



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

SANTIAGO GONZALEZ BRAVO

**PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DO ÓLEO VIA MODELAGEM NUMÉRICA NOS
ECOSSISTEMAS PRAIA-ESTUÁRIO-RECIFE: LITORAL SUL DE
PERNAMBUCO/PE**

Recife

2024

SANTIAGO GONZALEZ BRAVO

**PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DO ÓLEO VIA MODELAGEM NUMÉRICA NOS
ECOSSISTEMAS PRAIA-ESTUÁRIO-RECIFE: LITORAL SUL DE
PERNAMBUCO/PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia
Abiótica.

Orientadora: Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

G643p

Gonzalez Bravo, Santiago.

Padrão de distribuição do óleo via modelagem numérica nos ecossistemas praia-estuário-Recife: litoral sul de Pernambuco/PE / Santiago Gonzalez Bravo – 2024.
110 f.: il., fig. e tab.

Orientadora: Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2024.
Inclui referências e Apêndices.

1. Oceanografia. 2. Dispersão de óleo. 3. Desastre ambiental 2019. 4. Modelagem numérica. 5. Delft3D. I. Costa, Mirella Borba Santos Ferreira (Orientadora). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-104

SANTIAGO GONZALEZ BRAVO

**PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DO ÓLEO VIA MODELAGEM NUMÉRICA NOS
ECOSSISTEMAS PRAIA-ESTUÁRIO-RECIFE: LITORAL SUL DE
PERNAMBUCO/PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Aprovada em: 27/03/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Mirella Borba Santos Ferreira Costa (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Roberto Lima Barcellos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo Siegle (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

RESUMO

O desastre ambiental ocorrido no litoral brasileiro entre agosto de 2019 e março de 2020, devido a um derramamento de óleo, foi o maior em extensão que o país já enfrentou. Este não foi o único aspecto singular do desastre, passados 4 anos não se sabe as características iniciais do vazamento, como tampouco os responsáveis. Diante disso, utilizando modelagem numérica, este trabalho investigou o padrão de dispersão do óleo, com especial atenção ao Complexo Industrial Portuário de Suape e seu entorno, em Pernambuco. Foram avaliadas as condições meteo-oceanográficas e sua influência na dinâmica do derramamento, aplicando simulações para prever as trajetórias de dispersão do óleo e seu impacto nos ecossistemas costeiros. Assim, foram considerados dois cenários que abrangessem o período com registros de óleo em 2019 feitos pelo IBAMA na área de estudo. Os cenários foram caracterizados por diferentes regimes de maré (quadratura e sizígia) e condições meteo-oceanográficas. Os resultados evidenciaram a variabilidade na dispersão do óleo nos diferentes cenários modelados e destacaram a importância das forças físicas, principalmente o vento, nesta variabilidade. Os ecossistemas costeiros mais impactados em área foram os recifes e os ambientes estuarinos, enquanto as praias e os recifes foram os mais afetados em termos de massa total de óleo sedimentado. Embora os modelos apresentem limitações e incertezas, a pesquisa sublinha sua importância crítica para o desenvolvimento de estratégias de resposta e preparação para desastres ambientais futuros, enfatizando a necessidade de planos de contingência robustos e a relevância da modelagem hidrodinâmica na gestão de crises ambientais.

Palavras-chave: dispersão de óleo; desastre ambiental 2019; modelagem numérica; Delft3D.

ABSTRACT

The environmental disaster that occurred off the coast of Brazil between August 2019 and March 2020, due to an oil spill, was the largest the country has ever faced. This was not the only unique aspect of the disaster: four years on, the initial characteristics of the spill are not known, nor are those responsible. Therefore, using numerical modeling, this study investigated the dispersion pattern of the oil, with special attention to the Suape Industrial Port Complex and its surroundings in Pernambuco. Meteo-oceanographic conditions and their influence on spill dynamics were assessed, applying simulations to predict oil dispersion trajectories and their impact on coastal ecosystems. Thus, two scenarios were considered covering the period with oil records in 2019 made by IBAMA in the study area. The scenarios were characterized by different tidal regimes (neap and spring) and meteo-oceanographic conditions. The results showed the variability in oil dispersion in the different modeled scenarios and highlighted the importance of physical forces, especially wind, in this variability. The coastal ecosystems most impacted in terms of area were reefs and estuarine environments, while beaches and reefs were the most affected in terms of total mass of sedimented oil. Although the models present limitations and uncertainties, the research underlines their critical importance for the development of response and preparedness strategies for future environmental disasters, emphasizing the need for robust contingency plans and the relevance of hydrodynamic modeling in environmental crisis management.

Keywords: oil spill; environmental disaster 2019; numerical modeling; Delft3D.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	12
2	METODOLOGIA.....	14
2.1	ÁREA DE ESTUDO.....	14
2.2	LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	17
2.2.1	Batimetria e linha de costa.....	17
2.2.2	Modelo atmosférico.....	19
2.2.3	Modelo de correntes.....	20
2.2.4	Modelo de marés.....	20
2.2.5	Dados meteoceanográficos (in situ).....	21
2.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	21
2.3.1	Configuração do modelo.....	23
2.3.1.1	Domínio espacial.....	23
2.3.1.2	Domínio temporal.....	26
2.3.1.3	Parâmetros do Delft3D FLOW.....	27
2.3.1.3.1	<i>Processos.....</i>	<i>27</i>
2.3.1.3.2	<i>Condições de contorno.....</i>	<i>28</i>
2.3.1.3.3	<i>Parâmetros físicos.....</i>	<i>29</i>
2.3.1.3.4	<i>Operações (descargas).....</i>	<i>29</i>
2.3.1.3.5	<i>Monitoramento.....</i>	<i>30</i>
2.3.1.4	Parâmetros do Delft3d PART.....	31
2.3.1.4.1	<i>Número de partículas e massa total.....</i>	<i>32</i>
2.3.1.4.2	<i>Densidade e viscosidade cinemática.....</i>	<i>33</i>
2.3.1.4.3	<i>Demais parâmetros do óleo.....</i>	<i>33</i>
2.3.1.4.4	<i>Derrame (releases).....</i>	<i>34</i>
2.3.1.4.5	<i>Parâmetros de processos - físicos.....</i>	<i>35</i>
2.3.1.4.6	<i>Monitoramento.....</i>	<i>36</i>
2.3.1.4.7	<i>Cenários do módulo PART.....</i>	<i>37</i>
2.3.2	Análise de sensibilidade e calibração do modelo.....	37
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.1	DADOS IN SITU.....	40

3.1.1	Dados atmosféricos.....	40
3.1.2	Altura da superfície do mar.....	44
3.1.3	Correntes.....	46
3.1.4	Ondas.....	51
3.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	54
3.2.1	Altura da superfície do mar.....	54
3.2.2	Correntes.....	57
3.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	61
3.3.1	Descrição de cenários (Delft3D FLOW).....	62
3.4	MODELAGEM DE DISPERSÃO DE ÓLEO.....	62
3.4.1	Cenário 1 – maré de quadratura.....	63
3.4.1.1	Dispersão de óleo em superfície.....	63
3.4.1.2	Intemperismo e sedimentação do óleo.....	68
3.4.1.2.1	Sedimentação.....	70
3.4.2	Cenário 1 – maré de sizígia.....	72
3.4.2.1	Dispersão de óleo em superfície.....	72
3.4.2.2	Intemperismo e sedimentação do óleo.....	79
3.4.2.2.1	Sedimentação.....	80
3.4.3	Análise de cenários modelados.....	82
3.4.4	Localidades afetadas em 2019.....	86
4	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A – <i>Script</i> (código) em python para adequação de dados do ERA5 para o input do Delft3D FLOW (.amp, .amu, .amv).....	103
	APÊNDICE B – <i>Script</i> (código) em python para adequação de dados do HYCOM GLBy0.08 para o input do Delft3D FLOW (.bct).....	107
	APÊNDICE C – Configurações de cenários do Delft3D FLOW e resultados estatísticos de sensibilidade (RMSE, MAW, Skill).....	110

1 INTRODUÇÃO

Os poluentes que chegam na zona costeira provêm de atividades humanas domésticas, comerciais e industriais, e trazem consigo substâncias, que podem ser biodegradáveis e serem decompostos pela ação de bactérias, ou quando persistentes, mantêm-se por longo tempo no sedimento, e podem bioacumular e, em alguns casos, sofrer biomagnificação ao longo da teia trófica (Moraes e Jordão, 2002). A contaminação por petróleo em regiões costeiras marinhas é considerada uma das mais importantes e impactantes devido à alta toxicidade de seus compostos, que podem ocasionar impactos ecológicos e socioeconômicos (Bícego *et al.*, 2008). Dentre os componentes do petróleo, os hidrocarbonetos são os principais constituintes, correspondendo a 95% de sua composição (UNEP, 1992; NRC, 2003).

O litoral brasileiro enfrentou uma das maiores crises de derramamento de óleo entre agosto de 2019 a março de 2020 afetando significativamente o meio ambiente, a economia e as comunidades locais. O desastre atingiu os estados do Maranhão, Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro, compreendendo a 3.000 quilômetros de costa afetada (Escobar, 2019; IBAMA, 2019; Magris e Giarrizzo, 2020; Soares *et al.*, 2020; Lourenço *et al.*, 2020; Câmara *et al.*, 2021).

O primeiro avistamento do óleo foi em agosto de 2019 no litoral da Paraíba, atingindo São João da Barra no Rio de Janeiro em dezembro do mesmo ano. A localidade mais ao norte com registros do óleo foi em Cururupu (MA) em dezembro de 2019 e registros do mesmo óleo foram feitos até junho de 2022 (Lourenço *et al.*, 2023). A quantidade estimada do derrame foi de 5.000 a 12.000 metros cúbicos de petróleo e a sua distribuição foi influenciada pelas Corrente do Brasil (CB) e Corrente Norte do Brasil (NCB) (Lourenço *et al.*, 2020; Zacharias *et al.*, 2021a). O volume de óleo estimado é próximo a outros derramamentos já ocorridos em águas brasileiras (Tabela 1; Zacharias e Fornaro, 2020).

Tabela 1 – Dados sobre os principais acidentes com derramamentos de óleo no Brasil entre 1960 e 2016, que possuem volumes derramados similares aos estimados para o crime ambiental ocorrido em 2019

Ano	Fonte	Local	Volume derramado (m3)
1974	Navio Takimyia Maru	Canal de São Sebastião, SP	7000
1974	Navio Esso Garden State	Terminal indefinido	5800
1975	Navio Tarik Ibn Ziyad	Baía de Guanabara, RJ	7000-18000
1978	Marina brasileira	Canal de São Sebastião, SP	6000-40000
2000	Óleoduto	Rio Barigüi, PR	4000
2004	Navio Vicuña	Baía de Paranaguá, PR	6500

Fonte: adaptado de Zacharias e Fornaro, 2020.

A composição do petróleo diferiu dos óleos típicos brasileiros, com isso técnicas forenses identificaram biomarcadores venezuelanos presentes (Morrison, 2000; Dahlmann e Kienhuis, 2015; Simecek-Beatty e Lehr, 2016; Beegle-Krause, 2018; Soares *et al.*, 2020; Lourenço *et al.*, 2020; de Oliveira *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021). As propriedades do óleo apesar de semelhantes às de *tar balls*, com densidade maior do que a água do mar, sofreram minimamente processos de intemperismo como evaporação, dissolução e biodegradação (Lourenço *et al.*, 2020). Devido à alta densidade, o óleo não foi detectado e monitorado por satélites (Zacharias *et al.*, 2021b; Soares *et al.*, 2021). Lessa *et al.* (2021) estima que o óleo se deslocou a profundidades superiores a 17 metros.

A origem do derramamento permanece desconhecida até o presente momento, apesar das investigações utilizando modelagem reversa no tempo e abordagens probabilísticas de Monte Carlo. Os estudos por Zacharias *et al.* (2021b), Nobre *et al.* (2022), Freitas Tessarolo *et al.* (2023) e Sbragio *et al.* (2023) consideram a possibilidade de um derrame contínuo por rotas de navegação offshore NO-SE, além de considerar também derrames pontuais (Zacharias *et al.*, 2021b; Sbragio *et al.*,

2023). A área provável do derrame se estende desde 8,5° a 15°S e 28° a 32°W, considerando os estudos supracitados.

Esse desastre ameaçou habitats e ecossistemas marinhos importantes como recifes de corais, prados de fanerógamas marinhas, estuários e manguezais impactando diretamente a teia trófica (Magris e Giarrizzo, 2020; Gusmão *et al.*, 2021; Craveiro *et al.*, 2021; Lira *et al.*, 2021; Magalhães *et al.*, 2021; Campelo *et al.*, 2021). Além disso, os efeitos socioeconômicos foram significativos, incluindo perdas na pesca e a diminuição do turismo, levaram ao aumento da vulnerabilidade social nas comunidades costeiras que combinado com a pandemia do COVID-19, exacerbou a situação (Araújo *et al.*, 2020).

O litoral sul de Pernambuco foi uma das áreas mais afetadas entre os estados nordestinos. Extensas manchas foram observadas em ecossistemas altamente sensíveis, como recifes, estuários e praias. De acordo com informações existentes nas Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo (SAO), cerca de 80% da linha de costa do estado é ocupada por ecossistemas altamente sensíveis e de alta prioridade de ação, entre os quais, os manguezais (ISL 10) e os recifes de coral (ISL 9) (Mallmann *et al.*, 2011). Os ecossistemas supracitados apresentam processos costeiros específicos e comumente se encontram interconectados, fazendo com que o impacto sofrido em um deles possa exercer efeito sobre os demais.

Essas variações nos processos costeiros dos ecossistemas, afetam também o transporte e distribuição de óleo próximo à costa. No litoral de Pernambuco, onde o sistema praia-estuário-recife repete-se ao longo da costa, observou-se que a chegada e deposição do óleo não ocorreu de forma homogênea (JC Online, 2019; Nascimento, 2019). Grande parte do óleo penetrou pelos estuários enquanto algumas praias adjacentes receberam apenas pequenos fragmentos de óleo (Morais K. 2019). Foi ainda observado durante uma expedição para mapeamento do óleo submerso (Doretto e Laterman, 2019), que parte do óleo foi depositado na zona protegida dos ecossistemas recifais, indicando possíveis danos crônicos a esses ambientes.

Derrames como o de Exxon Valdez e Deepwater Horizon mostram que os resíduos do óleo podem persistir afetando o ambiente por décadas (Lindeberg *et al.* 2018; Bociu *et al.* 2019). Com isso, embora as operações de limpeza, auxiliadas por voluntários da sociedade civil, tenham desempenhado papel importante na rápida recuperação dos ecossistemas atingidos, os resíduos em áreas rochosas, como na praia de Itapuama (Cabo de Santo Agostinho-PE), podem persistir por mais tempo

(Bontempo-Filho *et al.* 2022), ressaltando a importância de monitoramento contínuo e levantamento de possíveis áreas afetadas. Através do estudo dos processos costeiros é possível entender tais padrões de circulação, conectividade hidrodinâmica e inferir sobre distribuição e deposição de óleo entre os ecossistemas.

Condições meteo-oceanográficas influenciam significativamente na dinâmica do derramamento de óleo, principalmente devido às trajetórias do óleo que tendem a seguir as direções das correntes (Freitas Tessarolo, 2017; Barreto, 2019). Vários modelos determinísticos e probabilísticos já foram usados para estudar trajetórias de diferentes derramamentos de óleo no mundo e seus processos de intemperismo, incluindo OSCAR, OILMAP, TAMOC, BLOSSOM, MOHID, POSEIDON, GNOME, OILTRANS, OSERIT, MEDSLIK-II, OpenOil e Delft3D PART (Reed *et al.*, 1995; Aamo *et al.*, 1996; Pollani *et al.*, 2001; Leitão *et al.*, 2005; Zelenke *et al.*, 2012; Berry *et al.*, 2012; Legrand e Duliere, 2012; de Dominicis *et al.*, 2013a; de Dominicis *et al.*, 2013b; Fernandes *et al.*, 2013; Fingas, 2016; Gros *et al.*, 2016; Freitas Tessarolo, 2017; Spaulding, 2017; Gros *et al.*, 2017; Röhrs *et al.*, 2018; Dagestad *et al.*, 2018; Barreto, 2019; Prasad *et al.*, 2020; Murray *et al.*, 2020; Keramea *et al.*, 2021; Franz *et al.*, 2021). Esses modelos combinam o conhecimento de vários processos para descrever os movimentos de campo próximo e de campo distante, a degradação do óleo e as interações ambientais com a costa. O destino e os efeitos de um derramamento específico são determinados com base nos processos físicos e nas condições climáticas, razão pela qual a maioria dos modelos simulam processos que incluem advecção, espalhamento, evaporação, dissolução, emulsificação, dispersão e afundamento (Fingas, 2016).

Nesse sentido, a modelagem numérica incorpora importantes parâmetros que afetam o comportamento do óleo na zona costeira, portanto o modelo Delft3D, especificamente o módulo de rastreamento de partículas (PART) foi empregado no presente estudo. O módulo PART é amplamente aplicado não apenas na dispersão de óleo, mas também na simulação do transporte de sedimentos, dispersão de larvas de organismos e outros poluentes solúveis e insolúveis na água do mar. Sua flexibilidade e integração com o módulo FLOW no Delft3D tornam o PART uma ferramenta eficiente para estudos sobre a dinâmica de substâncias no ambiente aquático e para auxiliar na tomada de decisões baseada em evidências científicas (DELTARES, 2023a).

A área escolhida para avaliação da dispersão de óleo foi a zona do Complexo Industrial Portuário de Suape e seu entorno, situado no litoral sul do estado de Pernambuco. Conforme apresentado por Lira (1987), os mecanismos que regem o sistema de circulação marinha ao longo do litoral pernambucano são influenciados primordialmente pela orientação e pela força dos ventos, estando estes últimos intrinsecamente ligados à dinâmica latitudinal do Centro de Alta Pressão do Atlântico Sul. Observa-se que ventos provenientes do Sudeste, caracterizados por sua maior intensidade e frequência, induzem a formação de correntes costeiras que se deslocam de sul para norte. Em contrapartida, a incidência de ventos do setor Nordeste, de natureza mais branda e esporádica, promove uma inversão no curso das correntes, direcionando-as para o Sul.

A pesquisa conduzida por Lira *et al.* (2010) revelou que a área de estudo demonstra um padrão sazonal na predominância das direções das correntes marítimas, estando este fenômeno diretamente atrelado ao regime de ventos que prevalece localmente, o que sublinha a estreita relação entre o regime de ventos e a orientação das correntes marítimas. No entanto, devido às particularidades do sistema costeiro que circunda a área de estudo, ainda é necessário entender melhor como a dispersão do óleo pode ter se comportado neste sistema, que tem sido submetido a atividades humanas que afetam a sua geomorfologia e hidrodinâmica desde a década de 1980 (Neumann *et al.*, 1998; Muniz *et al.*, 2005; Araújo *et al.*, 2007; Pessoa *et al.*, 2009; Paiva e Araújo, 2010).

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECIFICOS

O presente projeto tem como objetivo geral o entendimento no padrão de distribuição do óleo nos ecossistemas praia-estuário-recife da zona do Complexo Industrial Portuário de Suape e seu entorno, situado no litoral sul do estado de Pernambuco (município de Ipojuca). Pretende-se contribuir para a compreensão do padrão heterogêneo de deposição de óleo observado nos diferentes ecossistemas. Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- a) investigar as condições oceanográficas durante o período de dispersão do óleo;

- b) avaliar o padrão de distribuição do óleo indicando as áreas preferenciais de deposição entre os ecossistemas praia-estuário-recife.

2 METODOLOGIA

A estratégia metodológica consistiu em investigar o padrão de dispersão de óleo entre cada tipo de ecossistema (praia-estuário-recife) presente na área de estudo através de modelagem numérica hidrodinâmica. Para tal, a metodologia envolveu a descrição da área de estudo (2.1), obtenção e análise de dados disponíveis (2.2), coletados *in situ* e fornecidos por modelos globais, configuração de modelos numéricos e análise de sensibilidade dos resultados obtidos (2.3).

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Situado no litoral sul de Pernambuco, a 40 km da capital do Estado, o Complexo Industrial e Portuário de Suape possui uma área de 13.500 ha (Cordeiro *et al.* 2018). Pertencente à cidade de Ipojuca, está situado na fronteira deste município com o de Cabo de Santo Agostinho. O local é cercado por diversos ecossistemas, como manguezais, costões arenosos, recifes de arenito e planícies de algas. A instalação do porto levou a perda de mais de 600 ha de florestas de mangue que somada às mudanças antropogênicas têm causado maior intrusão marinha e diminuição da produtividade do ecossistema (Neumann *et al.*, 1998; Cordeiro, 2018).

As condições climáticas ao longo da costa pernambucana são identificadas segundo classificação Koppen como do tipo As', ou seja, tropical quente e úmido, marcadas por dois padrões de precipitação anual, sendo a estação seca e a estação chuvosa (Chagas, 2003). A média anual de precipitação é de 2,272 mm com temperatura em torno de 25,6 °C, umidade relativa de 90% e taxa de evapotranspiração de 1.500 mm/ano (Aragão, 2000; Ramos *et al.*, 2009; SRH-PE, 2010; Torres & Machado, 2011). O ápice da estação chuvosa ocorre entre março e julho, mostrando uma variabilidade significativa influenciada pelos eventos do El Niño e Oscilação Sul (Andreoli e Kayano, 2007; Oliveira *et al.*, 2011).

A área apresenta marés semi-diurnas, classificadas como mesomarés de amplitude entre 1,5 e 3,0 metros (Suape, 2015) com as correntes de plataforma mudando a direção de sul no verão para norte no inverno (Lira *et al.*, 2010). Conforme analisado por Cintrão Barros (2009), as características das ondas variam sazonalmente. Durante o outono e a primavera, predominam alturas próximas a 1 m; no verão, estas alturas variam entre 0,85 e 1 m; e no inverno, as ondas atingem os

picos do ano, com cerca de 1,25 m. A altura média significativa das ondas na região mencionada é de aproximadamente 1,11 m ao longo do ano. Quanto à periodicidade das ondas, esta é de cerca de 6,5 segundos durante o outono, inverno e primavera, e reduz para 5,0 segundos no verão, com um período médio de aproximadamente 6,28 segundos. A velocidade das correntes na entrada do Porto de Suape, segundo análise de medições realizadas entre 2016 e 2017, apresenta uma média de 0,0670 m/s, observando-se um aumento gradual dessas médias mensais de outubro de 2016 a fevereiro de 2017. Os registros máximos de velocidade ocorreram durante agosto e setembro, enquanto os mínimos ocorreram em outubro e novembro de 2016, com velocidades de 0,3505 e 0,4004 m/s para os máximos, e de 0,0121 e 0,0112 m/s para os mínimos (Sales, 2017).

O perfil hidrográfico da região inclui duas categorias primárias de rios: os rios costeiros, que agrega os rios Massangana, Tatuoca e Merepe pertencentes às Pequenas Bacias Hidrográficas Costeiras; e o rio Ipojuca, considerado translitoral. Estes rios apresentam características distintas. Os rios costeiros são pequenos, perenes e fortemente influenciados pelas forças das marés, em contraste com o rio Ipojuca que tem uma área de captação de cerca de 3.433 km² e uma descarga média de aproximadamente 17 m³/s. O rio Ipojuca nasce na região do Agreste de Pernambuco, tornando-se perene à medida que avança para a zona costeira (Koenig *et al.*, 2002). O rio Merepe, com cerca de 18 km de extensão, funde-se com o rio Ipojuca ao sul do Porto de Suape, enquanto o rio Tatuoca, com cerca de 6 km da nascente à foz, é caracterizado por um canal estreito e raso (1-3 metros aproximadamente) com fluxo mínimo (Gouveia, 2010). O rio Massangana, que marca a divisa entre o Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca, é parte integrante de uma complexa rede estuarina e de canais (CPRH, 2001), e possui profundidades entre 2 e 4 metros (Cintrão Barros, 2009). Silva (2019) descreveu as componentes horizontais de velocidade do fluxo deste rio após análise de dados medidos no dia 25 de novembro de 2014 obtidos via ADCP fundeado próximo a desembocadura do rio Massangana. A autora constatou que durante a vazante o fluxo residual da componente u é de aproximadamente 0,21 m/s e da componente v de 0,09 m/s, enquanto durante a enchente é de cerca de 0,11 m/s para a componente u e de 0,04 m/s para a componente v. Anteriormente à instalação do complexo portuário, a Baía de Suape servia como ponto de convergência destes quatro rios (Massangana,

Tatuoca, Ipojuca e Merepe) formando um estuário considerado parcialmente isolado do oceano devido a presença dos recifes de arenitos na foz.

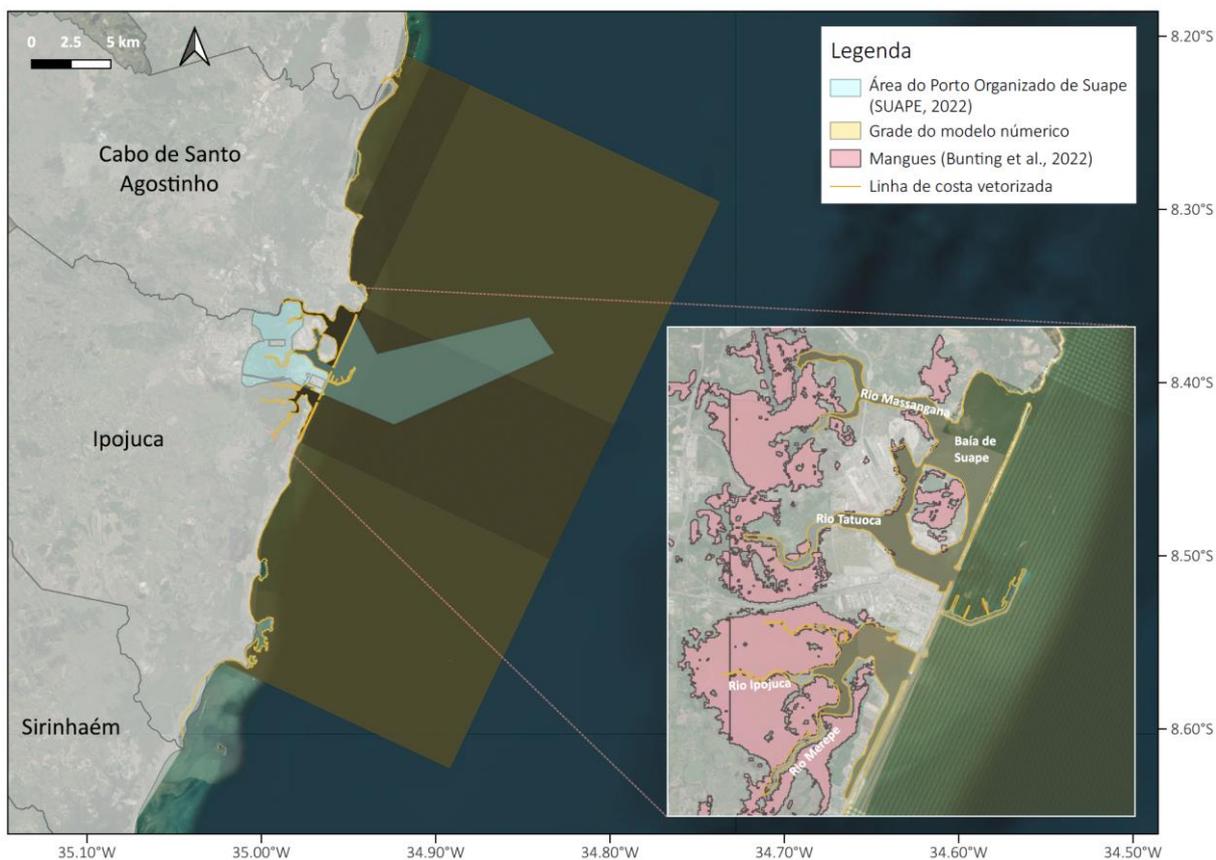
O desenvolvimento do porto levou à segmentação do estuário em três seções distintas: o estuário da Baía de Suape/Rio Massangana; o estuário do Rio Tatuoca (canal interno do porto); e o estuário do Rio Ipojuca/Merepe. Atualmente, o estuário apresenta duas desembocaduras artificiais criadas pela detonação da linha externa de recifes, que protegia naturalmente o ecossistema estuarino (Barcellos & Santos, 2018). A construção de molhes, quebra-mares e o aterro do porto, obstruíram a drenagem natural dos rios Ipojuca e Merepe para o mar, levando a inundações significativas nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, principalmente entre 1979 e 1983 (CONDEPE, 1983). A solução implementada pelas autoridades para o impasse da inundação envolveu a quebra parcial do recife de arenito criando uma abertura próxima à foz do rio Ipojuca. Isso resultou no atraso da dinâmica da maré de mais de duas horas em relação aos ciclos usuais de seis horas, diminuindo assim a velocidade do fluxo do rio na foz, causando sedimentação, reduzindo a circulação e a profundidade da água e transformando a foz do rio em uma laguna costeira, que registrou um aumento na evaporação e nos níveis de salinidade. Essa modificação levou a uma alteração substancial nos ritmos naturais das marés e exigiu operações de dragagem (Muniz *et al.*, 2005; Paiva e Araújo, 2010).

Lins (2018) ao analisar a penetração da maré salina no rio Ipojuca, em períodos de chuva e de estiagem do ano de 2017, observou uma variação de 2,0 a 5,7 km de alcance da maré acima de sua foz. Este fenômeno foi bastante influenciado pelo padrão de chuvas na região e pela configuração estreita da desembocadura do rio. Além disso, a salinidade do sistema exibiu uma acentuada variação sazonal, com níveis reduzidos durante períodos de chuva intensa e salinidades mais altas, similares às das águas costeiras, durante secas prolongadas. Ainda, a autora classificou o estuário do rio Ipojuca como subtipo 1b de acordo com a classificação de Hansen e Rattray (1966), sugerindo que suas águas tendem a uma estratificação de moderada a intensa, e que a advecção causada pela maré é o principal mecanismo de penetração salina.

Tanto a região do baixo estuário do rio Ipojuca como a Baía de Suape e os rios costeiros que a formam apresentam profundidades rasas. O primeiro na região onde se forma a laguna costeira a profundidade média é de 0,5 m (Lins, 2018), apresentando um canal central mais profundo e bancos de areia emersos. Já na Baía

de Suape a profundidade predominante é de 1 m, com exceção da região nas proximidades do canal de navegação do Porto, onde as profundidades médias são de 16 m.

Figura 1 – Mapa de área de estudo com apresentação de componentes relevantes para o presente projeto, como zonas de ocorrência de mangues, recifes, Unidades de Conservação, e *zoom in* no entorno da área do Porto Organizado de Suape



Fonte: O Autor, 2024

2.2 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

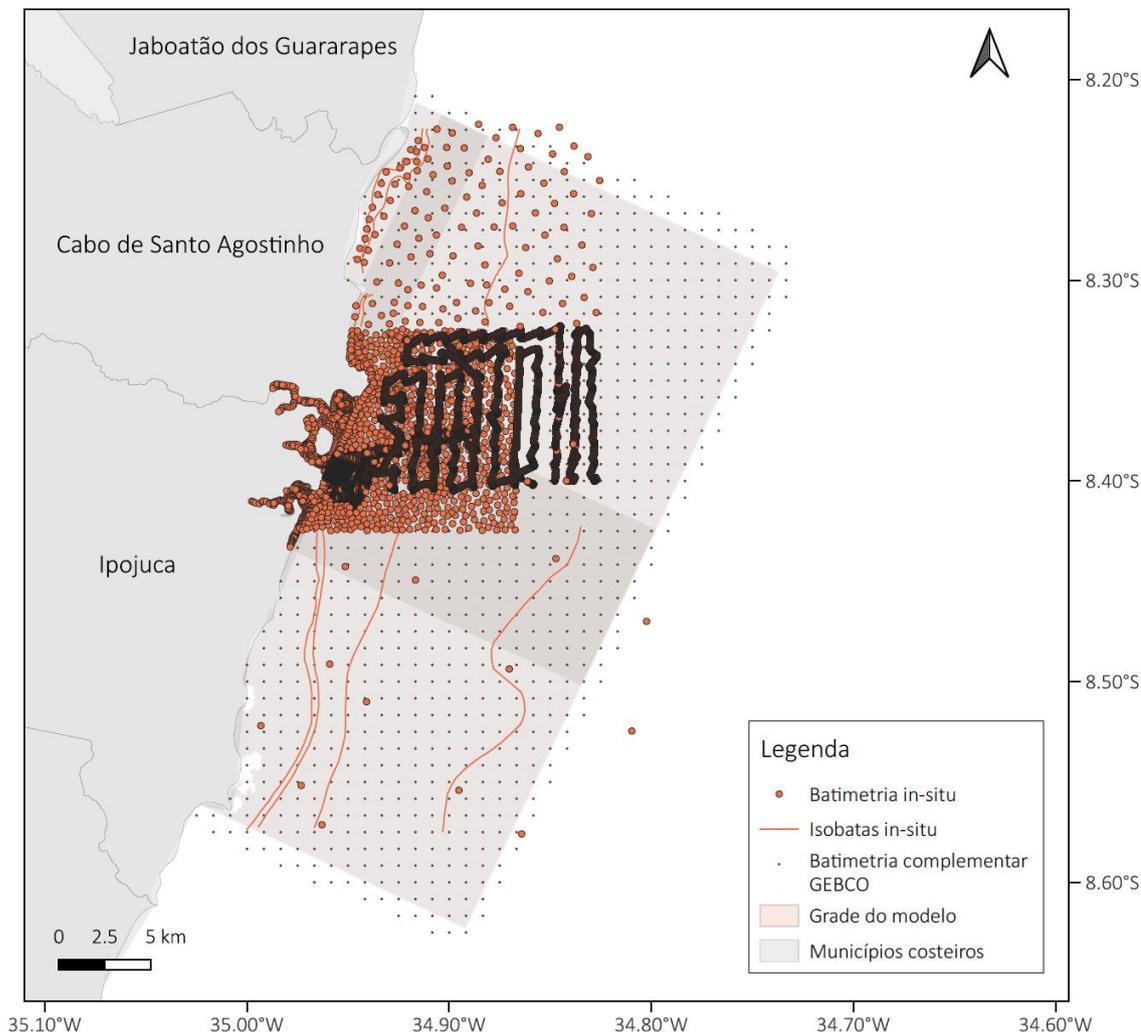
2.2.1 BATIMETRIA E LINHA DE COSTA

O contorno da linha de costa, dos recifes, ilhas e estrutura portuária foram obtidos a partir da vetorização de imagens de satélite utilizando como referência visual e geográfica, imagens de satélite proporcionadas pela Maxar Technologies, amplamente disponibilizadas sob o nome de “*World Imagery*” pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). A imagem selecionada possui resolução

de 0,6 m e foi produzida no dia 29 de agosto de 2021. Foi utilizado o QGIS para a vetorização, o qual é um programa de código aberto que permite trabalhar informações espaciais em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), onde através de técnicas de geoprocessamento, permite visualizar, tratar, editar e analisar dados geoespaciais.

Para representar a batimetria atual do sistema foram utilizados dados de múltiplas fontes de levantamentos batimétricos, compostos por levantamentos hidrográficos realizados pelo Porto de Suape entre os anos de 2015 e 2021, por levantamento realizado em 2023 por projeto conjunto entre o Porto e a UFPE (Projeto GEOMAR), por extração de dados batimétricos da região da Baía de Suape e estuário do Ipojuca dos trabalhos de Cintrão (2009) e Lins (2018) respectivamente, por cartas náuticas disponíveis para a região (#906, #930, #22200) e finalmente complementado por dados da GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), especificamente a grade GEBCO_08 de 30" de resolução. Todos os registros foram devidamente ajustados ao NR da DHN. A seguir são apresentados todos os dados batimétricos utilizados.

Figura 2 – Apresentação de dados batimétricos utilizados para a geração de batimetria interpolada em domínio do modelo hidrodinâmico e de dispersão de partículas utilizado no presente projeto



Fonte: O Autor, 2024

2.2.2 MODELO ATMOSFÉRICO

Os dados atmosféricos utilizados foram extraídos do ERA5, o qual é a quinta geração da reanálise atmosférica do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), que fornece um conjunto de dados abrangente e consistente do clima e do tempo globais das últimas oito décadas, a partir de 1940. É um produto de reanálise que combina dados de modelos com observações mundiais. Esse processo baseia-se no método usado pelos centros de previsão numérica do tempo, em que, a cada tantas horas, uma previsão anterior é combinada com observações recém-disponíveis de forma otimizada para produzir uma nova estimativa do estado

da atmosfera, chamada análise, a partir da qual é emitida uma previsão atualizada e aprimorada. A reanálise funciona da mesma forma, mas com resolução reduzida para permitir o fornecimento de um conjunto de dados que abrange várias décadas. Os dados foram reclassificados em uma grade espacial regular de $0,25^\circ$ para a reanálise (Hersbach *et al.*, 2020). A resolução temporal do modelo é horária.

Os parâmetros utilizados foram a pressão superficial (Pa) e as componentes leste e norte do vento a 10 m (m/s), ou seja, as velocidades horizontais do ar que se move em direção leste e norte, a uma altura de dez metros acima da superfície da Terra, em metros por segundo.

2.2.3 MODELO DE CORRENTES

Para a representação das correntes no domínio do modelo foram utilizados dados do *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), o qual é um modelo oceânico global de alta resolução que oferece um conjunto de dados valioso para pesquisas oceanográficas. O HYCOM possui uma resolução espacial de 0.08° , abrangendo grande parte do oceano global de 80°S a 90°N . Sua resolução temporal é horária, com dados disponíveis a partir de julho de 2014. Os dados utilizados são de simulações *hindcast* realizadas no experimento *expt_93.0*, utilizando o conjunto de dados *GLBy0.08* (Chassignet *et al.*, 2007).

Os dados de corrente utilizados foram: as componentes horizontais de velocidade barotrópica (u e v) em metros por segundo.

2.2.4 MODELO DE MARÉS

Para a representação dos fenômenos de maré na área de estudo foi utilizado o modelo TPXO o qual representa um conjunto abrangente de modelos globais de marés oceânicas. Esses modelos são elaborados para minimizar os erros por meio de um processo de ajuste de mínimos quadrados que envolve as equações de maré de Laplace e dados de altimetria. O desenvolvimento de todos os modelos TPXO se baseia na utilização do software OTIS, que implementa as metodologias descritas em detalhe por Egbert *et al.* (1994), e aprimoradas por Egbert e Erofeeva (2002).

As componentes astronômicas de maré utilizadas foram: oito primárias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), duas de longo período (Mf, Mm) e três não lineares (M4, MS4, MN4).

