



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

SARANA CASTRO DEMONER

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA FOZ DO RIO  
AMAZONAS**

Tucuruí – PA 2023

SARANA CASTRO DEMONER

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA FOZ DO RIO  
AMAZONAS**

Texto Agregador dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção de créditos referentes à Defesa de Mestrado.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

Co - Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Medeiros de Abreu.

SARANA CASTRO DEMONER

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA FOZ DO RIO  
AMAZONAS**

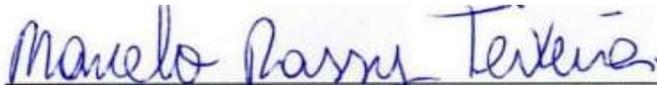
Texto Agregador dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção de créditos referentes à Defesa de Mestrado.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Marcelo Rassy Teixeira.

Co - Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Medeiros de Abreu.

Tucuruí, 30 de janeiro de 2023.

Aprovado por:



Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira, Dr. em Engenharia de Estruturas (UFPA)  
(Orientador)



Prof. Dr. Carlos Henrique Medeiros de Abreu, Dr. em Biodiversidade e Biotecnologia  
(UEAP)(Co - Orientador)

Documento assinado digitalmente



HELENILZA FERREIRA ALBUQUERQUE CUNHA  
Data: 31/03/2023 11:40:38-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dra. Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha, Dra. em Ciências da Engenharia Ambiental  
(UNIFAP)  
(Examinador Externo)



Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes, Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental  
(UFPA)  
(Examinador Interno)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- C355s CASTRO DEMONER, SARANA.  
Simulação numérica de derramamento de óleo na foz do rio Amazonas / SARANA CASTRO DEMONER. — 2023.  
74 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira  
Coorientador(a): Prof. Dr. Carlos Henrique Medeiros de Abreu  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2023.
1. Planejamento ambiental, Sisbahia I, monitoramento de portos. I. Título.

CDD 620.8

---

## RESUMO

A dinâmica dos rios na Amazônia está predominantemente ligada a ameaças ou eventos naturais que podem ou não desencadear danos ambientais. Em março de 2013 ocorreu um deslizamento de uma extensa porção de solo para o interior do canal de Santana no Amapá, essa movimentação abrupta de massa levou consigo o Porto de Santana e suas respectivas instalações. As constatações da perícia identificaram um solo sensível que ainda não havia sido identificado anteriormente no Brasil. Em razão do comportamento insólito do material às margens do Porto de Santana, das novas características de solo identificadas e por se tratar de uma área portuária, a qual abriga diversos materiais de grande potencial poluidor, incluindo terminais de granéis líquidos, oleodutos, surge a necessidade de avaliar o comportamento de um possível derramamento de óleo através da modelagem hidrodinâmica. O software SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental foi escolhido para ser utilizado na elaboração dos modelos pois possui interface amigável e já é bastante difundido em linhas de pesquisas correlacionadas. De posse dos modelos e cenários simulados identificou-se as proporções de um novo acidente de deslizamento envolvendo essas reservas de combustíveis, as áreas do canal de Santana que seriam diretamente afetadas pelo óleo e qual o tempo de resposta que as instituições responsáveis teriam para acionar ações de mediação e contenção de um acidente dessa proporção. Assim sendo, o estudo busca obter mecanismos de gestão pontuais e tomadas de decisões sobre um possível sinistro.

Palavras chave: Modelagem Hidrodinâmica; SisBaHiA; Monitoramento de Portos.

## **ABSTRACT**

The dynamics of rivers in the Amazon is predominantly linked to threats or natural events that may or may not trigger environmental damage. In March 2013 a large portion of soil slid into the interior of the Santana channel in Amapá, this abrupt mass movement took with it the Port of Santana and its respective facilities. The forensics findings identified a sensitive soil that had not previously been identified in Brazil. Due to the unusual behavior of the material on the shores of the Port of Santana, the new soil characteristics identified and because it is a port area, which houses several materials of great polluting potential, including bulk terminals, pipelines, the need arises to evaluate the behavior of a possible oil spill through hydrodynamic modeling. The software SisBaHiA® - Base System of Environmental Hydrodynamics was chosen to be used in the development of the models because it has a friendly interface and is already widespread in related lines of research. With the models and simulated scenarios, we identified the proportions of a new landslide accident involving these fuel reserves, the areas of the Santana channel that would be directly affected by the oil and what is the response time that the responsible institutions would have to trigger actions for mediation and containment of an accident of this proportion. Thus, the study seeks to obtain timely management mechanisms and decision-making about a possible accident.

