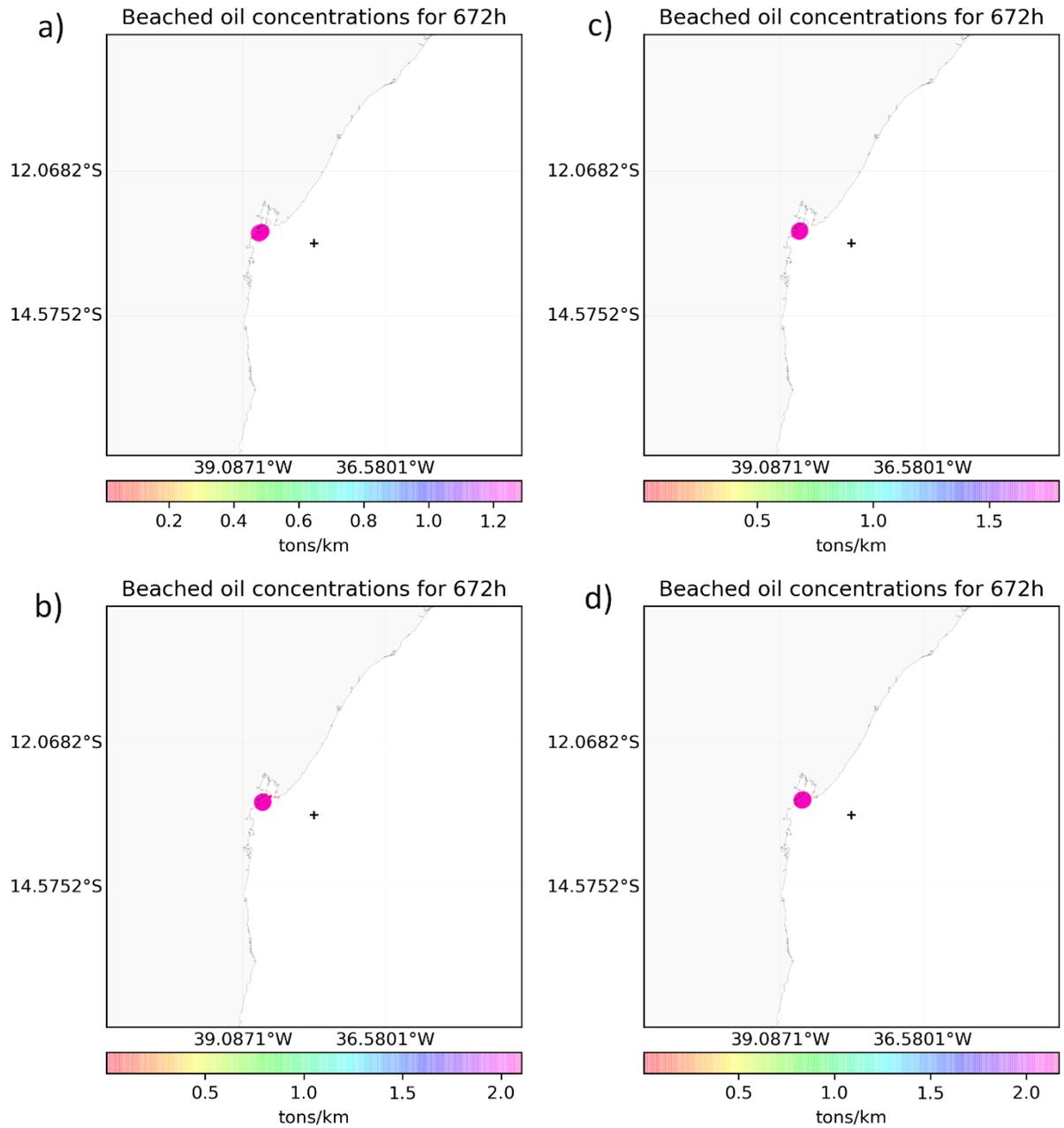
4.2.5 O óleo na costa

Através dos resultados obtidos a partir do modelo, constatou-se que a região da costa mais afetada foi a região de Vera Cruz, na ilha de Itaparica-BA, sendo a região que apresentou a maior probabilidade de toque na costa, e a primeira a ser atingida pelo óleo em todos os cenários e períodos de simulação. Essa prevalência de chegada de óleo próximo a região de Vera Cruz, na ilha de Itaparica, corrobora com os cenários observados após o acidente de óleo de 2019 ocorrido ao largo da plataforma continental do nordeste do Brasil, na qual a região foi amplamente atingida (IBAMA,2019; ZACHARIAS *Et al*, 2021).

Nas Figuras 37, 38, 39 e 40, é possível observar a concentração em tons/km de óleo na costa ao final da simulação. Foi visto que nos períodos de janeiro, devido a direção das correntes marinhas e de vento, os hidrocarbonetos tiveram uma tendência a se espalhar mais para o sul, em direção a ponta Garcia, e o município de Jaguaripe-BA. Em contraste, o período de Julho, apresentou uma tendência, devido ao sentido das correntes do período, dos hidrocarbonetos se dispersarem mais ao litoral norte, em direção a cidade de Salvador-BA.