2.2.5 DADOS METEOCEANOGRÁFICOS (IN SITU)

Os dados coletados e utilizados para a calibração do modelo hidrodinâmico foram concedidos pelo Porto de Suape, e fazem parte do Monitoramento Meteoceanográfico, em tempo real SISMO SUAPE. Este sistema de informações teve início em agosto de 2016 e conta com duas estações, a primeira com medição de parâmetros de correntes, marés e ventos, e a segunda com medição de parâmetros de ondas. Para realizar essa tarefa, foram implantados um perfilador de correntes fundeado a 17 m de profundidade – ADCP (*Acoustic Döppler Current Profiler*) – um anemômetro e um marégrafo na divisa entre o Porto interno e externo e fundeado um ondógrafo na região do Porto externo (Figura 6). Estes dispositivos operam de forma contínua, e seus dados são disponibilizados virtualmente em tempo real. No entanto, os dados concedidos pelo Porto de Suape possuem resolução temporal de 10 minutos. A seguir são apresentados os equipamentos que estavam em funcionamento no ano de 2019.

Tabela 2 – descrição técnica dos instrumentos instalados para o Monitoramento Meteoceanográfico do Porto de Suape

Instrumento	Fabricante	Modelo
Anemômetro	RM Young	05103
Marégrafo	WaterLOG	NILE502
ADCP vertical	SonTek	Argonaut-XR .750

Fonte: Sales, 2017.

2.3 MODELAGEM NUMÉRICA

O Delft3D é um software de modelagem hidrodinâmica altamente integrado e versátil, desenvolvido pela Deltares, um instituto de pesquisa independente baseado na Holanda. Este software é projetado para realizar simulações numéricas de processos naturais em corpos de água superficial, tais como rios, lagos, estuários, e zonas costeiras. O Delft3D é amplamente utilizado por engenheiros, geólogos, oceanógrafos e pesquisadores para estudar a dinâmica da água, transporte de sedimentos, morfologia e qualidade da água, entre outros processos físicos, químicos e biológicos.

O potencial do Delft3D reside em sua capacidade de integrar diferentes aspectos do ambiente aquático em um único modelo. Isso permite aos usuários entender melhor as interações complexas entre diferentes processos e, conseqüentemente, fazer previsões mais precisas sobre mudanças ambientais ou o impacto de intervenções humanas em corpos de água.

Sua *suite* é composta pelos módulos FLOW, WAVE, PART e WAQ. No presente projeto foram utilizados os módulos FLOW e PART. O primeiro trata-se do principal módulo do Delft3D, responsável por simular fluxos hidrodinâmicos e transporte de massa em corpos de água. Utiliza uma abordagem baseada em malhas flexíveis ou regulares e resolve as equações de águas rasas, bem como as equações de transporte em 3D (DELTARES, 2023a). As equações principais resolvidas pelo módulo FLOW incluem a equação de continuidade, para a conservação da massa, e as equações de momento, para a conservação do momento linear. Essas equações são complementadas por equações constitutivas para a turbulência, transporte de sedimentos, e trocas térmicas e químicas, permitindo uma modelagem detalhada de processos complexos como formação de ondas, interações onda-corrente, e trocas de calor e massa com a atmosfera e o fundo (DELTARES, 2023a).

O módulo PART do Delft3D é especializado na simulação da dispersão de partículas e substâncias no ambiente aquático, incluindo a modelagem da dispersão de óleo. Este módulo utiliza uma abordagem Lagrangiana, na qual as trajetórias das partículas são rastreadas individualmente através do campo de fluxo simulado pelo módulo FLOW. Presume-se que os processos sejam determinísticos, exceto por um deslocamento aleatório da partícula em cada etapa de tempo. Isso significa que, embora os movimentos gerais das partículas sejam determinados por regras definidas (como correntes e outras forças físicas), há também um elemento de aleatoriedade. Este elemento aleatório é introduzido na forma de um "deslocamento aleatório" em cada passo de tempo, representando fatores imprevisíveis ou complexos demais para serem modelados exatamente. A base teórica deste módulo envolve a solução de equações diferenciais que descrevem o movimento das partículas sob a influência de processos de advecção, difusão, decaimento, e transformações físico-químicas (DELTARES, 2023b).

A modelagem da dispersão de óleo com o módulo PART envolve considerações específicas sobre as propriedades do óleo, como a densidade, viscosidade, e taxa de evaporação, bem como interações com o sedimento. O módulo

permite simular o transporte horizontal e vertical do óleo incluindo processos advectivos e de mistura turbulenta. Além disso, considera efeitos de degradação do óleo pela ação de processos físicos e químicos como: espalhamento (difusão), entranhamento, dispersão, emulsificação, evaporação e sedimentação. Este tipo de modelagem é crucial para planejar respostas a derramamentos de óleo, avaliar o impacto ambiental de atividades petrolíferas e desenvolver estratégias de mitigação (DELTARES, 2023b).

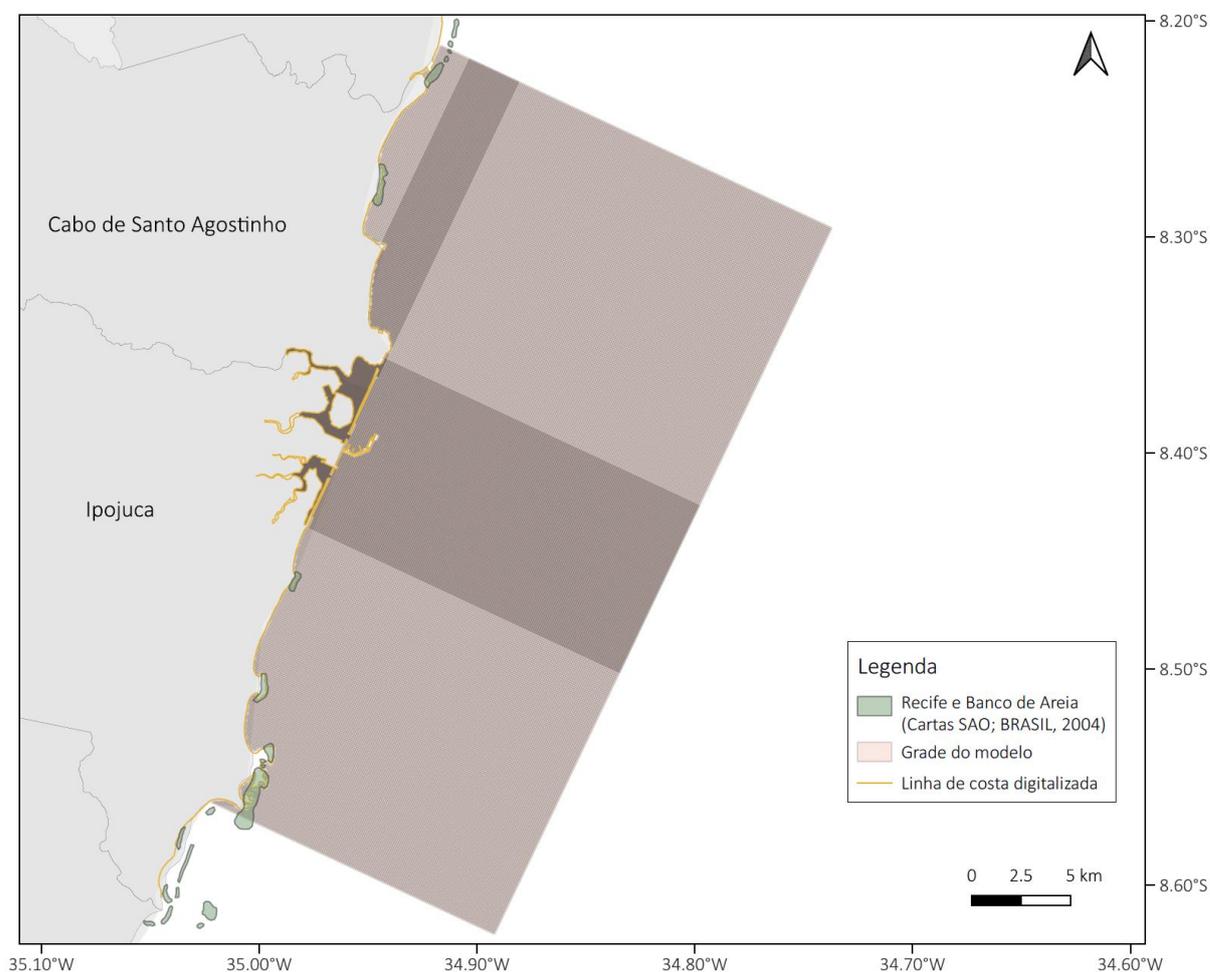
2.3.1 CONFIGURAÇÃO DO MODELO

2.3.1.1 DOMÍNIO ESPACIAL

No Delft3D, as direções N e M são usadas para descrever as dimensões da grade numérica. A direção N refere-se à dimensão longitudinal da grade, já a direção M refere-se à dimensão latitudinal da grade. A grade foi feita no sistema de coordenadas cartesianas, e possui 592 pontos de grade na direção M, medindo 40 km do limite norte ao sul aproximadamente, e 320 pontos de grade na direção N, medindo cerca de 18 km do limite leste até o limite terrestre mais próximo. É uma grade regular, sua ortogonalidade é, em geral, igual a 0, com valor máximo de 0,015 em apenas dois pontos de célula da grade. Foram feitos refinamentos na resolução da grade na região portuária e estuarina. As células da grade refinadas que se encontram localizadas na região oceânica até a entrada do porto medem 33 m na direção M e 100 m na direção N, resultando em uma razão de aspecto igual a 3. As células da grade localizadas na região oceânica que não foram refinadas medem 100 m em ambos os lados (M e N), resultando em uma razão de aspecto igual a 1. Finalmente, as células da grade localizadas dentro da Baía de Suape e das regiões estuarinas medem 33 m em ambos os lados, resultando em uma razão de aspecto de 1, e possuindo a melhor resolução horizontal do domínio. A grade foi elaborada com base no contorno da linha de costa utilizando o módulo de pré-processamento RGFGGRID do Delft3D.

Figura 3 – Grade numérica adotada para as simulações hidrodinâmicas e de dispersão de óleo.

Trechos mais escuros representam maior resolução/refinamento da grade numérica. Linha em amarelo é relativa à vetorização da linha de costa utilizando como base imagem de satélite da Maxar Technologies. A vetorização considerou áreas com ocorrência de recifes ou banco de areias emersos visíveis em imagem de satélite

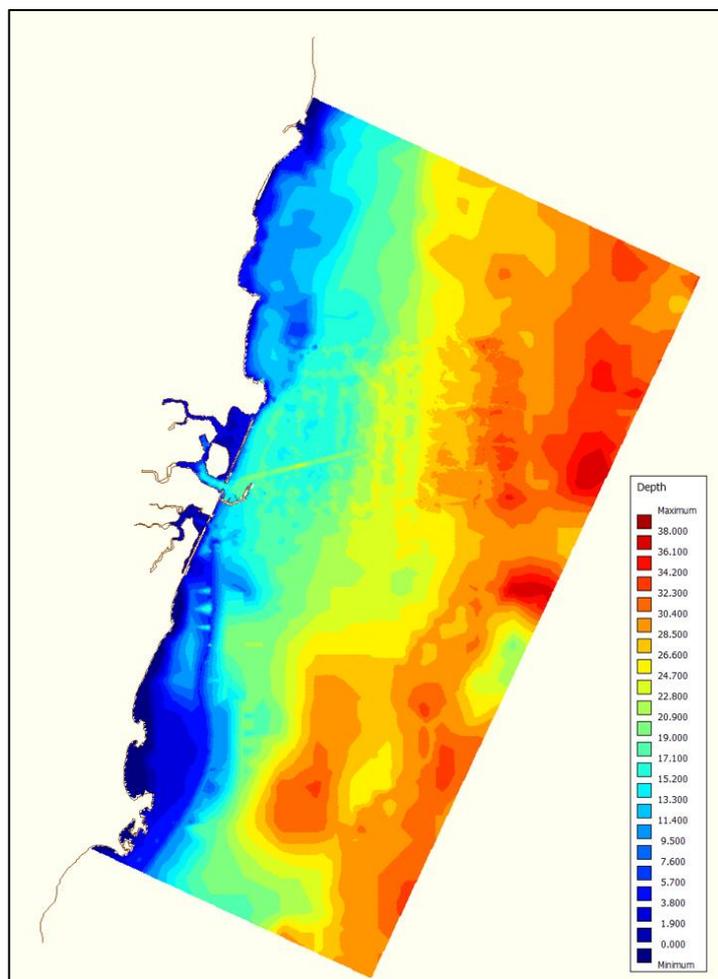


Fonte: O Autor, 2024

O domínio do modelo é limitado ao norte pelo município de Jaboatão dos Guararapes, mais especificamente na região da Barra da Jangadas, e limitado ao sul pelo município de Ipojuca na praia de Serrambi. A grade do modelo inclui seções do estuário do Rio Ipojuca e a Baía de Suape, juntamente com o Porto de Suape. O limite oceânico do domínio do modelo é localizado a aproximadamente 38 m de profundidade e uma distância média de 18 km do litoral.

Os dados de batimetria foram interpolados para os pontos da grade através do módulo de pré-processamento QUICKIN do Delft3D, pelo método da triangulação linear. A figura a seguir apresenta o resultado da interpolação realizada.

Figura 4 – Mapa com contornos batimétricos após interpolação por triangulação linear dos dados de profundidade disponíveis para a área de estudo



Fonte: O Autor, 2024

O modelo foi implementado no modo bidimensional (2D), assumindo condições barotrópicas, apesar do estuário do rio Ipojuca haver sido categorizado como moderadamente estratificado por Lins (2018). Esta decisão foi baseada em função do tempo de desenvolvimento e execução do modelo, que para modos tridimensionais (3D) é mais prolongado. Ainda, na área de estudo, vale destacar que a Baía de Suape é caracterizada por um padrão consistente de circulação homogênea, acompanhado por uma intrusão pronunciada de águas marinhas, conforme delineado por Cordeiro *et al.* (2018). Essa caracterização é ainda apoiada pelas observações de Zanardi-Lamardo *et al.* (2018) que demonstram um perfil vertical homogêneo dentro da Baía, especificamente durante a estação seca.

2.3.1.2 DOMÍNIO TEMPORAL

Para a definição do domínio temporal do modelo foram consultados os registros de observação de óleo provenientes do derrame de 2019, na área de estudo (IBAMA, 2019). Após a consulta foi definido que os registros de óleo realizados no dia 02 de setembro de 2019 em diferentes localidades da área de estudo serviriam de base para comparação qualitativa com os resultados do modelo. Além disso, optou-se por iniciar o processo a partir do repouso, o que significa que os cálculos foram principiados com condições iniciais estabelecidas como zero em toda a extensão do modelo. Portanto, com o objetivo de atingir um estado de equilíbrio hidrodinâmico e minimizar eventuais perturbações decorrentes de condições iniciais desconhecidas, foi necessário incorporar um período de ajuste gradual (*spin-up*), como recomendado no manual do usuário de Delft3D FLOW (DELTARES, 2023a). Ainda, como os resultados do módulo FLOW foram aplicados posteriormente para a dispersão de óleo no módulo PART, além da consideração do aquecimento do modelo hidrodinâmico também foi levado em conta o período necessário para a dispersão e transporte das partículas de óleo, portanto como medida conservadora o domínio temporal do modelo hidrodinâmico foi iniciado no dia 02 de agosto e finalizado no dia 07 de setembro de 2019. Isto permitiu que diversos cenários de calibração no módulo PART pudessem ser feitos com o modelo hidrodinâmico já em equilíbrio, a partir do dia 09 de agosto aproximadamente.

Os cenários finais no módulo PART foram executados nos seguintes intervalos de tempo: de 23/08 à 01 am a 30/08 à 01 am; de 30/08 à 01 am a 07/09 à 01 am. Estes intervalos foram definidos considerando os períodos de maré de quadratura e de sizígia, respectivamente.

Finalmente, foi definido o *time step* ou tempo de discretização temporal do cálculo de execução do modelo. Este representa o intervalo de tempo pelo qual os cálculos numéricos são avançados em uma simulação. Em outras palavras, é a diferença temporal entre cada iteração consecutiva no modelo. A escolha de um *time step* adequado é essencial para assegurar que o modelo seja capaz de simular corretamente as variações temporais dos processos físicos, químicos e biológicos de interesse, sem comprometer a estabilidade numérica da simulação (DELTARES, 2023a).

Embora o conceito de *time step* seja fundamentalmente simples, sua aplicação prática envolve a consideração de várias equações e critérios de estabilidade. Um dos

mais conhecidos é o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que relaciona o time step (Δt), a velocidade de fluxo ou celeridade (\sqrt{gH} ; onde g é a gravidade e H é a profundidade da água), e o espaçamento da grade ($\Delta x, \Delta y$) pela eq.(1):

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} \quad (1)$$

Para garantir a estabilidade das simulações, o valor de CFL deve geralmente ser menor que 10. O valor de *time step* adotado para os cenários de calibração e finais do modelo variaram entre 0,1 e 1 minuto. Todos os valores adotados garantiam um CFL menor que 10 como recomendado por DELTARES (2023b).

2.3.1.3 PARÂMETROS DO DELFT3D FLOW

2.3.1.3.1 PROCESSOS

Dentre os processos físicos ou de constituintes disponíveis para implementação no modelo hidrodinâmico, o empregado nos cenários de calibração foi o processo físico do vento. Este auxilia a modelagem da interação entre a atmosfera e os corpos d'água, influenciando diretamente a hidrodinâmica e o transporte de substâncias. O modelo permite diferentes tipos de configuração do vento, sendo o mais completo o adotado no presente estudo, com a inclusão de uma série temporal de componentes do vento variando no espaço em uma grade equidistante, onde são consideradas as velocidades zonais e meridionais do vento a 10 metros (u e v) e a pressão superficial atmosférica. Essas entradas simulam o impacto do vento na superfície da água, afetando a formação de ondas, o fluxo de correntes e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos e poluentes.

O modelo atmosférico utilizado para a extração das componentes de vento foi o ERA5 descrito em maior detalhe em item anterior (2.2.2 MODELO ATMOSFÉRICO). O script em Python (.py) utilizado para a adequação dos dados do modelo atmosférico exportados em netCDF (.nc4) para os arquivos de input do Delft3D FLOW (.amp, .amu, .amv) encontra-se no Apêndice A.

2.3.1.3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno no módulo FLOW do Delft3D são essenciais para definir como o modelo interage com seu ambiente externo, influenciando diretamente a precisão das simulações hidrodinâmicas. Os contornos podem ser classificados em dois tipos: contornos fechados e contornos abertos. Os contornos fechados representam limites físicos intransponíveis no modelo, como margens de rios, costas ou paredes de um reservatório. Nestes contornos, não há fluxo de água através do limite, o que significa que as condições de fluxo são configuradas para refletir o bloqueio físico. Já os contornos abertos são utilizados para modelar as interfaces do sistema modelado com o ambiente externo, por onde água, sedimentos e outras substâncias podem entrar ou sair do domínio modelado. Esses contornos são fundamentais para simular trocas hidrodinâmicas e químicas com áreas fora do modelo (DELTARES, 2023a). As condições aplicadas nos cenários de calibração e finais em contornos abertos incluem:

a) Condições Astronômicas: Utilizadas para simular o efeito das forças astronômicas, como a maré, sobre o sistema. Essas condições empregam dados de maré astronômica para gerar variações de nível d'água no contorno aberto, permitindo que o modelo simule o efeito das marés de maneira realista. As componentes de maré utilizadas foram extraídas do modelo TPXO 7.2 descrito em maior detalhe em item anterior (2.2.4 MODELO DE MARÉS);

b) Condições de Corrente: Permitem a inserção de dados de velocidade da corrente em função do tempo, possibilitando a modelagem de fluxos dinâmicos através dos contornos abertos. As velocidades de corrente utilizadas foram extraídas do modelo HYCOM GLBy0.08 descrito em maior detalhe em item correspondente (2.2.3 MODELO DE CORRENTES). O script em Python (.py) utilizado para a adequação dos dados do modelo hidrodinâmico exportados em netCDF (.nc4) para o arquivo de input do Delft3D FLOW (.bct) encontra-se no Apêndice B.

As condições de contorno foram implementadas utilizando diferentes configurações ao longo das 3 bordas abertas do modelo nos cenários de calibração, como é possível verificar na seção 3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.

2.3.1.3.3 PARÂMETROS FÍSICOS

Os coeficientes de rugosidade foram ajustados por meio de cenários de calibração (Apêndice C) e o valor final definido é apresentado na seção 3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.

2.3.1.3.4 OPERAÇÕES (DESCARGAS)

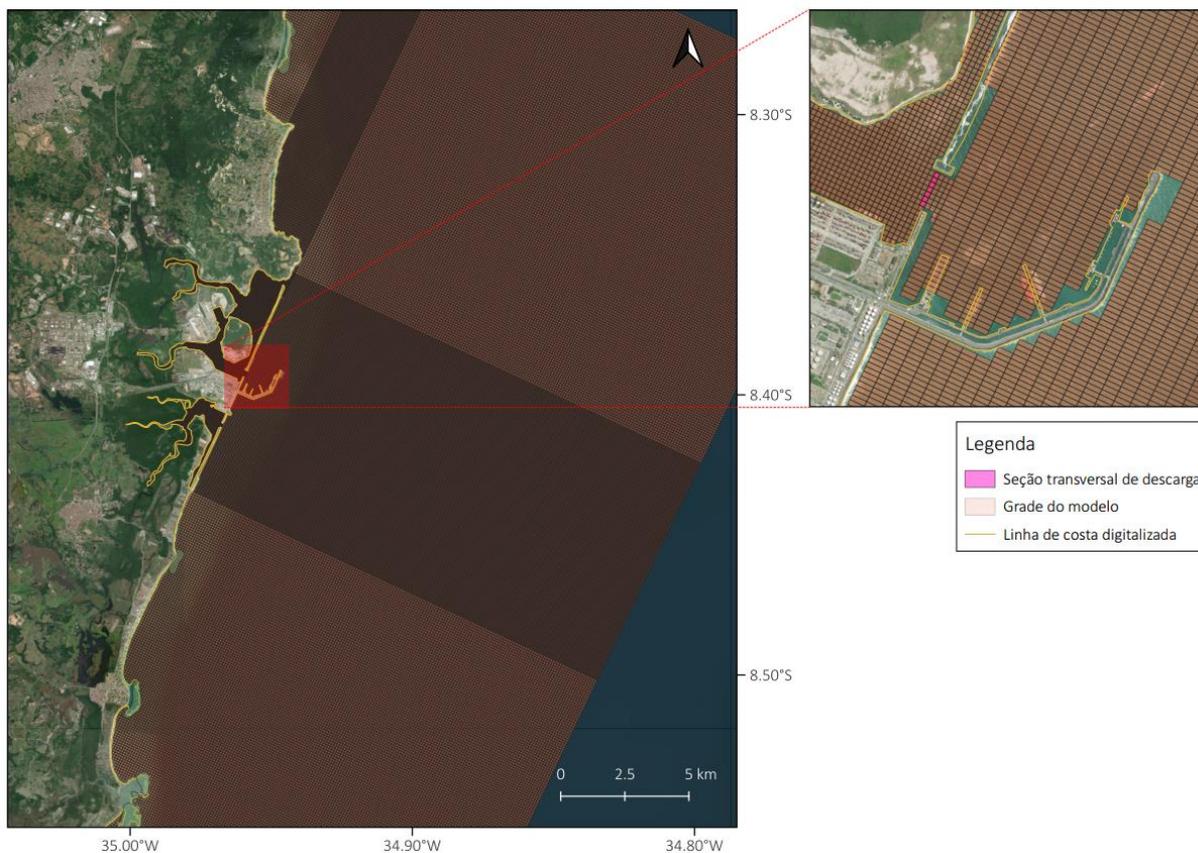
Dentro do módulo FLOW do Delft3D, a opção "*Operations - Discharge*" permite aos usuários modelar a introdução de fluxos de água (ou descargas) em qualquer ponto do domínio. Essa funcionalidade auxilia para simular o impacto de rios, canais de drenagem, ou descargas de efluentes sobre o corpo d'água principal. Ao configurar um rio como uma descarga, o usuário pode especificar a vazão de entrada (em m³/s), permitindo que o modelo preveja como essa entrada afeta a hidrodinâmica e a distribuição de sedimentos e poluentes na área de estudo. Esta opção oferece flexibilidade na modelagem de sistemas aquáticos complexos, possibilitando a representação mais precisa de variações temporais e espaciais nas entradas de água. Por exemplo, é possível modelar a variação sazonal de um rio, ajustando as vazões de entrada de acordo com dados históricos ou previsões. Vale ressaltar que o método mais indicado para a representação do fluxo fluvial é a aplicação da vazão medida ou estimada do rio na seção mais à montante presente no domínio do modelo. A aplicação da vazão pode ser feita como condição de contorno no domínio fluvial.

No presente estudo em cenários de calibração e finais foi utilizada esta modalidade para simular a vazão da Baía de Suape em sua abertura ao sul. Para o cálculo do fluxo de descarga utilizou-se a seguinte fórmula:

$$Q=A \cdot V \quad (2)$$

Onde Q é o fluxo resultante, A é a área transversal da entrada do canal (3696 m²), considerando sua largura e profundidade média nessa seção, e V a velocidade média da corrente (0,279 m/s). O fluxo resultante foi de 1031,18 m³/s.

Figura 5 – Seção transversal do canal de navegação do Porto de Suape utilizada para adição de fluxo no modelo Delft3D FLOW



Fonte: O Autor, 2024

2.3.1.3.5 MONITORAMENTO

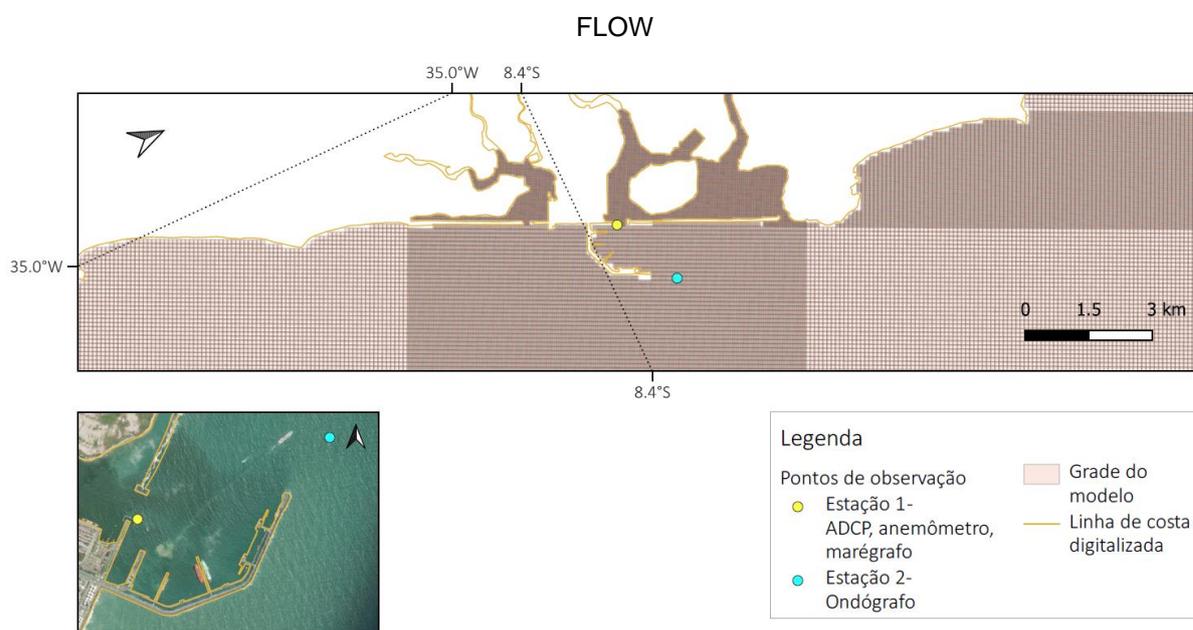
Para o monitoramento dos resultados e calibração dos modelos são definidos os "Observation Points" dentro do módulo FLOW do Delft3D. Estes são pontos específicos definidos pelo usuário no domínio do modelo onde são coletados dados de simulação em intervalos de tempo regulares. Esses pontos de observação permitem monitorar variáveis específicas, como nível médio da água, velocidades das correntes, concentrações de poluentes, entre outras, ao longo do período de simulação. A seleção desses pontos é estratégica para a análise de resultados, facilitando a comparação entre dados modelados e observações in situ em locais de interesse. Foram definidos 2 pontos de observação, situados nas adjacências das estações de coleta de dados via ADCP e ondógrafo fundeados no Porto de Suape. A localização geográfica destes pontos é apresentada a seguir:

Tabela 3 – Localização e identificação dos pontos de observação estabelecidos no modelo Delft3D FLOW

Ponto de observação	Latitude (UTM 25S)	Longitude (UTM 25S)
Estação 1 – ADCP, anemômetro, marégrafo	9074124	283741,31
Estação 2- Ondógrafo	9072432	286040,91

Fonte: O Autor, 2024.

Figura 6 – Localização e identificação dos pontos de observação estabelecidos no modelo Delft3D FLOW



Fonte: O Autor, 2024

2.3.1.4 PARÂMETROS DO DELFT3D PART

No módulo *Particle tracking* (PART) do Delft3D é possível selecionar entre dois tipos de substâncias a serem modeladas. A primeira é o “*tracer*” ou marcador, refere-se a partículas que podem ser utilizadas para simular o movimento de materiais dissolvidos ou em suspensão na água. Por não interagirem quimicamente com o meio, os *tracers* oferecem um meio simplificado, porém eficaz, de rastrear padrões de fluxo e dispersão em corpos d'água (DELTARES, 2023b). Já a segunda opção trata-se do “*Oil*” ou óleo, específica para modelagem de dispersão de óleo, considerando as propriedades únicas e os comportamentos complexos do petróleo e seus derivados quando liberados no ambiente aquático. Este tipo de modelagem leva em conta uma série de processos físicos e químicos que afetam o destino e o comportamento do

óleo na água, incluindo advecção, mistura turbulenta, espalhamento (difusão), entranhamento, dispersão, emulsificação, evaporação e sedimentação (DELTARES, 2023b).

No presente estudo foi utilizada a opção *Oil* e certos parâmetros foram adaptados para representar de melhor maneira a substância que impactou a região de estudo em 2019. Os parâmetros são descritos a seguir.

2.3.1.4.1 NÚMERO DE PARTÍCULAS E MASSA TOTAL

O número de partículas foi definido conforme equações (3) e (4) a seguir sugerida em manual do módulo de *Particle tracking* (DELTARES, 2023b).

$$C_{min} = \frac{m_{particle}}{A_{cell} \times h_{layer}} = \frac{M_{total}}{N_{total} \times A_{cell} \times h_{layer}} \quad (3)$$

$$N_{total} = \frac{M_{total}}{C_{min} \times A_{cell} \times h_{layer}} \quad (4)$$

Onde:

- a) C_{min} : resolução mínima de concentração (kg/m³);
- b) $m_{particle}$: massa por partícula (kg);
- c) A_{cell} : área superficial da célula de computação (m²);
- d) h_{layer} : espessura da camada local (m);
- e) N_{total} : número total de partículas;
- f) M_{total} : peso total do derrame (kg).

A resolução mínima de concentração foi definida em 0.001 kg/m³. A área superficial da menor célula da grade na área de interesse é igual a 1089 m². A espessura mínima da camada local é igual a 1 m. Já o peso total do derrame na área de estudo foi definido considerando a porcentagem de degradação/intemperismo do óleo venezuelano “Bachaquero 17” - óleo bruto pesado com características geoquímicas similares ao óleo que impactou o litoral brasileiro em 2019 - determinada por Zacharias *et al.* (2021a). Através do emprego de um modelo de derramamento, transporte e destino (STFM) os autores calcularam as frações de perda de óleo sobre a superfície do oceano e usaram esse valor como um complemento ao volume de

petróleo bruto estimado no resíduo coletado em 2019. Dessa forma, geraram uma estimativa do volume inicial derramado. A porcentagem mínima de degradação resultante foi igual a 21,6 %.

Este valor foi aplicado sobre as 40 toneladas de resíduos com óleo que foram retirados do litoral de Ipojuca até o dia 22 de outubro de 2019, segundo informado em matéria jornalística (TV Jornal, 2019). Considerando que até o dia 22 de outubro os únicos registros de avistamento de óleo (IBAMA, 2019) em Ipojuca (área de estudo) equivaleram àqueles feitos no dia 02 de setembro, as 40 toneladas de resíduo retiradas serviram como uma estimativa inicial razoável para o presente estudo. Ainda que este resíduo não fosse exclusivamente de óleo, foi utilizado este peso para estimar a massa inicial antes da degradação de 21,6 %. Assim, a massa total determinada foi de 51.000 kg.

Após o cálculo (eq.(4)) o número de partículas totais resultante foi de aproximadamente 47.000 partículas.

2.3.1.4.2 DENSIDADE E VISCOSIDADE CINEMÁTICA

Como supracitado, estudos de geoquímica forense mostraram altos níveis de similaridade das amostras de derramamento de petróleo de 2019 com o petróleo venezuelano “Bachaquero 17” do banco de dados do LEPETRO (de Oliveira *et al.*, 2020; Zacharias *et al.* 2021a). Assim, os valores de densidade (959 kg/m^3) e viscosidade cinemática (407 cSt) empregados no modelo PART equivaleram aos do óleo venezuelano “Bachaquero 17” (Zacharias *et al.*, 2021a).

2.3.1.4.3 DEMAIS PARÂMETROS DO ÓLEO

Para os parâmetros listados a seguir não foram detalhados valores nos artigos consultados relativos à caracterização do óleo de 2019 (Lourenço *et al.*, 2020; de Oliveira *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021; Carregosa *et al.*, 2021; Reddy *et al.*, 2022; Lourenço *et al.*, 2023) como tampouco nas informações disponibilizadas sobre o óleo “Bachaquero 17”. Logo, os valores predefinidos no módulo PART foram empregados. Os parâmetros mencionados foram: Evaporação por dia (0 por dia), probabilidade de aderência (0,5), fração volátil (0,94), emulsificação (2×10^{-6}), máximo conteúdo de água

(0,7), fração onde há início de emulsificação (1), dispersão/arrasto (calculada segundo Delvigne e Sweeney, 1988) e espessura mínima (0,0005 m).

2.3.1.4.4 DERRAME (RELEASES)

Foram estabelecidos cinco lançamentos/derrames instantâneos de óleo, na camada superficial do oceano, e a 2,4 quilômetros do litoral aproximadamente, como apresentado na figura a seguir. Esta configuração foi adotada considerando que: a) o óleo que impactou o litoral brasileiro em 2019 estava disperso próximo ao litoral, justificando mais de um ponto de lançamento; b) o óleo apenas emergiu em superfície próximo à costa devido à ação das ondas (Lessa *et al.*, 2021), justificando a soltura em superfície próximo a costa.

Figura 7 – Localização dos pontos de derramamento de óleo definidos no modelo Delft3D PART. Em azul, localização dos registros do avistamento de óleo no dia 02/09/2019 (IBAMA, 2019)



Fonte: O Autor, 2024

O número de partículas e a massa total de óleo foram divididos equitativamente entre os 5 lançamentos.

2.3.1.4.5 PARÂMETROS DE PROCESSOS - FÍSICOS

O módulo PART permite a inserção de uma série temporal das condições do vento (velocidade e direção). Foram inseridos os dados de vento medidos *in situ*, correspondentes à série temporal completa do modelo hidrodinâmico (02/08 a 07/09). A adição das componentes do vento no módulo PART foi realizada considerando que o modelo hidrodinâmico (módulo FLOW) final adotado, o qual obteve os menores

erros na análise de calibração, não conteve a forçante física dos ventos. Assim, esta foi inserida no módulo PART para contemplar um dos processos fundamentais para o transporte do óleo em superfície (Ferreira, 2006; Keramea *et al.*, 2021).

2.3.1.4.6 MONITORAMENTO

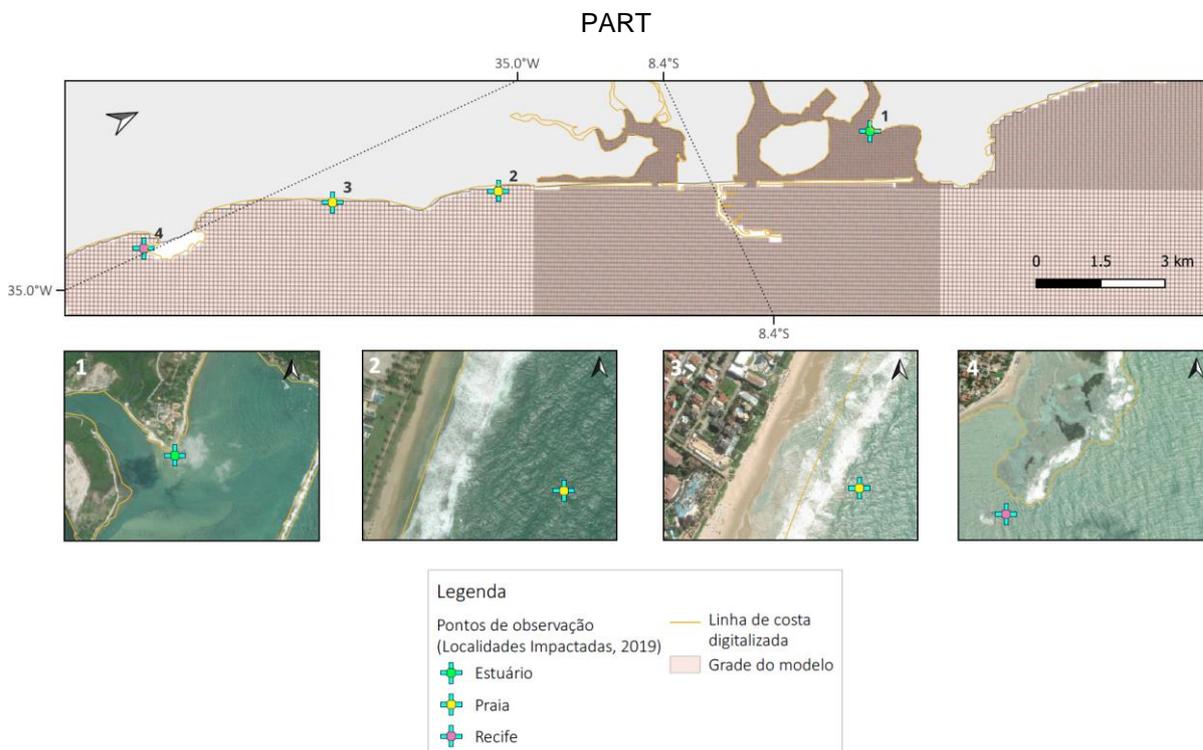
Assim como no módulo FLOW o módulo PART também possui a opção de adicionar pontos de observação (*observation points*) para coletar resultados da simulação em posições estratégicas e em intervalos de tempo regulares. As localizações destes pontos foram definidas segundo as localidades atingidas pelo óleo em setembro de 2019 na área de estudo. A localização de cada ponto e sua correspondência são descritos a seguir:

Tabela 4 – Localização e identificação dos pontos de observação estabelecidos no modelo Delft3D PART

Ponto de observação	Ambiente	Latitude (UTM 25S)	Longitude (UTM 25S)
1	Estuário	284311	9074820
2	Praia	282727	9070040
3	Praia	282987	9068750
4	Recife	282803	9068880

Fonte: O Autor, 2024.