Keywords: Hydrodynamic Modeling; SisBaHiA; Port Monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Deslizamento no Porto de Santana – AP em 2013.	17
Figura 2: Trajeto realizado pelo óleo diesel desde o seu desembarque até o armazenamento.	19
Figura 3: Carta de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima da foz do Amazonas, zona FZA15, também conhecidas como Cartas SAO.	24
Figura 4: Abrangência dos diferentes Planos de Combate à Poluição por vazamento de óleo.	29
Figura 5: Cronologia das Legislações brasileiras e sua relação com as convenções internacionais.	30
Figura 6: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental, com destaque a rota mais.	32
Figura 7: Sistema de Coordenadas de modelagem 3D.	36
Figura 8: Representação do comportamento do óleo face a evaporação, dispersão e óleo remanescente.	40
Figura 9: Curva de decaimento do óleo.	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do oleoduto utilizado no transporte de óleo no Porto Organizado de Santana-AP.	20
Tabela 2: Explicação dos termos da equação de quantidade de movimento, aproximado hidrosticamente, na direção x e y analogamente.	43
Tabela 3: Explicação dos termos da equação continuidade integrada ao longo da vertical e a equação da continuidade respectivamente.	44
Tabela 4: Dados de entrada no software.	45

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 : Movimentação em toneladas/ano no Porto de Santana.

19

## **LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS**

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários

API - American Petroleum Institute

Cartas SAO - Cartas de Sensibilidade ao Derramamento de Óleo

CLC 69 - International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IMO - International Maritime Organization

ISL - Índice de Sensibilidade Litoral

MARPOL 73/78 Marine Pollution - Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios

MMA - Ministério do Meio Ambiente

OILPOL/54 - International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil

OPRC - International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation

PA - Plano de Área

PEI - Plano de Emergência Individual

PNC - Plano Nacional de Contingência

PNLP - Plano Nacional de Logística Portuária

PR - Plano de Contingência Regional

SEMAS - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade

SisBaHIA - Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental

St - Sensibilidade do Solo

TGLs - Terminais de Granéis Líquidos

TUP - Terminal de Uso Privativo

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	10
2.	JUSTIFICATIVA .....	13
3.	OBJETIVOS .....	14
3.1.	OBJETIVO GERAL.....	14
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
4.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.1.	PORTO DE SANTANA.....	15
4.2.	ROMPIMENTO DE TALUDE NO PORTO DE SANTANA.....	15
4.3.	TERMINAL DE GRANÉIS LÍQUIDOS .....	17
4.4.	COMPORTAMENTO DO ÓLEO NA ÁGUA .....	20
4.5.	EFEITOS DA POLUIÇÃO POR ÓLEO EM AMBIENTES AQUÁTICOS.....	22
4.6.	CONVENÇÕES INTERNACIONAIS SOBRE A POLUIÇÃO POR ÓLEO .....	25
4.7.	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA REFERENTE À POLUIÇÃO POR ÓLEO .....	27
4.8.	A MODELAGEM COMO APARATO NO AUXÍLIO DA GESTÃO AMBIENTAL	31
4.9.	SISBAHIA.....	34
4.9.1.	MODELO HIDRODINÂMICO 3D: EQUAÇÕES GOVERNANTES .....	36
5.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	43
5.1.	ARTIGO .....	43
➤	REVISTA .....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (Texto Agregador) .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo "impacto ambiental" refere-se ao impacto da atividade ao ambiente, onde a relação entre sociedade com seu entorno é a principal causa. O escopo dessas influências pode flutuar dentro de uma escala significativa, contudo até as mínimas interferências na composição química do ar e da água podem levar a transformações complexas nas propriedades químicas, físicas, biológicas do ar, água, sedimentos, animais e plantas (SÁNCHEZ, 2013). As significativas alterações causadas por estes processos podem influenciar nas características das bacias hidrográficas, alteração da qualidade das águas, redução da mata ciliar, assoreamento dos corpos hídricos e implicações na vazão dos rios (ISSII *et al.*, 2020; LIRA *et al.*, 2020).