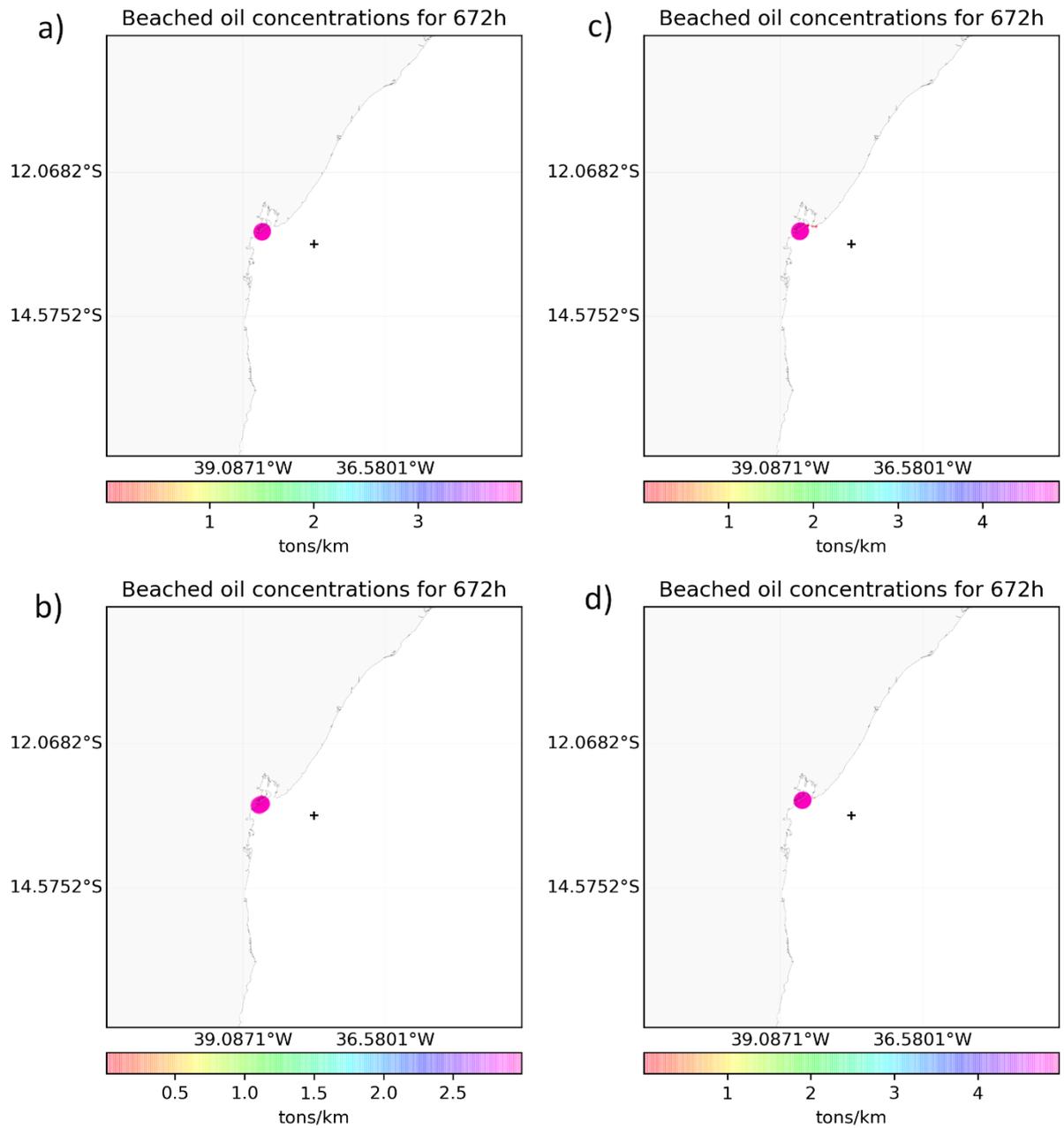
Como o ponto de lançamento encontrava se no meio de um vórtice(Figuras 13 e 14), ele possivelmente atuou como uma força retardando a chegada do óleo a costa, sendo o vento a principal força atuante no processo de deslocamento do hidrocarboneto.

Figura 37- Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S1, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro



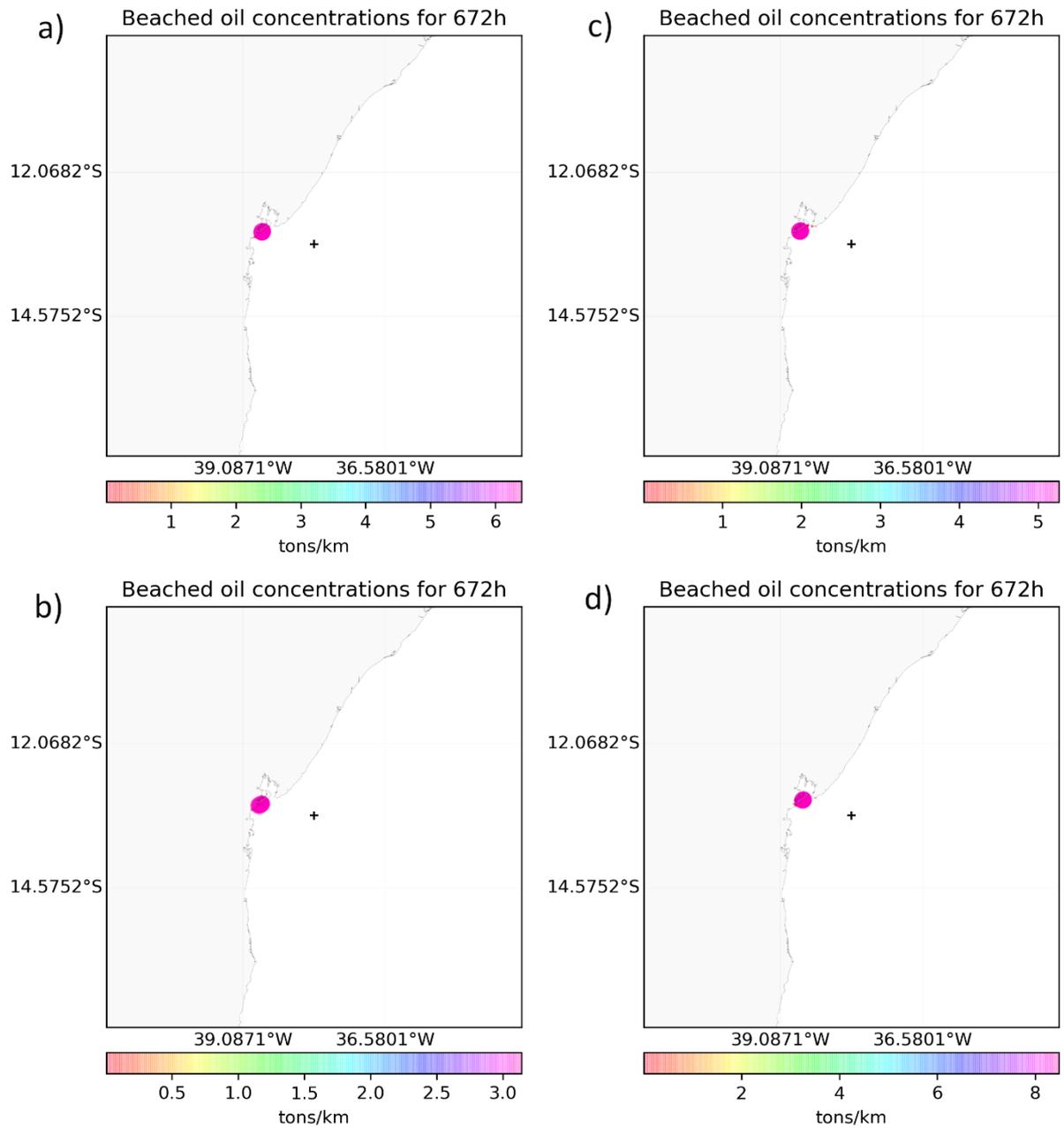
Fonte: Autoral.

Figura 38- Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S2, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro



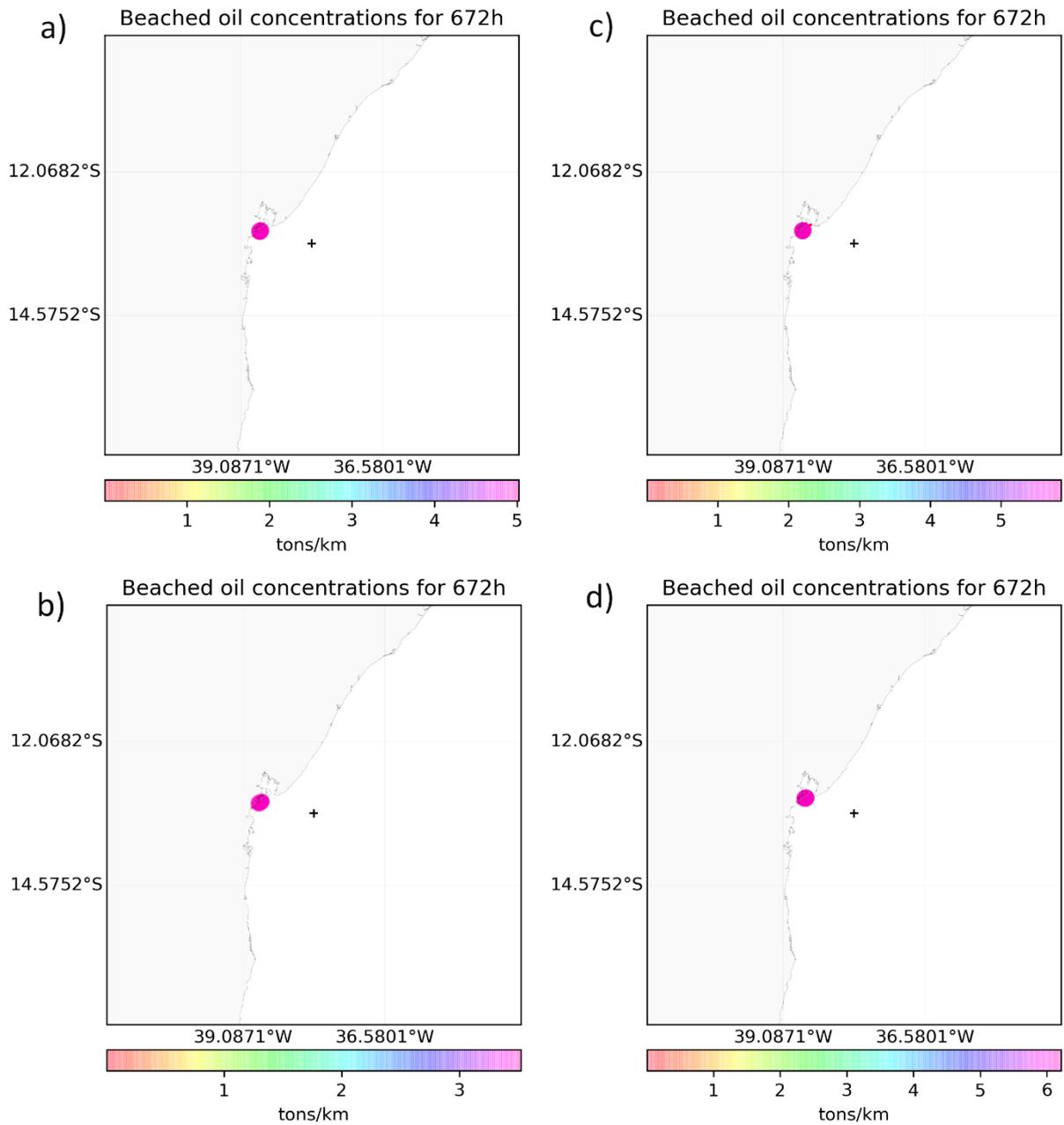
Fonte: Autoral.

Figura 39- Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S3, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro



Fonte: Autoral.

Figura 40- Concentração em tons/km da quantidade de óleo que chegou a costa na Simulação S4, sendo a) Janeiro, b) Abril, c) Julho e d) Outubro



Fonte: Autoral.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A modelagem numérica de derramamento de óleo vem sendo reconhecida para o gerenciamento de resposta em casos de acidentes. Portanto, o desenvolvimento e a melhoria da capacidade de modelagem de derramamento para apoiar uma melhor tomada de decisão de resposta são muito procurados.

Muitos estudos vêm sendo realizados para melhor compreender os processos físicos e químicos atuantes sobre a pluma de óleo. As variáveis físicas oceânicas e atmosféricas e os processos químicos e físicos podem afetar significativamente o destino e o transporte do petróleo. Processos de intemperismo, como evaporação e emulsificação, são extremamente sensível à composição química e viscosidade da mancha de óleo, e a compreensão desses processos são fundamentais para determinar o comportamento do óleo quando derramado e a resposta da natureza ao impactos consequentes.

No presente trabalho foi utilizado uma metodologia de aplicação do modelo Medslik-II adaptado para a região equatorial tropical, utilizado como uma ferramenta para mitigação e para formulação de planos de previsão no gerenciamento de riscos de regiões de interesse, além de servir como uma ferramenta para melhor compreensão de como as variáveis físicas oceânicas e atmosféricas podem afetar significativamente o destino e o transporte do petróleo.

O mês de julho apresentou em todos os cenários, S1,S2,S3 e S4, uma elevada velocidade de transporte do óleo, diminuindo a janela de tempo para medidas mitigatórias. No entanto, o período de outubro foi o que apresentou a maior chegada de material na costa.

Entretanto vale salientar que os resultados apresentados com prevalência de chegada de óleo próximo a região de Vera Cruz, na ilha de Itaparica, corrobora com os cenários observados após o acidente de óleo de 2019 ocorrido ao largo da plataforma continental do nordeste do Brasil.

A compreensão desses processos são fundamentais para determinar os esforços adequados de resposta ao derramamento de óleo, reduzindo os danos e auxiliando na limpeza e restauração.

O sucesso da aplicação depende não apenas das formulações de intemperismo e espalhamento no modelo, mas também da preparação de dados de entrada dos

modelos numéricos ou dados de observação, e do manuseio dos parâmetros-chave e seus valores, devido à inevitáveis erros ou imprecisão nos dados de entrada, como informações de vento, ondas e correntes, as incertezas dos parâmetros devem ser consideradas com mais cuidado. Portanto, calibração de parâmetros e análise de incerteza e sensibilidade são essenciais para minimizar a discrepância entre dados simulados e observados e melhorar o desempenho e a confiabilidade da modelagem, sendo assim necessário calibrar e validar o modelo a partir de acidentes pretéritos na região tropical afim de melhorar o desempenho e confiabilidade do mesmo.