Figura 8 – Localização e identificação dos pontos de observação estabelecidos no modelo Delft3D



Fonte: O Autor, 2024

2.3.1.4.7 CENÁRIOS DO MÓDULO PART

Foram definidos dois cenários para a representação dos resultados de dispersão de óleo na área de estudo. Os cenários foram configurados nos seguintes períodos de tempo: de 23/08 à 01 am a 30/08 à 01 am; de 30/08 à 01 am a 07/09 à 01 am. Assim, foram considerados os períodos de maré de quadratura e de sizígia, respectivamente. Ambos consideraram os mesmos parâmetros descritos anteriormente (e.g. domínio espacial, volume e tipo de óleo, pontos de lançamento), logo suas diferenças se resumem às condições hidrodinâmicas e de vento atuantes nos diferentes períodos.

2.3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para avaliar de forma precisa o desempenho do modelo hidrodinâmico e calibrar o mesmo, as seguintes métricas foram calculadas (eq. 5 – 7): raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e o Skill. Os parâmetros

analisados foram: altura da superfície do mar e velocidade média da corrente em profundidade.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

Onde:

- a) y_i representa o i-ésimo valor real observado;
- b) \hat{y}_i representa o i-ésimo valor previsto;
- c) n é o número total de observações.

O RMSE é uma medida que quantifica a precisão de um modelo de previsão. Ele calcula a média das diferenças quadráticas entre os valores previstos e os valores reais. Já o MAE é uma medida de erro que representa a média das diferenças absolutas entre os valores previstos e os valores reais. Assim, fornece uma visão direta da magnitude média dos erros no modelo de previsão. É uma alternativa útil ao RMSE já que é menos sensível a outliers, pois não eleva ao quadrado os erros. Já o RMSE ‘penaliza’ erros maiores mais do que erros menores devido à sua natureza quadrática.

A métrica de skill apresentada na imagem é uma formulação que visa avaliar a performance de um modelo em relação às observações medidas. A fórmula é a seguinte:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum |X_{\text{mod}} - X_{\text{obs}}|^2}{\sum (|X_{\text{mod}} - \langle X_{\text{obs}} \rangle| + |X_{\text{obs}} - \langle X_{\text{obs}} \rangle|)^2} \quad (7)$$

Onde:

- a) $\langle \dots \rangle$ indica a média dos valores,
- b) $| \dots |$ representa o valor absoluto,
- c) X_{mod} são os valores resultantes da modelagem,
- d) X_{obs} são os valores medidos in situ.

Esta métrica compara a diferença absoluta ao quadrado entre os valores modelados e observados com a soma das diferenças absolutas entre os valores modelados e a média dos observados e os valores observados e a média dos observados, também ao quadrado. O objetivo é normalizar o erro do modelo com a variabilidade dos dados medidos.

Um valor de Skill próximo de 1 indica um modelo muito preciso, enquanto um valor próximo de 0 indica baixa precisão do modelo em relação à variabilidade dos dados observados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

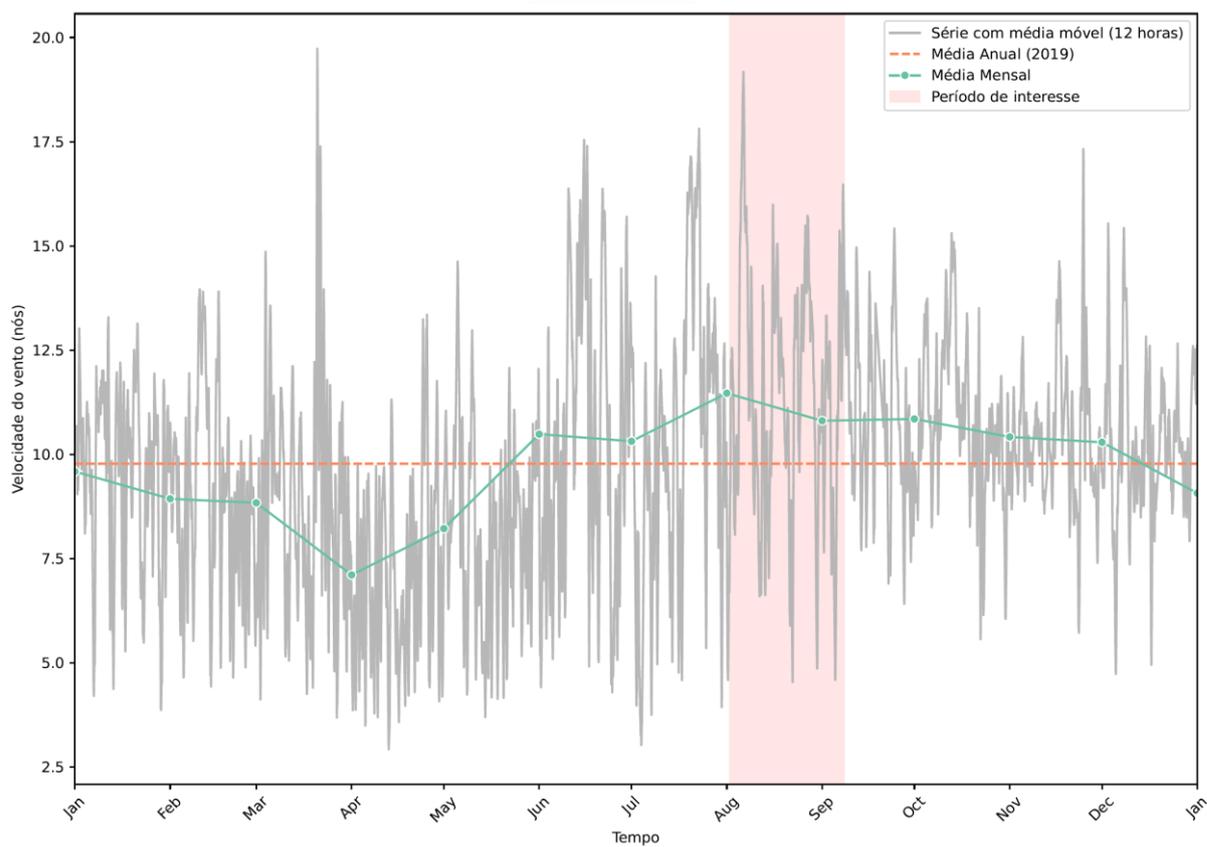
A estratégia de apresentação e discussão dos resultados consistiu em primeiramente analisar os dados in situ, considerando o ano de 2019, para visualizar de melhor forma como o período de interesse se encaixa na série anual (3.1). Em seguida, foram analisados os dados obtidos pela modelagem hidrodinâmica realizada no Delft3D FLOW e seu ajuste com os dados medidos localmente (3.2). Finalmente, foram apresentados e discutidos os dados resultantes da modelagem de dispersão de óleo executada no Delft3D PART (3.3).

3.1 DADOS IN SITU

3.1.1 DADOS ATMOSFÉRICOS

Ao longo de 2019, o sensor de detecção de velocidade e direção dos ventos operou com poucas interferências (aproximadamente 66 horas em 365 dias), sendo apenas uma maior do que 3 horas de interrupção na coleta de dados (49 horas entre o dia 18 e 20/09). Logo, em geral o equipamento operou continuamente. A Figura 9 ilustra a flutuação da velocidade do vento durante esse período, com destaque para o intervalo temporal relevante para o presente projeto. Além disso, a Tabela 5 apresenta para os mesmos períodos as estatísticas descritivas da velocidade e direção do vento. Foi observado que os ventos mais intensos em média ocorreram nos meses de agosto e outubro, enquanto os menos intensos ocorreram em abril e maio. Durante o período de interesse (02-agosto a 07-setembro) os valores médios de velocidade foram maiores que a média anual.

Figura 9 – Série temporal da velocidade do vento (em nós) medida, após aplicação de média móvel de 12 horas, no ano de 2019 pela estação de monitoramento no Porto de Suape. Destaque em vermelho para o período de interesse para o presente projeto. Em verde, linha conectando os valores correspondentes a média mensal de velocidade. Em laranja, linha demarcando valor de média anual da velocidade do vento



Fonte: O Autor, 2024

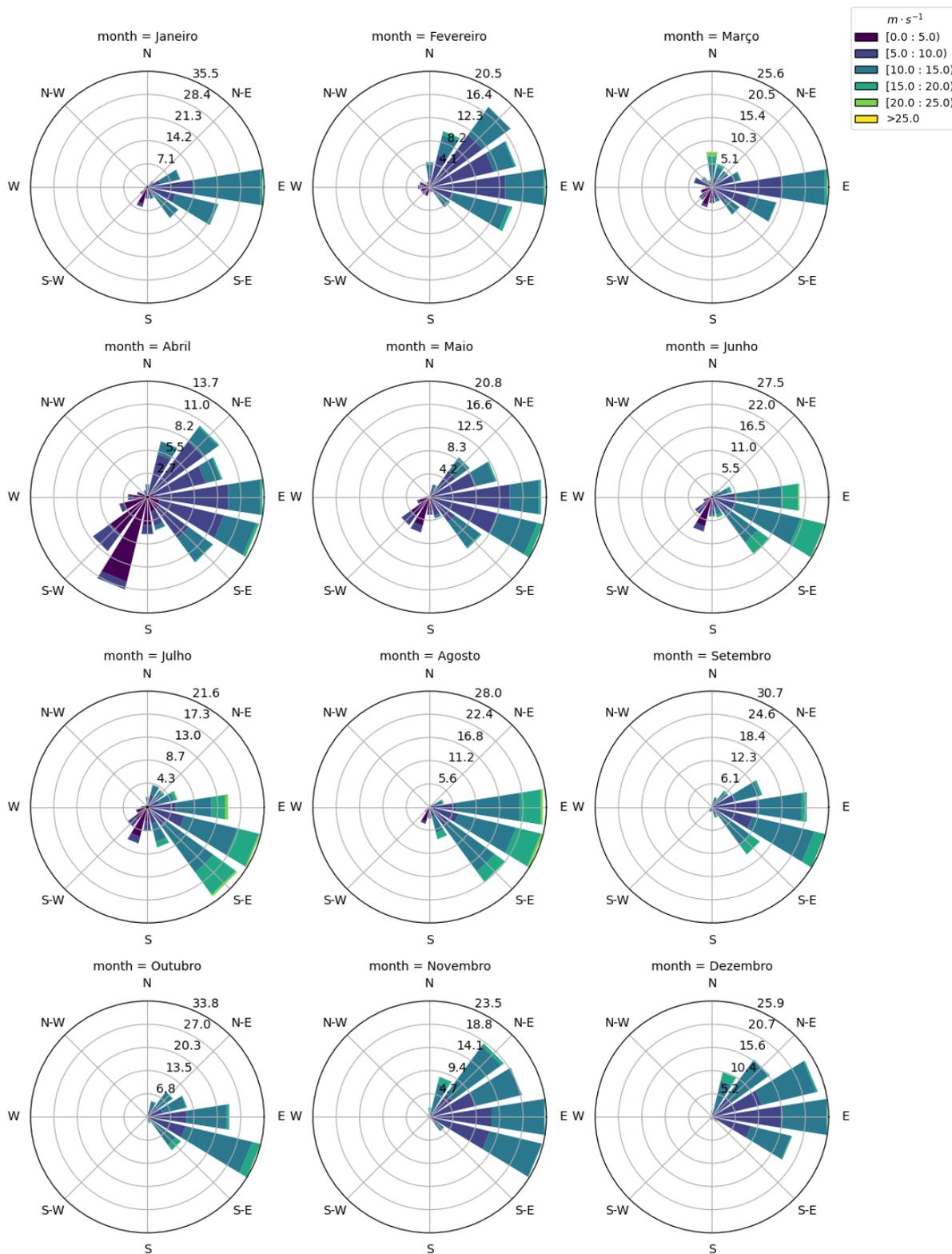
Tabela 5 – Resultados das métricas de estatística descritiva realizadas sobre os dados de velocidade e direção do vento, medidos in situ na estação de monitoramento no Porto de Suape

Período / Métricas	Velocidade do vento (nós)			Direção do vento (graus)
	Média	Máximo	Desvio Padrão	Mediana
Janeiro	9,6	30,7	3,1	102,0
Fevereiro	8,9	24,6	3,1	82,7
Março	8,8	25,7	3,8	103,5
Abril	7,1	23,5	3,2	113,1
Mai	8,2	23,1	3,2	106,1
Junho	10,5	27,6	4,5	117,7
Julho	10,3	26,6	4,6	122,3
Agosto	11,5	27,7	3,9	112,4
Setembro	10,8	21,2	3,3	102,5
Outubro	10,8	21,9	2,7	101,0
Novembro	10,4	20,1	2,3	81,6
Dezembro	10,3	23,7	2,6	77,3
Anual-2019	9,8	30,7	3,6	-
Domínio temporal do modelo (02-Ago - 07-Set)	11,4	27,7	3,8	109,3

Fonte: O Autor, 2024.

A direção dos ventos é predominantemente entre 77 e 122°, variação entre ventos de leste-nordeste e leste-sudeste, reflexo dos ventos alísios de leste e sudeste, característicos para a região, com variações de ventos de nordeste, principalmente no período de novembro e dezembro (Sales, 2017; Domingues *et al.*, 2017). Isto se deve a variação do posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Figura 10 – Rosa dos ventos agrupadas por mês (ano de 2019), com apresentação de dados medidos em estação de monitoramento no Porto de Suape

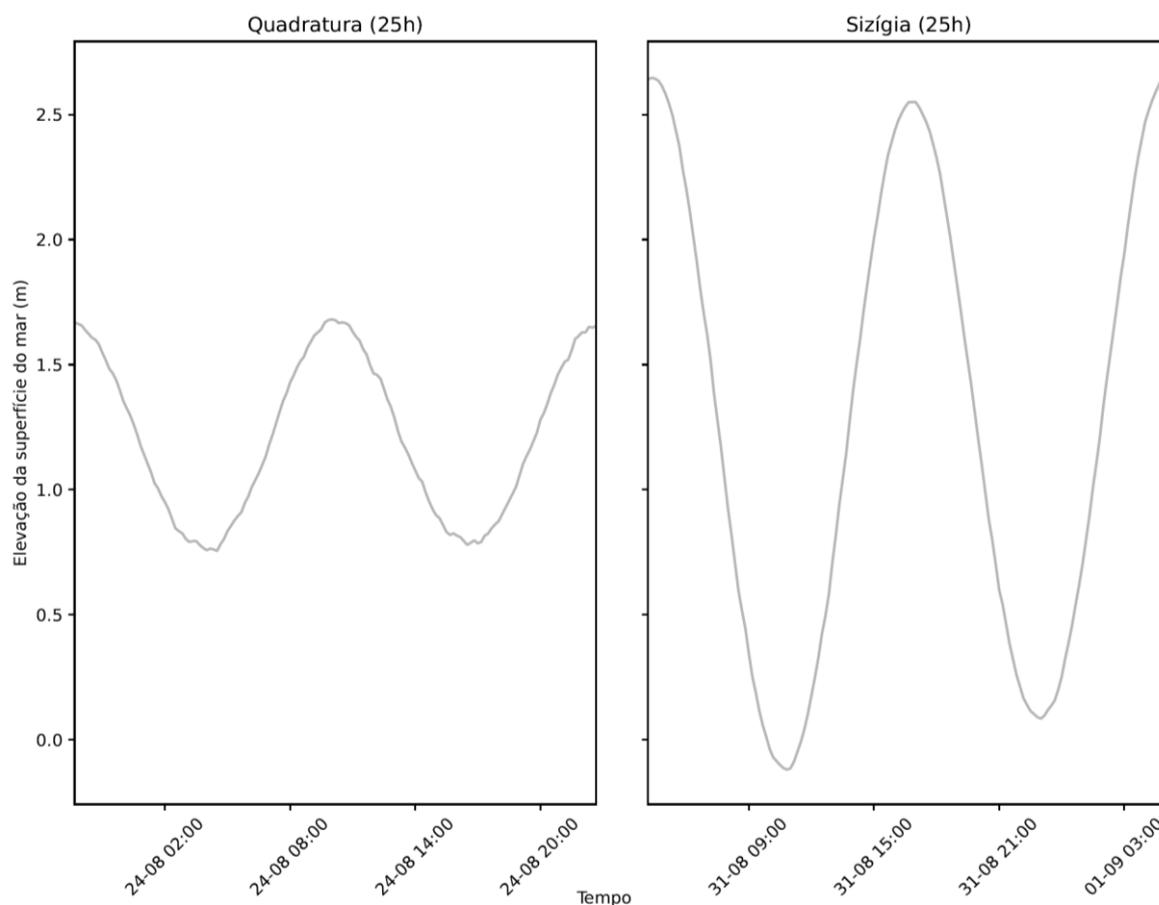


Fonte: O Autor, 2024

3.1.2 ALTURA DA SUPERFÍCIE DO MAR

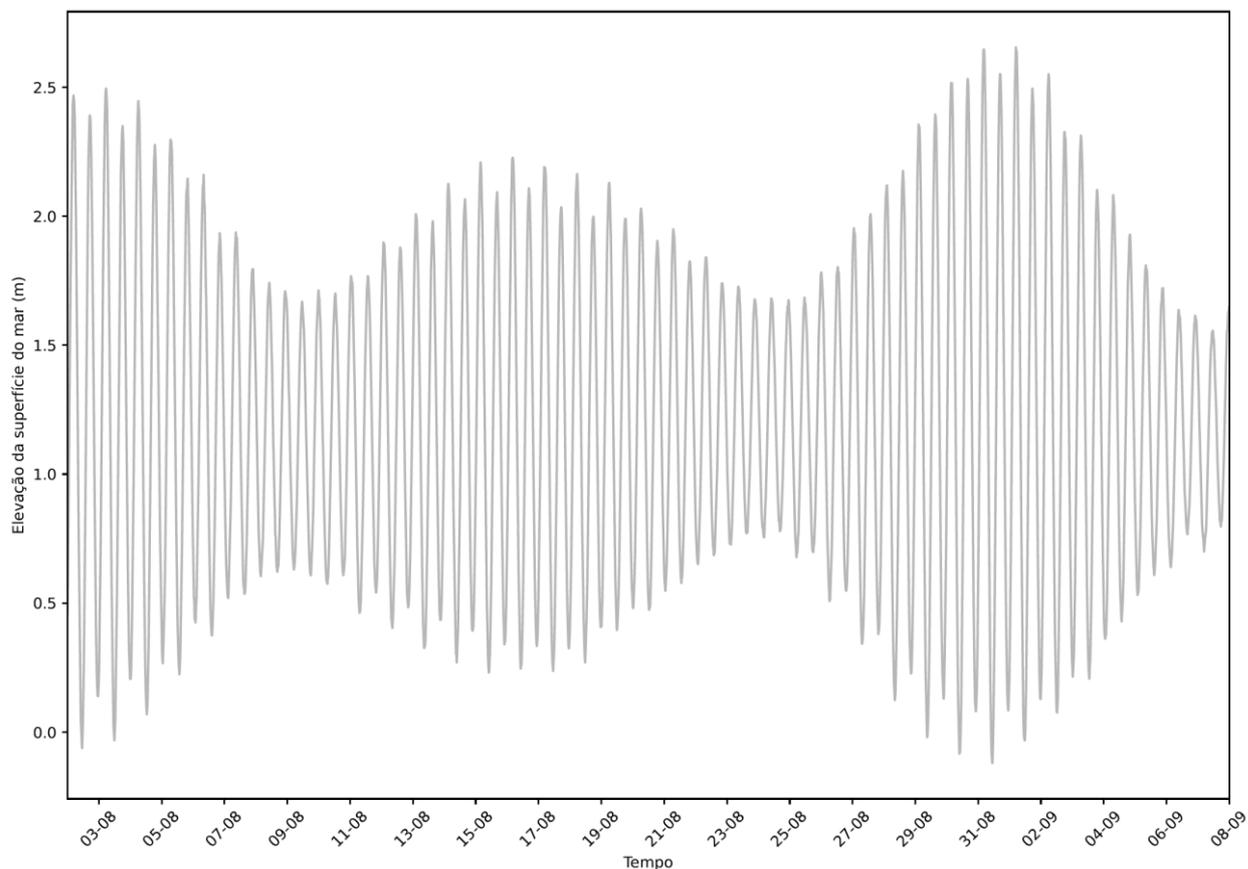
Ao longo de 2019, o marégrafo operou com poucas interferências (aproximadamente 22 horas em 365 dias), sendo apenas uma maior do que 3 horas de interrupção na coleta de dados (3,5 horas no dia 18/09). Assim, em geral o equipamento operou continuamente. O regime de marés é caracterizado por seu padrão semidiurno, a Figura 11 ilustra comparativamente a variação da elevação da superfície durante 25 h em dias de maré de quadratura e de sizígia, no domínio temporal de interesse (02 de agosto a 07 de setembro). Já a Figura 12 mostra a variação da elevação da superfície do mar para todo o período. A variação de amplitude no nível do mar entre as duas fases foi de 1,84 m sendo a amplitude máxima igual a 2,77 m e a mínima igual a 0,93 m.

Figura 11 – Variação da elevação da superfície do mar (em metros), medição in situ, durante a maré de quadratura e a maré de sizígia



Fonte: O Autor, 2024

Figura 12 – Variação da elevação da superfície do mar (em metros), medição in situ, durante o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024

Na Tabela 6 são apresentados os valores de elevação máximos, mínimos e de amplitude da superfície do mar na maré de quadratura e de sizígia.

Tabela 6 – Valores mínimos, máximos e a amplitude da maré de quadratura e da maré de sizígia, considerando o período de interesse (02 de agosto a 07 de setembro), obtidos após análise de dados medidos em estação de monitoramento no Porto de Suape

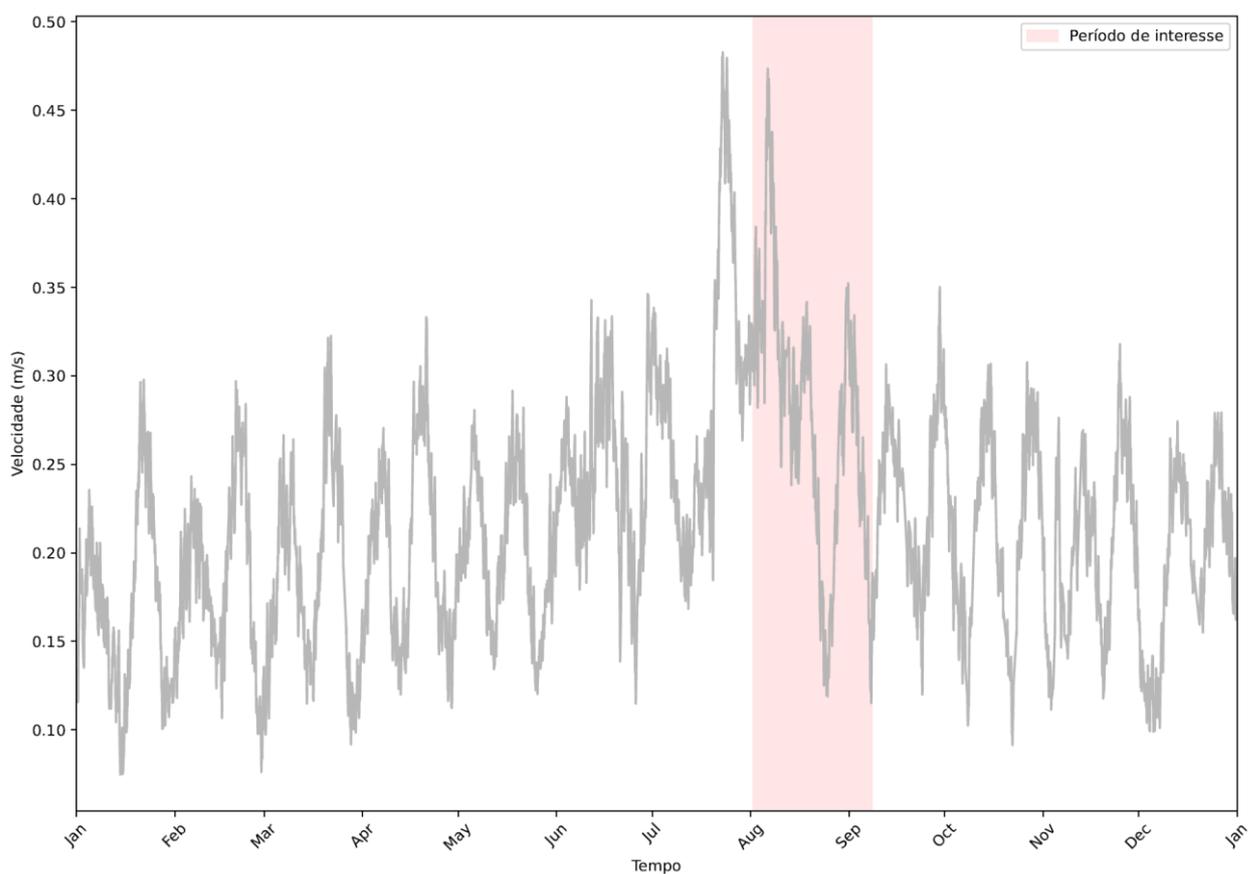
Parâmetros	Maré de quadratura (m)	Maré de sizígia (m)
Altura da sup. mínima	0,75	-0,12
Altura da sup. máxima	1,68	2,65
Amplitude	0,93	2,77

Fonte: O Autor, 2024.

3.1.3 CORRENTES

Ao longo de 2019, o ADCP operou com poucas interferências (aproximadamente 48 horas em 365 dias), sendo apenas 2 maiores do que 3 horas de interrupção na coleta de dados (3,8 horas no dia 18/09 e 4,8 horas no dia 19/10). Logo, em geral o equipamento operou continuamente. A Figura 13 ilustra a flutuação da velocidade da corrente média em profundidade durante esse período, com destaque para o intervalo temporal relevante para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro).

Figura 13 – Variação da velocidade da corrente (em m/s), medição in situ, após aplicação de média móvel de 12 horas, durante o ano de 2019, com destaque em vermelho para o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024.

Foi observado que as correntes mais intensas em média ocorreram nos meses de agosto e julho, enquanto as menos intensas ocorreram em janeiro e fevereiro.

Durante o período de interesse (02-agosto a 07-setembro) os valores médios de velocidade foram maiores que a média anual.

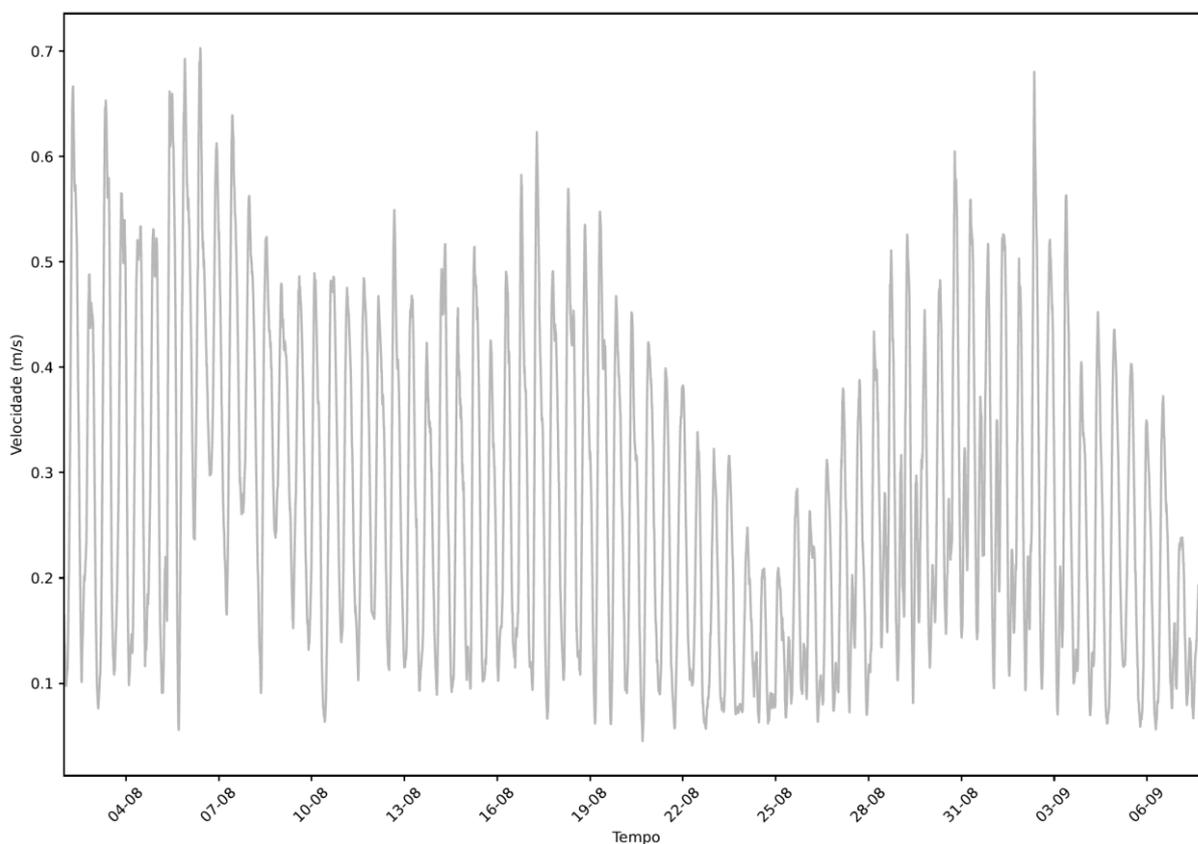
Em seguida são apresentadas figuras apenas para o domínio temporal de interesse, contendo a velocidade e as direções predominantes da corrente para o período. Além disso, a Tabela 7 apresenta para os mesmos períodos as estatísticas descritivas da velocidade da corrente. As médias das velocidades observadas para o período de interesse diferem significativamente da média descrita por Sales (2017) de 0,0670 m/s.

Tabela 7 – Resultados das métricas de estatística descritiva realizadas sobre os dados de velocidade da corrente (m/s), medidos in situ na estação de monitoramento no Porto de Suape

Período / Métricas	Velocidade da corrente (m/s)		
	Média	Máximo	Desvio Padrão
Janeiro	0,17	0,78	0,11
Fevereiro	0,18	0,63	0,12
Março	0,19	0,68	0,12
Abril	0,20	0,72	0,12
Mai	0,20	0,64	0,12
Junho	0,24	1,07	0,15
Julho	0,29	0,93	0,16
Agosto	0,29	1,01	0,17
Setembro	0,23	0,86	0,14
Outubro	0,21	0,81	0,13
Novembro	0,20	0,59	0,12
Dezembro	0,19	0,72	0,11
Anual-2019	0,22	1,07	0,14
Domínio temporal do modelo (02-Ago - 07-Set)	0,27	1,01	0,17

Fonte: O Autor, 2024.

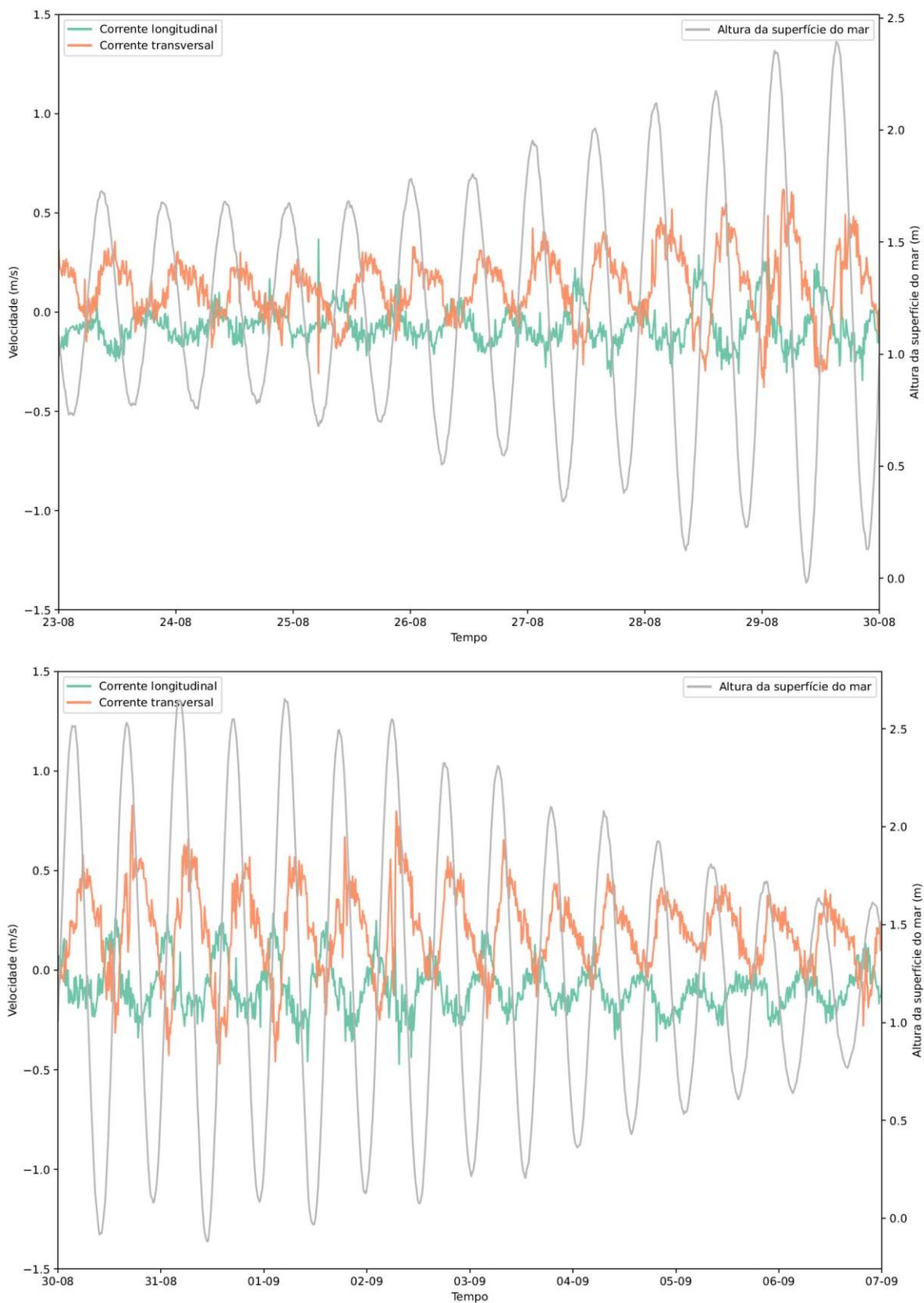
Figura 14 – Variação da velocidade da corrente (em m/s), medição in situ, após aplicação de média móvel de 2 horas, durante o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024.

O vetor da velocidade da corrente foi decomposto para avaliação das correntes longitudinais e transversais considerando a variação da altura da superfície do mar, para os períodos de maré de quadratura (23/08 a 30/08) e de sizígia (30/08 a 07/09). Foi perceptível a relação entre a variação do nível do mar pela onda de maré e as correntes transversal e longitudinal superficiais, as quais atingiram seus valores máximos durante a maré vazante e enchente respectivamente (Figura 15). Esta relação também foi observada por Sales (2017) que a justificou considerando a posição do fundeio do ADCP a uma profundidade de 17 metros no canal de acesso, onde espera-se que as correntes variem predominantemente de acordo com os regimes de maré. Além disso, a oscilação análoga com a variação da maré confirma a caracterização do sistema como barotrópico (Sales, 2017).

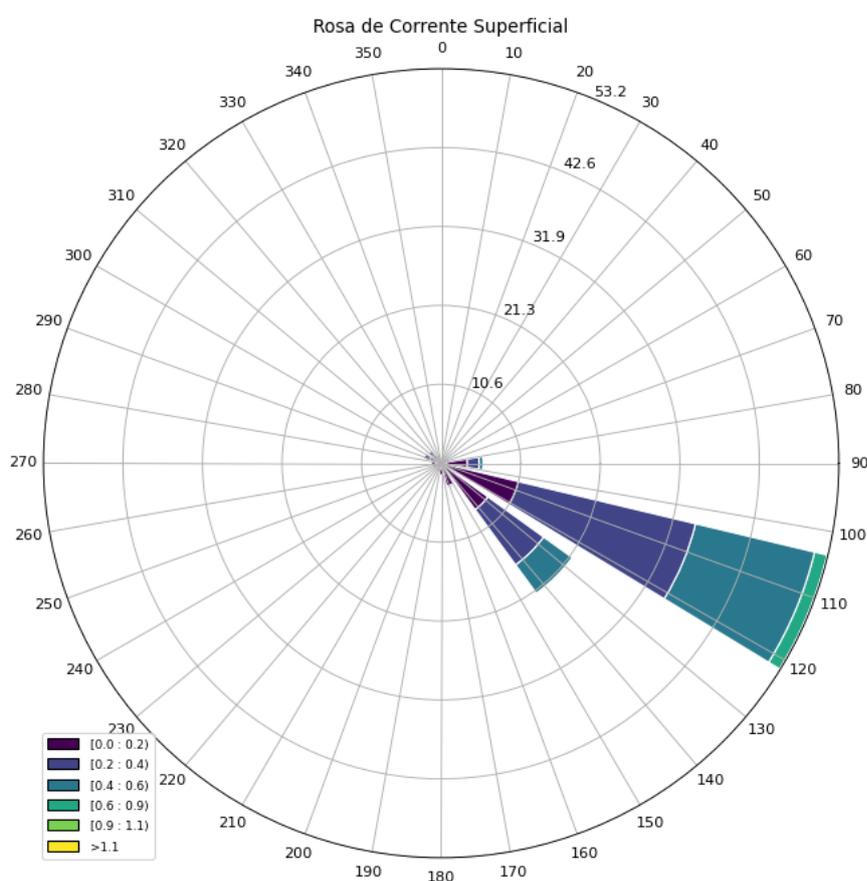
Figura 15 – Variação da velocidade da corrente longitudinal e transversal (em m/s), medição in situ, justaposta à variação da elevação da superfície do mar, durante a maré de quadratura (23/08 a 30/08; gráfico superior) e maré de sizígia (30/08 a 07/09; gráfico inferior)



Fonte: O Autor, 2024.