Pesquisas recentes correlacionam alguns desastres ambientais que vêm ocorrendo com determinados fenômenos hidroclimáticos, e trazem consigo as mudanças climáticas como principal justificativa (IPCC, 2019; PABÓN-CAICEDO *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2018). São diversos os impactos negativos provocados à sociedade em função de desastres naturais em razão da ocupação de áreas vulneráveis ou da sua incapacidade em responder aos mesmos (SILVA *et al.*, 2020).

Em contrapartida Romeo e Vazquez (2019), partem da perspectiva de que desastres não são essencialmente naturais, os autores defendem a ideia de que estes são socialmente construídos e que, portanto, tem um risco intrínseco. Logo, por serem socialmente construídos, os desastres podem ser evitados, prevenidos, minimizados e mitigados.

Segundo Ferguson (2020), se tratando de desastres ambientais causados por derramamento de óleo, os impactos negativos ao meio ambiente são inevitáveis, além dos danos à saúde dos afetados. Os agravos à saúde se entendem por sequelas a integridade física, mental e social dos indivíduos, e no que tange a poluição ambiental, ressalta-se principalmente contaminação da água e da biota. Para Fensterseifer (2020), a burocracia e lentidão dos sistemas governamentais responsáveis em acionar os planos de controle é o principal empecilho de aplicação das ações de mitigação, principalmente as de cunho imediatistas e de modelos de simulações sobre o deslocamento das manchas.

Apesar do avanço e disseminação de novas energias renováveis ainda se estabelece primordialmente a conjuntura do uso de combustíveis fósseis. Para alimentar essa dependência

energética um dos mecânicos adotados para transporte e armazenamento dessa energia são os granéis líquidos. Via de regra as ações antrópicas que envolvem petróleo ou seus subprodutos como as atividades de exploração, produção, transporte e armazenamento podem ser consideradas potenciais ou efetivamente poluidoras, à medida que acarretam descargas de óleo no ambiente, tornando-se ameaça ao ecossistema, nesse âmbito abre-se destaque sobretudo àqueles costeiros, que comportam elevada biodiversidade, no qual é extremamente sensível a aspectos externos, principalmente aos de elevada toxicidade, logo estes ambientes estão sujeitos a inúmeros impactos ambientais (UCHÔA, 2014).

Por meio da modelagem computacional é possível combinar diferentes variáveis e estimar, com elevado grau de precisão, os diferentes cenários de derramamento de óleo, gerando uma ferramenta de alta precisão para nortear a tomada de decisões que diz respeito à contenção da pluma de óleo. A forma mais prática de simular diferentes cenários desse tipo de sinistro é por meio da aplicação desse modelo, a exemplo tem-se o uso do Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHIA. Conduzida criteriosamente, a simulação dos padrões de circulação hidrodinâmicos e de transporte de contaminantes no programa SisBaHiA é capaz de apresentar resultados bastante realísticos (ROSMAN, 2021).

Levando em consideração as sérias consequências para o ambiente receptor e os ecossistemas que vivem nesse ambiente, os sinistros imputados por derramamentos acidentais de óleo, segundo J Lu *et al* (2017), a avaliação dos riscos ambientais é um instrumento imprescindível para as empresas do ramo petrolífero, no planejamento e implementação de suas respectivas atividades, desde produção, transporte e armazenamento.

Em março de 2013 um desastre natural foi palco de um relevante impacto ambiental. Um processo de ruptura de talude na margem esquerda do Canal de Santana no Amapá, que culminou no deslizamento de uma porção de solo para o interior do canal, essa movimentação de massa, rápida e abrupta, ocasionou a perda de vidas humanas, além das perdas materiais, pois levou consigo o Porto de Santana e suas respectivas instalações. As consequências ambientais levaram o sinistro a uma escala maior ainda no que tange suas proporções de danos gerados (SOUZA, 2019; TEIXEIRA *et al*, 2019).

Teixeira *et al* (2019), destaca que uma das peculiaridades relacionadas ao acidente discorre que o mesmo não apresentou sinais prévios de sua ruptura, como trincas no terreno ou mesmo movimentação das instalações que havia no local pré sinistro. Ressalta também a

rapidez do ocorrido, constatado pela proporção das ondas causadas pelo contato da massa de solo com a água.