De tal maneira seria interessante a realização de mais simulações com outros cenários nos períodos de julho e outubro para melhor compreende o transporte dos hidrocarbonetos e os efeitos dessas propriedades nessa área.

REFERÊNCIA

ABIANEH, O.S.; CHEN, C. Modelling of evaporation and dissolution of multicomponent oil droplet in shallow water. **Advanced Computational Methods Experiments in Heat Transfer** 2012, v. 12, p. 231 DOI:10.2495/HT120201

AGUIAR, A.L.; CIRANO, M.; MARTA-ALMEIDA, M.; LESSA, G. C.; VALLE-LEVINSON, A.; Upwelling processes along the South Equatorial Current bifurcation region and the Salvador Canyon (13°S), Brazil, **Continental Shelf Research**, Volume 171, 2018, Pages 77-96, ISSN 0278-4343, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.10.001>.

AGUILERA, F., J. MÉNDEZ, E. PÁSARO, AND B. LAFFON. Review on the effects of exposure to spilled oils on human health. **Journal of Applied Toxicology** **30(4):291-301**. 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/jat.1521>

ALMEDA, R.; WAMBAUGH, Z.; WANG, Z.; HYATT, C.; LIU, Z.; BUSKEY, E.J. Interactions between zooplankton and crude oil: toxic effects and bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons. **PLoS ONE**, v. 8(6). E67212. 2013. doi:10.1371/journal.pone.0067212

AL-RABEH, A., LARDNER, R.; GUNAY, N. Gulfspill Version 2.0: a software package for oil spills in the Arabian Gulf. **Environmental Modelling & Software**, v.15, p. 425-442. 2000.

AMORIM, F. N. **Caracterização oceanográfica da Baía de Camamu e adjacências e mapeamento das áreas de risco a derrames de óleo**. 2005. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal das Bahia, Salvador, 2005

AMORIM, F. N.; CIRANO, M.; SOARES, I. D.; LENTINI, C. A. D. Coastal and shelf circulation in the vicinity of Camamu Bay (14°S), Eastern Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research**, **31(2), 108–119**. 2011. doi:10.1016/j.csr.2010.11.011

ANDERSSON, K.; BRYNOLF, S.; LINDGREN, J.F.; WILEWSKA-BIEN, M. **Shipping and the Environment**. Springer Berlin Heidelberg. Ed 1. p.137. 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49045-7

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **DÉCIMA SEXTA RODADA DE LICITAÇÕES. BACIA DE CAMAMU-ALMADA. Superintendência de Definição de Blocos. Sumário Geológico e Setores em Oferta**. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/16a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas-oferta/sumario-geologico-camamu-almada.pdf>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

BEEGLE-KRAUSE, J. General NOAA oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model. In **Proceedings of International Oil Spill Conference**, 2001; pp. 865-871

BERRY, A.; DABROWSKI, T.; LYONS, K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine Pollution Bulletin**. 2012, 64, 2489-2501, doi:10.1016/j.marpolbul.2012.07.036.

BUIST, I.A.; TWARDUS, E. M. In-situ Burning of Uncontained Oil Slicks, **Proceedings of the Seventh AMOP Technical Seminar**, Environment Canada, Ottawa, ON, pp. 127-154, 1984.

BURGESS, R., M. Evaluating ecological risk to invertebrate receptors from PAHs in sediments at hazardous waste sites: **Ecological Risk Assessment Support Center**, Cincinnati, USA. 2009.

CARLS, M. G.; M. M. BABCOCK; P. M. HARRIS; G. V. IRVINE; J. A. CUSICK; S. D. RICE. Persistence of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. **Marine Environmental Research** 51(2):167-190. 2001
[http://dx.doi.org/10.1016/S0141-1136\(00\)00103-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-1136(00)00103-3)

CARRACEDO, P.; TORRES-LOPEZ, S.; BARREIRO, M.; MONTERO, P.; BALSEIRO, C.F.; PENABAD, E.; LEITAO, P.C.; PEREZ-MUNUZURI, V. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): development of an operational system. **Marine Pollution Bulletin.**, v.53, p. 350-360, 2006 doi:10.1016/j.marpolbul.2005.11.014

CHANG, S. E., J. STONE, K. DEMES, AND M. PISCITELLI. Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. **Ecology and Society** **19(2): 26**. 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06406-190226>

CIRANO, M.; MATA, M. M.; CAMPOS, E. J. D.; DEIRÓ, N. F. R. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 2, p. 209-230, 2006.

CIRANO, M.; LESSA, G. C. Oceanographic characteristics os Baía de Todos os Santos, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 363-387, 2007.

CRAVEIRO FILHO, JOSÉ., NYKON; ALVES, RODRIGO; SILVA, JULIANA; VASCONCELOS, EDSON; A. ALVES-JÚNIOR, FLAVIO; Rosa Immediate effects of the 2019 oil spill on the macrobenthic fauna associated with macroalgae on the tropical coast of Brazil. **Marine Pollution Bulletin**. V. 165. P. 1-8. 2021. Doi:10.1016j.marpolbul.2021.112107.