Considerando que a variação da corrente é predominantemente conforme o regime de maré, dada a posição do ADCP, esperava-se um balanço entre direções opostas da corrente, representando fluxos de maré vazante e enchente. Contudo, o ADCP registrou uma direção de fluxo preferencial do Porto externo (mar) para a Baía de Suape, com valores medianos mensais da direção das correntes em superfície, a 2 metros e a 5 metros de profundidade variando entre 118 e 143°.

Figura 16 – Rosa direcional de correntes com apresentação de dados medidos em estação de monitoramento no Porto de Suape, durante o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)

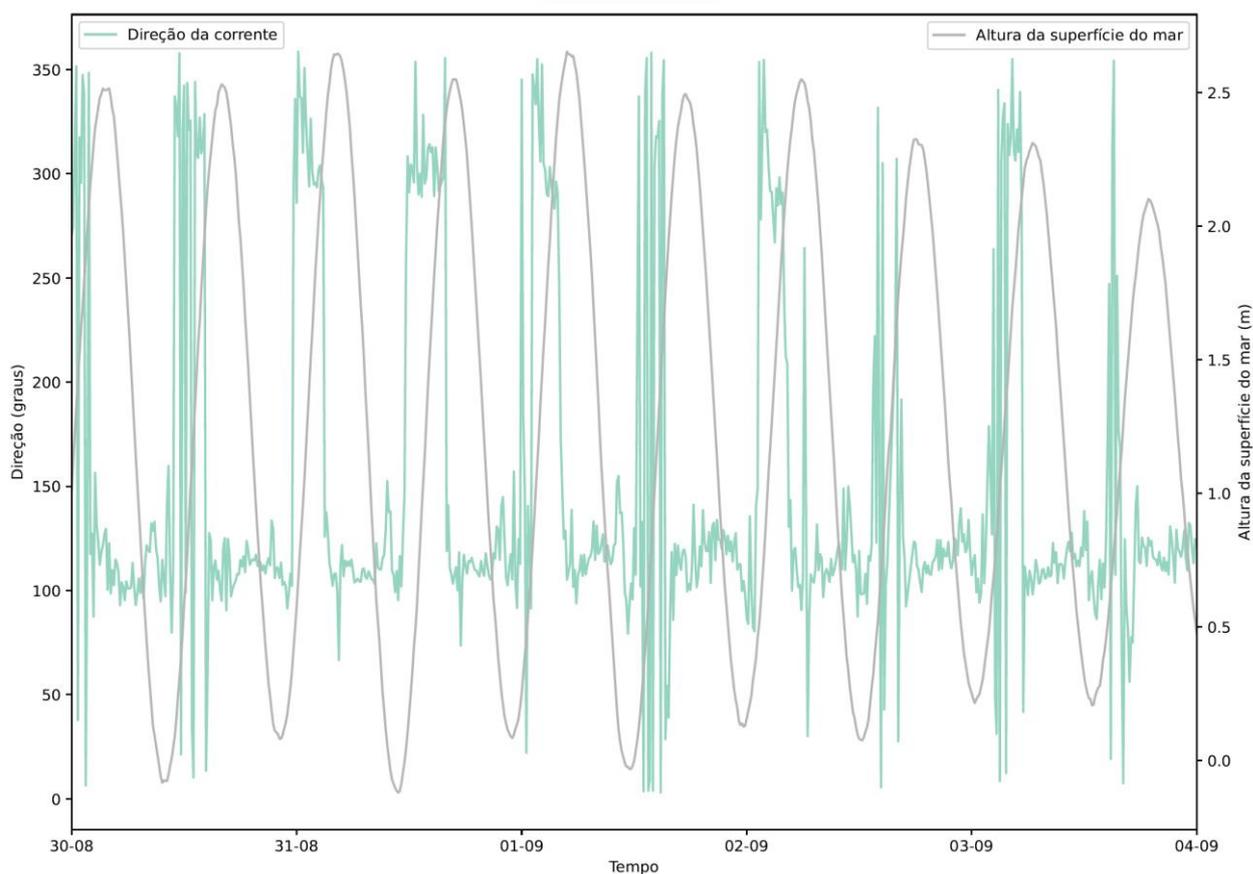


Fonte: O Autor, 2024.

Quando visualizada a série temporal da direção das correntes e do nível de água é perceptível que com frequência durante a maré enchente há uma mudança na direção da corrente para norte (valores próximos a 0 e 360°). Isso provavelmente se deve ao aumento da intensidade da corrente nesse período e à configuração da

entrada do canal, protegido por um molhe a leste, onde o ADCP está fundeado (Figura 6).

Figura 17 – Variação da direção da corrente (em graus), medição in situ, justaposta à variação da elevação da superfície do mar, durante intervalo (30/08 a 04/09) no período de interesse para o presente projeto (02/08 a 07/09)

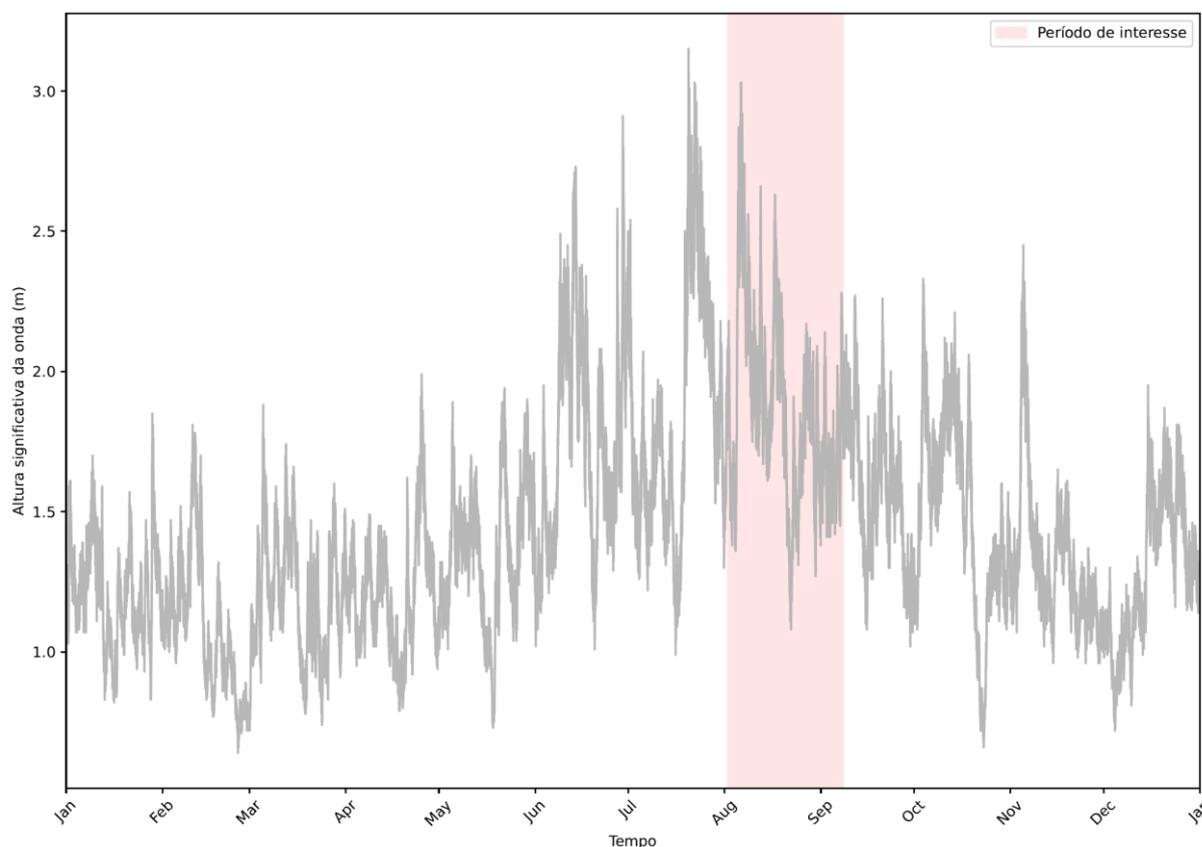


Fonte: O Autor, 2024.

3.1.4 ONDAS

Ao longo de 2019, o ondógrafo operou com poucas interferências (aproximadamente 30 horas em 365 dias), com nenhuma maior do que 2 horas de interrupção na coleta de dados. Logo, em geral o equipamento operou continuamente. A Figura 18 ilustra a flutuação da altura significativa da onda durante esse período, com destaque para o intervalo temporal relevante para o presente projeto.

Figura 18 – Variação da altura significativa da onda (em m), medição in situ, durante o ano de 2019, com destaque em vermelho para o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024.

Foi observado que as alturas significativas mais elevadas em média ocorreram nos meses de agosto e julho, enquanto as menos elevadas ocorreram em janeiro e fevereiro, conforme observado também para a velocidade das correntes medidas por ADCP. Durante o intervalo de interesse (02-agosto a 07-setembro) os valores médios de velocidade foram maiores que a média anual.

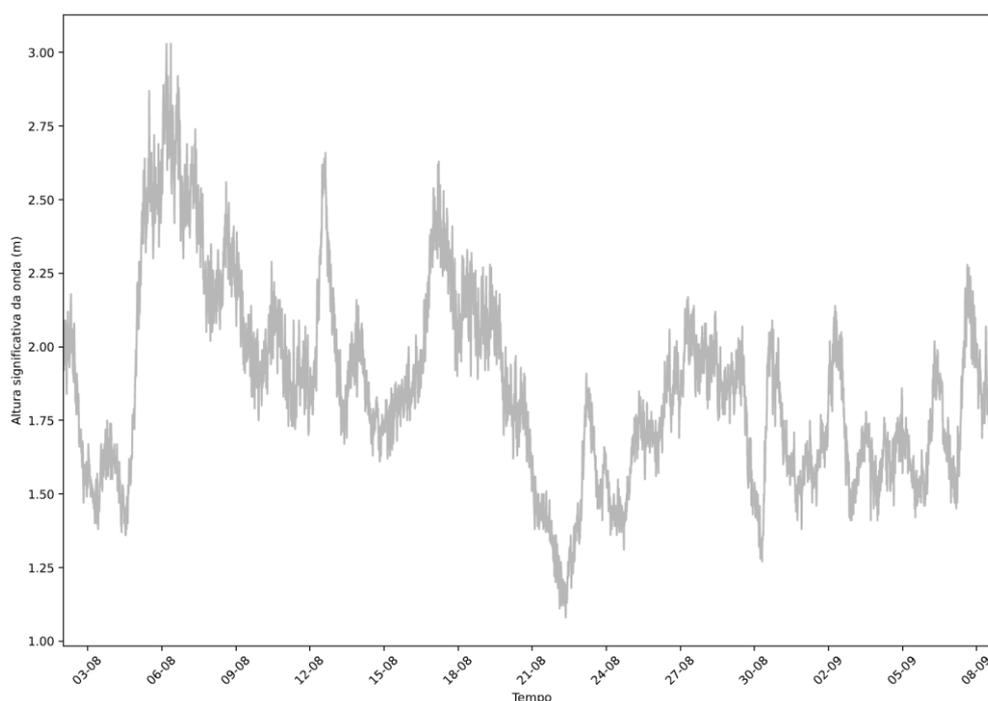
Em seguida são apresentadas figuras apenas para o domínio temporal de interesse, contendo a altura significativa das ondas e as direções predominantes da mesma para o período. Além disso, a Tabela 8 apresenta as estatísticas descritivas dos parâmetros de onda. Foi possível perceber que os valores médios de altura significativa e período de onda diferiram dos apresentados por Cintrão Barros (2009), correspondentes de medições entre 1977 e 1984, o qual notificou alturas significativas médias menores (média anual de 1,11 m; média em 2019 foi 1,44 m) e períodos médios maiores (média anual de 6,28 s; média em 2019 foi 5,13 s).

Tabela 8 – Resultados das métricas de estatística descritiva realizadas sobre os dados de onda – altura significativa (m), período (s) e direção (graus) – medidos in situ na estação de monitoramento no Porto de Suape

Período / Métricas	Altura significativa (m)			Período (s)	Direção (graus)
	Média	Máximo	Desvio Padrão	Média	Média
Janeiro	1,21	1,85	0,18	4,55	121
Fevereiro	1,09	1,81	0,24	4,61	108
Março	1,20	1,88	0,21	5,04	112
Abril	1,21	1,99	0,20	5,27	112
Mai	1,36	1,94	0,24	5,30	114
Junho	1,76	2,91	0,39	5,44	122
Julho	1,85	3,15	0,44	5,76	122
Agosto	1,89	3,03	0,34	5,60	120
Setembro	1,61	2,28	0,24	5,23	118
Outubro	1,48	2,33	0,34	5,00	112
Novembro	1,32	2,45	0,26	4,96	108
Dezembro	1,29	1,95	0,26	4,75	104
Anual-2019	1,44	3,15	0,39	5,13	114
Domínio temporal do modelo (02-Ago - 07-Set)	1,86	3,03	0,32	5,51	119

Fonte: O Autor, 2024.

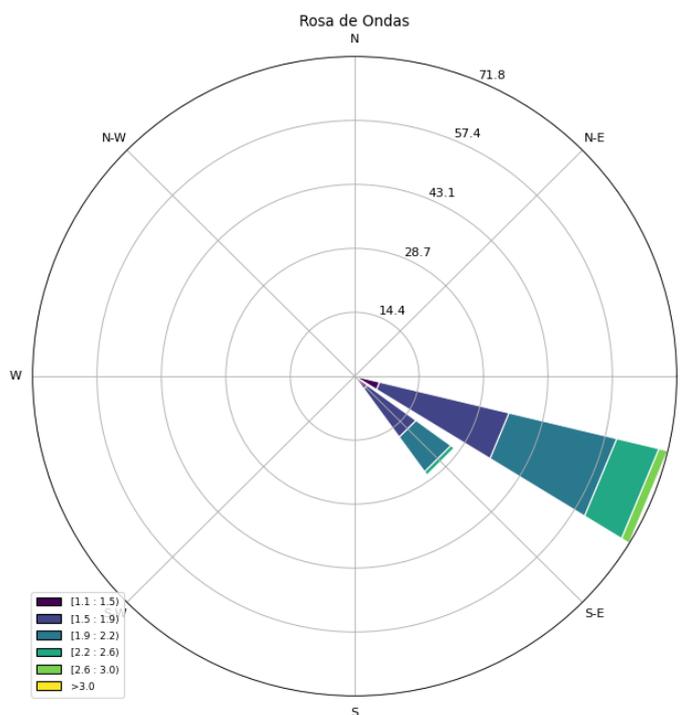
Figura 19 – Variação da altura significativa da onda (em m), medição in situ, durante o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024.

Os valores médios calculados por mês da direção das ondas variam entre 104 e 122° indicando a predominância de direção de ondas de leste – sudeste-leste.

Figura 20 – Rosa direcional de ondas de dados medidos em estação de monitoramento no Porto de Suape, durante o período de interesse para o presente projeto (02 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024

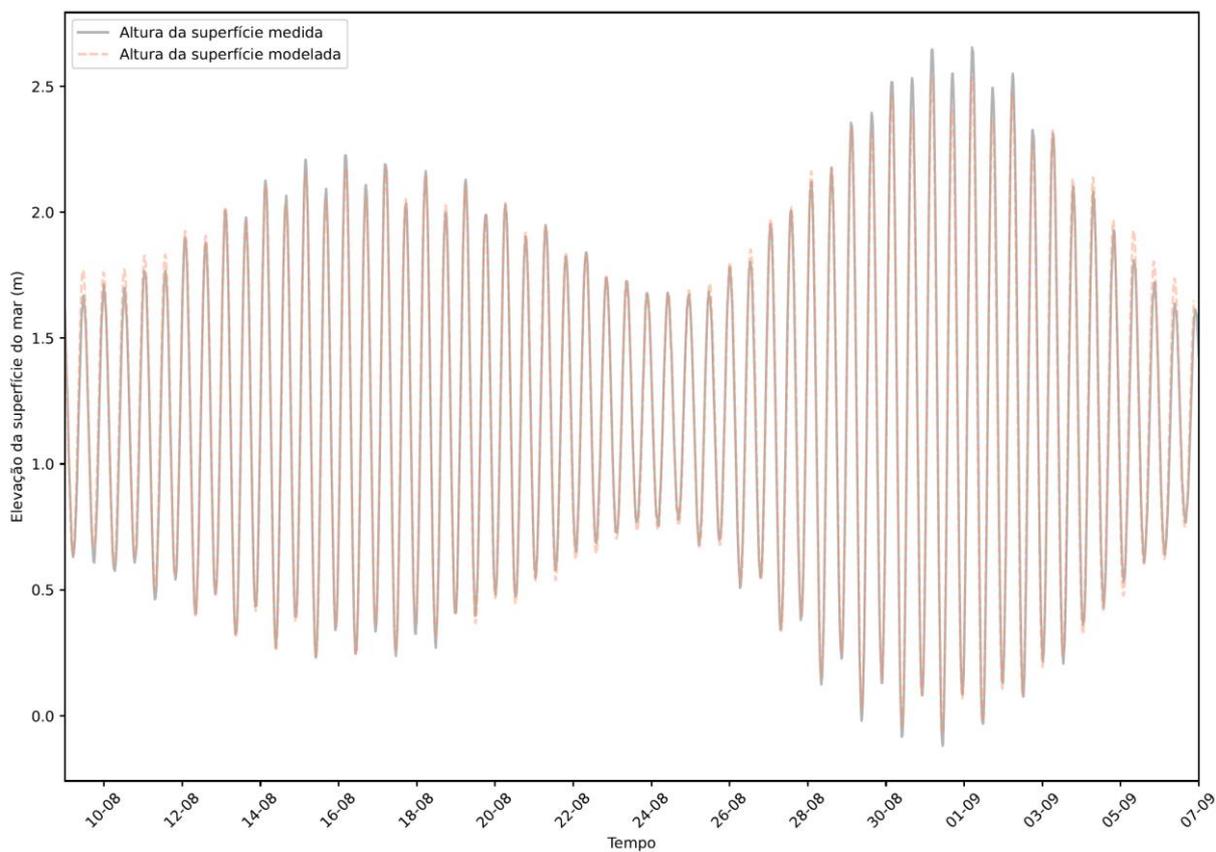
3.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

3.2.1 ALTURA DA SUPERFÍCIE DO MAR

O regime de marés resultante do modelo hidrodinâmico caracterizou adequadamente o padrão semidiurno da região.

A Figura 21 apresenta a variação da elevação da superfície do mar para o período modelado (após o aquecimento do modelo - 09 de agosto a 07 de setembro), comparando os dados medidos com os resultantes do modelo hidrodinâmico. É perceptível pela Figura 21 que o modelo capta com precisão as flutuações no nível da água decorrentes da propagação da onda de maré.

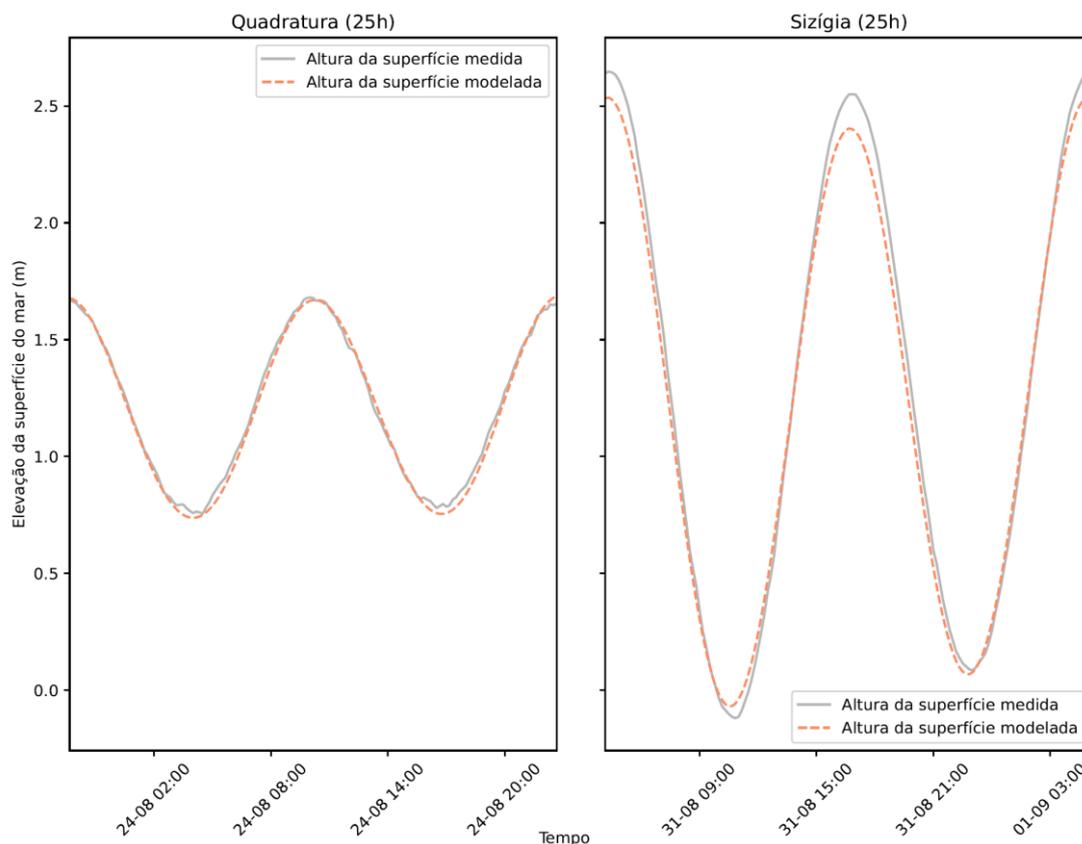
Figura 21 – Comparação da variação da elevação da superfície do mar (em metros), entre medição in situ (linha cinza) e resultados de modelo (linha pontilhada laranja), durante o período com dados válidos para a modelagem hidrodinâmica (09 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024

A Figura 22 ilustra os dados medidos in situ junto com os dados modelados, comparando a variação da elevação da superfície do mar durante dias de maré de quadratura e de sizígia no domínio temporal do modelo após período de aquecimento.

Figura 22 – Comparação da variação da elevação da superfície do mar (em metros), entre medição in situ (linha cinza) e resultados de modelo (linha pontilhada laranja), durante a maré de quadratura e a maré de sizígia



Fonte: O Autor, 2024

A variação de amplitude no nível do mar observada nos dados modelados entre as duas fases foi de 1,67 m (dados medidos=1,84 m) sendo a amplitude máxima igual a 2,6 m (dados medidos=2,77 m) e a mínima igual a 0,93 m (dados medidos=0,93 m).

Na Tabela 9 são apresentados os valores de elevação máximos, mínimos e de amplitude da superfície do mar na maré de quadratura e de sizígia, considerando os dados medidos em estação de monitoramento do Porto de Suape e os dados resultantes de modelagem hidrodinâmica.

Tabela 9 – Valores mínimos, máximos e a amplitude da maré de quadratura e da maré de sizígia, considerando o período de 09 de agosto a 07 de setembro, obtidos após análise de dados medidos em estação de monitoramento no Porto de Suape e por modelagem hidrodinâmica

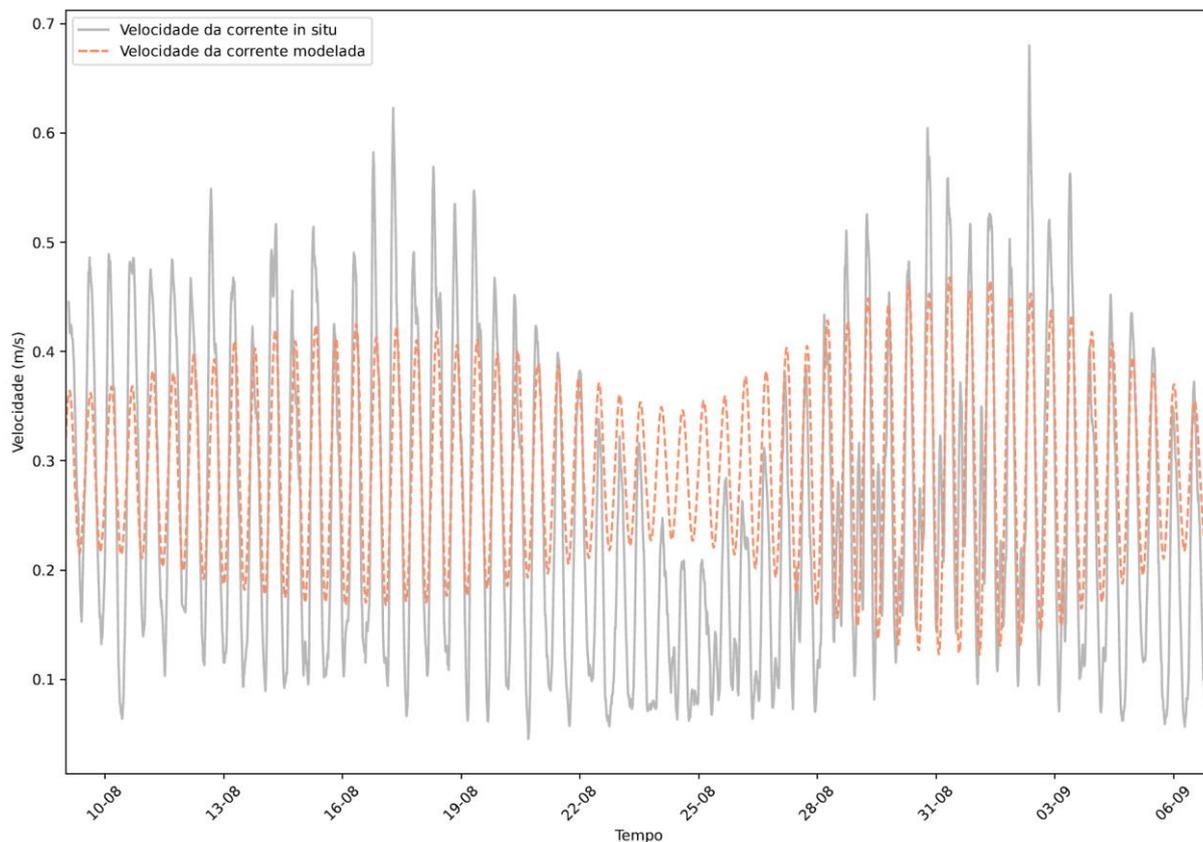
Parâmetros	Maré de quadratura (m)		Maré de sizígia (m)	
	Medição	Modelo	Medição	Modelo
Altura da sup. mínima	0,75	0,74	-0,12	-0,07
Altura da sup. máxima	1,68	1,67	2,65	2,53
Amplitude	0,93	0,93	2,77	2,6

Fonte: O Autor, 2024

3.2.2 CORRENTES

A Figura 23 ilustra a flutuação da velocidade da corrente média em profundidade para o período modelado (após o aquecimento do modelo - 09 de agosto a 07 de setembro), comparando os dados medidos com os resultantes do modelo hidrodinâmico.

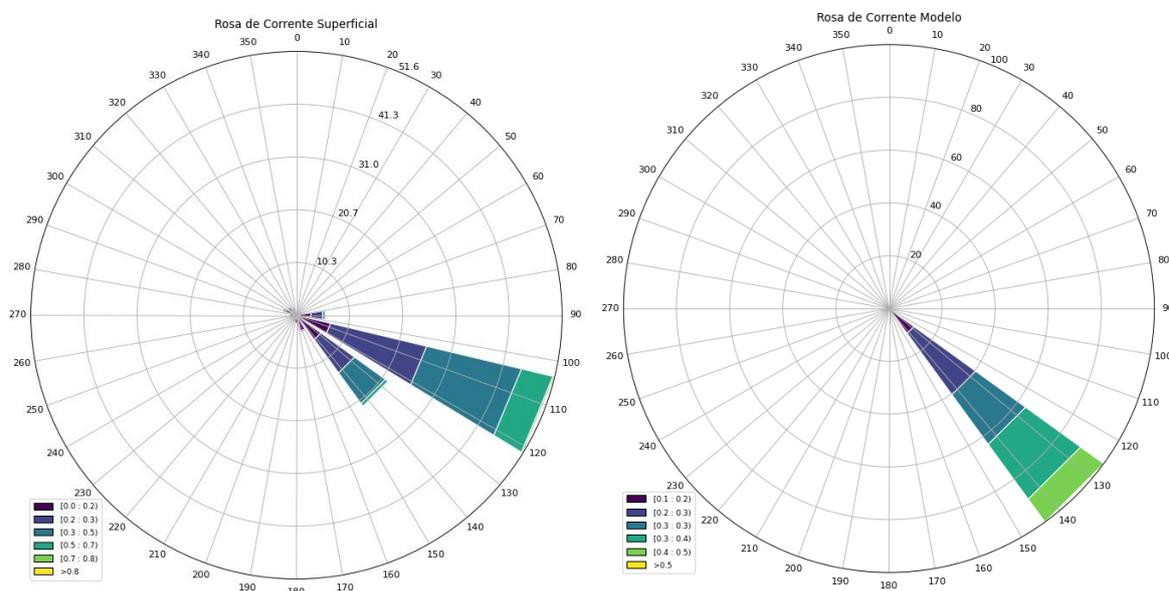
Figura 23 – Comparação da velocidade da corrente média em profundidade (em m/s), entre medição in situ (linha cinza; média móvel de 2 horas aplicada) e resultados de modelo (linha pontilhada laranja), durante o período com dados válidos para a modelagem hidrodinâmica (09 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024

Em seguida é apresentada a comparação entre as direções de corrente em superfície medidas in situ e os resultados obtidos em modelo hidrodinâmico, durante o período pós aquecimento do modelo. Nota-se que apesar da defasagem em 30-40° do campo direcional predominante, o modelo apresenta concordância com o quadrante das direções, sendo sudeste a direção dominante.

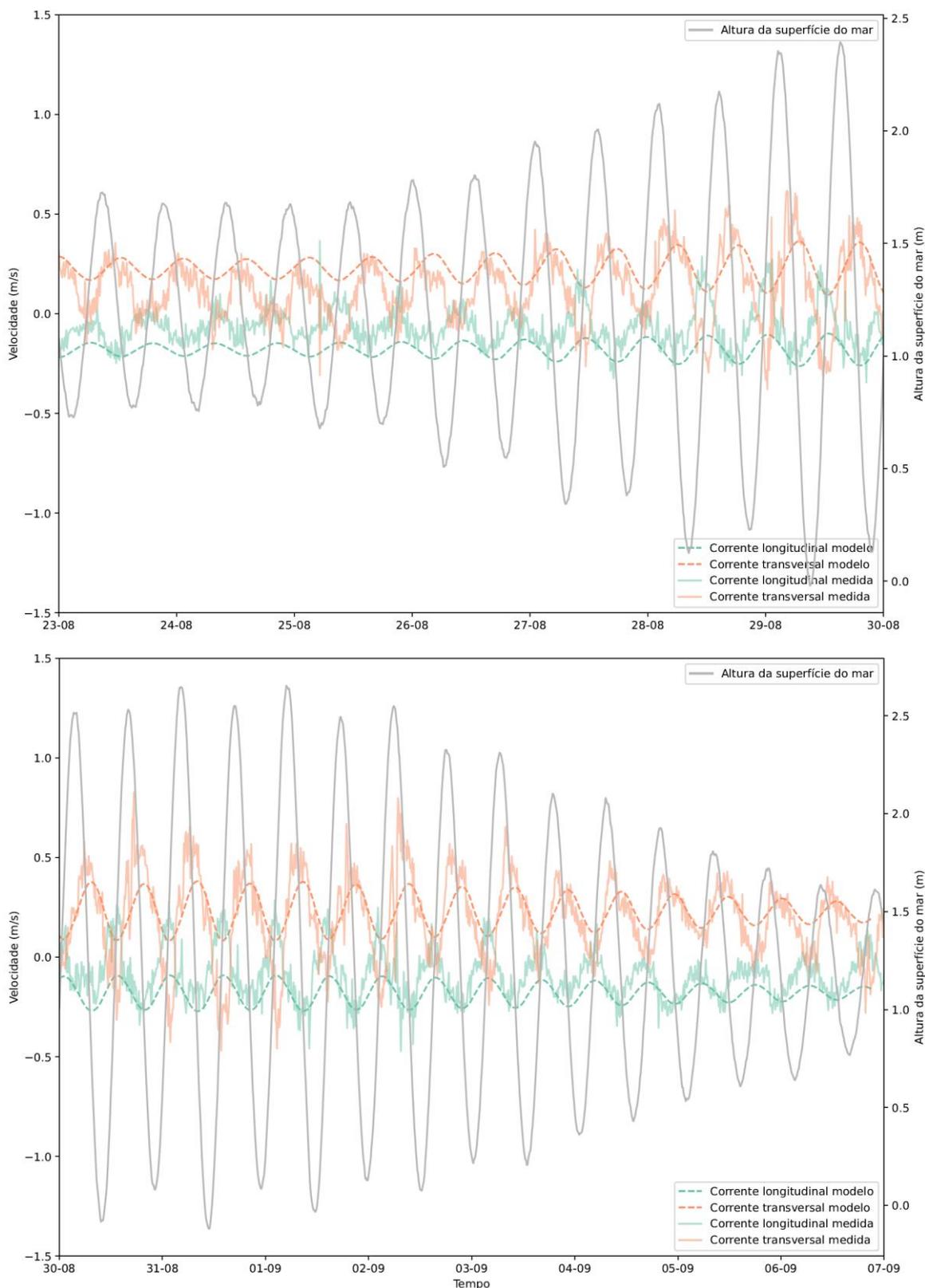
Figura 24 – Comparação da variação de direção da corrente (em graus), entre medição in situ (rosa direcional à esquerda) e resultados de modelo (rosa direcional à direita), durante o período com dados válidos para a modelagem hidrodinâmica (09 de agosto a 07 de setembro)



Fonte: O Autor, 2024

O vetor da velocidade da corrente foi decomposto para avaliação das correntes longitudinais e transversais considerando a variação da altura da superfície do mar. A concordância entre as correntes modeladas e medidas foi perceptível em termos de frequência, porém a variação da magnitude não foi tão bem representada. Ainda assim, houve relação entre a variação do nível do mar pela onda de maré e as correntes transversal e longitudinal do modelo, as últimas atingindo seus valores máximos na maré vazante e enchente respectivamente (Figura 25).

Figura 25 – Comparação da variação de velocidade da corrente longitudinal e transversal (em m/s), entre medição in situ (linhas contínuas) e resultados de modelo (linhas pontilhadas), justaposta à variação da elevação da superfície do mar, durante a maré de quadratura (23/08 a 30/08; gráfico superior) e maré de sizígia (30/08 a 07/09; gráfico inferior)



Fonte: O Autor, 2024

3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A seguir são apresentados os resultados dos testes de sensibilidade realizados para a avaliação de desempenho e compatibilidade do modelo hidrodinâmico, considerando a configuração do modelo onde se obtiveram os resultados mais satisfatórios.

Tabela 10 – Resultados obtidos por métricas de sensibilidade (RMSE, MAE, Skill) para parâmetros de modelagem hidrodinâmica: altura da superfície do mar (m) e velocidade da corrente (m/s), considerando o período de 09 de agosto a 07 de setembro

Métricas de sensibilidade	Altura da superfície (m)	Velocidade da corrente (m/s)
RMSE	0,060	0,116
MAE	0,045	0,097
Skill	0,999	0,720

Fonte: O Autor, 2024

O modelo apresentou um excelente parâmetro de Skill, segundo classificação de Allen, Somerfield e Gilbert (2007), tanto para a variação da altura da superfície do mar quanto para a variação da velocidade das correntes, indicando alta similaridade entre os resultados modelados e medidos.

A média dos valores medidos in situ da velocidade de corrente para o período de interesse foi de 0,27 m/s. Os erros representados pelos valores de RMSE e MAE são de aproximadamente 40,7% (RMSE) e 33,3% (MAE) da média dos valores reais, respectivamente. Logo o modelo apresentou um desempenho não muito satisfatório segundo essas métricas, sugerindo a ocorrência de variações significativas em diferentes momentos do período modelado. Ainda, o fato de o RMSE ser ligeiramente maior que o MAE sugere a presença de alguns erros maiores, uma vez que o RMSE dá mais peso a erros maiores devido ao seu cálculo quadrático. Contudo, mesmo que os erros da intensidade da corrente sejam razoáveis os resultados da simulação não são comprometidos devido ao valor alto do Skill (Hymans, 2022).

3.3.1 DESCRIÇÃO DE CENÁRIOS (DELFT3D FLOW)

A configuração do modelo hidrodinâmico (DELFT3D FLOW) que apresentou os melhores resultados de simulação quando comparados com os medidos *in situ* é descrita em listagem abaixo:

- a) Grade: Descrito em item 2.3.1.1 DOMÍNIO ESPACIAL.
- b) Uso de barragens finas (*thin damns*): Não
- c) Condições de contorno: Contorno oceânico paralelo à costa forçado por marés.
- d) Vento (forçante): Não
- e) Ondas (forçante): Não
- f) Descarga: Sim. Fluxo de 1031,18 m³/s.
- g) Fórmula de rugosidade: Chezy
- h) Valor de rugosidade: 30 x 30
- i) *Time step*: 1 minuto

Vale ressaltar que demais parâmetros configuráveis no arquivo de *setup* do modelo hidrodinâmico FLOW não listados acima não foram modificados, ou seja, os valores padrões do Delft3D foram mantidos. Em Apêndice C são apresentados os demais cenários realizados e os valores de RMSE, MAE e Skill correspondentes.

3.4 MODELAGEM DE DISPERSÃO DE ÓLEO

Nesta seção os resultados e comportamento da dispersão de óleo durante os dois cenários modelados serão analisados em detalhe. Primeiramente, são apresentados os resultados do transporte de óleo superficial, os processos de intemperismos atuantes e a sedimentação do óleo para o cenário com o regime de maré de quadratura, seguido do cenário com o regime de maré de sizígia. Logo, são analisadas as diferenças entre os cenários. Finalmente é realizada uma análise qualitativa das localidades atingidas por óleo em 2019 (IBAMA, 2019) no contexto dos cenários modelados.