As manifestações e processos que têm potencial de provocar situações de risco na Zona Costeira do Amapá é uma importante fonte de conhecimento para as instituições responsáveis e a sociedade em geral (Silva *et al.*, 2020). Portanto, alimenta-se a necessidade de estudos pontuais e detalhados nos locais de maiores riscos, para a produção de dados mais precisos que possam subsidiar a implementação de medidas mitigadoras, de adaptação ou mesmo de intervenções, caso necessárias.

Esse conjunto de fatores e características mostraram uma possibilidade de um solo sensível que ainda não teria sido identificado antes no Brasil, essa hipótese fora constatada mais tarde pelo ensaio de perícia feito na área de abrangência do acidente. De posse dessa nova descoberta apontada na região e levando em consideração o uso do solo naquele ambiente, surgem alguns questionamentos: Em razão do comportamento insólito do solo no Porto de Santana, das novas características de solo identificadas e por se tratar de uma área portuária, a qual abriga diversos materiais incluindo terminais de granéis líquidos e oleodutos, em que seu conteúdo é exclusivamente derivado de petróleo, logo, de grande potencial poluidor, quais as proporções de um novo acidente de deslizamento envolvendo essas reservas de combustíveis? Quais áreas da foz do rio Amazonas seriam diretamente afetadas e qual o tempo de resposta que as instituições responsáveis teriam para acionar ações de mediação e contenção de um acidente dessa proporção?

Em virtude do que fora exposto, torna-se necessário conhecer o comportamento esperado de plumas de óleo de diferentes proporções, modeladas sob diferentes condições ambientais, principalmente aquelas que podem resultar num menor tempo para a mancha alcançar a costa, ou num maior volume de óleo atingindo a costa, ou ainda, numa maior extensão de costa afetada.

Desse modo, este trabalho se concentra em analisar um cenário hipotético de acidente envolvendo um deslizamento da área de localização dos oleodutos e granéis líquidos da região portuária de Santana, simulando um possível derramamento de óleo no Canal de Santana. A partir dessa análise, ações mais eficientes e efetivas contra esse tipo de acidente podem ser incluídas em um plano de contingência.

## 2. JUSTIFICATIVA

- A localização do oleoduto e granéis líquidos que abastecem a cidade de Santana no Amapá integra a área denominada de Zona portuária de Santana, na qual protagonizou em março de 2013 um enorme desastre na escala portuária, em que ocorreu o rompimento do talude a margem esquerda no denominado Canal de Santana, levando ao desmoronamento das estruturas do Porto de extração de minério de ferro, utilizado pela empresa Anglo American. Logo, essas características erodíveis já apresentadas na região acarretam um elevado grau de risco para futuros acidentes do gênero, visto a atual localização do oleoduto que dista aproximadamente 100 metros da cicatriz formada pelo rompimento do talude causado por esse desastre ambiental.
- Os laudos periciais do referido acidente, identificaram nessa área, solos de características geológicas consideradas sensíveis, e ainda classificou o movimento como um flowslide, objetivando as características de rompimento brusco do talude, o que sugere um elevado grau de risco ambiental imputado pelos empreendimentos instalados às margens do rio Amazonas na área de estudo.
- Um derramamento de óleo nessa área causaria danos na fauna e flora da região em escalas incomensuráveis;
- A região vem sendo constante alvo de pesquisas no mesmo ramo acadêmico, sendo assim, as conclusões feitas neste estudo podem servir de auxílio para futuros estudos;
- A já disponibilidade de dados, como por exemplo, os de marés, correntes, vento e batimetria;
- As análises de risco e vulnerabilidade ambiental em locais onde há a probabilidade de vazamentos de óleo e hidrocarbonetos de atividades industriais se fazem necessárias para colaborar com a prevenção de acidentes com esses elementos;
- A modelagem vem sendo de grande ajuda para a realização de estudos ambientais em diversos tipos de sistemas naturais. Sendo ferramenta imprescindível para a elaboração e escolha de um plano de contingência adequado, no caso de derramamento de óleo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GERAL**