DE DOMINICIS, M.; PINARDI, N.; ZODIATIS, G.; ARCHETTI, R. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine oil spill model for short-term forecasting - Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development Discussions**. v. 6. P.1949-1997. 2013a. doi: 10.5194/gmdd-6-1949-2013.

DE DOMINICIS, M.; PINARDI, N.; ZODIATIS, G.; ARCHETTI, R. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine oil spill model for short-term forecasting – Part 2: Numerical simulations and validations. **Geoscientific Model Development Discussions**, v.6(1), p. 1999–2043. 2013b. doi:10.5194/gmdd-6-1999-2013

DEAN, T. A.; J. L. BODKIN; S. C. JEWETT; D. H. MONSON; D. JUNG. Changes in sea urchins and kelp following a reduction in sea otter density as a result

of the Exxon Valdez oil spill. **Marine Ecology Progress Series** **199:281-291**. 2000.
<http://dx.doi.org/10.3354/meps199281>

DIEZ, S.; JOVER, E.; BAYONA, J. M.; ALBAIGES, J. "Prestige oil spill. III. Fate of a heavy oil in the marine environment." **Environmental Science & Technology** v. 41(9): p. 3075-3082. 2007

DOMINGUEZ, J. M. L.; ANDRADE, A. C. S.; BITTENCOURT, A. C. S. P. The Holocene barrier strand plains of the state of Bahia. In: DILLENBURG, S. P.; HESP, P. (Ed.). **Geology and geomorphology of Holocene Coastal Barrier of Brazil**. Berlin: Springer Verlag, v. 107, p. 253-285, 2009.

ETKIN, D. S *et al.* Quantification of oil spill risk. **Oil Spill Science and Technology**. 2nd ed. Gulf Professional Publishing, pp. 71–183. 2017.
[DOI:10.1016/B978-0-12-809413-6.00002-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809413-6.00002-3)

FAN, T.; BUCKLEY, J. S.; Rapid and Accurate SARA Analysis of Medium Gravity Crude Oils. **Energy & Fuels**, v.16(6),p. 1571–1575. 2002.
[doi:10.1021/ef0201228](https://doi.org/10.1021/ef0201228)

FINGAS, M.; FIELDHOUSE, B.; MULLIN, J.V. Studies of water-in-oil emulsions: stability studies. In: Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar. **Environment Canada**, pp.21–42. Canadá, 1997.

FINGAS, M. **The basics of oil spill cleanup**. 2. ed. Flórida: CRC Press, 2001. 245 p. 11 .Oil spill science and technology: prevention, response and cleanup. 1. ed. **Oxford: Elsevier Inc.**, 1189 p. 7, 8, 9, 12, 13, 14, 39. 2011.

FINGAS, M. F. Macondo well blowout mass balance: a chemical view. **Arctic And Marine Oil Spill Program (Amop) Technical Seminar On Environmental Contamination And Response**, v. 36., 2013. Proceedings... Ottawa: Environment Canada, p. 75–102. 2. 2013.

FINGAS, M.; FIELDHOUSE, B. Water-in-Oil Emulsions. In: FINGAS, M. (Ed.). **Handbook of Oil Spill Science and Technology**. John Wiley & Sons. p. 225–270. 2014.

GAD, S. C. Petroleum Hydrocarbons. **Encyclopedia of Toxicology**, p. 838–840. 2014. doi:10.1016/b978-0-12-386454-3.00899-x

GAIMAN, Niel. "somewhat less sinister ducks" . Niel Gaiman's Journal:somewhat less sinistre ducks. 2004. Disponível em: <<http://journal.neilgaiman.com/2004/04/somewhat-less-sinister-ducks.asp> > Acesso em: 26 de Setembro de 2022

GARMARUDI, A.B.; KHANMOHAMMADI, M.; FARD, H.G.; DE LA GUARDIA, M. Origin based classification of crude oils by infrared spectrometry and chemometrics. **Fuel**, V. 236, p.1093–1099. 2019. doi:10.1016/j.fuel.2018.09.013

HORN, M. Trajectory and Fate Modelling in Support of the ExxonMobil Eastern Newfoundland Offshore Exploration Drilling Project. 2018.

HOWLETT, E.; JAYKO, K.; SPAULDING, M. Interfacing real-time information with OILMAP. (**EC/TDTS--94-02286-Vol1-2**). Canada. 1993.