3.4.1 CENÁRIO 1 – MARÉ DE QUADRATURA

3.4.1.1 DISPERSÃO DE ÓLEO EM SUPERFÍCIE

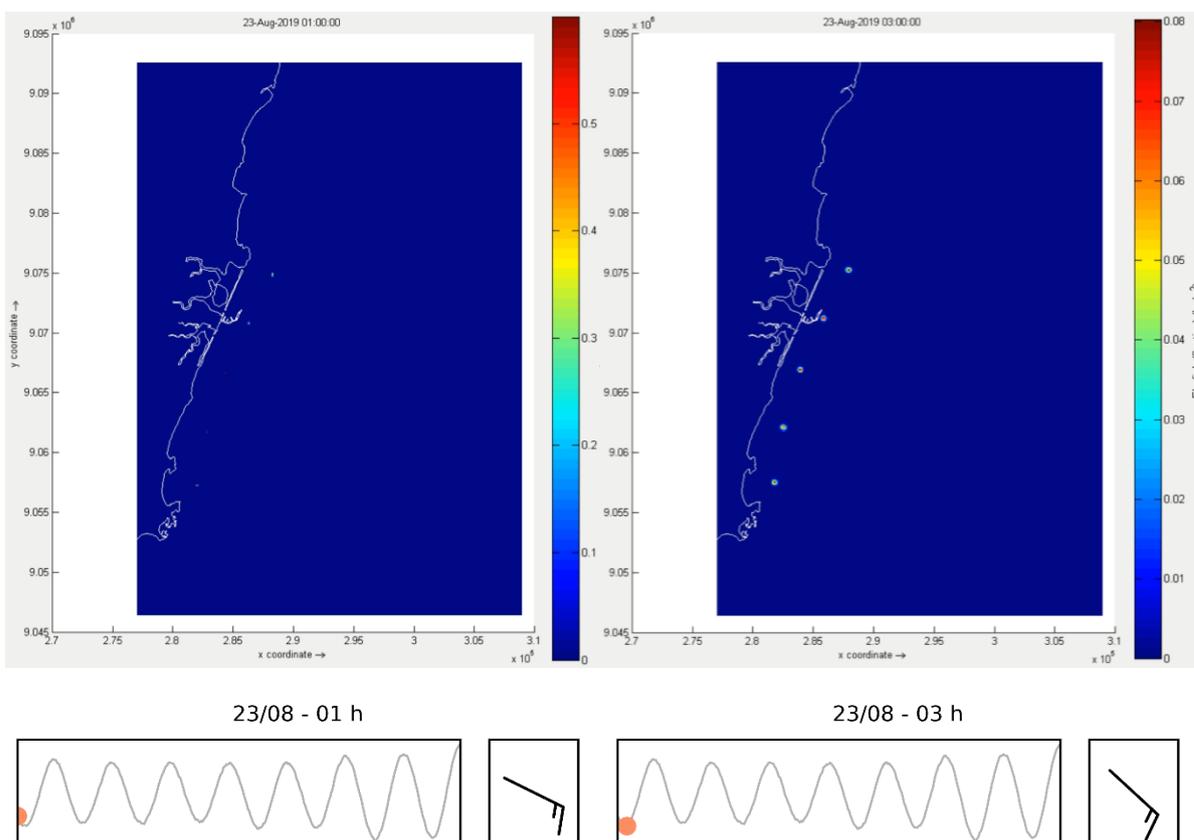
O cenário 1 foi realizado entre os dias 23 e 30 de agosto de 2019, iniciando em regime de maré de quadratura. O modelo de dispersão de óleo iniciou à 1 am do dia 23 de agosto, próximo a maré baixa e sob influência de ventos de sudeste de aproximadamente 15 nós, como indicado na Figura 26. Com o início da simulação as partículas de óleo, divididas em 5 grupos correspondentes aos diferentes locais de 'soltura' (*release*) do óleo, iniciaram o deslocamento para noroeste em direção ao litoral. Em menos de 3 horas houve o primeiro contato entre as partículas e o molhe do Porto de Suape. Em seguida, aproximadamente 6 horas após o início da simulação ocorreu o contato com o recife de arenito localizado a frente da baía do rio Ipojuca, e uma hora mais tarde as demais 'manchas', também chamadas de fragmentos (*patches*), de óleo atingiram o litoral. Os locais atingidos foram: recifes e a praia de Porto de Galinhas, assim como os costões rochosos localizados ao sul do município de Cabo de Santo Agostinho. Durante o período da simulação descrito o vento se manteve com a direção constante de sudeste e entre 10 e 15 nós.

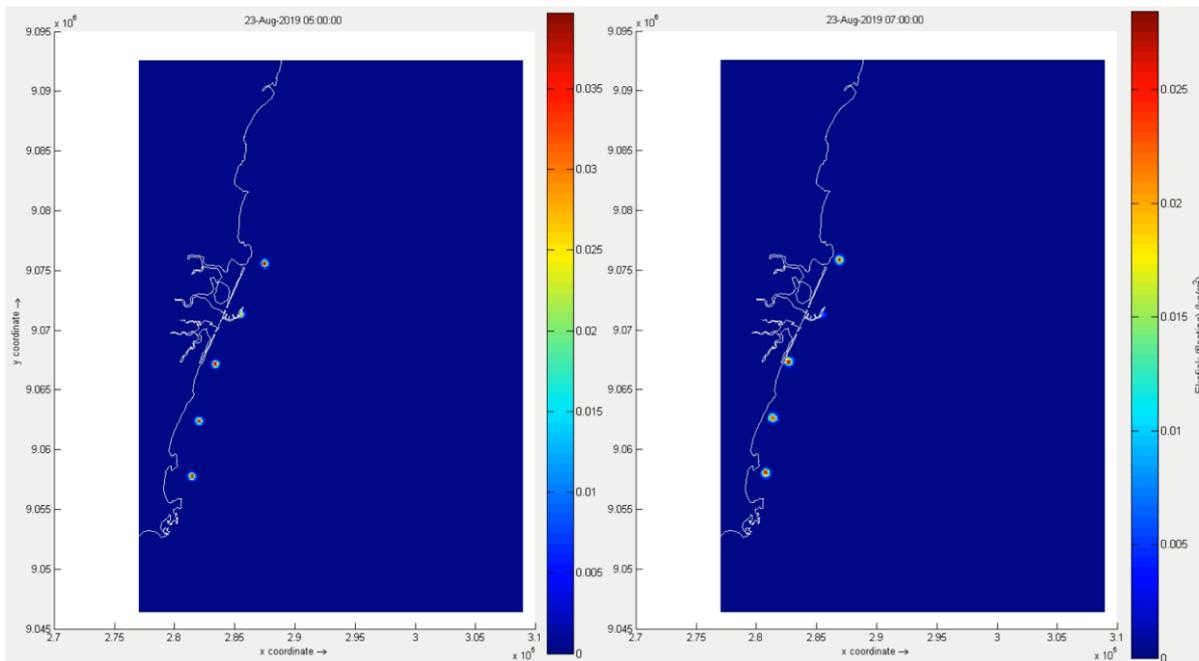
Às 9 am, em maré alta, os fragmentos começaram a se espalhar em direção sul, após mudança da direção do vento para leste. Considerando a inclinação da costa é esperada a promoção de correntes paralelas à costa com a ocorrência de ventos do quadrante Norte-Leste. As manchas localizadas no entorno mais próximo do Porto de Suape às 12 pm já não são visíveis nos mapas de dispersão, indicando valores mínimos de concentração e processos de intemperismo e sedimentação predominando sobre o óleo em superfície. Durante as horas seguintes as manchas continuaram a se espalhar a sul, com constante diminuição da concentração de óleo em superfície e ventos de sudeste que predominaram até o final do período de simulação. Às 9 pm os fragmentos localizados a frente das praias de Maracaípe e Porto de Galinhas atingiram suas extensões máximas de aproximadamente 1,5 a 2 km, antes da alteração na direção do fluxo para norte. A mancha de óleo às 10 am do dia 24/08 é contínua, entretanto vale ressaltar que as concentrações de óleo nesse momento não ultrapassam o valor de 0,0035 kg/m². O espalhamento da mancha atinge sua extensão máxima entre Maracaípe e a praia de Cupe (aproximadamente 10 km) no início do dia 25/08. A partir desse momento até o dia 26/08 a posição da

mancha é estável, e sua concentração em superfície continua diminuindo. No dia 26/08 o intemperismo via entranhamento e sedimentação do óleo são evidentes resultando em manchas isoladas em superfície entre Porto de Galinhas e Cupe, com concentrações na ordem de $0,00006 \text{ kg/m}^2$. Finalmente, ao final do dia os fragmentos se encontram apenas em Porto de Galinhas e no dia 27/08 já não há óleo em superfície.

Figura 26 – Mapas de dispersão de óleo em superfície (kg/m^2) na área de estudo, referente ao cenário 1 (23 a 30/08 de 2019). Abaixo de cada mapa são ilustradas a altura da superfície do mar e as barbelas de vento (*wind barbs*) respectivas ao horário de representação do mapa. As velocidades do vento são representadas por: pequena linha (barbela) a qual representa 5 nós cada; linha longa (pena) a qual representa 10 nós cada. A direção do vento é indicada pela orientação da linha

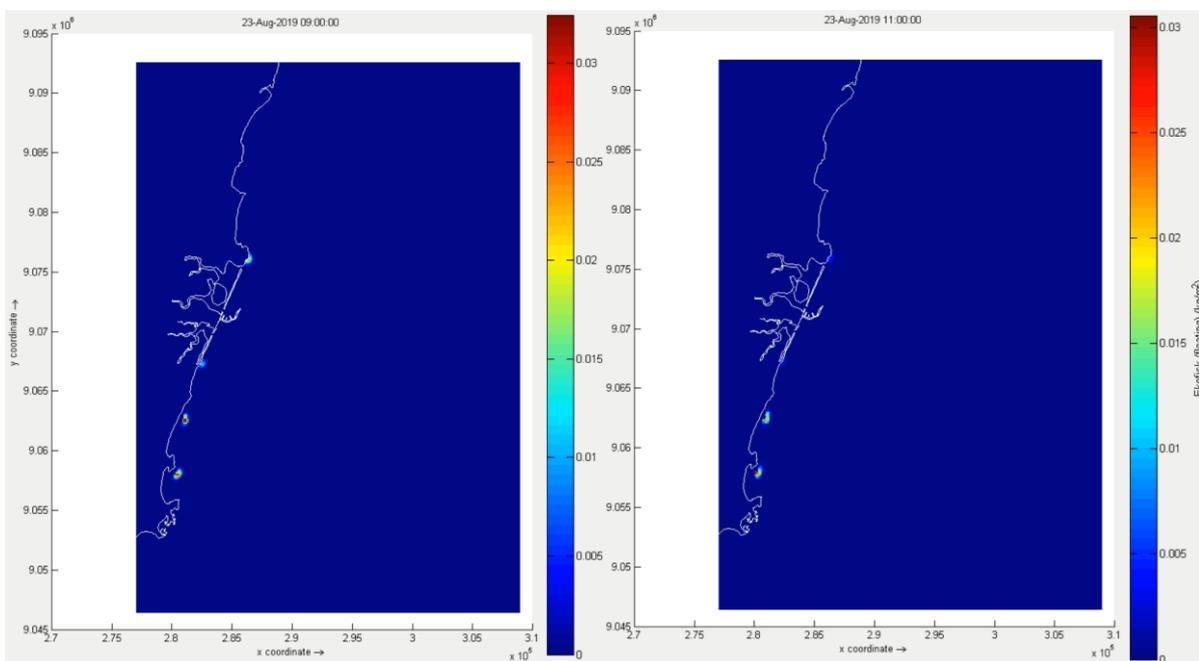
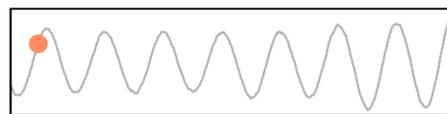
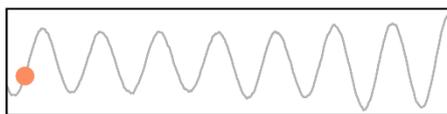
principal





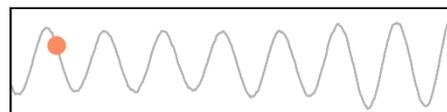
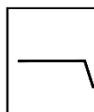
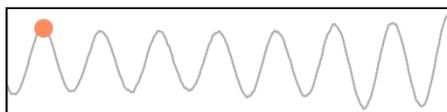
23/08 - 05 h

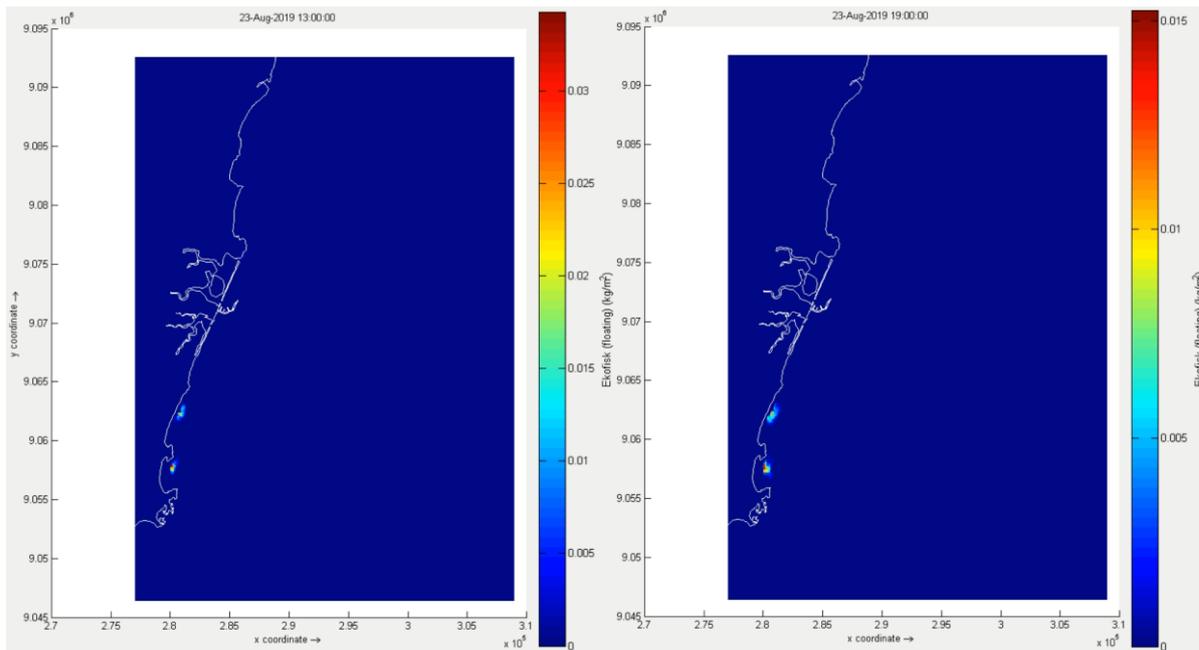
23/08 - 07 h



23/08 - 09 h

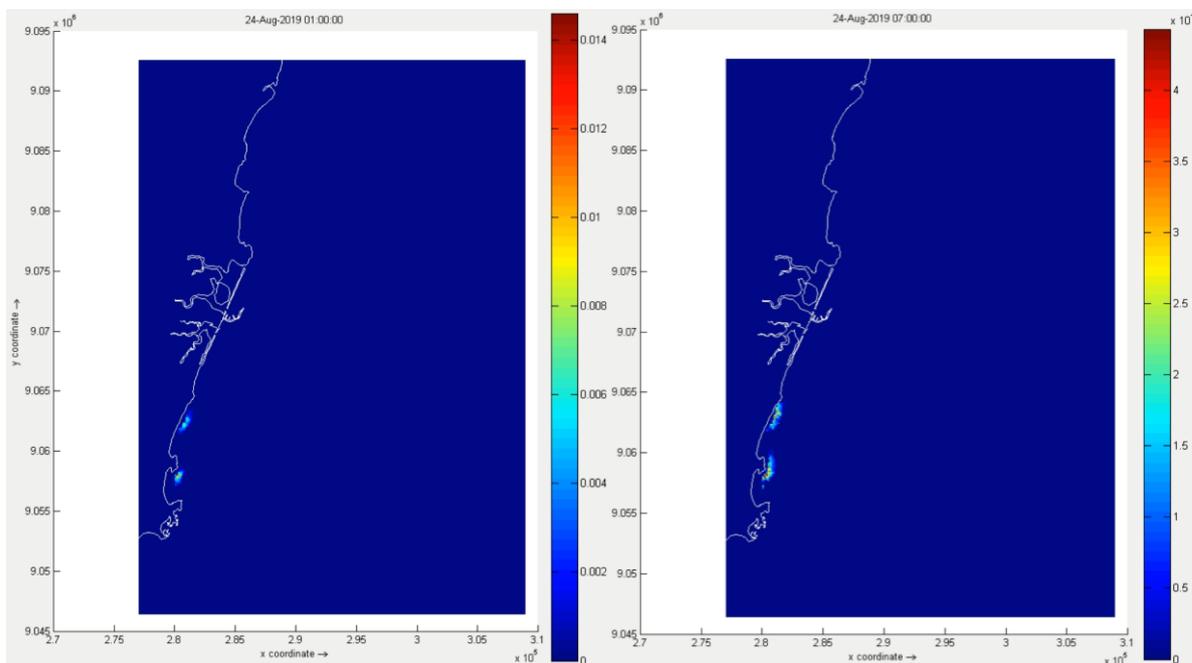
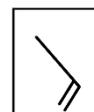
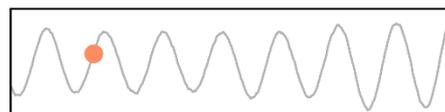
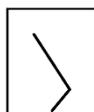
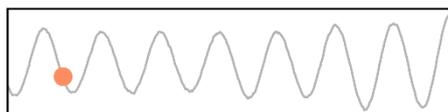
23/08 - 11 h





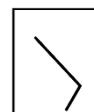
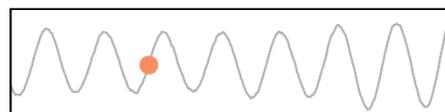
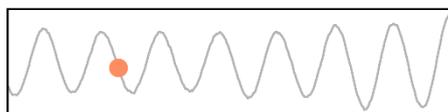
23/08 - 13 h

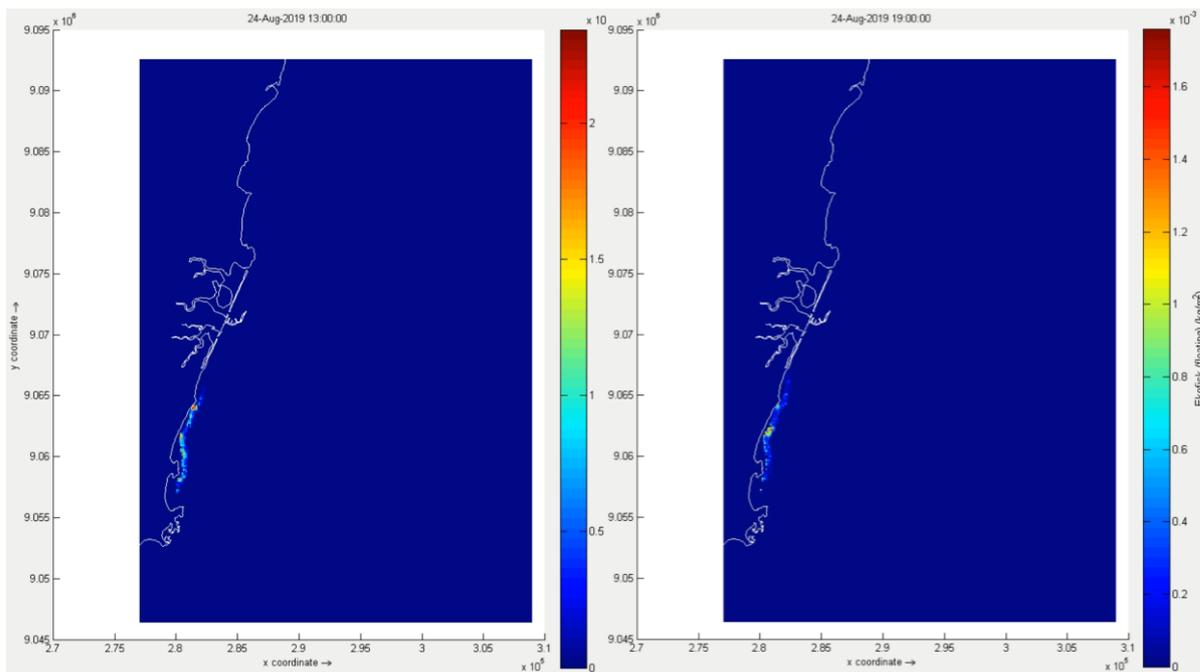
23/08 - 19 h



24/08 - 01 h

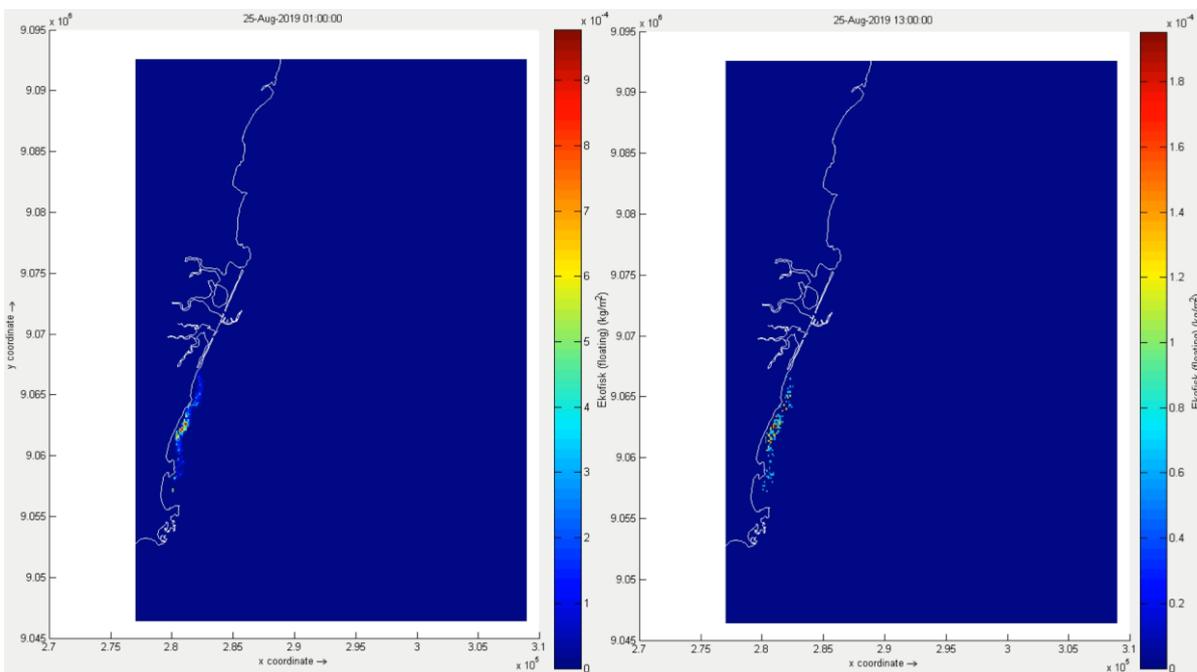
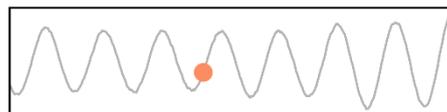
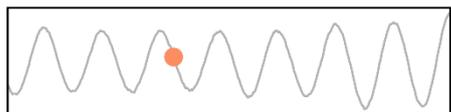
24/08 - 07 h





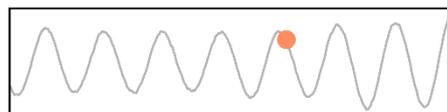
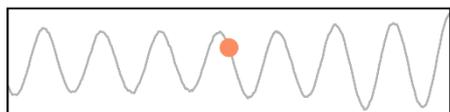
24/08 - 13 h

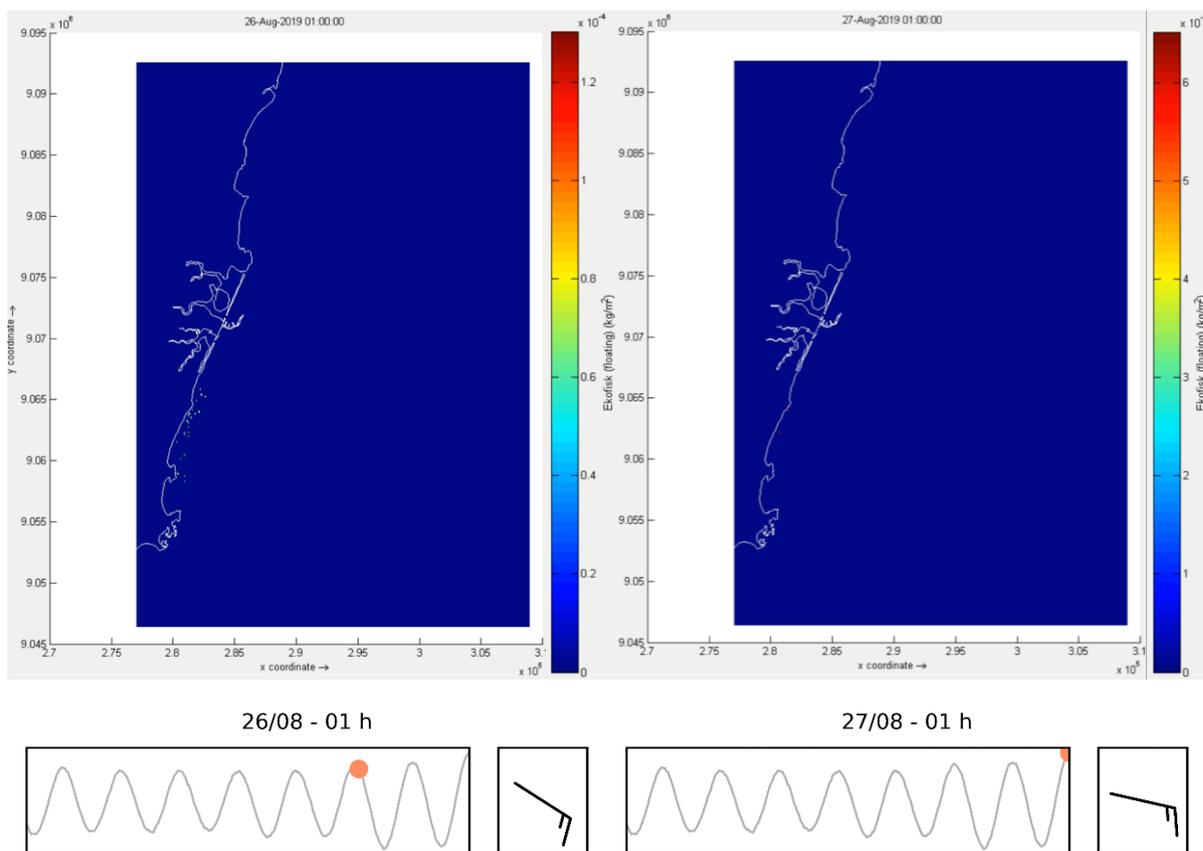
24/08 - 19 h



25/08 - 01 h

25/08 - 13 h



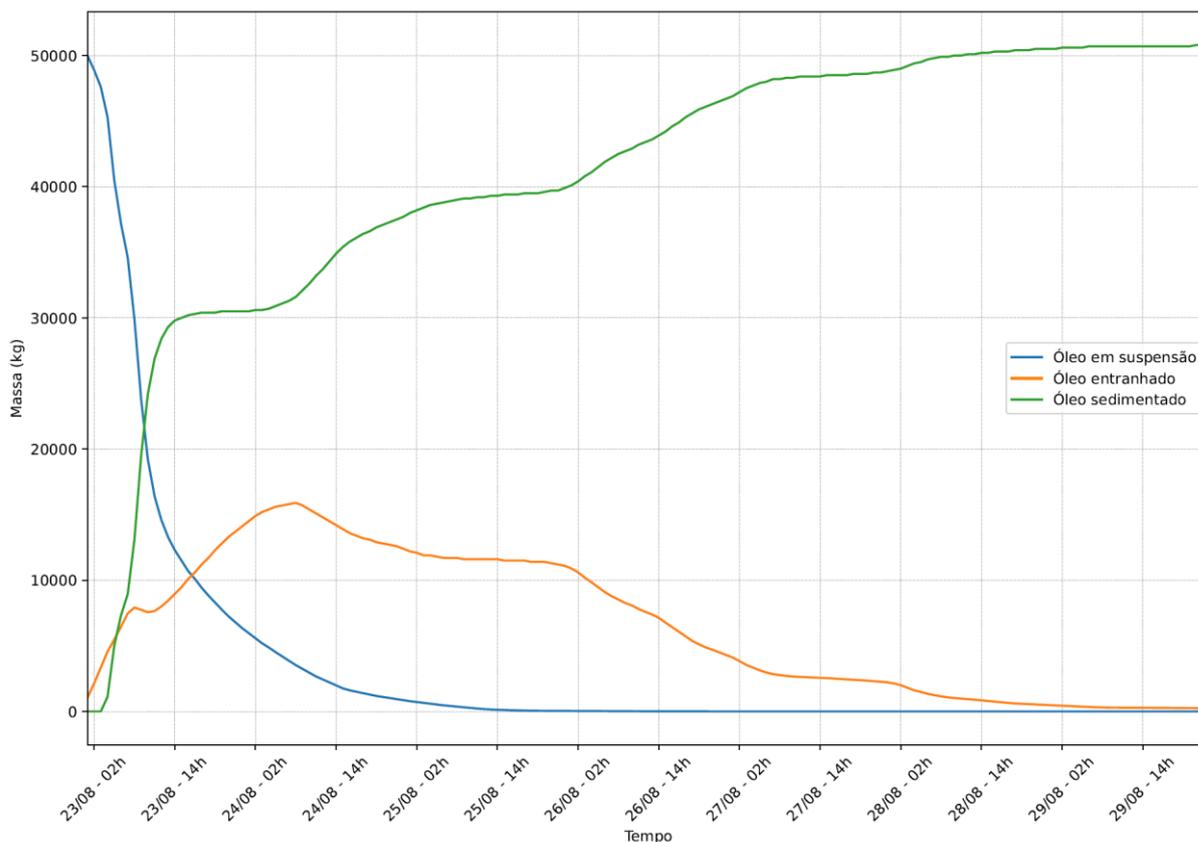


Fonte: O Autor, 2024

3.4.1.2 INTEMPERISMO E SEDIMENTAÇÃO DO ÓLEO

Os processos de intemperismo observados nos resultados do modelo foram o espalhamento (difusão) e o entranhamento. A caracterização do espalhamento atuante no transporte horizontal do óleo em superfície foi descrita em item anterior. Não foi observada emulsificação nos resultados obtidos. Isto pode ser explicado pela ausência de evaporação nos processos de intemperismo. Segunda Fingas (2012) diversos óleos crus/pesados devem passar pelo processo de evaporação antes de sofrerem a emulsificação. Vale ressaltar, que o óleo coletado no sedimento em 2019 foi caracterizado como minimamente degradado por processos de evaporação, dissolução e biodegradação após análise em cromatograma (Lourenço *et al.*, 2020).

Figura 27 – Série temporal da massa total de óleo em suspensão, entranhado e sedimentado, obtida no cenário 1 (23 a 30/08 de 2019)



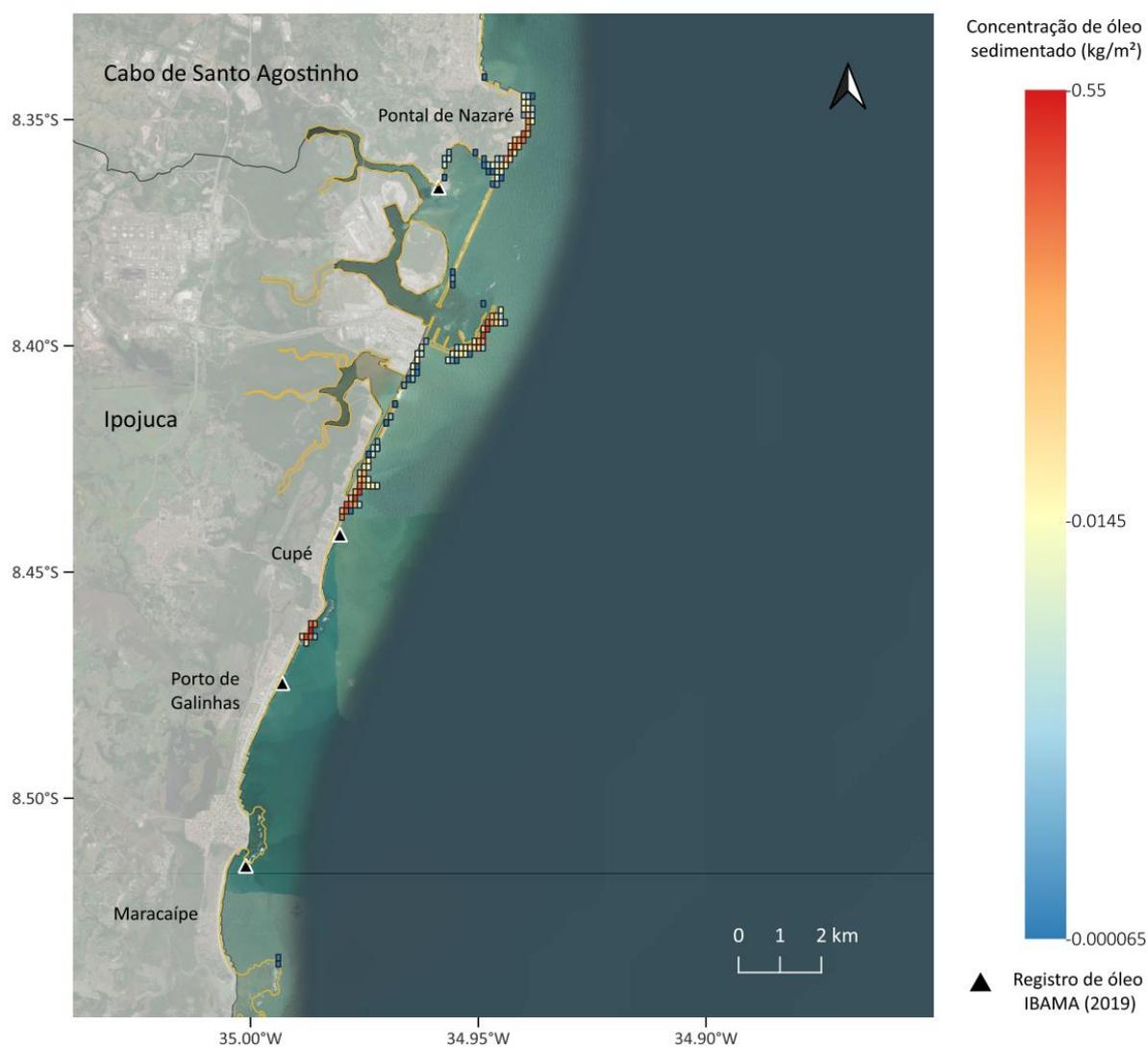
Fonte: O Autor, 2024

Processos de intemperismo ocorrem após derramamentos de óleo em taxas variáveis. Neste cenário, a taxa de entranhamento teve um aumento gradual com o tempo, atingindo seu valor máximo (~15 ton) após 31 horas do início da simulação, aproximadamente. A massa total sedimentada é inexistente durante as primeiras horas, com aumento expressivo após o toque de óleo na costa. O óleo entranhado aumenta de densidade promovendo a sedimentação (Keramea *et al.*, 2021). Além disso, o óleo entranhado está principalmente concentrado próximo à costa (praia de Porto de Galinhas, zona entremarés) no dia 26/08, promovendo sua sedimentação. Este processo é observado após declínio da massa de óleo entranhado e incremento da massa de óleo sedimentado.

3.4.1.2.1 SEDIMENTAÇÃO

O óleo foi depositado apenas em zonas litorâneas (Guilcher, 1955) como indicado na Figura 28. Após entrar em contato com os ambientes costeiros o óleo foi sedimentando gradualmente. O molhe do Porto de Suape foi o primeiro local com deposição de óleo, seguido dos recifes areníticos na seção externa do estuário do rio Ipojuca, e pelos costões rochosos que ocupam o Pontal de Nazaré. Em seguida o óleo ao adentrar a Baía de Suape também é sedimentado, unicamente na seção norte da baía, na praia de Suape. Após 27 horas de iniciada a simulação há a deposição de óleo na praia de Porto de Galinhas, onde ocorreu a maior concentração de óleo sedimentado registrada no presente cenário. A seguir um mapa ilustrando as áreas afetadas e as concentrações de óleo sedimentado correspondentes.

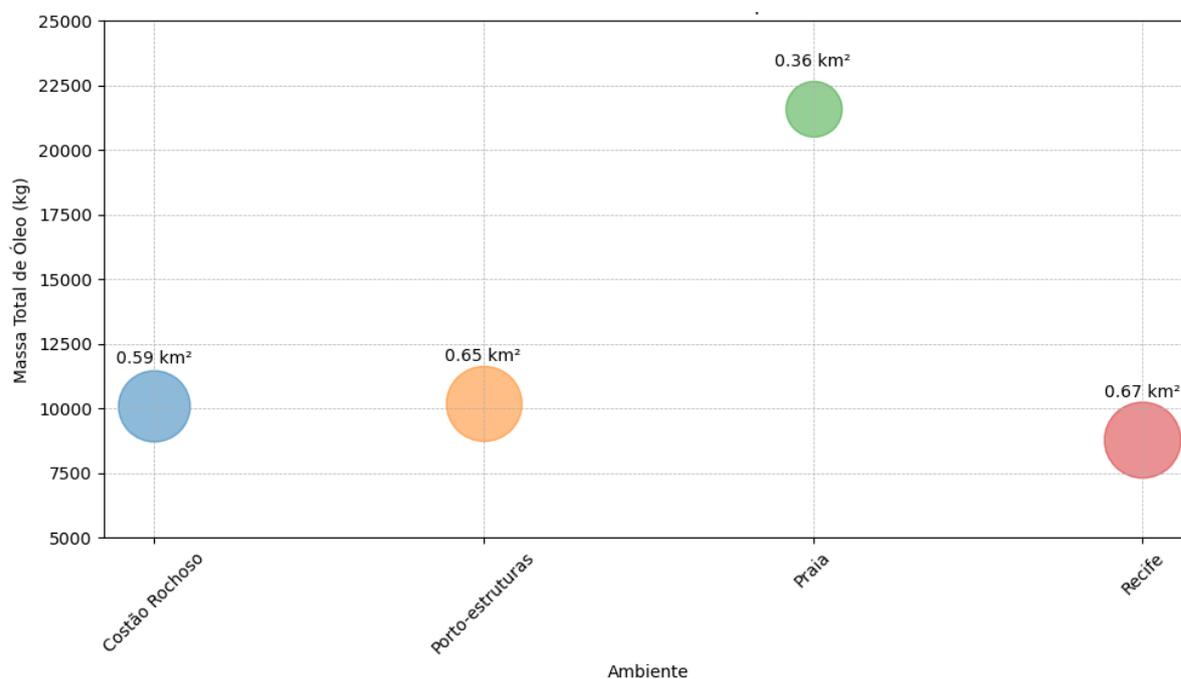
Figura 28 – Mapa com distribuição da concentração de óleo sedimentado na área de estudo (kg/m^2), correspondente ao cenário 1 (23 a 30/08 de 2019)



Fonte: O Autor, 2024

Os valores de massa totais de óleo sedimentado por ambiente variaram entre 8800 e 21500 kg, sendo os recifes os ambientes com menor massa depositada, seguido dos costões rochosos (10117 kg), das estruturas portuárias (10176 kg) e finalmente pelas praias (Figura 29). A menor área afetada foi a das praias (0,36 km^2), que variou significativamente dos demais ambientes onde as extensões afetadas foram similares entre si: costão rochoso (0,59 km^2), estruturas portuárias (0,65 km^2) e recifes (0,67 km^2). Assim, o ambiente com maior concentração de óleo por m^2 foram as praias, com uma média de 0,06 kg/m^2 , enquanto os outros ambientes variaram entre 0,013 e 0,017 kg/m^2 .