O trabalho objetiva simular o comportamento de um derrame de óleo no Canal de Santana causado pelo possível rompimento de talude e posterior deslizamento da margem onde o oleoduto e granéis líquidos são armazenados, de modo a proporcionar subsídios aos tomadores de decisão nas ações de resposta de gestão ambiental.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar por meio do modelo de transporte de óleo, as potenciais zonas de contaminação em função dos cenários hidrodinâmicos simulados e identificar as áreas sensíveis afetadas dentro do Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas;
- Determinar o tempo que o contaminante (óleo diesel) leva até atingir áreas de preservação ambiental e fontes de abastecimento de água;
- Analisar impactos ambientais e socioeconômicos, provenientes de um derrame de óleo no canal, assim como, recomendar a aplicação de estratégias de prevenção de acidentes e ações mitigadoras caso venham a ocorrer.
- Propor o estudo como um subsídio para um plano de gestão ambiental para o empreendimento visando criar um sistema de alerta de acordo com os riscos estimados, ampliando a possibilidade de ações de resposta necessárias visando mitigar um possível sinistro.

### **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **4.1. PORTO DE SANTANA**

A finalidade original da construção do Porto era atender à movimentação de mercadorias por via fluvial, transportadas para o Estado do Amapá e para a Ilha de Marajó. Contudo, sua posição geográfica privilegiada trouxe novas perspectivas à construção, se apresentando como uma das principais rotas marítimas de navegação do litoral brasileiro, permitindo conexão estratégica com portos de outros continentes, cabotagem, além da menor distância de navegação para a Américas do Norte, América Central, bem como com a União Europeia, servindo como porta principal de entrada e saída da região Amazônica, foi-lhe atribuída posição de relevo tanto no cenário nacional quanto no âmbito internacional, ainda que extremamente subutilizado Rodrigues *et al* (2020).

A cidade de Santana do Amapá abriga o Porto, que está localizado à margem esquerda do Rio Amazonas, no canal de Santana. Em frente existe uma ilha que carrega o mesmo nome da cidade, a Capital Macapá dista 18 km da área portuária. Sua área de abrangência se estende ao estado do Amapá e aos Municípios paraenses de Afuá e Chaves, situados na foz do Rio Amazonas, a noroeste da ilha de Marajó. Algumas das principais aplicabilidades do Porto são a sua posição geográfica estratégica pois fronteira com departamento francês, possui relevante proximidade com Caribe e EUA é a entrada e saída do Amazonas, pode proporcionar a possibilidade de atraque de grandes contêineres, possui infraestrutura portuária instalada, certificação para funcionamento desde 2004 e uma ampla conectividade rodoferroviária (RODRIGUES *et al*, 2020).

A dinâmica dos rios na Amazônia está predominantemente ligada às ameaças ou eventos naturais que podem desencadear um dano, a região possui uma certa vulnerabilidade. No Amapá, os riscos conhecidos são principalmente causados pelas inundações e erosões que conseqüentemente revelam uma instabilidade de taludes, seja por características naturais ou induzidas. Há também uma estreita relação desses riscos a submersão lenta ou abrupta de espaços litorais continentais, intrusão salina, mudanças climáticas e até mesmo o uso e ocupação do solo (TAKIYAMA E SILVA, 2009; IPCC, 2019; RODRIGUES E JUNIOR, 2021).

#### **4.2. ROMPIMENTO DE TALUDE NO PORTO DE SANTANA**

Massey et al (2013), explica que o profundo entendimento relacionado às atividades espaço-temporais dos movimentos de deslizamento é de suma importância tanto para a estimativa dos riscos envolvendo deslizamentos quanto para a modelagem de desenvolvimento futuro. O estudo dessas interações visa prioritariamente entender o mecanismo que envolve essas estruturas e suas respectivas reações de movimento. O do movimento de taludes requer um constante monitoramento, visto que esse acompanhamento pode promover o melhor entendimento da dinâmica do escorregamento e alerta precoce de escorregamento (LIU et al, 2016).

O movimento de talude apresentado em 2013 na ocasião do acidente às margens do porto de Santana se destacou por possuir em parte do solo estudado, características específicas que segundo Teixeira et al (2019), ainda não tinham sido classificadas em nenhuma outra região do Brasil. O solo considerado sensível possui suas principais citações em regiões como Canadá, Finlândia, Noruega, Rússia, Suécia e no estado americano do Alasca.