IBAMA, 2019. Fonte: Manchas de óleo no Nordeste. Disponível em : <www.ibama.gov.br/manchasdeoleo> Acesso em: 07 de outubro de 2022

INCARDONA, J. P.; M. G. CARLS, H. L. DAY, C. A. SLOAN, J. L. BOLTON, T. K. COLLIER,; N. L. SCHOLZ. Cardiac arrhythmia is the primary response of embryonic Pacific herring (*Clupea pallasii*) exposed to crude oil during weathering. **Environmental Science and Technology** 43:201-207. 2009.<http://dx.doi.org/10.1021/es802270t>

JUDSON, R. S.; M. T. MARTIN. D. M. REIF; K. A. HOUCK; T. B. KNUDSEN; D. M. ROTROFF; M. XIA; S. SAKAMURU; R. HUANG; P. SHINN; C. P. AUSTIN; R. J. KAVLOCK; D. J. DIX. Analysis of eight oil spill dispersants using rapid, in vitro tests for endocrine and other biological activity. **Environmental Science and Technology** 44:5979-5985. 2010. <http://dx.doi.org/10.1021/es102150z>

KAZLAUSKIENE, N.; M. Z. VOSYLIENE,; E. RATKELYTE. The comparative study of the overall effect of crude oil on fish in early stages of development. Pages 307-316 in P. Hlavinec, O. Bonacci, J. Marsalek, and I. Mahrikova, editors. Dangerous pollutants (xenobiotics) in urban water cycle: proceedings of the NATO

advanced research workshop on dangerous pollutants (xenobiotics) in urban water cycle, Lednice, Czech Republic, 3-6 May 2007. **Springer Netherlands**, Amsterdam, The Netherlands. 2008. [http://dx. doi.org/10.1007/978-1-4020-6795-2_28](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6795-2_28)

KERAMEA, P.; SPANOUDAKI, K.; ZODIATIS, G.; GIKAS, G.; SYLAIOS, G. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives and Challenges. **Journal of Marine Science and Engineering**. 2021, v. 9, p. 181. 2021. Doi: [https://doi.org/ 10.3390/jmse9020181](https://doi.org/10.3390/jmse9020181)

LEE, K.; BOUFADEL, M.; CHEN, B.; FOGHT, J.; HODSON, P.; SWANSON, S.; VENOSA, A. **Expert Panel Report on the Behaviour and Environmental Impacts of Crude Oil Released Into Aqueous Environments**. Royal Society of Canada. 2015.

LEHR, W.; JONES, R.; EVANS, M.; SIMECEK-BEATTY, D.; OVERSTREET, R. Revisions of the ADIOS oil spill model. **Environmental Modelling Software** 2002, 17, 189-197. 2002.

LIU Y, KUJAWINSKI E.B. Chemical Composition and Potential Environmental Impacts of Water-Soluble Polar Crude Oil Components Inferred from ESI FT-ICR MS. **PLOS ONE** 10(9): e0136376. 2015a. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136376>

LIU, X., GUO, J., GUO, M., HU, X., TANG, C., WANG, C., & XING, Q. Modelling of oil spill trajectory for 2011 Penglai 19-3 coastal drilling field, China. **Applied Mathematical Modelling**, 39(18), 5331–5340. 2015b. doi:10.1016/j.apm.2014.10.063

MA, J. Y. C.; A. RENGASAMY, D. FRAZER, M. W. BARGER, A. F. HUBBS, L. BATTELLI, S. TOMBLYN, S. STONE, AND V. CASTRANOVA. Inhalation exposure of rats to asphalt fumes generated at paving temperatures alters pulmonary xenobiotic metabolism pathways without lung injury. **Environmental Health Perspectives** 111:1215-1221. 2003 [online] URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1241577/pdf/ehp0111-001215.pdf>

MAJOR, D. N.; H. WANG. How public health impact is addressed: a retrospective view on three different oil spills. **Toxicological and Environmental Chemistry** **94:442-467**. 2012. <http://dx.doi.org/10.1080/02772248.2012.654633>

MARINETRAFFIC. **MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic**. Disponível em: <<http://www.marinetraffic.com/>>. Acesso em: 12 de Junho de 2022.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine pollution bulletin**, v. **71**, n. **1**, p. **139-151**, 2013.

MISHRA, A.K.; KUMAR, G.S. Weathering of oil spill: modeling and analysis. **Aquatic Procedia** **2015**, 4, 435-442. 2015.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **The Use of Dispersants in Marine Oil Spill Response**. Washington, DC: The National Academies Press. 2019 doi: <https://doi.org/10.17226/25161>.

NORTH, W. J. Position paper on effects of acute oil spills. Background information for ocean affairs workshop on inputs, fates, and effects of petroleum in the marine environment, Airlie, Virginia. May, 1973

ORMSETH, O. A.; BEN-DAVID, A. M. Ingestion of crude oil: effects on digesta retention times and nutrient uptake in captive river otters. **Journal of Comparative Physiology B** **170 (5-6):419-428**. 2000. <http://dx.doi.org/10.1007/s003600000119>

PALIUKAITĖ, M.; VAITKUS, A.; ZOFKA, A. Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. Doi: 10.3846/enviro.2014.162. 2014.

PASQUINI, C.; BUENO, A. Characterization of petroleum using near-infrared spectroscopy: Quantitative modeling for the true boiling point curve and specific gravity. **Fuel**. **86**. **1927-1934**. 10.1016/j.fuel.2006.12.026. 2007.

PAYNE, J. R.; PHILLIPS, C. R. Photochemistry of petroleum in water. **Environmental Science & Technology**, v. 19, n. 7, p. 569-579. Calif, 92037, 1985.