Figura 29 – Massa total de óleo e área afetada por cada ambiente impactado resultante do cenário 1 (23 a 30/08 de 2019). O tamanho de cada símbolo circular equivale a área afetada, a qual também está indicada em numeral



Fonte: O Autor, 2024

3.4.2 CENÁRIO 2 – MARÉ DE SIZÍGIA

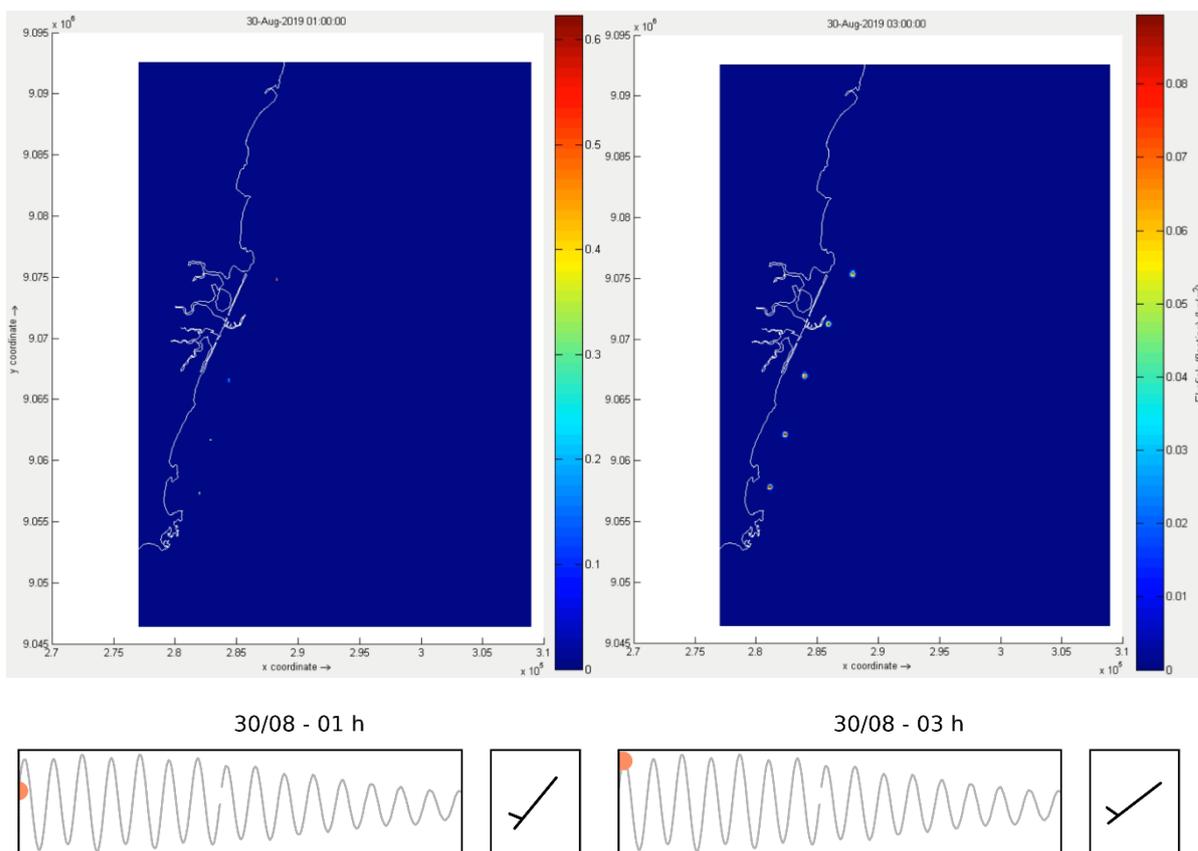
3.4.2.1 DISPERSÃO DE ÓLEO EM SUPERFÍCIE

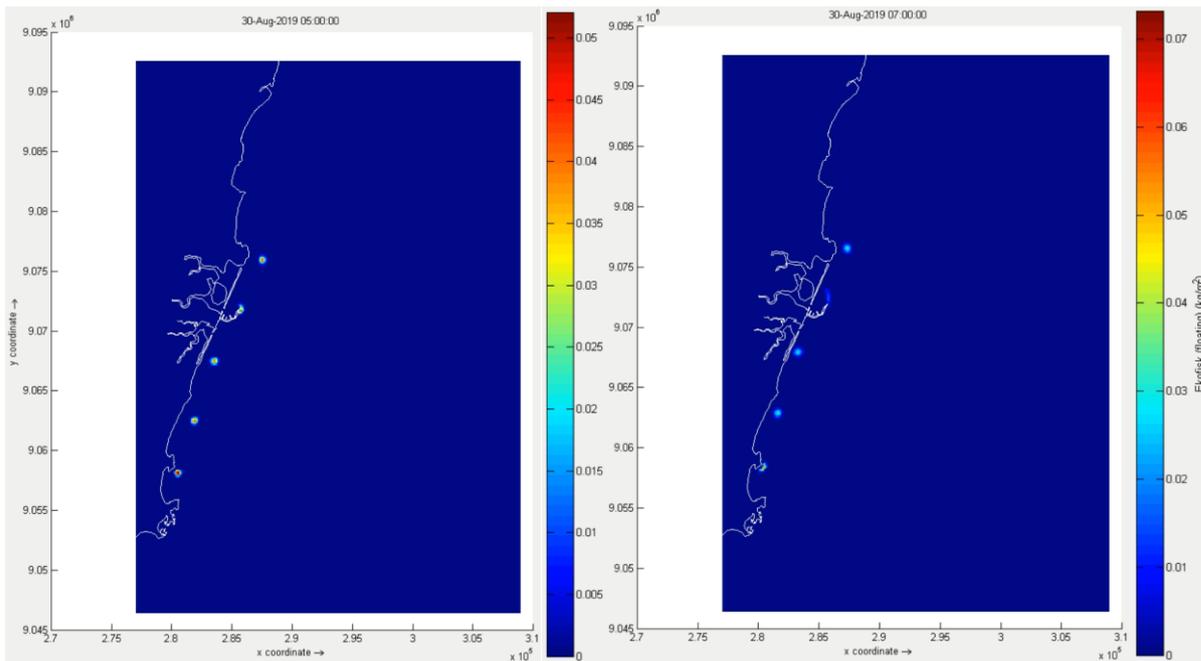
O cenário 2 foi realizado entre os dias 30 de agosto e 07 de setembro de 2019, iniciando em regime de maré de sizígia. O modelo de dispersão de óleo iniciou à 1 am do dia 30 de agosto, em maré enchente e sob influência de ventos de sudoeste de aproximadamente 5 nós, como indicado na Figura 30. Com o início da simulação as partículas de óleo, divididas em 5 grupos correspondentes aos diferentes locais de ‘soltura’ (*release*) do óleo, iniciaram o deslocamento para noroeste em direção ao litoral. Em menos de 3 horas houve o primeiro contato entre as partículas e o molhe do Porto de Suape.

Em seguida, aproximadamente 4 horas após o início da simulação ocorreu o contato com os recifes de Porto de Galinhas, enquanto o fragmento (*patch*) de óleo próximo ao molhe do Porto de Suape iniciou seu espalhamento para norte. Às 8 am o recife de arenito a frente da baía do rio Ipojuca foi atingido pelo óleo. Ainda, com o início do espalhamento dos fragmentos, estes foram deslocados a norte, enquanto a

direção do vento nesse intervalo de tempo (primeiras 8 horas de simulação) variou entre sudoeste e sul, promovendo essa direção de deriva. Às 10 am aproximadamente o fragmento mais próximo de Cupe atingiu o litoral, enquanto o fragmento mais ao norte continuou seu deslocamento com toque parcial no Pontal de Nazaré (ambiente de terraços expostos de declividade média e costões rochosos lisos) até o início da praia de Gaibu, no município de Santo Agostinho. À 1 pm após a trajetória das manchas a norte, os dois fragmentos localizados próximos as entradas da baía de Suape e do estuário do rio Ipojuca penetraram estes ambientes com forçantes favoráveis para isso, maré enchente e vento de leste. Ao mesmo tempo as manchas localizadas a sul em recifes de Porto de Galinhas e no Pontal de Cupe aumentaram a sua extensão a norte pelo espalhamento sofrido. Às 9 pm o fragmento a norte atinge os recifes e praia da Enseada dos Corais, no município de Santo Agostinho. Até às 7 am do dia 31/08 a mancha a sul manteve uma posição estável, com extensão de 10 km aproximadamente, ressaltando que as concentrações superficiais neste momento atingiam no máximo $0,0035 \text{ kg/m}^2$. Os demais fragmentos já não estavam em superfície, indicando o intemperismo do óleo via entranhamento e/ou sedimentação. No dia 01/09 a mancha que se estendia por 12 km aproximadamente deslocou-se a sul até atingir o Pontal de Maracaípe, os ventos nesse dia foram predominantemente de nordeste e leste. Este fragmento de óleo continuou a sofrer processos de intemperismo e sedimentação, e sua extensão foi diminuindo de norte a sul, deixando de ocupar a praia do Cupe e se localizando entre Porto de Galinhas e Maracaípe até o final da simulação (07/09) com apenas ocorrência de manchas isoladas de baixa concentração ($0,00006 \text{ kg/m}^2$).

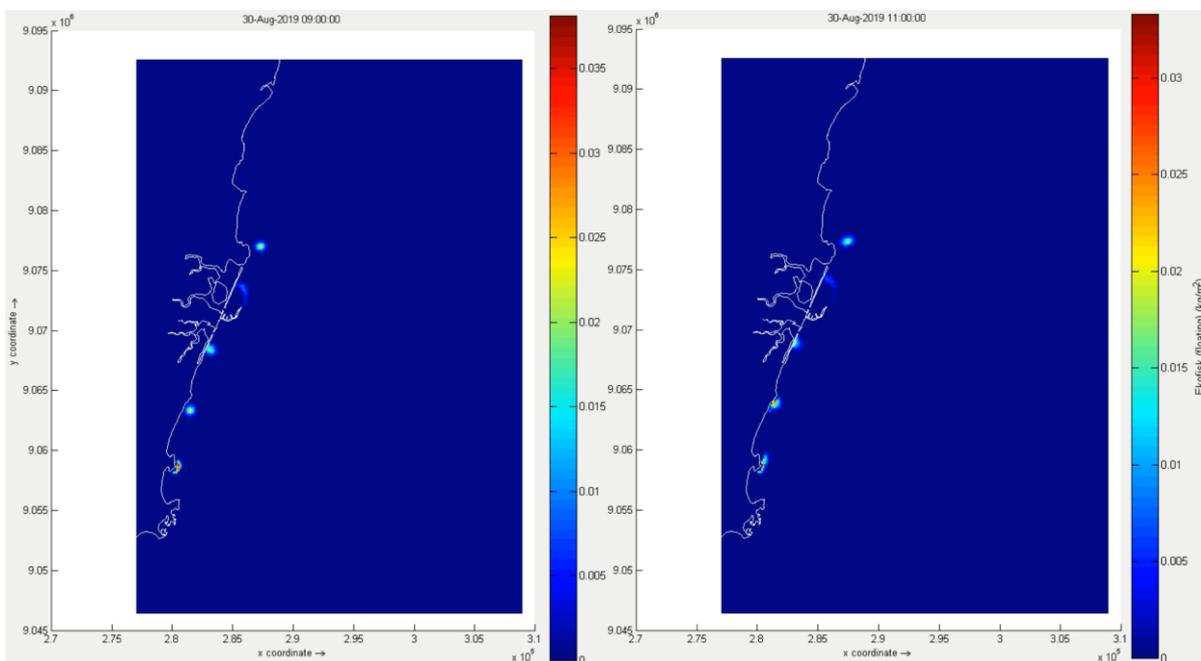
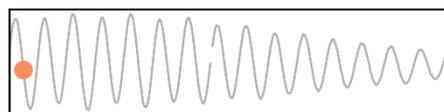
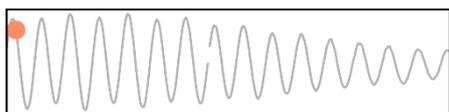
Figura 30 – Mapas de dispersão de óleo em superfície (kg/m^2) na área de estudo, referente ao cenário 2 (30/08 a 07/09 de 2019). Abaixo de cada mapa são ilustradas a altura da superfície do mar e as barbelas de vento (*wind barbs*) respectivas ao horário de representação do mapa. As velocidades do vento são representadas por: pequena linha (barbela) a qual representa 5 nós cada; linha longa (pena) a qual representa 10 nós cada. A direção do vento é indicada pela orientação da linha principal





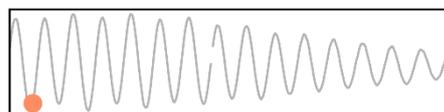
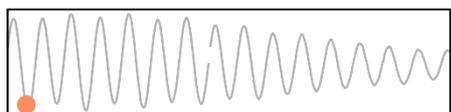
30/08 - 05 h

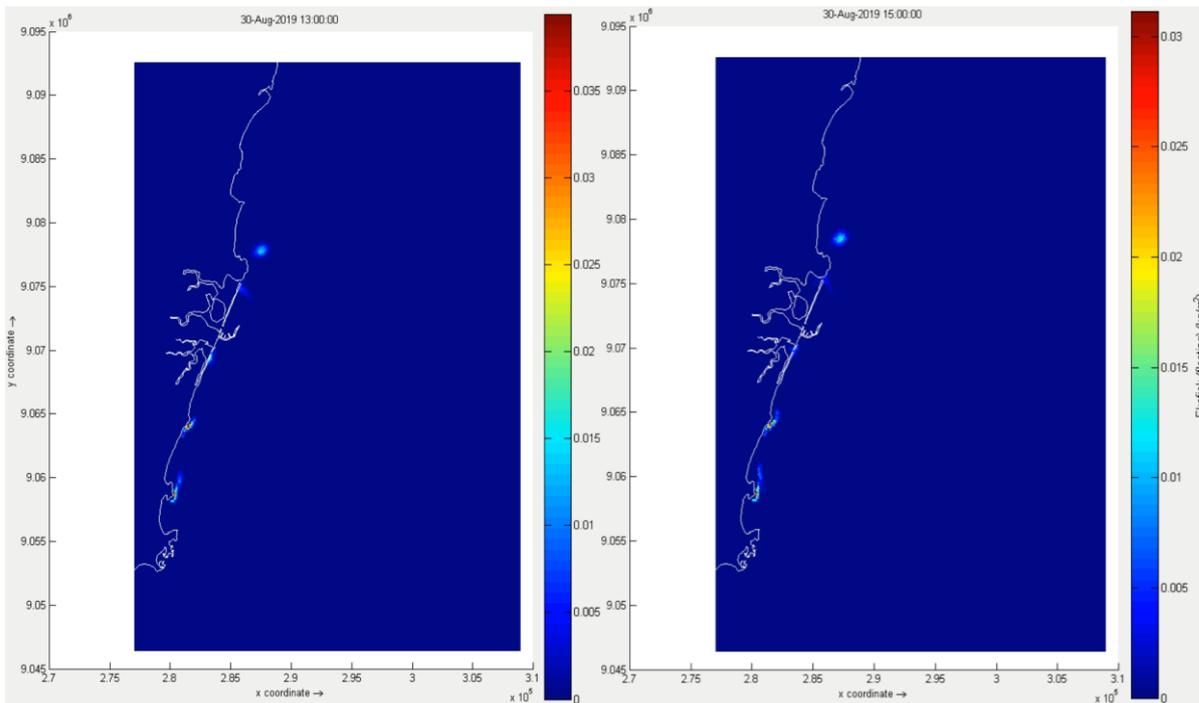
30/08 - 07 h



30/08 - 09 h

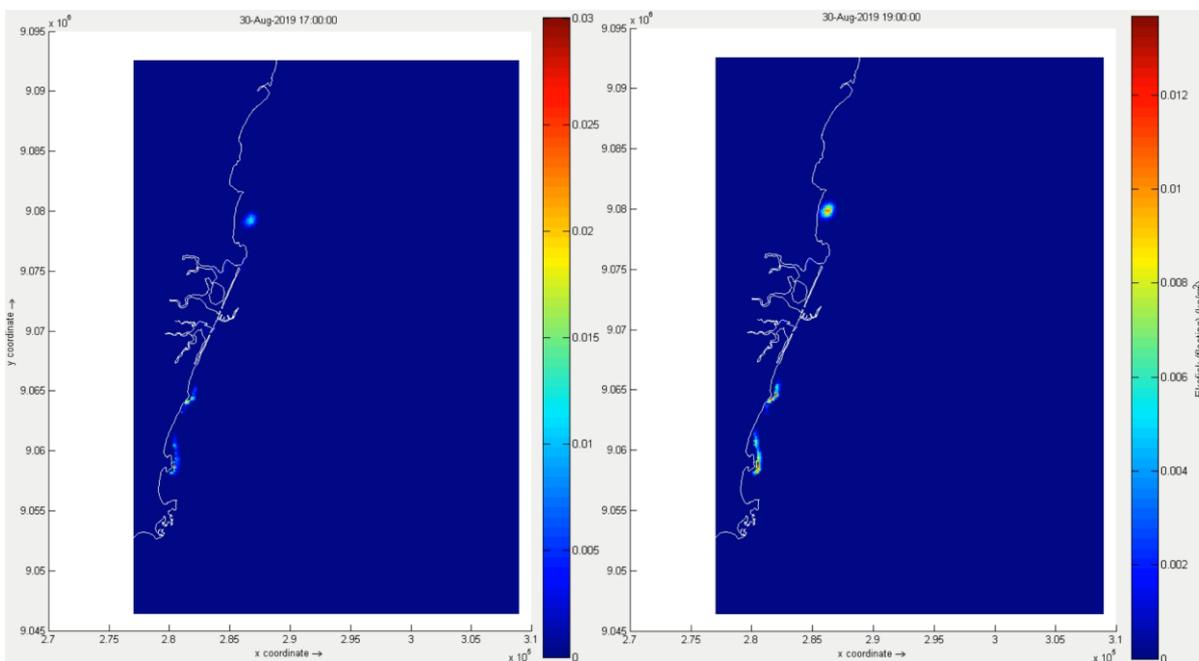
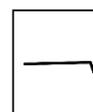
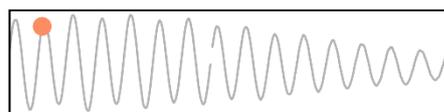
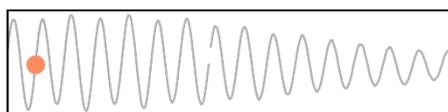
30/08 - 11 h





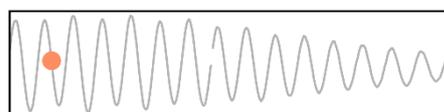
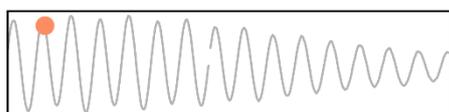
30/08 - 13 h

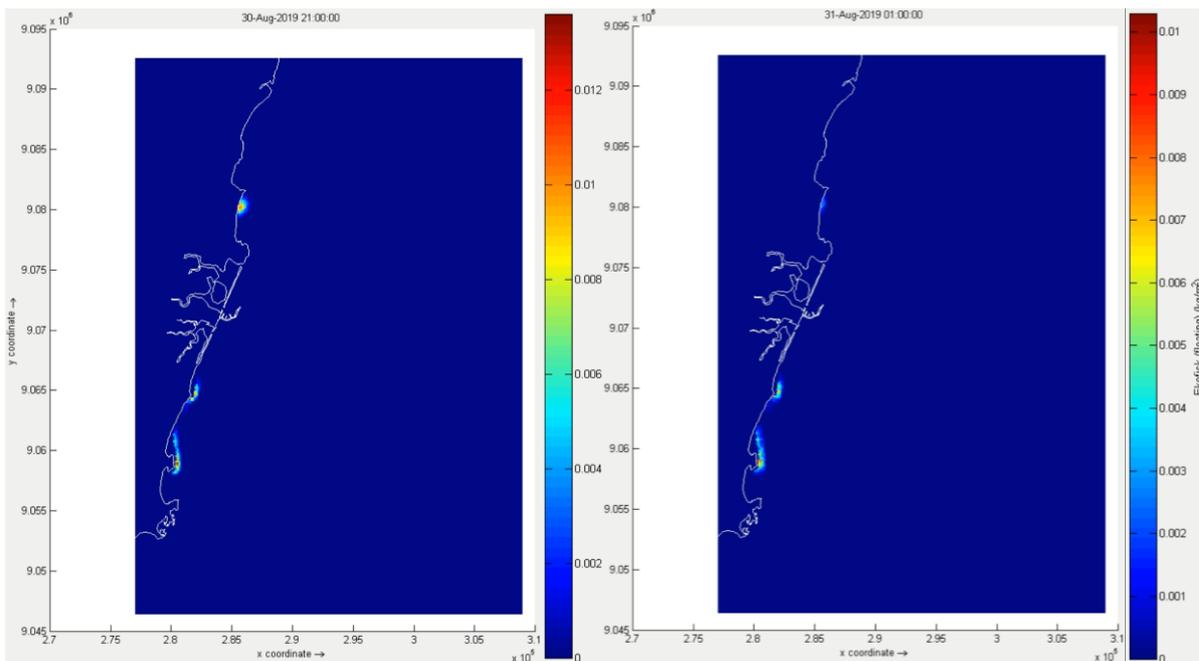
30/08 - 15 h



30/08 - 17 h

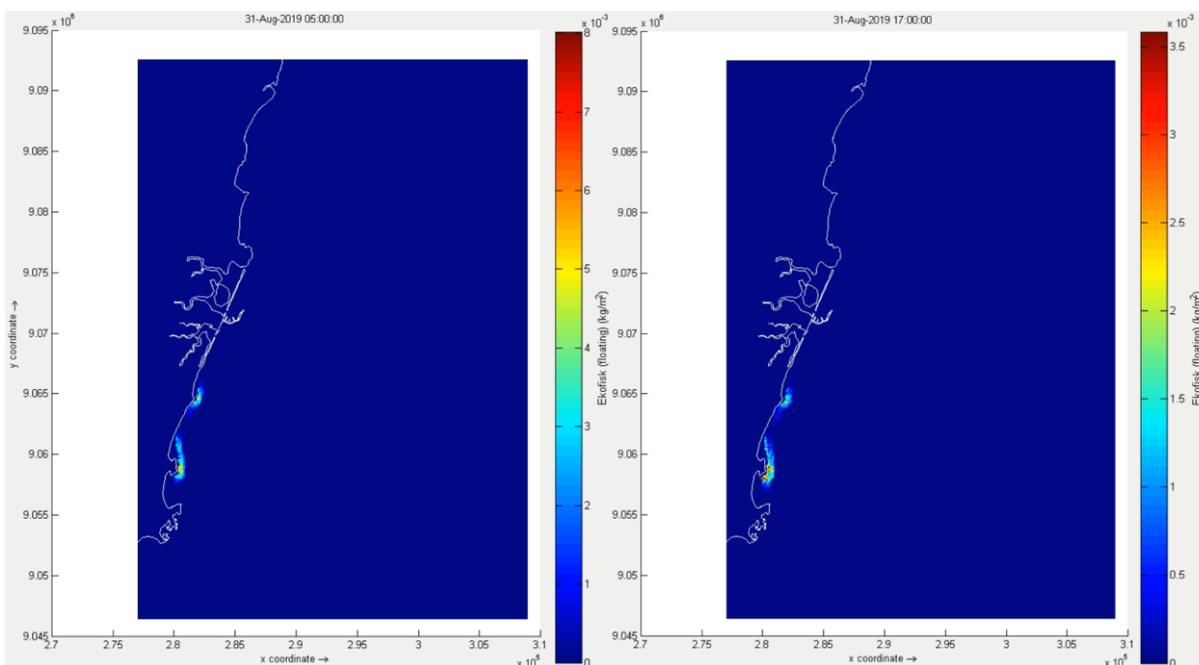
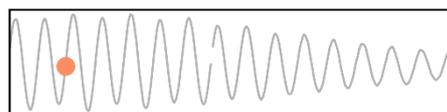
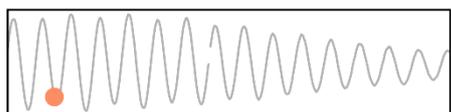
30/08 - 19 h





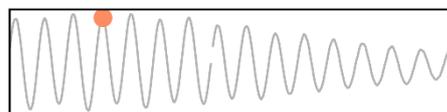
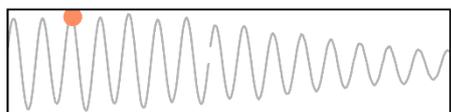
30/08 - 21 h

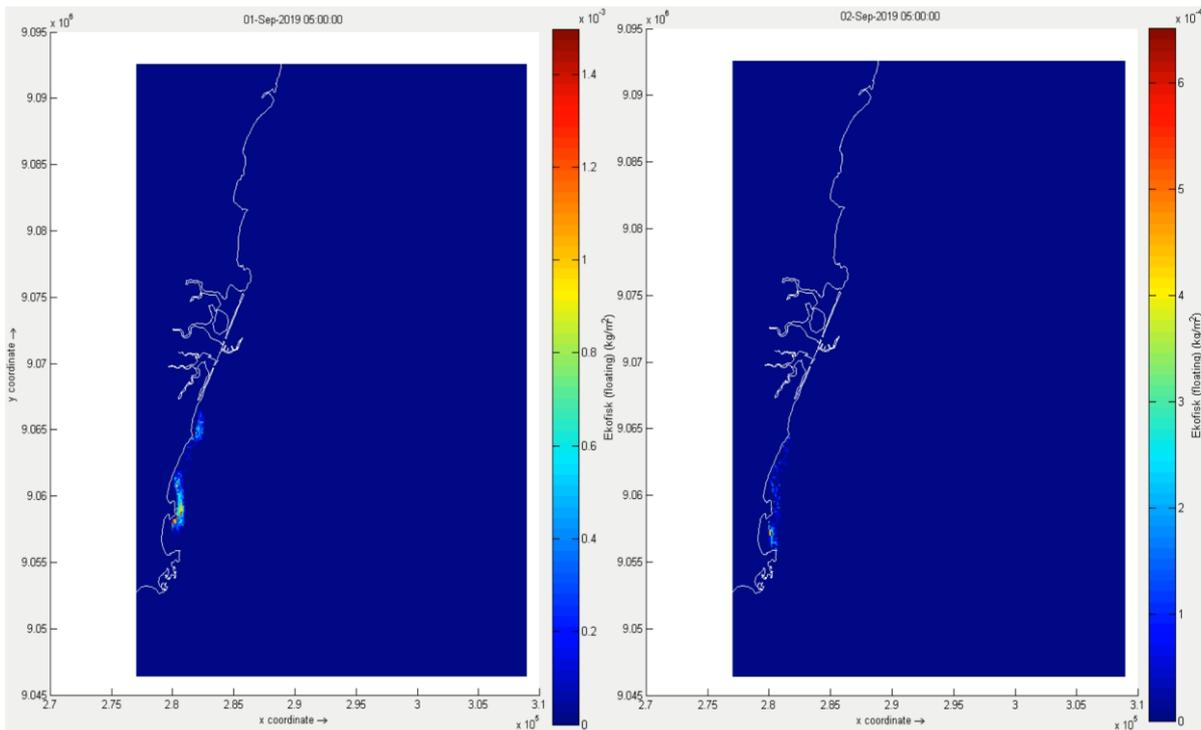
31/08 - 01 h



31/08 - 05 h

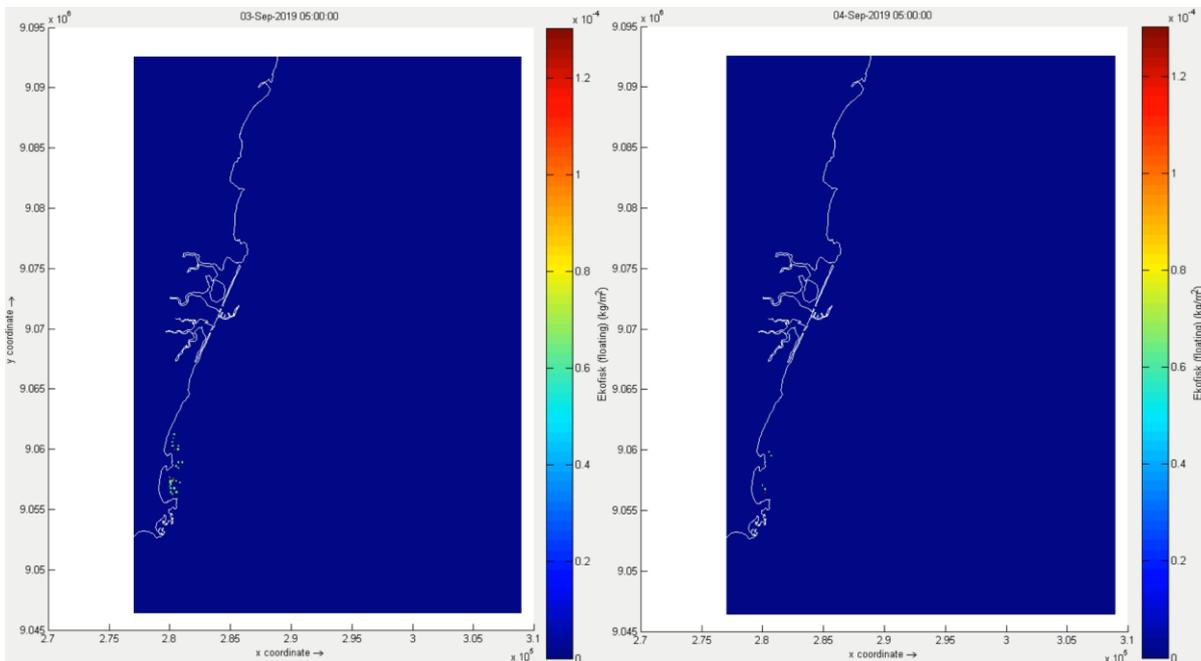
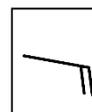
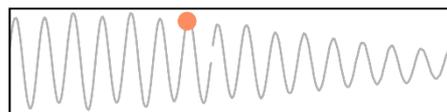
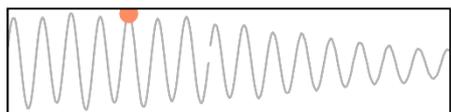
31/08 - 17 h





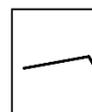
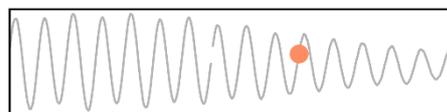
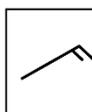
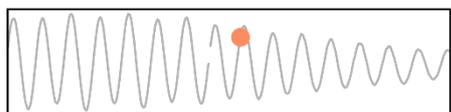
01/09 - 05 h

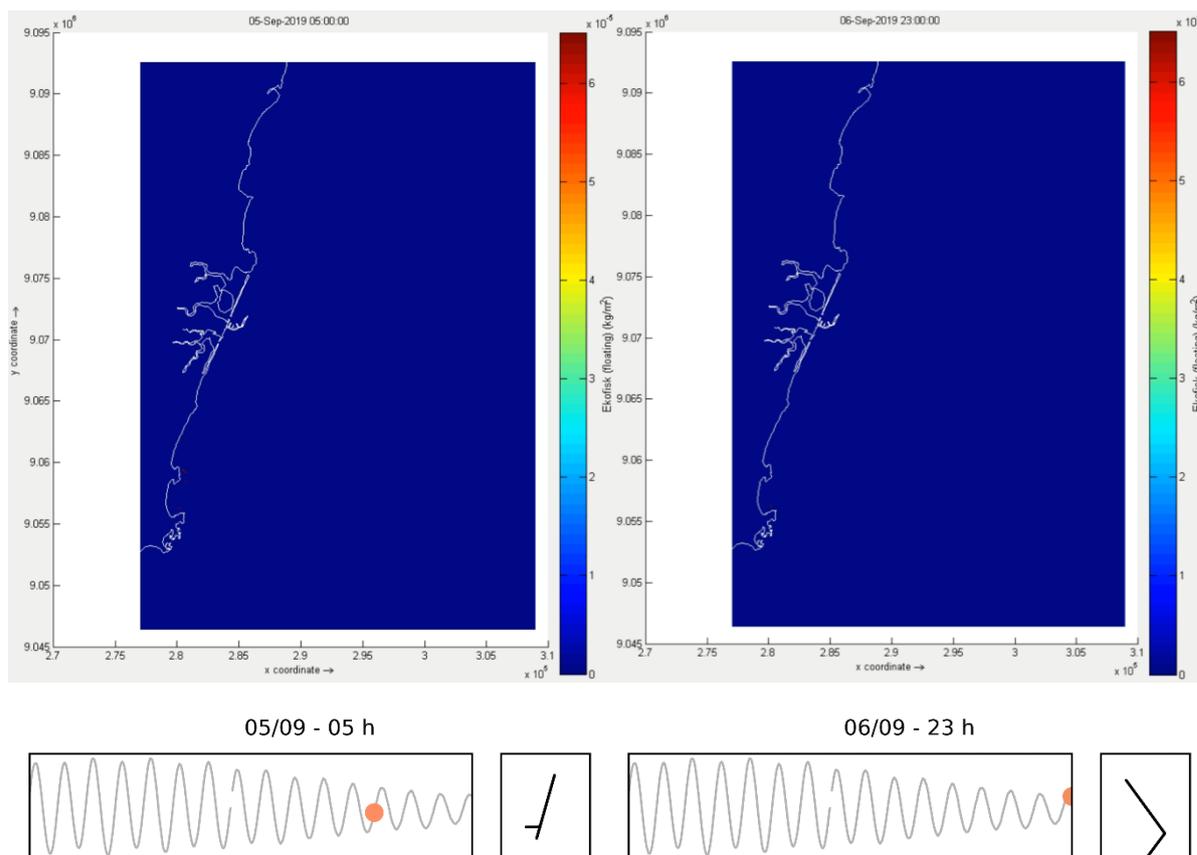
02/09 - 05 h



03/09 - 05 h

04/09 - 05 h



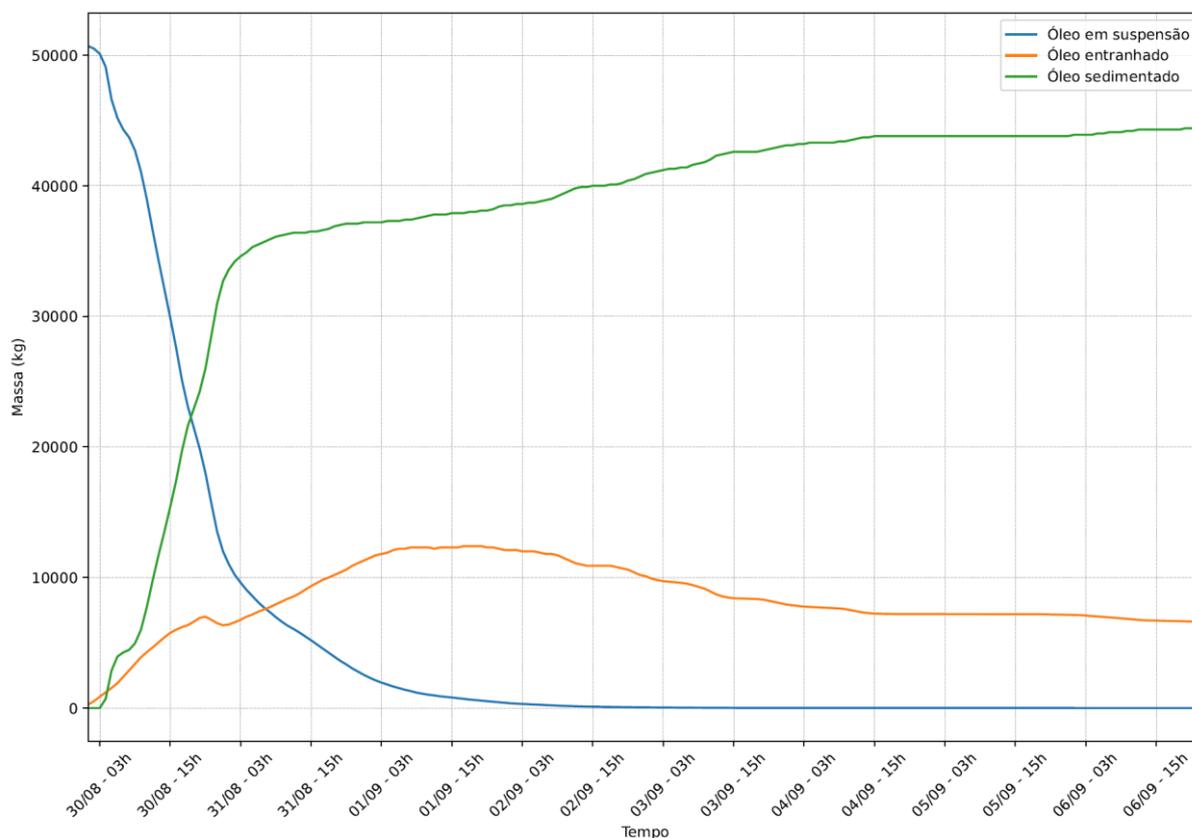


Fonte: O Autor, 2024

3.4.2.2 INTEMPERISMO E SEDIMENTAÇÃO DO ÓLEO

Os processos de intemperismo observados nos resultados do modelo foram o espalhamento (difusão) e o entranhamento. A caracterização do espalhamento atuante no transporte horizontal do óleo em superfície foi descrita em item anterior. Não foi observada emulsificação nos resultados obtidos. Isto pode ser explicado pela ausência de evaporação nos processos de intemperismo. Segunda Fingas (2012) diversos óleos crus/pesados devem passar pelo processo de evaporação antes de sofrerem a emulsificação. Vale ressaltar, que o óleo coletado no sedimento em 2019 foi caracterizado como minimamente degradado por processos de evaporação, dissolução e biodegradação após análise em cromatograma (Lourenço *et al.*, 2020).