As peculiaridades apontadas pelo autor indicam que na área do acidente foi encontrado em grande parte das amostras da pesquisa, um solo sensível que também pode ser denominado de “argilas sensíveis” ou “argilas rápidas”. L'Heureux et al (2014), descreve que um solo pode ser denominado sensível se sua sensibilidade ( $S_t$ ) for maior que 1. A sensibilidade é a razão entre a resistência do solo não perturbado e a resistência ao cisalhamento remodelado. O autor pontua ainda que existem diversas definições para o termo “argila sensível”, visto que diferentes estudos possuem um determinado “ponto” de sensibilidade para enquadrar o solo nesse respectivo termo.

Para Richer et al (2020), a argila rápida é assinalada pela diferença imponente de comportamento entre seus estágios não perturbado e remodelado, pois se comporta mais ou menos como um fluido quando perturbada. Ele destaca ainda que compreender a estabilidade de taludes neste tipo de solo é vital para garantir a segurança das pessoas e das infraestruturas nestas áreas. O que demonstra a importância da descoberta do estudo de Teixeira et al (2019) a frente do sinistro no Porto de Santana, visto que diante das características peculiares do solo, o monitoramento dessa área é de suma relevância tanto para a manutenção da qualidade ambiental quanto para a correta adequação das infraestruturas da região a fim de evitar e/ou mitigar possíveis acidentes no local. A figura 1 apresenta o resultado do acidente acima descrito.

Figura 1: Deslizamento no Porto de Santana – AP em 2013.



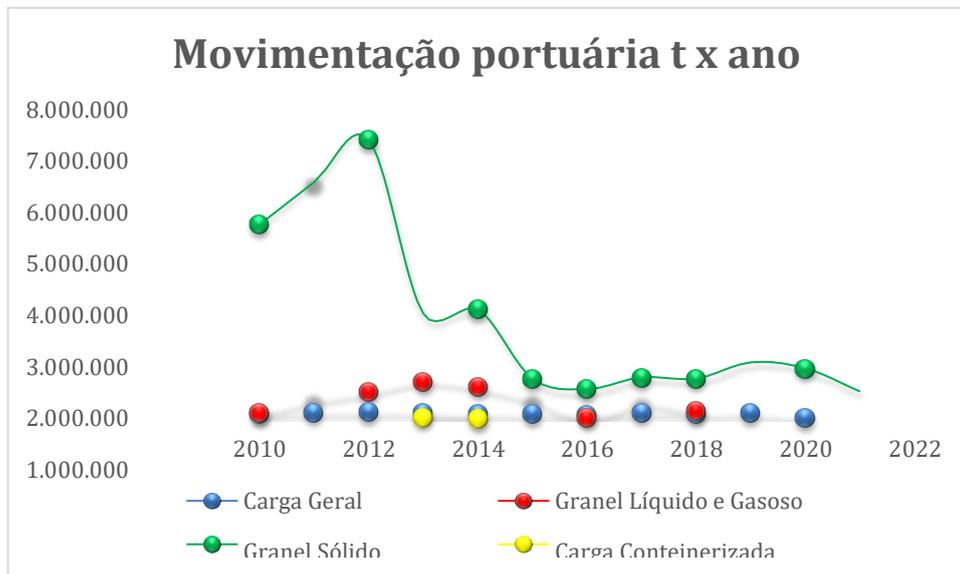
Fonte: Agência Amapá, 2013.

#### 4.3. TERMINAL DE GRANÉIS LÍQUIDOS

Na área de estudo analisada fazem parte do conjunto de infraestrutura local uma instalação de Terminais de Granéis Líquidos – TGLs. Segundo o Plano Nacional de Logística Portuária-PNLP (2017), em terminais portuários, os granéis líquidos são definidos como mercadorias líquidas transportadas em grandes quantidades, sem embalagem.

Os granéis líquidos são de grande importância para o setor portuário brasileiro. Em 2020, o setor movimentou mais de 290 milhões de toneladas de granéis líquidos (ANTAQ, 2021), esse registro representa cerca de 25% de toda a movimentação portuária no país. Os principais produtos são os combustíveis minerais, óleos e seus derivados, matérias betuminosas e ceras minerais, chegando a representar aproximadamente 92% das cargas referente aos granéis líquidos e gasosos. Como mostra o gráfico 1, para o Porto de Santana, a ANTAQ não possui registros para os anos de 2019 e 2020 sobre o volume de movimentação de granéis líquidos e as últimas atualizações completas de um ano de dados datam de 2018, logo estes serão os dados apresentados aqui.