PETROBRAS. **Nossas Atividades - Principais Operações**. Disponível Em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-madre-de-deus.htm>>. Acessado Em: 17 de Agosto de 2022

PLATA, D. L.; SHARPLESS, C. M.; REDDY, C. M. "Photochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in oil films." **Environmental Science & Technology** **42(7)**: 2432-2438. 2008.

REED, M.; RYE, H. A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment. **In Proceedings of International Oil Spill Conference**, pp. 61-66. 1995.

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. *Journal of Physical Oceanography*, v. 37, p. 16-30, 2007.

ROGERS, V. V.; WICKSTROM, M.; LIBER, K.; MACKINNON, M. D. Acute and subchronic mammalian toxicity of naphthenic acids from oil sands tailings. **Toxicological Sciences** **66(2)**:347-355. 2002.

<http://dx.doi.org/10.1093/toxsci/66.2.347>

SILVA, F. R.; SCHIAVETTI, A.; MALHADO, A. C. M.; FERREIRA, B.; SOUSA, C. V. P.; VIEIRA, F. P.; PINTO, F. R.; SOUZA, G. B. G.; OLAVO, G.; SANTOS, J. B. Q.; CAMPOS-SILVA, J. V.; JÚNIOR, J. G. C. O.; MESSIAS, L. T.; FILHO, M. L. V. B.; ACCIOLY, M. C.; FABRÉ, N. N.; ABDALLAH, P. R.; LOPES, P. F. M.; KIKUCHI, R. K. P.; CÂMARA, S. F.; BATISTA, V. S.; SOARES, M. O. Oil Spill and Socieconomic Vulnerability in Marine Protected Areas. **Frontiers – Frontiers in Marine Science**, **v9 – 859697**. Fortaleza, Brazil. 2022. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.85969>.

SILVA, M.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PENVEN, P.; LENTINI, C. A. D. Highresolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. *Ocean Modelling*, v. 30, n. 4, p. 256–269, 2009

SHORT, J. W., IRVINE, G. V., MANN, D. H., MASELKO, J. M., PELLA, J. J., LINDEBERG, RICE, S. D.. Slightly Weathered Exxon Valdez Oil Persists in Gulf of

Alaska Beach Sediments after 16 Years. *Environmental Science & Technology*, 41(4), 1245–1250. 2007. doi:10.1021/es0620033

SPEIGHT, J.G. *The Chemistry and Technology of Petroleum*, 5th Edition. **CRC Press/Taylor & Francis Group**, Boca Raton, FL. 2014.

STOUT, S. A.; WANG, Z. Chemical fingerprinting of spilled or discharged petroleum - methods and factors affecting petroleum fingerprints in the environment. *Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification*. S. A. Stout and Z. Wang. Boston, **Elsevier**: 1-53. 2007.

TANSEL, B. “Propagation of impacts after oil spills at sea: Categorization and quantification of local vs regional and immediate vs delayed impacts”. **Em: Int J Disaster Risk Reduct** 7, pp. 1–8. 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.11.001>

TANSEL, B.; LEE, M. “Removal of crude oil from highly contaminated natural surfaces with corexit dispersants”. *Em: Journal of Environmental Management* 247, pp. 363–370. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.091>.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. **Rio de Janeiro: Interciência/PETROBRÁS**, 2001.

UNITED STATES. **National standard petroleum oil tables**. Washington: U.S. Govt. Print. Off., 1936.

VAN TAMELEN, P. G.; M. S. STEKOLL.; L. DEYSHER. Recovery processes of the brown alga *Fucus gardneri* following the ‘Exxon Valdez’ oil spill: settlement and recruitment. **Marine Ecology Progress Series** 160:265-277. 1997. <http://dx.doi.org/10.3354/meps160265>

VELEDA, D.; ARAUJO, M.; SILVA, M.; MONTAGNE, R.; ARAÚJO, R.; Seasonal and interannual variability of the southern south Equatorial Current bifurcation and meridional transport along the eastern brazilian edge.. **Tropical Oceanography**. 2011. 39. 10.5914/tropocean.v39i1.5176.

YIM, U. H.; KIM, M.; HA, S. YONG.; KIM, S.; SHIM, W. J. Oil Spill Environmental Forensics: the Hebei Spirit Oil Spill Case. **Environmental Science & Technology**, 46, 6431-6437. Republic of Korea, 2012.

YIM, U.H.; HONG, S.; LEE, C.; KIM, M.; JUNG, J.H.; HA, S.Y.; YU, O.H. Rapid recovery of coastal environment and ecosystem to the Hebei Spirit oil spill's impact. **Environment International** 136, 105438. 2020.[https://doi.org/10.1016/j.%20envint.2019.105438](https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105438)

ZACHARIAS, D.C., GAMA, C.M., FORNARO, A., Mysterious oil spill on Brazilian coast: analysis and estimates, *Mar. Pollut. Bull.*, 165 (2021), Article 112125, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112125

ZAFIRAKOU, A. Oil Spill Dispersion Forecasting Models. In *Monitoring of Marine Pollution*, **IntechOpen**: 2018.