Figura 31 – Série temporal da massa total de óleo em suspensão, entranhado e sedimentado, obtida no cenário 2 (30/08 a 07/09 de 2019)



Fonte: O Autor, 2024

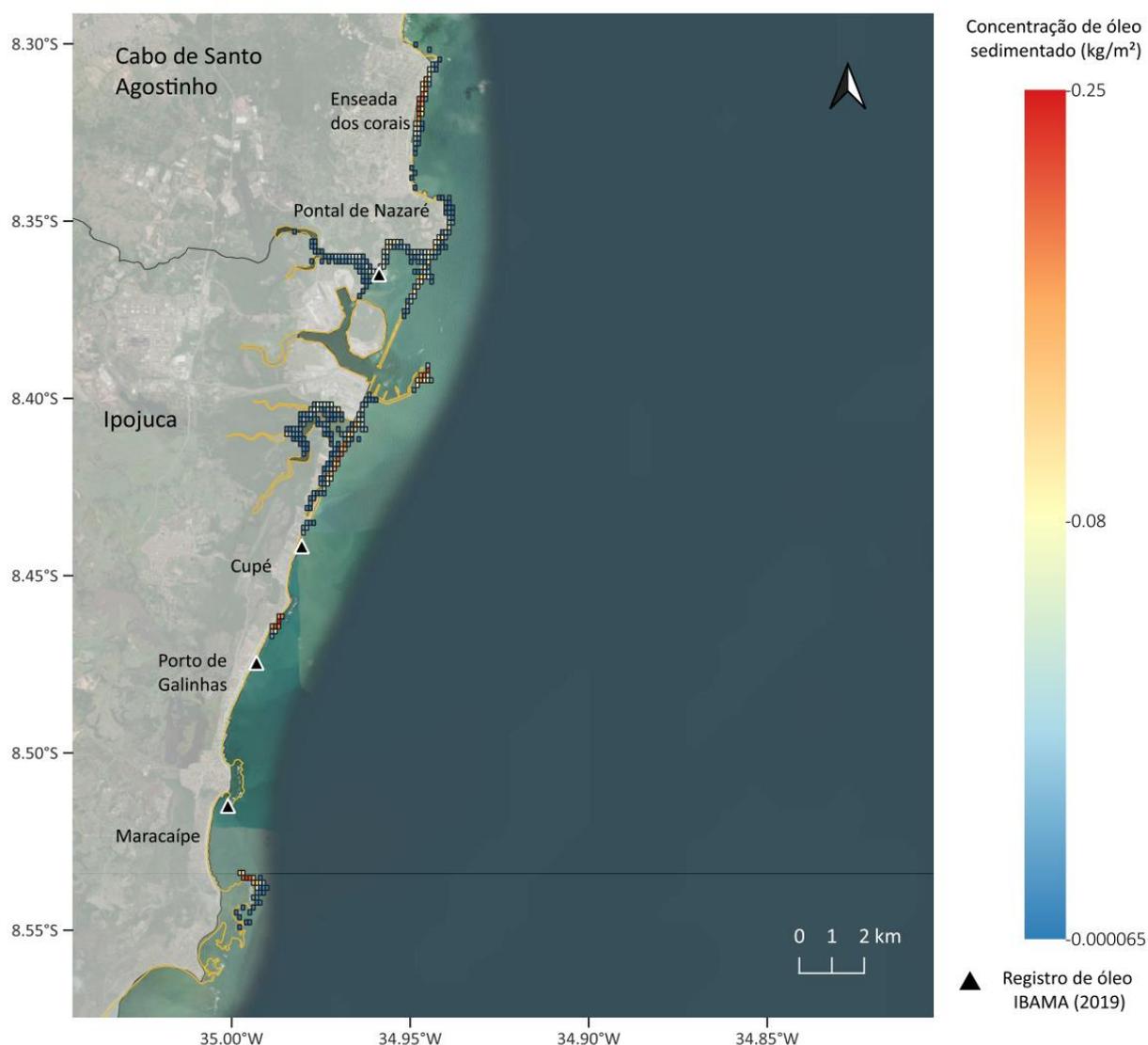
Processos de intemperismo ocorrem após derramamentos de óleo em taxas variáveis. Neste cenário, a taxa de entranhamento teve um aumento gradual com o tempo, atingindo seu valor máximo (~12 ton) após 50 horas do início da simulação, aproximadamente. Logo, manteve valores estáveis entre 8 e 6,5 ton até o final da simulação. A curva para a massa total sedimentada começa em zero e, após poucas horas, aumenta significativamente, sugerindo que a sedimentação inicia quando há toque de óleo na costa, como evidenciado na cronologia do óleo em superfície descrita anteriormente.

3.4.2.2.1 SEDIMENTAÇÃO

O óleo foi depositado apenas em zonas litorâneas (Guilcher, 1955) como indica a Figura 32. Após entrar em contato com os ambientes costeiros o óleo foi sedimentando gradualmente. O molhe do Porto de Suape foi o primeiro local com deposição de óleo, 3 horas após o início de simulação, seguido da praia de Porto de

Galinhas (seção norte) e dos recifes areníticos tanto na seção externa do estuário do rio Ipojuca, quanto na seção da Baía de Suape, em um período de 10 horas. Quatro horas mais tarde o óleo já havia sido depositado no estuário do rio Ipojuca e na região de manguezais da Baía de Suape, assim como nos costões rochosos do Pontal de Nazaré. Às 8 pm do dia 30/08 ocorre a sedimentação do óleo nos recifes localizados na praia da Enseada dos Corais, onde se estende por toda a seção dos recifes nas horas seguintes. Finalmente, no dia 2 de setembro há deposição de óleo sobre os recifes do Pontal de Maracaípe. A seguir um mapa ilustrando as áreas afetadas e as concentrações de óleo sedimentado correspondentes.

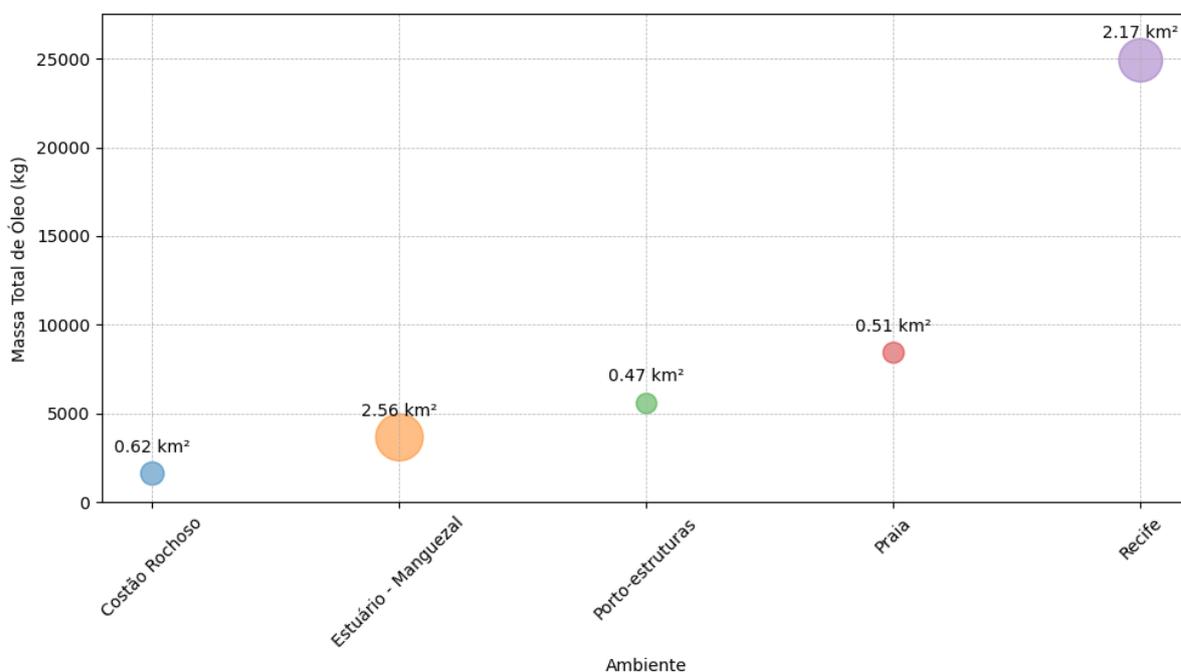
Figura 32 – Mapa com distribuição da concentração de óleo sedimentado na área de estudo (kg/m^2), correspondente ao cenário 2 (30/08 a 02/09 de 2019)



Fonte: O Autor, 2024

Os valores de massa totais de óleo sedimentado por ambiente variaram entre 1622 e 24951 kg, sendo os costões rochosos os ambientes com menor massa depositada, seguido dos estuários e manguezais (3667 kg), das estruturas portuárias (5614 kg), das praias (8433 kg) e por último dos recifes (Figura 33). A menor área afetada foi a das estruturas do Porto de Suape (0,47 km²), com extensão similar a observada no ambiente praias e de costão rochoso, 0,51 e 0,62 km² respectivamente. Já os recifes e os estuários tiveram áreas maiores atingidas pela sedimentação do óleo, 2,17 e 2,56 km² respectivamente.

Figura 33 – Massa total de óleo e área afetada por cada ambiente impactado resultante do cenário 2 (30/08 a 07/09 de 2019). O tamanho de cada símbolo circular equivale a área afetada, a qual também está indicada em numeral



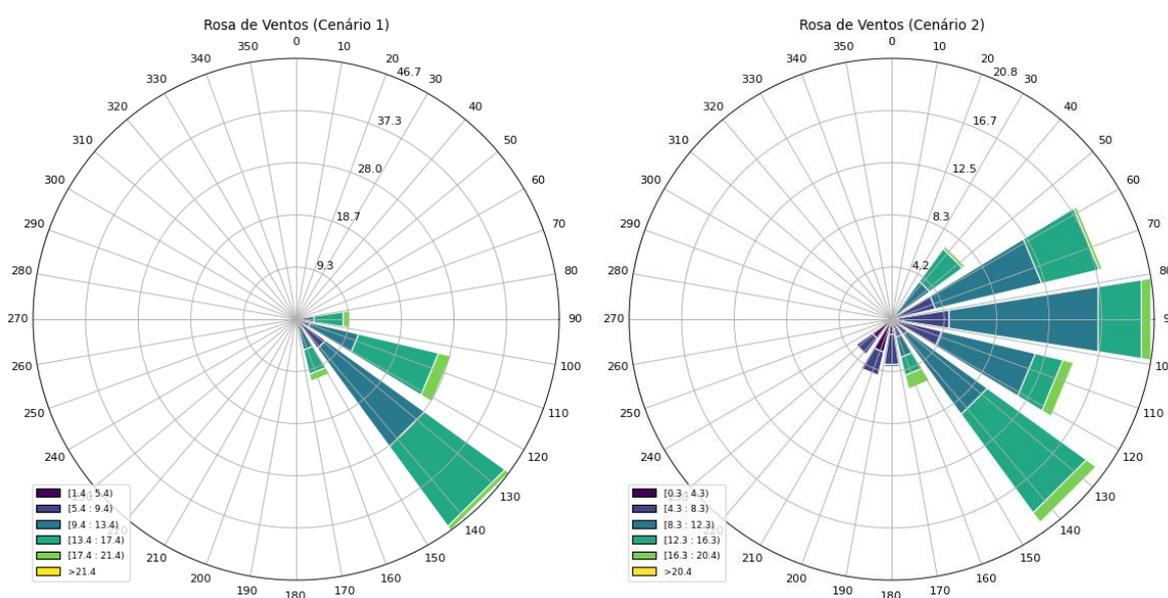
Fonte: O Autor, 2024

3.4.3 ANÁLISE DE CENÁRIOS MODELADOS

As diferenças entre os cenários modelados foram em suma determinadas pela variação nas forçantes físicas atuantes nas simulações. Os cenários foram definidos considerando os períodos de maré de quadratura e maré de sizígia, contudo, a variação de intensidade e direção do vento e consequente variação das correntes entre os cenários, também foi fundamental para as diferenças observadas nos resultados obtidos. Como é possível observar na comparação entre os dados de vento

medidos in situ para os dois períodos (23 a 30/08 e 30/08 a 07/09 de 2019), o primeiro cenário teve uma direção de vento dominante, sudeste, enquanto no cenário 2 a energia do vento se distribuiu entre nordeste e sudeste, com ocorrência de ventos de sudoeste como observado nas primeiras horas da simulação. A média da intensidade dos ventos também diferiu com ocorrência de ventos mais intensos (~ 13 nós) em média no cenário 1 quando comparado ao cenário 2 (~ 10 nós).

Figura 34 – Rosa dos ventos para os períodos do cenário 1 e 2, 23 a 30/08 e 30/08 a 07/09, respectivamente



Fonte: O Autor, 2024

É amplamente documentada em diversas regiões do mundo a significativa influência que os ventos exercem na direção e velocidade das correntes marítimas próximas à costa. (e.g., Albérola & Millot, 2003; Beardsley *et al.*, 2004; Míguez *et al.*, 2005; Marín & Delgado, 2007). A dispersão e deriva do óleo em superfície descritas anteriormente para ambos os cenários estiveram diretamente relacionadas com as mudanças na direção do vento, assim como relatado por Lessa *et al.* (2021) em relação ao derrame de 2019 onde as observações de óleo atingindo a costa nordeste correlacionaram-se estreitamente com mudanças nos padrões de ventos e correntes costeiras. Assim, dadas as diferenças nas forças físicas para a dispersão de óleo eram esperados contrastes entre os cenários.

O cenário 1, caracterizado pela maré de quadratura e ventos predominantemente de sudeste, teve uma área impactada significativamente menor à área impactada durante o cenário 2 (2,27 e 6,33 km² respectivamente). Este feito foi refletido na abrangência meridional da ocorrência de óleo durante o cenário 2, onde os limites geográficos do óleo sedimentado alcançaram aproximadamente 28 km de distância. Dessa forma, o município de Cabo de Santo Agostinho conteve 32% do óleo sedimentado na área de estudo. Este município foi o mais atingido pelo derramamento de óleo em 2019, no estado de Pernambuco, com aproximadamente 1032 toneladas de resíduos recolhidos (Bontempo-Filho *et al.*, 2022). Já no cenário 1 a extensão foi de 22 km aproximadamente. Esta diferença pode ser explicada pela combinação entre a inclinação da costa (~204°) e a direção média e dominante do vento (128°) no cenário 1 – a qual não promove correntes paralelas a costa tão competentes quanto as promovidas no cenário 2 – e também, pelo regime de maré de sizígia, durante o qual foi observado nos dados modelados um incremento na intensidade das correntes em pauta (Figura 25). A sedimentação de óleo observada em ambos os cenários esteve diretamente relacionada com o toque do óleo na costa, e não apresentou relação com a fase da maré, apesar da relação direta conhecida entre a maré baixa e a deposição do óleo (Reed *et al.*, 1989).

Além da diferença na abrangência da área impactada, os ambientes atingidos e o nível de impacto em cada um também variaram significativamente entre os cenários. Assim como observado no estado de Pernambuco, os resultados obtidos por modelagem evidenciaram possíveis impactos significativos em ecossistemas sensíveis com alta biodiversidade, como é o caso dos manguezais e recifes de corais, que já sofrem da pressão antrópica (Araujo *et al.*, 2007; Bontempo-Filho *et al.*, 2022). As diferenças mais notáveis entre os cenários neste quesito foram: a não ocorrência de óleo nos estuários da área de estudo no cenário 1 e o aumento do impacto nas áreas de recife, tanto em abrangência quanto em massa total sedimentada. O último é principalmente devido ao impacto nos recifes da Enseada dos Corais, localizada no município de Santo Agostinho, região não atingida durante o cenário 1. Ainda, vale destacar que as massas totais sedimentadas nos ambientes de praias, costões rochosos e estruturas portuárias reduziram em mais de 50% no cenário 2. Isto pode ser explicado pelos seguintes motivos: no cenário 1 a massa total de óleo derramado foi sedimentada, enquanto no cenário 2 aproximadamente 10% da mesma permaneceu na coluna d'água como óleo entranhado; a massa de óleo

correspondente ao óleo entranhado no cenário 1 esteve principalmente concentrada e foi sedimentada no ambiente praias; graças às condições físicas menos favoráveis para a deriva do óleo ao norte, descritas anteriormente, a deriva do óleo se manteve na região dos costões rochosos no cenário 1 promovendo maior sedimentação neste ambiente; devido à direção de vento predominante no início da simulação do cenário 2 a deriva do óleo foi em direção ao norte impactando em menor medida às estruturas portuárias, principalmente o seu molhe.

Levantamentos realizados sobre os habitats costeiros afetados a nível nacional pelo derramamento de óleo ocorrido em 2019 diferem em proporções do observado no presente projeto, o qual era esperado considerando a variação entre as áreas examinadas. Magris e Giarrizzo (2020) estimaram que os estuários e manguezais teriam sido os habitats com a maior área impactada, seguido pelas pradarias marinhas, praias, planícies de maré e por último recifes de coral. Já Mussi *et al.* (2022) utilizaram o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) para estimar a área dos diferentes habitats afetados. Os autores observaram que as praias foram em termos de área os ambientes mais impactados, seguido pelos manguezais, planícies de maré, recifes e costões rochosos. É importante denotar que a avaliação de sensibilidade nestes ambientes deve ser realizada considerando também fatores biológicos, e não apenas fatores geomorfológicos e hidrodinâmicos, critérios utilizados para a classificação do ISL. Isto é tratado por Vasconcelos *et al.* (2010) onde um dos exemplos dados é o de um costão rochoso exposto, que segundo a metodologia oficial é classificado como ISL 2, poderia abrigar uma colônia de aves marinhas de alta sensibilidade. A avaliação de sensibilidade de ambientes costeiros não é objeto do presente estudo, contudo vale a ressalva da importância de considerações abrangentes quando tratando desta temática.

Ainda, notou-se a diferença entre a sedimentação do óleo entranhado para os dois cenários. No cenário 1 o óleo entranhado foi quase em sua totalidade sedimentando, enquanto no cenário 2 esse atingiu um patamar e sedimentou em taxas mais lentas, mantendo até o final da simulação uma massa considerável de 6500 kg. Isto se deu devido à distribuição do óleo entranhado. Durante o primeiro cenário o último estava localizado principalmente próximo a praia de Porto de Galinhas, e assim foi sedimentando na zona entremarés. Já no cenário 2 o óleo entranhado estava mais distante do litoral, entre os recifes de Porto de Galinhas e o

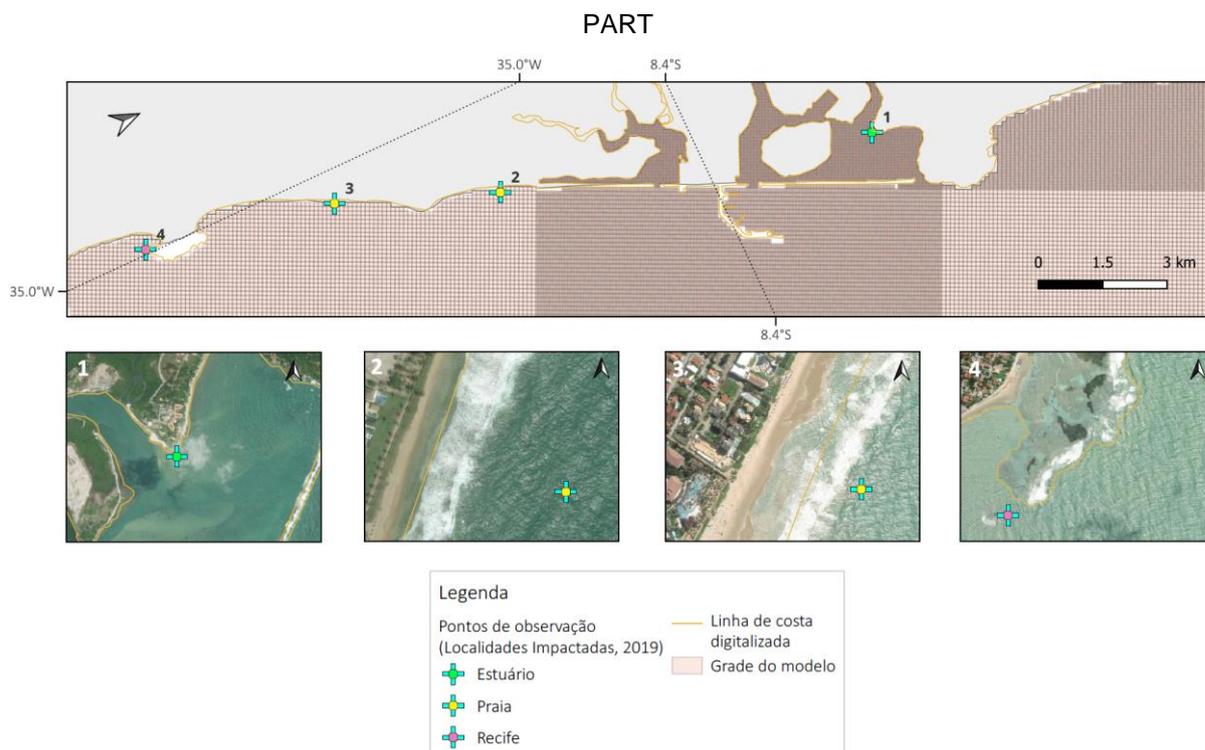
Pontal de Maracaípe, o que limitou a deposição promovida pelo toque com o sedimento.

Finalmente, observou-se que não houve penetração do óleo em superfície pela entrada sul da Baía de Suape, na entrada do canal de navegação do Porto, em nenhum dos dois cenários. É possível que isto tenha sido ocasionado dada a forma unidirecional como foi configurada a descarga da vazão do fluxo da Baía de Suape no modelo (2.3.1.3.4 OPERAÇÕES (DESCARGAS)).

3.4.4 LOCALIDADES AFETADAS EM 2019

As posições com ocorrência de óleo registradas e divulgadas no dia 02 de setembro de 2019 pelo IBAMA (2019) foram configuradas como pontos de observação nos cenários de modelagem de óleo realizados. Dessa forma, foi possível determinar para cada ponto o tempo de toque do óleo em superfície, de deposição do óleo, além das suas concentrações e massas totais. Vale ressaltar que os registros do IBAMA correspondem a uma posição geográfica pontual, ou seja, não correspondem a áreas e sim a um ponto no espaço. Dessa forma os pontos de observação correspondentes às localidades afetadas equivaleram cada um a uma célula da grade do modelo. Logo, os resultados apresentados a seguir correspondem apenas à célula da grade (100 x 150 m) onde se localiza o ponto geográfico e não a área que a circunda. As Figuras 28 e 32 apresentam os pontos de registro do IBAMA conjuntamente com os resultados de concentração de óleo sedimentado para cada cenário modelado. Ainda, a ausência das metodologias utilizadas para busca, identificação e estimativa da área afetada pelo óleo nos documentos do IBAMA pode levar a uma discrepância entre o momento em que o óleo realmente chegou à costa e quando foi oficialmente identificado e registrado, além do desconhecimento da real área impactada. Essa variação aumenta a subjetividade na análise dos resultados do modelo apresentados a seguir.

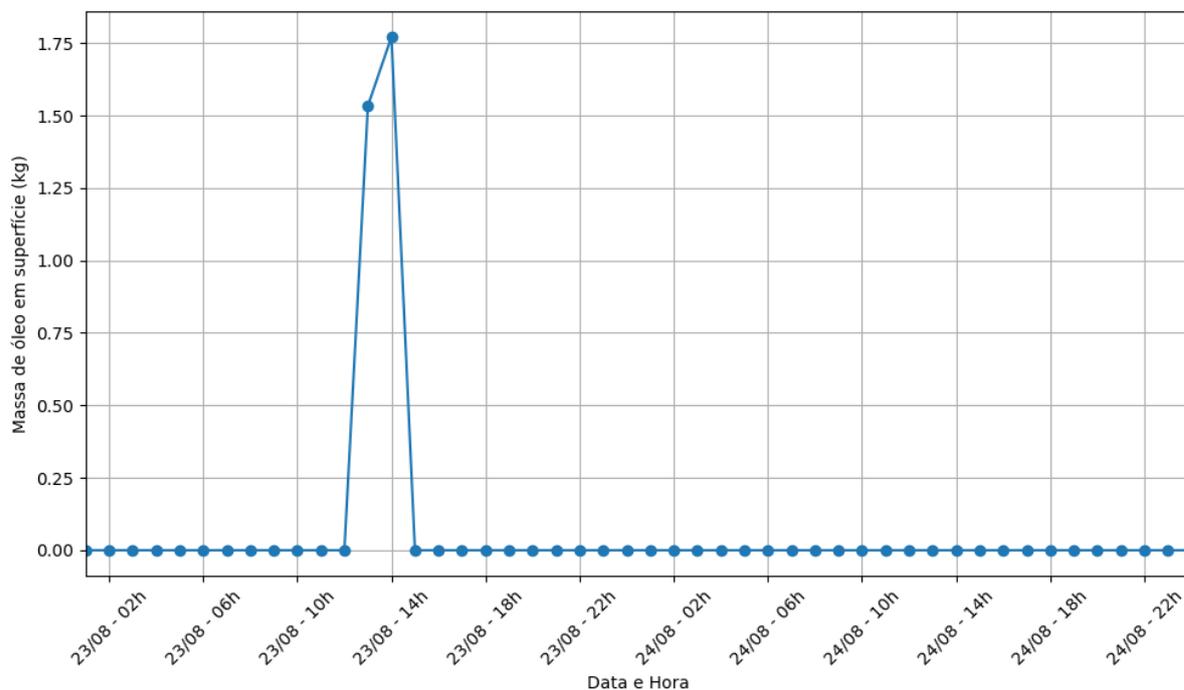
Figura 35 – Localização e identificação dos pontos de observação estabelecidos no modelo Delft3D



Fonte: O Autor, 2024

Durante o cenário 1, entre 23 e 30/08, caracterizado pela maré em regime de quadratura, a única localidade com registro de óleo foi a #2, localizada na praia de Cupe (Figura 35). Nesta, o óleo em superfície esteve presente no dia 23 entre 1 e 2 pm, 12 horas após o início do derrame. A massa total não ultrapassou 2 kg de óleo. Não houve deposição de óleo no sedimento nesta localidade.

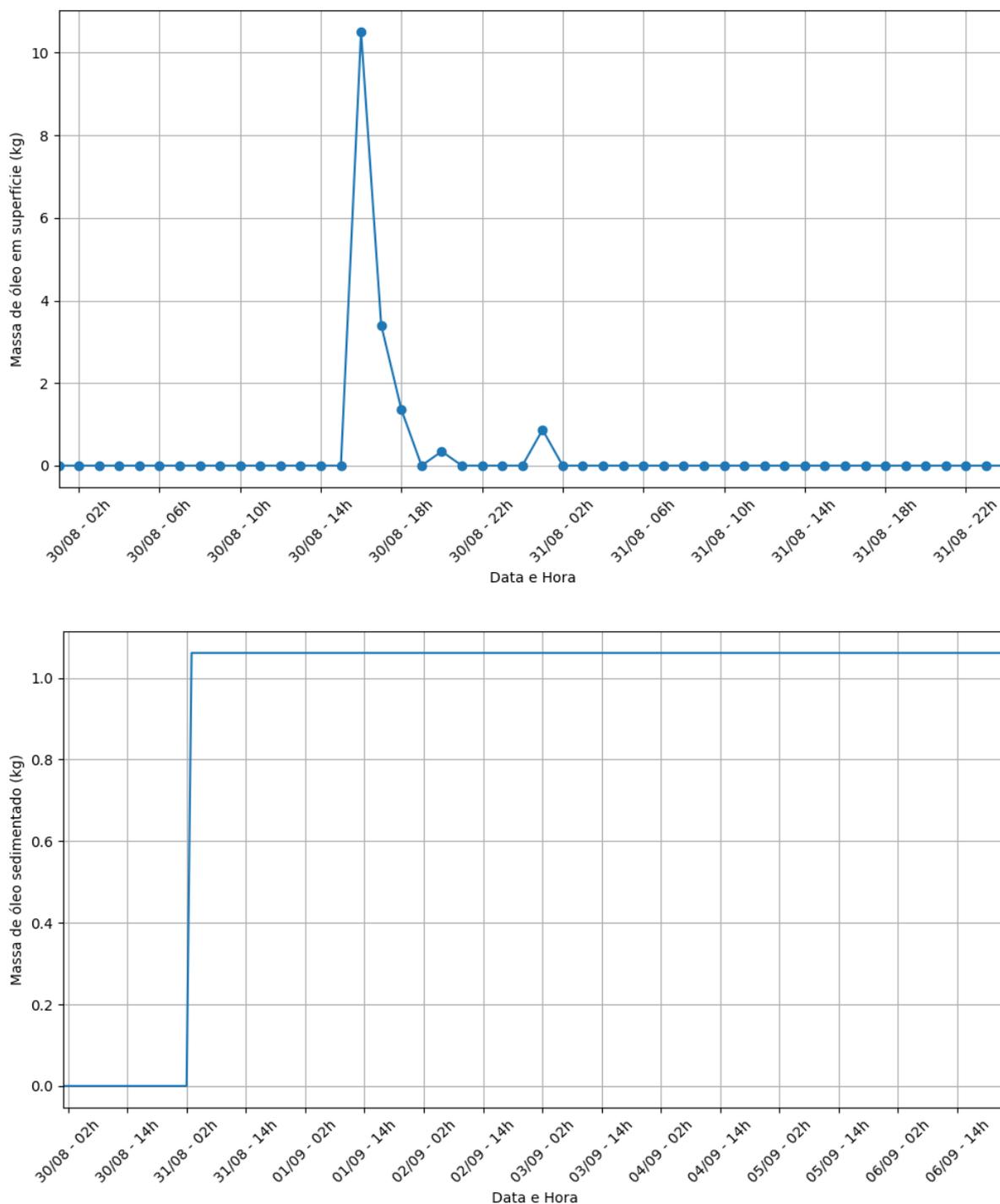
Figura 36 – Massa de óleo em superfície (kg) no ponto de observação #2, na praia de Cupe, registrada no cenário 1 (23 a 30/08 de 2019)



Fonte: O Autor, 2024

Durante o cenário 2, entre 30/08 e 07/09, caracterizado pela maré de sizígia, as localidades #1 e #2 tiveram registros de óleo realizados pelo IBAMA. No ponto #1, correspondente ao registro no estuário do rio Massangana na Baía de Suape, o óleo em superfície esteve presente nos dias 30/08 (entre 3 e 8 pm) e 31/08 a 1 am, com massa máxima ultrapassando os 10 kg (Figura 37). Após este intervalo o óleo foi parcialmente sedimentado (~1 kg) às 2 am do dia 31/08 (Figura 37).

Figura 37 – Massa de óleo em superfície (kg; gráfico superior) e sedimentada (kg; gráfico inferior) no ponto de observação #1, no estuário do rio Massangana, registrada no cenário 2 (30/08 a 07/09 de 2019)

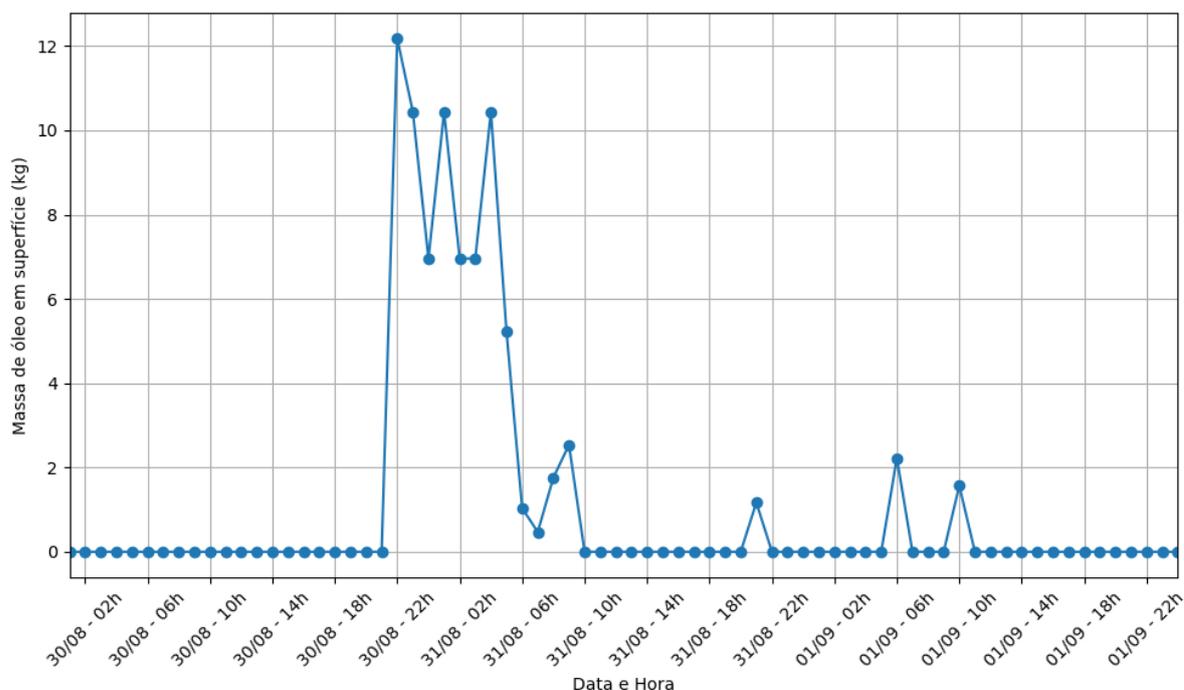


Fonte: O Autor, 2024

Já em relação ao ponto #2, localizado na praia do Cupe, o óleo em superfície esteve presente continuamente durante 12 horas, entre às 10 pm do dia 30/08 e às 10 am do dia 31/08, chegando a 12 kg de óleo (Figura 38). Após este período voltou

a incidir em momentos pontuais, não ultrapassando 2 kg de óleo em superfície. Não houve deposição de óleo no sedimento nesta localidade.

Figura 38 – Massa de óleo em superfície (kg) no ponto de observação #2, na praia do Cupe, registrada no cenário 2 (30/08 a 07/09 de 2019)



Fonte: O Autor, 2024

Como observado e descrito nos resultados de dispersão do óleo em superfície, para ambos os cenários, este esteve presente nas regiões que circundam as localidades #3 e #4, correspondentes à praia e aos recifes de Porto de Galinhas, contudo não ocorreu nas mesmas. A distribuição do óleo sedimentado, apresentada nas Figuras 28 e 32, dá indícios das regiões com maior toque de óleo superficial na costa. Ao analisá-las os recifes de Porto de Galinhas não possuíram nenhum registro de sedimentação, e apenas a seção mais ao norte das praias, próximas ao Pontal do Cupe, apresentou ocorrência do óleo depositado. Já em relação à localidade #1 no estuário do rio Massangana, apenas o cenário 2 caracterizado por maior amplitude da maré (sizígia) obteve registros do óleo superficial e sedimentado no estuário.

4 CONCLUSÕES

A aplicação de um modelo numérico calibrado, representando as condições hidrodinâmicas entre agosto e setembro de 2019 no entorno do Complexo Industrial Portuário de Suape, permitiu simular cenários de derramamento de óleo superficial e definir os ambientes diretamente impactados pela sedimentação do óleo.

Inicialmente foi realizada uma análise dos parâmetros oceanográficos medidos *in situ* (velocidade de corrente e vento; altura significativa de onda) e foi constatado que as condições oceanográficas durante o período de dispersão do óleo foram em média mais energéticas que as observadas durante os demais meses do ano de 2019. Além disso, a direção dos ventos foi marcada pela ocorrência dos ventos alísios de leste e sudeste, fator fundamental para o comportamento resultante da deriva do óleo nos diferentes cenários.

Em cenário marcado pela influência da maré de quadratura e caracterizado por ventos predominantemente de direção sudeste foi observado que a dispersão de óleo foi mais restrita em extensão, zonal e meridional, com menor duração do óleo em suspensão, e maior concentração do óleo nas regiões onde este sedimentou, quando comparado com o segundo cenário marcado pela maré de sizígia e direções mais variadas dos ventos (NE-SO). Dessa forma, durante o primeiro cenário menos ecossistemas foram diretamente atingidos pelo óleo sedimentado, já que a deriva do óleo em suspensão foi mais restrita e o toque de óleo na costa mais concentrado. Assim, as praias foram o principal ambiente impactado em termos de massa de óleo depositado (42% da massa total), e os recifes (17% da massa total) juntamente com as estruturas portuárias (20% da massa total) foram os mais impactados em termos de área com óleo depositado. Os costões rochosos também foram atingidos, em magnitude similar às estruturas portuárias (20% da massa total). Em contraste, durante o segundo cenário os ecossistemas estuarinos, livres de óleo sedimentado no primeiro cenário, foram impactados pelo óleo (8% da massa total) e representaram a área mais atingida, seguido pelos ambientes recifais que foram os mais impactados em termos de massa de óleo sedimentado (56% da massa total). Em termos de área impactada os costões rochosos (4% da massa total) foram o terceiro ambiente mais atingido, seguido das praias (19% da massa total) e estruturas portuárias (13% da massa total).

As simulações em diferentes condições meteo-oceanográficas viabilizaram a visualização da influência das forçantes físicas na dispersão do óleo em suspensão, onde foi observada a relação direta entre as correntes paralelas a costa induzidas pelo vento e a deriva do óleo. Logo, denota-se a importância de dados representativos para a alimentação dos modelos numéricos afim de reduzir as incertezas geradas por estes métodos.