Gráfico 1: Movimentação em toneladas/ano no Porto de Santana.



Fonte: ANTAQ (2021), adaptado pelo autor.

No ano de 2018, o Porto Santana movimentou 204.420,00 toneladas, ou seja, cerca de 15% de toda a movimentação de cargas realizada no Porto de Santana neste ano foram de granéis líquidos (ANTAQ, 2021). O Plano Nacional de Logística Portuária (2017), apresenta uma determinada estrutura de classificação, que divide em duas vertentes o setor de granéis líquidos:

- Combustíveis e químicos, ou seja, o petróleo e seus derivados, álcool além de produtos da indústria química.
- Produtos de origem vegetal, como sucos, óleo de soja e outros produtos alimentícios.

Dentre os citados, o primeiro possui maior abrangência em relação a quantidade. A importância do setor de granéis líquidos é ressaltada pelo fato do Brasil ser expressivamente atuante tanto na importação quanto exportação desses produtos, sendo o 12º maior produtor de petróleo no mundo e o 5º maior consumidor (FERREIRA, 2017).

Uchôa (2014), descreve em sua obra o procedimento decorrente do processo de transporte de combustível, óleo diesel, dos navios de carga até os granéis líquidos de armazenamento no Porto Organizado de Santana-AP. Inicialmente transcorre o seguinte percurso, as embarcações-tanque contendo combustíveis atracam no porto público denominado píer B para iniciar os trâmites de descarga.

O percurso de óleo diesel dos navios até o parque de tancagem da Ipiranga é feito com a utilização das balsas-tanque, um tipo de embarcação de menor porte, que se faz necessária haja vista que o terminal de uso privativo (TUP) da Ipiranga não dispõe de calado suficiente para a atracagem dos navios-tanque. Esse caminho de cerca de 1,8 km entre o píer e o TUP acaba fazendo com que este procedimento seja demorado e passivo de inúmeras lacunas de ineficiência. Posteriormente, através do sistema de oleoduto, o material segue para o parque de tancagem onde serão armazenados nos tanques da distribuidora Ipiranga, a figura 2 descreve com mais clareza esse trajeto (UCHÔA, 2014).

Figura 2: Trajeto realizado pelo óleo diesel desde o seu desembarque até o armazenamento.



Fonte: Google Earth, adaptado pelo Autor, 2021

O transporte do óleo diesel nas imediações das instalações do Porto Organizado de Santana tem o aparato de um oleoduto, que contava até maio de 2021 com o documento de autorização para esta operação, emitido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, nº 468, DE 15.10.2012 - DOU 16.10.2012, dispondo das especificações descritas na tabela 1. Atualmente esta autorização encontra-se revogada pelo Despacho SIM-ANP Nº 542, de 27 de maio de 2021- DOU de 28.05.2021, a solicitação foi feita pela própria empresa autorizada, conforme as prerrogativas do Inciso II do art. 36 da RESOLUÇÃO ANP nº 52, de 02 de dezembro de 2015.

Tabela 1: Especificações do oleoduto utilizado no transporte de óleo no Porto Organizado de Santana-AP.

Extensão (m)	Diâmetro (pol)	Produto	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura	Pressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Material
270	10	Diesel	800	Ambiente	10	Aço carbono SCH 20

Fonte: Autorização ANP N° 468, DE 15.10.2012 - DOU 16.10.2012.

Atualmente o direito de uso e exploração do terminal privado pertence a empresa Ipiranga Produtos de Petróleo S/A, o requerimento de autorização consta no processo 50300.07128/16-63 e pode ser acesso na base de dados disponibilizada pelo site da ANTAQ.

#### 4.4. COMPORTAMENTO DO ÓLEO NA ÁGUA

As atuações do óleo em água envolvem fatores como, expansão, evaporação, emulsificação, dissolução, sedimentação e adsorção do filme de óleo, sendo considerados os processos mais importantes de um início de derrame de óleo segundo Siqueira (2015) e Zhen et al (2020). O estudo das reações que decorrem de um derramamento de óleo em ambientes aquáticos é classificado na visão de Zhen et al (2020), um processo complexo tanto relacionados ao movimento quanto nas variações do mesmo, diversas variáveis podem fazer parte desse processo de alguma forma, seja por meios físicos, químicos ou biológicos, ou mesmo uma correlação de todos esses fatores.