Contudo, a imprevisibilidade das trajetórias de derramamento de óleo ainda está presente e deve-se, em grande parte, a diversas incertezas, como nos dados utilizados para observações, no estado inicial do ambiente e nos modelos globais muitas vezes utilizados como forçantes hidrodinâmicas e meteorológicas. Além disso, a precisão dos cálculos internos dos modelos, incluindo métodos numéricos e a representação dos comportamentos físico-químicos, contribuem para essas incertezas (Spaulding, 2017; Keramea *et al.*, 2021). Dessa forma, ademais dos fatores intrínsecos do modelo são ressaltados àqueles específicos do presente projeto que contribuíram para a incerteza dos resultados apresentados:

- a) Os dados medidos *in situ* utilizados para a calibração do modelo foram coletados por ADCP fundeado próximo a estruturas portuárias, que aumentam a complexidade das interações físicas locais. Apesar de bem representadas na grade do modelo, as estruturas não correspondem à realidade.
- b) A batimetria na área de estudo é composta por dados de diferentes anos (2015 a 2021) em uma zona que está em constantes alterações devido ao Porto de Suape, o que pode afetar a representatividade da região próxima ao ponto de observação e coleta de dados *in situ*.
- c) O domínio possui diferentes áreas que se comportam de formas distintas em relação à coeficientes de arrasto e rugosidade. Na área de estudo há ocorrência de praias de areia, estruturas de concreto, recifes areníticos, costões rochosos, presença de ilhas, canais e estuários.
- d) A ausência do aprimoramento das ondas como forçante física, via modelagem específica utilizando o módulo WAVE do Delft3D, pode haver comprometido a representação deste fenômeno nos resultados hidrodinâmicos introduzidos no módulo PART.
- e) O estabelecimento do modelo hidrodinâmico considerando um sistema barotrópico ignora a complexidade associada aos estuários. Como já

descrito, os estuários presentes na área de estudo são pouco competentes e se aproximam a um sistema barotrópico. No entanto, o estuário do rio Ipojuca, apesar de conter um fluxo médio baixo (17 m³/s; Koenig *et al.*, 2002), foi classificado por Lins (2018) como moderadamente estratificado, fazendo com que um modelo 3D que considerasse as especificidades deste sistema fosse mais indicado para representar esta seção do domínio.

- f) O uso da funcionalidade 'Operações (Descarga)' para a caracterização do fluxo de vazão da Baía de Suape em sua entrada sul foi indevidamente empregado, já que este impôs um fluxo competente unidirecional que não representa adequadamente a circulação nessa seção específica do domínio. O procedimento indicado seria o uso de contornos abertos fluviais à montante dos rios presentes para a aplicação da vazão de cada um destes como forçante hidrodinâmica.
- g) As limitações intrínsecas do modelo como a falta de consideração dos processos de biodegradação ou foto-oxidação pelo Delft3D PART aumentam as incertezas dos resultados gerados.
- h) A falta da caracterização completa e específica dos componentes do óleo encontrado em 2019 no modelo Delft3D PART.
- i) A ausência das metodologias utilizadas para busca, identificação e estimativa da área afetada pelo óleo nos documentos do IBAMA contribuíram para a subjetividade na comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e o "observado" em 2019.

Assim como o ocorrido em 2019, futuros crimes ou acidentes ambientais podem ter aspectos singulares tanto na perspectiva química e toxicológica do derramamento, como também dos ecossistemas atingidos e das ações de resposta empregadas. Em 2019 constatou-se a falta de preparo institucional, resultando em poucas ações efetivas na resposta ao derramamento de óleo (Araújo *et al.*, 2020; Brum *et al.*, 2020; Soares *et al.*, 2020). Isto resultou na ação de resposta por voluntários (pescadores, residentes, estudantes, comerciantes, turistas, etc.) os quais majoritariamente não possuíam equipamentos de segurança adequados e conhecimento dos efeitos nocivos das atividades que estavam desempenhando. Baron *et al.* (2020) destacaram a importância de planos de contingência e preparação para cenários de pior caso de derramamento, após analisar os impactos e ações executadas nos derrames do *Exxon Valdez* (1989 no Alasca), *Deepwater Horizon* (2010 no Golfo do México) e

Hebei Spirit (2007 na Coreia do Sul). Logo, apesar das limitações observadas e inferidas dos resultados obtidos por modelagem hidrodinâmica e de dispersão de partículas, a aplicação deste método se torna ainda mais crucial em regiões e contextos sociopolíticos onde as ações de contingência são limitadas. Além disso, visando ações contínuas e prolongadas de resposta e monitoramento de impactos, o auxílio na aferição de ambientes com maior probabilidade de óleo sedimentado também se torna fundamental. Finalmente, sugere-se que para futuros trabalhos seja realizado um aprofundamento no entendimento dos processos costeiros atuantes na região e aplicado um modelo probabilístico de dispersão de óleo para estimar com maior certeza as regiões com maior probabilidade de serem impactadas em um derramamento de óleo.

REFERÊNCIAS

- AAMO, O. M.; REED, M.; DOWNING, K. **Oil spill contingency and response (OSCAR) model system: Sensitivity studies**. 2005 International Oil Spill Conference, IOSC 2005. **Anais[...]**.2005.
- ALBÉROLA, C.; MILLOT, C. Circulation in the French mediterranean coastal zone near Marseilles: The influence of wind and the Northern Current. **Continental Shelf Research**, v. 23, n. 6, 2003.
- ALLEN, J. I.; SOMERFIELD, P. J.; GILBERT, F. J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models. **Journal of Marine Systems**, v. 64, n. 1–4, p. 3–14, 2007.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do atlântico tropical sul e pacífico leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 1, 2007.
- ARAGÃO, J. O. R. Fundamentos de meteorologia e relação oceano-atmosfera. **Recife, Secretaria de recursos hídricos de Pernambuco**, 2000.
- ARAÚJO, K. C. *et al.* Oil spill in northeastern Brazil: Application of fluorescence spectroscopy and PARAFAC in the analysis of oil-related compounds. **Chemosphere**, v. 267, 2021.
- ARAÚJO, M. C. B. *et al.* Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, 2007.
- BARCELLOS, R.; DANTAS DOS SANTOS, L. Histórico de impactos ambientais e o estado da arte em Oceanografia no sistema estuarinolagunar de Suape-Ipojuca (PE). **Parcerias Estratégicas**, v. 23, n. 46, 2018.
- BARRON, M. G. *et al.* Long-Term Ecological Impacts from Oil Spills: Comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit, and Deepwater Horizon. **Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 11, 2020.
- BEARDSLEY, R. C.; LIMEBURNER, R.; OWENS, W. B. Drifter measurements of surface currents near Marguerite Bay on the western Antarctic Peninsula shelf during austral summer and fall, 2001 and 2002. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 17–19, p. 1947–1964, 2004.
- BEEGLE-KRAUSE, C. J. Challenges and mysteries in oil spill fate and transport modeling. Em: **Oil Spill Environmental Forensics Case Studies**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 187–199.
- BERRY, A.; DABROWSKI, T.; LYONS, K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 11, 2012.
- BÍCEGO, M. *et al.* Poluição por petróleo. **Poluição Marinha**, v. Interciência, 2008.

BOCIU, I. *et al.* Decomposition of sediment-oil-agglomerates in a Gulf of Mexico sandy beach. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 10071, 2019.

BONTEMPO-FILHO, E. B. *et al.* Temporal monitoring of contamination in three sandy beaches from the 2019 oil spill near Cabo de Santo Agostinho, Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos. Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo. MMA: Brasília, 2004. 107 p. (Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho).

BRUM, H. D.; CAMPOS-SILVA, J. V.; OLIVEIRA, E. G. **Brazil oil spill response: Government inaction.** **Science**, 2020.

CÂMARA, S. F. *et al.* Socioeconomic vulnerability of communities on the Brazilian coast to the largest oil spill (2019–2020) in tropical oceans. **Ocean and Coastal Management**, v. 202, 2021.

CAMPELO, R. P. DE S. *et al.* Oil spills: The invisible impact on the base of tropical marine food webs. **Marine Pollution Bulletin**, v. 167, 2021.

CARREGOSA, J. C. *et al.* Multiple reaction monitoring tool applied in the geochemical investigation of a mysterious oil spill in northeast Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. e20210171, 2021.

CHASSIGNET, E. P. *et al.* The HYCOM (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system. **Journal of Marine Systems**, v. 65, n. 1–4, p. 60–83, 2007.

CINTRAO BARROS, L. Estudos sedimentológicos, batimétricos e geoquímicos na região interna do Porto de Suape-PE. 2009.

CONDEPE. **Caracterização do Complexo Estuarino-Lagunar da área de Suape (Pernambuco-Brasil): Síntese Ecológica.** Recife: [s.n.].

CORDEIRO, I. A. *et al.* Environmental conditions of the Suape estuarine-port complex area (Pernambuco, Brazil): Phytoplankton biomass and hydrological parameters. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 99, n. 2, 2019.

COUNCIL, N. R. *et al.* Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. 2003.

CPRH. **Diagnóstico sócio-ambiental do litoral sul de Pernambuco.** 2001.

CRAVEIRO, N. *et al.* 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. 112107, 2021.

DAGESTAD, K. F. *et al.* OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 4, 2018.

DAHLMANN, G.; KIENHUIS, P. Oil Spill Sampling and the Bonn-Oil Spill Identification Network: A Common Method for Oil Spill Identification. **Handbook of Environmental Chemistry**, v. 41, 2016.

DE ARAÚJO, M. E.; RAMALHO, C. W. N.; DE MELO, P. W. Artisanal fishers, consumers and the environment: immediate consequences of the oil spill in Pernambuco, Northeast Brazil. **Cadernos de Saude Publica**, v. 36, n. 1, 2020.

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

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

DE FREITAS TESSAROLO, L. *et al.* A surface Lagrangian algorithm applied to the 2019 South Atlantic oil spill. **Ocean Engineering**, v. 268, p. 113505, 2023.

DE OLIVEIRA, O. M. C. *et al.* Environmental disaster in the northeast coast of Brazil: Forensic geochemistry in the identification of the source of the oily material. **Marine Pollution Bulletin**, v. 160, 2020.

DELTARES. **User Manual Delft3D-Flow**.2023a.

DELTARES. **User manual D-waq part**.2023b.

DELVIGNE, G. A. L.; SWEENEY, C. Natural dispersion of oil. **Oil and Chemical Pollution**, v. 4, n. 4, p. 281–310, 1988.

DOMINGUES, E. DE C. *et al.* Hydrography and currents on the Pernambuco Continental Shelf. **RBRH**, v. 22, n. 0, 2017.

DORETTO, C.; LATERMAN, M. Óleo no Nordeste: expedição revela impacto invisível nos recifes de corais. **Greenpeace**, 21 nov. 2019.

EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, 1994.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 2, 2002.

environment/structure.php> Acesso em: 10 de ago. de 2020.

ESCOBAR, H. Mysterious oil spill threatens marine biodiversity haven in Brazil. **Science**, v. 366, n. 6466, p. 672, 2019.

FERNANDES, R. *et al.* **Integration of an oil and inert spill model in a framework for risk management of spills at sea - A case study for the Atlantic area.** Proceedings of the 36th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. **Anais...**2013.

FERREIRA, J. P. Análise de estratégias de resposta a derramamento de óleo pesado no litoral do espírito santo utilizando modelagem computacional. 2006.

FINGAS, M. F. Studies on the evaporation regulation mechanisms of crude oil and petroleum products. 2012.

FINGAS, M. **Oil spill science and technology**. [s.l.] Gulf professional publishing, 2016.

FREITAS TESSAROLO, L. **Numerical model for oil and gas releases from deepwater: Validation and applications in hypothetical blowouts**. Doctoral Thesis in Meteorology—[s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

GOUVEIA, E. L. Aspectos Ambientais e Gestão dos Recursos Hídricos no litoral sul da Região Metropolitana do Recife RMR: o caso da Microrregião de Suape. 2010.

GROS, J. *et al.* Petroleum dynamics in the sea and influence of subsea dispersant injection during Deepwater Horizon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 38, 2017.

GROS, J. *et al.* Simulating gas-liquid-water partitioning and fluid properties of petroleum under pressure: Implications for deep-sea blowouts. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 14, 2016.

GUILCHER, A. Morphologie littorale et sous-marine. **The Geographical Journal**, v. 121, n. 2, 1955.

GUSMAO, J. B. *et al.* The barnacle *Chthamalus bisinuatus* is the only sessile invertebrate colonizing oil patches on beachrocks one year after a massive oil spill on the Northeastern Brazilian coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 173, 2021.

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

IBAMA. 2019. **Manchas de Óleo Litoral do Nordeste**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo>> Acesso em: 10 de ago. de 2022.

JC Online 2019. **Entenda por que a movimentação do óleo nas praias de Pernambuco é imprevisível**. Jornal do Comércio. Recife, 23 de out. De 2019. Disponível em: <<https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/cienciamambiente/noticia/2019/10/23/entenda-por-que-a-movimentacao-do-oleo-nas-praias-de-pernambuco-e-imprevisivel-391156.php>>. Acesso em: 10 de ago. de 2020.

KERAMEA, P. *et al.* **Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges**. **Journal of Marine Science and Engineering**, 2021.

KOENING, M. L. *et al.* Impactos da construção do Porto de Suape sobre a comunidade fitoplanctônica no estuário do rio Ipojuca (Pernambuco-Brasil). **Acta Botanica Brasilica**, v. 16, p. 407–420, 2002.

LEGRAND, S.; DULIERE, V. **OSERIT: An oil spill evaluation and response integrated tool**. INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF PHYSICAL MODELING TO PORT AND COASTAL PROTECTION. **Anais[...]**2012.

LEHR, W. *et al.* Revisions of the ADIOS oil spill model. **Environmental Modelling and Software**, v. 17, n. 2, 2002.

LESSA, G. C. *et al.* The 2019 Brazilian oil spill: Insights on the physics behind the drift. **Journal of Marine Systems**, v. 222, 2021.

LINDEBERG, M. R. *et al.* Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 147, 2018.

LIRA, A. L. DE O. *et al.* Effects of contact with crude oil and its ingestion by the symbiotic polychaete *Branchiosyllis* living in sponges (*Cinachyrella* sp.) following the 2019 oil spill on the tropical coast of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 801, 2021.

LIRA, L. *et al.* Estudo de correntes marinhas por meio do lançamento de cartões de deriva no litoral do estado de Pernambuco, Brasil. 2010.

LOURENÇO, R. A. *et al.* Mysterious oil spill along Brazil's northeast and southeast seaboard (2019–2020): Trying to find answers and filling data gaps. **Marine Pollution Bulletin**, v. 156, 2020.

LOURENÇO, R. A. *et al.* Recurrent arrival of oil spill remnants along the Brazilian coast: In situ long-term weathering of the largest spill in Brazil's history. **Regional Studies in Marine Science**, v. 66, 2023.

MAGALHÃES, K. M. *et al.* Oil spill + COVID-19: A disastrous year for Brazilian seagrass conservation. **Science of the Total Environment**, v. 764, 2021.

MAGRIS, R. A.; GIARRIZZO, T. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 153, 2020.

MALLMANN, D. L. B. *et al.* Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo do litoral de Pernambuco. **Recife, PE: Linceu Ed**, 2011.

MAREM – Mapeamento Ambiental para Resposta à Emergência no Mar. Banco de dados. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.marem-br.com.br/> . Acesso em: 07 fev. 2024

MARÍN, V. H.; DELGADO, L. E. Lagrangian observations of surface coastal flows North of 30° S in the Humboldt Current system. **Continental Shelf Research**, v. 27, n. 6, p. 731–743, 2007.

MIGUEZ, B. M. *et al.* Physical and biogeochemical fluxes in shelf waters of the NW Iberian upwelling system. Hydrography and dynamics. **Journal of Marine Systems**, v. 54, n. 1–4, p. 127–138, 2005.

MORAES, D. S. DE L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de saúde pública**, v. 36, p. 370–374, 2002.

MORAIS K. 2019. **Entenda por que as manchas de óleo não atingiram Porto de Galinhas**. Brasília, 21 de out. de 2019. Disponível em: <<https://jc.ne10.uol.com.br/canal/cidades/cienciamambiente/noticia/2019/10/21/entenda-por-que-as-manchas-de-oleo-nao-atingiram-porto-de-galinhas-390989.php>>. Acesso em: 10 de ago. de 2020.

MORRISON, R. D. Critical Review of Environmental Forensic Techniques: Part II. **Environmental Forensics**, v. 1, n. 4, 2000.

MUNIZ, K. *et al.* Hydrological impact of the port complex of Suape on the Ipojuca River (Pernambuco-Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 5, 2005.

MURRAY, K. J.; BOEHM, P. D.; PRINCE, R. C. The Importance of Understanding Transport and Degradation of Oil and Gasses from Deep-Sea Blowouts. Em: **Deep Oil Spills**. [s.l: s.n.].

MUSSI, C. *et al.* Environmental sensitivity analysis of environments affected by the oil spill on the Brazilian coast. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 57, n. 4, 2022.

NEUMANN, V. H. *et al.* Hydrodynamism, Sedimentology, Geomorphology and Plankton Changes at Suape Area (Pernambuco - Brazil) after a Port Complex Implantation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 70, n. 2, 1998.

NOBRE, P. *et al.* The 2019 northeast Brazil oil spill: scenarios. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, 2022.

OLIVEIRA, G. C. DE S. *et al.* Uma Abordagem da Geografia do Clima Sobre os Eventos Extremos de Precipitação em Recife–PE (An Climate Geography Approach on Extreme Precipitation Events in Recife–PE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 2, 2011.

PAIVA, A. C. G. DE; ARAÚJO, M. E. DE. Environmental characterization and spatial distribution of fish fauna in estuaries in the State of Pernambuco, Brazil. **Tropical Oceanography**, v. 38, n. 1, 2010.

PESSOA, V. T.; NEUMANN-LEITÃO, S.; DE OLIVEIRA GUSMÃO, L. M. Comunidade zooplanctônica na baía de Suape e nos estuários dos rios Tatuoca e Massangana, Pernambuco (Brasil). **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 4, n. 1, p. 80–94, 2009.

Poligonal do Porto Organizado. SUAPE. 2022. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/porto/poligonal-do-porto-organizado>. Acesso em: 07 fev. 2024

POLLANI, A. *et al.* The Poseidon operational tool for the prediction of floating pollutant transport. **Marine pollution bulletin**, v. 43, n. 7–12, 2001.

Praias de Ipojuca estão livres de manchas de óleo, afirma prefeitura. TV Jornal. 2019. Disponível em: <https://tvjornal.ne10.uol.com.br/noticias-da-manha-pe/2019/10/22/praias-de-ipojuca-estao-livres-de-manchas-de-oleo-afirma-prefeitura-178243/index.html>. Acesso em: 20 jan. 2024

PRASAD, S. J. *et al.* Oil spill trajectory prediction with high-resolution ocean currents. **Journal of Operational Oceanography**, v. 13, n. 2, p. 84–99, 2020.

RAMOS, A. M.; DOS SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G. **Normais climatológicas do Brasil, 1961-1990**. [s.l.] Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, Ministério da Agricultura ..., 2009.

REDDY, C. M. *et al.* Synergy of analytical approaches enables a robust assessment of the Brazil mystery oil spill. **Energy & Fuels**, v. 36, n. 22, p. 13688–13704, 2022.

REED, M. *et al.* **A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment**. 2005 International Oil Spill Conference, IOSC 2005. **Anais...**2005.

REED, M.; GUNDLACH, E.; KANA, T. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies. **Oil and Chemical Pollution**, v. 5, n. 6, p. 411–449, 1989.

RÖHRS, J. *et al.* The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills. **Ocean Science**, v. 14, n. 6, 2018.

SALES, A.M. Estudo do regime de correntes no canal de acesso do Porto de Suape, Pernambuco, Brasil (Bachelor's thesis). 2017.

SBRAGIO, R.; RODRIGUES FILHO, O.; MARTINS, M. R. Methodology for the estimation of an oil spill origin: Analysis of the 2019 Brazilian coast oil spill. **Marine Pollution Bulletin**, v. 197, p. 115676, 2023.

SIMECEK-BEATTY, D.; LEHR, W. J. Forensic Trajectory Modeling of Marine Oil Spills. Em: **Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification: Second Edition**. [s.l.: s.n.].

SILVA, M.S. PROCESSAMENTO DE DADOS DE ADCP MÓVEL PARA ESTUDOS DE CIRCULAÇÃO EM ESTUÁRIOS (Bachelor's thesis). 2019.

SOARES, E. C. *et al.* Oil impact on the environment and aquatic organisms on the coasts of the states of Alagoas and Sergipe, Brazil - A preliminary evaluation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 171, 2021.

SOARES, M. DE O. *et al.* Oil spill in South Atlantic (Brazil): Environmental and governmental disaster. **Marine Policy**, v. 115, 2020.

SPAULDING, M. L. **State of the art review and future directions in oil spill modeling**. **Marine Pollution Bulletin**, 2017.

SRH-PE. **Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe: Tomo I-diagnóstico hidroambiental**. SRH-PE-Projetos Técnicos Recife, 2010.

SUAPE. 2015. **Complexo industrial portuário governador Eraldo Guerios – Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.suape.pe.gov.br/>>

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. DE O. **Introdução à climatologia**. [s.l.: s.n.].

UNEP. **Determination of petroleum hydrocarbons in sediments**. [s.l.] Unesco, 1992.

VASCONCELOS, T. L. *et al.* Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo e sua distribuição no Brasil. **Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Recife**, 2010.

ZACHARIAS, D. C. *et al.* Mysterious oil spill on the Brazilian coast – Part 2: A probabilistic approach to fill gaps of uncertainties. **Marine Pollution Bulletin**, v. 173, 2021b.

ZACHARIAS, D. C.; FORNARO, A. Brazilian offshore oil exploration areas: An overview of hydrocarbon pollution. **Revista Ambiente e Agua**, v. 15, n. 5, 2020.

ZACHARIAS, D. C.; GAMA, C. M.; FORNARO, A. Mysterious oil spill on Brazilian coast: Analysis and estimates. **Marine Pollution Bulletin**, v. 165, 2021a.

ZANARDI-LAMARDO, E. *et al.* Intratidal variability and transport of petroleum aromatic hydrocarbons in an anthropized tropical estuarine system: the Suape estuary (8.4 S 35W). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 66, p. 47–57, 2018.

APÊNDICE A – Script (código) em python para adequação de dados do ERA5 para o input do Delft3D FLOW (.amp, .amu, .amv)

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Nov 9 17:33:28 2023

@author: Santiago Bravo
"""

import sys
import numpy as np
from netCDF4 import Dataset

print('\nstart read .nc file\n')

# INPUT NETCDF4 FILE PATH
nc_file_path = r'' # Replace with your actual file path

# READ NETCDF FILE AND PRINT AVAILABLE VARIABLES
root = Dataset(nc_file_path)
print(root)
dims = root.dimensions
ndims = len(dims)

dic = {}
dic2 = {}
print('\navailable variables in selected .NC file:\n')
vars = root.variables
print(vars)
nvars = len(vars)
n = 0
for var in vars:
    print('#', n, ' ', var, vars[var].shape)
    dic[str(var)] = n
    l = vars[var].shape
    dic2[str(var)] = len(l)
    n += 1
print('\n')

# INPUT VARIABLES THAT YOU WANT TO READ
nc_data = []
iter_var = []
iter_var.append(input('write the variables you want to read (through the
gap): ').split(' '))
iter_var = iter_var[0]
try:
    for v in iter_var:
        dic[v]
except KeyError:
    sys.exit('\nvariable name error\n')

# WARNING!
# MAX DIMENSIONS OF MASSIVE: 3

var_inter_n = {}
ni = 0
for i in iter_var:
    if (dic2[i] == 1):
        nc_data.append(np.array(root.variables[i][::], dtype=np.float32))

```

```

    if (dic2[i] == 2):
        nc_data.append(np.array(root.variables[i][:,:], dtype=np.float32))
    if (dic2[i] == 3):
        nc_data.append(np.array(root.variables[i][:,:,:],
dtype=np.float32))
    var_inter_n[i] = ni
    ni += 1

print('\nread complete\n')

# WRITE GRID OF INPUT WIND NETCDF DIMENSION (REGULAR GRID WITH FIXED STEP
IN SPACE\TIME)
# OUTPUT FILE CONTAIN TWO COLOMNS WITH LONGITUDE AND LATITUDE COORDINATES
chk = input('write wind grid? y/n ')
if (chk != 'n'):
    outfile2_name = 'uvsp_grd.dat'
    outfile2 = open(outfile2_name, 'w')
    for i in range((len(root.variables['longitude']))):
        for j in range(len(root.variables['latitude'])):
            outfile2.write(str(root.variables['longitude'][i])+
'+str(root.variables['latitude'][j])+'\n')
    print('wind grid write complete')

# WRITE CHECK
check = input('start create meteo files? y/n ')
if (check == 'n'):
    sys.exit()

# USING CONST LIST
nodata_value = -999.000
grid_unit = 'degree' # m or degree
longitude_name = 'longitude'
latitude_name = 'latitude'
time_name = 'time'
n_quantity = 1
fmt = '.dat'

month = str(input('Using month: '))
for i in iter_var:

    # LIST OF AVIABLE OUTPUT DATA FOR DELFT3D METEO INPUT FILES
    if (i == 'u10'): fmt = '.amu'
    if (i == 'v10'): fmt = '.amv'
    if (i == 'sp'): fmt = '.amp'
    if (i == 't2m'): fmt = '.amt'
    if (i == 'mcc'): fmt = '.amc'
    if (i == 'rh'): fmt == '.amr'

    # FOR SINGLE MONTH CHOOSE ONE:
    mnth_chck = True
    # mnth_chck = True
    if mnth_chck == True:
        # month = str(input('Using month: '))
        if (month == 'jan'):
            monthtime = '01'
        if (month == 'feb'):
            monthtime = '02'
        if (month == 'mar'):
            monthtime = '03'
        if (month == 'apr'):
            monthtime = '04'

```

```

if (month == 'may'):
    monthtime = '05'
if (month == 'jun'):
    monthtime = '06'
if (month == 'jul'):
    monthtime = '07'
if (month == 'aug'):
    monthtime = '08'
if (month == 'sep'):
    monthtime = '09'
if (month == 'oct'):
    monthtime = '10'
if (month == 'nov'):
    monthtime = '11'
if (month == 'dec'):
    monthtime = '12'

outfile_name = str(i)+'_'+month+fmt
with open(outfile_name, 'w') as outfile:
    # Writing headers
    outfile.write('FileVersion = 1.03\n')
    outfile.write('filetype = meteo_on_equidistant_grid\n')
    outfile.write('NODATA_value = '+str(nodata_value)+'\n')
    n_cols = vars[i].shape[2]
    outfile.write('n_cols = '+str(n_cols)+'\n')
    n_rows = vars[i].shape[1]
    outfile.write('n_rows = '+str(n_rows)+'\n')
    outfile.write('grid_unit = '+str(grid_unit)+'\n')
    x_llcorner = root.variables[longitude_name][0]
    y_llcorner = root.variables[latitude_name][-1]
    outfile.write('x_llcorner = '+str(x_llcorner)+'\n')
    outfile.write('y_llcorner = '+str(y_llcorner)+'\n')
    dy = (root.variables[longitude_name][-1] -
root.variables[longitude_name][0]) / (n_cols - 1)
    dx = (root.variables[latitude_name][0] -
root.variables[latitude_name][-1]) / (n_rows - 1)
    outfile.write('dx = '+str(dx)+'\n')
    outfile.write('dy = '+str(dy)+'\n')
    outfile.write('n_quantity = '+str(n_quantity)+'\n')
    quantity1 = '???'
    unit1 = '???'
    if (i == 'u10'):
        quantity1 = 'x_wind'
        unit1 = 'm s-1'
    elif (i == 'v10'):
        quantity1 = 'y_wind'
        unit1 = 'm s-1'
    elif (i == 'sp'):
        quantity1 = 'air_pressure'
        unit1 = 'Pa'
    if (i == 't2m'):
        quantity1 = 'air_temperature'
        unit1 = 'Celsius'
    if (i == 'mcc'):
        quantity1 = 'cloudiness'
        unit1 = '%'
    outfile.write('quantity1 = '+quantity1+'\n')
    outfile.write('unit1 = '+unit1+'\n')
    time1 = 0

# WRITE DATA IN FILE

```

```

total_time_steps = vars['time'].shape[0]
requested_time_steps = int(input('time to write '+i+'(time size ' +
str(vars['time'].shape) + '): '))
if requested_time_steps > total_time_steps:
    print(f"Warning: Requested time steps ({requested_time_steps})
exceed available time steps ({total_time_steps}). Writing only available
time steps.")
    requested_time_steps = total_time_steps

for t in range(requested_time_steps):
    outfile.write('TIME = ' + str(root.variables[time_name][t]) + '
hours since 1900-01-01 00:00:00 +00:00\n')
    # FOR SINGLE MONTH WRITE USE THIS:
    # outfile.write('TIME = ' + str(time1) + ' hours since 2016-' +
monthtime + '-01 00:00:00 +00:00\n')
    for n in range(int(vars[i].shape[1])):
        for m in range(int(vars[i].shape[2])):
            if i == 't2m':
                outfile.write(str(nc_data[var_inter_n[i]][t, n, m]
- 273.150)+' ')
            else:
                outfile.write(str(nc_data[var_inter_n[i]][t, n,
m]))+' ')
        outfile.write('\n')
    time1 += 6

```

APÊNDICE B – Script (código) em python para adequação de dados do HYCOM GLBy0.08 para o input do Delft3D FLOW (.bct)

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Jan 22 15:27:11 2024

@author: Santiago Bravo

"""

import pandas as pd
from datetime import datetime
import xarray as xr

ds = xr.open_dataset(r'')
df = ds.to_dataframe()
df = df.reset_index()

"""Transformando longitude 0-360 para -180-180 """
df["lon"] = (((df["lon"] - 180) % 360) - 180)

""" Coletar informações de dois pontos perto da borda da grade que estão na
mesma linha,
que representem Begin - End do Delft (padrão é de esquerda para direita no
eixo x - West-East) """

latp1 = -8.239999771118164
lonp1 = -34.8800048828125

latp2 = -8.279999732971191
lonp2 = -34.800048828125

df_begin = df.loc[(df['lat'] == latp1) & (df['lon'] == lonp1)]
df_end = df.loc[(df['lat'] == latp2) & (df['lon'] == lonp2)]

""" Inserindo estes passos para exportar para análise a seguir """

df_begin["vel"] = (df_begin["u_barotropic_velocity"]**2 +
df_begin["v_barotropic_velocity"]**2)**(1/2)
df_end["vel"] = (df_end["u_barotropic_velocity"]**2 +
df_end["v_barotropic_velocity"]**2)**(1/2)

df_begin.to_excel(r'')
df_end.to_excel(r'')

"""

Lembre-se de substituir os caminhos dos arquivos (path_vel_A, path_vel_B,
output_bct_path)
pelos caminhos reais onde os arquivos estão localizados e para onde o
arquivo .bct deve ser salvo.
Este código considera que as planilhas têm colunas nomeadas de forma
apropriada ('time' e 'vel') e que estão no formato correto.

"""

def adjust_time_and_velocity(df, time_col, vel_col, interval=60,
tolerance=3):
```

```

adjusted_data = [[0, df[vel_col].iloc[0]]]
current_time = 0

for index in range(1, len(df)):
    row = df.iloc[index]
    time_diff = (row[time_col] - df[time_col].iloc[0]).total_seconds()
/ 60
    if 57 <= time_diff - current_time <= 63:
        current_time += interval
        adjusted_data.append([current_time, row[vel_col]])

return pd.DataFrame(adjusted_data, columns=['Time (min)', vel_col])

def create_bct_file(df_A, df_B, output_path):
    # Unindo os dataframes
    df = pd.merge(df_A, df_B, on='Time (min)')

    # Formatando os valores para notação científica
    df['vel_A_formatted'] = df['vel_A'].apply(lambda x: f"{x:.7e}")
    df['vel_B_formatted'] = df['vel_B'].apply(lambda x: f"{x:.7e}")

    # Criando o conteúdo do arquivo .bct
    reference_date = df_A['time'].iloc[0].strftime('%Y%m%d')
    total_records = len(df)
    header = [
        "table-name          'Boundary Section : 2'\n",
        "contents              'Uniform          '\n",
        "location               'northcurr         '\n",
        "time-function          'non-equidistant'\n",
        f"reference-time         {reference_date}\n",
        "time-unit              'minutes'\n",
        "interpolation          'linear'\n",
        "parameter              'time              '
unit '[min]'\n",
        "parameter              'current            (c)  end A'
unit '[m/s]'\n",
        "parameter              'current            (c)  end B'
unit '[m/s]'\n",
        f"records-in-table      {total_records}\n"
    ]
    with open(output_path, 'w') as file:
        file.writelines(header)
        for index, row in df.iterrows():
            file.write(f" {row['Time (min)']:.7e} {row['vel_A_formatted']}
{row['vel_B_formatted']}\n")

# Caminhos dos arquivos de input fornecidos pelo usuário
path_vel_A = 'path_to_velocity_A_file.xlsx' # Substitua pelo caminho
correto
path_vel_B = 'path_to_velocity_B_file.xlsx' # Substitua pelo caminho
correto
output_bct_path = 'path_to_output_bct_file.bct' # Substitua pelo caminho
de saída desejado

# Carregando e processando os dados de velocidade no ponto A
df_vel_A = pd.read_excel(path_vel_A)
df_vel_A['time'] = pd.to_datetime(df_vel_A['time'])
df_adjusted_A = adjust_time_and_velocity(df_vel_A, 'time', 'vel')

# Carregando e processando os dados de velocidade no ponto B
df_vel_B = pd.read_excel(path_vel_B)

```

```
df_vel_B['time'] = pd.to_datetime(df_vel_B['time'])
df_adjusted_B = adjust_time_and_velocity(df_vel_B, 'time', 'vel')

# Criando o arquivo .bct
create_bct_file(df_adjusted_A, df_adjusted_B, output_bct_path)
```

APÊNDICE C – Configurações de cenários do Delft3D FLOW e resultados estatísticos de sensibilidade (RMSE, MAW, Skill)

Parâmetros/ Testes	Grade	Barragens- finas (thin dams)	Cond. - Contorno - Norte	Cond. - Contorno - Oceânica	Cond. - Contorno - Sul	Vento (forçame)	Coefficiente de arrasto do vento	Onda (forçame)	Descarga (Fluxo - Discharge)	Formula de Rugosidade	Valor de Rugosidade	Time (min)	Domínio temporal	Alertas (Warnings)	Erros (Crash do modelo)	RMSE - velocidade da corrente	MAE - velocidade da corrente	Skill - velocidade da corrente	RMSE - nível de água	MAE - nível de água	Skill - nível de água
cenário-1	grid1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Chey	65	0.1	26:08 - 26:09	Latitude of your model is 0 degrees, model located at equator	NA	0.25	0.21	0.46	0.09	0.07	0.9990
cenário-2	grid1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Chey	65	0.1	26:08 - 26:09	NA	NA	0.25	0.21	0.46	0.09	0.07	0.9990
cenário-3	grid1	NA	NA	NA	NA	NA	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	26:08 - 26:09	NA	NA	0.26	0.20	0.29	1.13	1.12	0.6878
cenário-4	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	26:08 - 26:09	NA	NA	0.27	0.21	0.31	0.70	0.67	0.9934
cenário-5	grid1	NA	NA	NA	Neumann- astronomic	yes	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.20	0.34	0.75	0.74	0.8873
cenário-6	grid1	NA	NA	NA	Neumann- astronomic	yes	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	Water level change too high > 25.00 m [per 0.5 DT]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
cenário-7	grid1	NA	NA	NA	Riemann- astronomic	yes	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.20	0.34	0.75	0.74	0.8873
cenário-8	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.00063	NA	NA	Manning	0.02	0.1	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	1.82	1.51	0.11	16.27	16.24	0.0014
cenário-9	grid1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.25	0.21	0.46	0.09	0.07	0.9990
cenário-10	grid1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Chey	65	1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.21	0.46	0.09	0.07	0.9990
cenário-11	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.00063	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.20	0.35	0.63	0.62	0.9764
cenário-12	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.20	0.35	0.65	0.64	0.9703
cenário-13	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Chey	65	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	0.20	0.16	0.45	1.66	1.44	0.2521
cenário-14	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.0015	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	Water level change too high > 25.00 m [per 0.5 DT]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
cenário-15	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.0025	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	Water level change too high > 25.00 m [per 0.5 DT]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
cenário-16	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.007	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	Water level change too high > 25.00 m [per 0.5 DT]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
cenário-17	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.01	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	Water level change too high > 25.00 m [per 0.5 DT]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
cenário-18	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.04	0.6	22:08 - 07:09	NA	NA	0.27	0.21	0.38	0.92	0.71	0.8726
cenário-19	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.06	0.6	22:08 - 07:09	NA	NA	0.27	0.21	0.38	0.92	0.71	0.8727
cenário-20	grid2	2	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.08	0.6	22:08 - 07:09	NA	NA	0.27	0.22	0.37	0.92	0.71	0.8726
cenário-21	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Manning	0.04	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.21	0.45	0.10	0.08	0.9987
cenário-22	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.01	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.26	0.20	0.35	0.54	0.46	0.9512
cenário-23	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.01	NA	NA	Manning	0.1	0.6	22:08 - 07:09	NA	NA	0.28	0.23	0.37	0.92	0.71	0.8718
cenário-24	grid2	NA	NA	NA	NA	yes	0.01	NA	NA	Chey	65	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	0.22	0.17	0.43	1.68	1.46	0.2486
cenário-25	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.01	NA	NA	Manning	0.04	0.6	22:08 - 07:09	NA	NA	0.28	0.23	0.37	0.92	0.71	0.8717
cenário-26	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Chey	65	0.6	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	0.29	0.22	0.39	2.05	1.82	0.0966
cenário-27	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.19	0.17	0.61	0.09	0.07	0.9990
cenário-28	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.002	NA	NA	Chey	65	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.22	0.18	0.50	0.52	0.46	0.9546
cenário-29	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	1	NA	NA	Chey	65	1	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	0.32	0.26	0.23	1.34	1.24	0.5804
cenário-30	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	80	0.1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.20	0.17	0.59	0.09	0.07	0.9990
cenário-31	grid1	NA	NA	NA	NA	yes	0.5	NA	NA	Chey	70	1	22:08 - 07:09	Velocity change too high > 5.00 m/s	NA	0.24	0.19	0.28	0.72	0.66	0.9004
cenário-32	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	65	1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.20	0.17	0.59	0.09	0.07	0.9990
cenário-33	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	40	1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.20	0.17	0.59	0.09	0.07	0.9990
cenário-34	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	30	1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.20	0.17	0.59	0.09	0.07	0.9990
cenário-35	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	30	1	22:08 - 07:09	NA	NA	0.20	0.17	0.59	0.09	0.07	0.9990
cenário-36	grid1	NA	NA	NA	NA	no	NA	NA	NA	Chey	30	1	07:08 - 07:09	NA	NA	0.12	0.10	0.72	0.06	0.04	0.9995