Além das interferências já citadas e complementando o posicionamento do autor, Abreu et al (2020) e Cunha et al (2021), discorrem das condições hidrodinâmicas, meteorológicas, tempo de residência da água e propriedades do óleo, mostrando que todas essas características estabelecem um dinamismo intrínseco nesse comportamento do óleo na água.

A multidisciplinaridade que envolve a compreensão acerca do intemperismo do óleo em contato com a água possui diversas análises e definições, como base da pesquisa tem-se como parâmetro as especificações segundo ITOPF (2012), que trazem o seguinte posicionamento:

- Espalhamento: Trata-se do deslocamento horizontal da mancha de óleo na superfície da água logo após o sinistro de derramamento, afetado diretamente pela ação multifatorial de ventos, marés, ondas e correntezas, deslocando-se para

regiões distantes do ponto de lançamento, podendo atingir áreas sensíveis mais intensamente nas primeiras 24 horas e durar até semanas segundo American Petroleum Institute – API (1999), além disso esse processo é fortemente relacionada a outra propriedade física a saber, a viscosidade, pois quanto menos viscoso o fluido, mais rápido será o seu espalhamento.

- **Evaporação:** Através da relação direta com a interferência da radiação solar, temperatura e velocidade dos ventos, os compostos mais voláteis presentes no óleo são transferidos para a atmosfera por intermédio da evaporação, que por sua vez está diretamente relacionada à extensão da superfície de espalhamento do óleo e, após este processo, os compostos restantes terão alta densidade e viscosidade.
- **Dispersão:** Sob efeito de ondas e turbulência, toda a mancha de óleo, ou parte dela, divide-se em gotículas de diâmetros variados, logo sua reação está intrínseca às condições da superfície do mar no local onde houver derramamento de óleo. As gotículas de menor dimensão podem permanecer em suspensão enquanto as maiores sobem à superfície e se aglomeram, formando uma nova mancha de aspecto fino.
- **Dissolução:** Os compostos mais leves, hidrocarbonetos aromáticos tais como o benzeno e tolueno, são pouco solúveis, porém são os mais voláteis e dispersados com maior facilidade para a atmosfera através da evaporação, já os componentes pesados de petróleo bruto são praticamente insolúveis em água.
- **Emulsificação:** As moléculas de hidrocarbonetos incorporam moléculas de água formando emulsão água-óleo, que ocorre mais intensamente entre as dez primeiras horas após o derramamento e os sete primeiros dias, e pode prolongar-se por até um ano (API, 1999). Segundo Lopes (200), as emulsões de óleos pesados em ambientes de baixa circulação de energia como estuários, tendem a ser mais persistentes do que as de óleos leves.
- **Oxidação:** Camadas espessas de óleos muito viscosos ou emulsões água-em-óleo tendem a oxidar, resultando em resíduos persistentes, tal como compostos de alto peso molecular, esse processo ocorre devido ao efeito da radiação ultravioleta, onde os hidrocarbonetos que compõem o óleo podem reagir com o oxigênio. O resultado gerado por essa reação torna-se mais tóxico e solúvel na água e passam da superfície para a coluna d'água, processo que se inicia na primeira hora e pode durar até um mês (API,1999; ITOPI, 1986).

- **Sedimentação:** Componentes mais pesados do óleo que não se dissolvem na água associam-se à reduzidas partículas inorgânicas e a materiais sólidos flutuantes (detritos, galhos e resíduos) e tendem a imergir, esse processo ocorre de maneira mais acentuada durante as primeiras 24 horas e pode se estender por até um mês após o vazamento e durar vários anos (API, 1999). Estima-se que em áreas costeiras e estuários a grande quantidade de sólidos em suspensão podem favorecer esse processo de sedimentação de partículas oleosas no fundo do mar, devido a essa interação entre as gotículas de óleo dispersas e os sólidos em suspensão.
- **Biodegradação:** A biodegradação limita-se pela presença de oxigênio e, em algumas situações, este processo ocorre lentamente, um exemplo disso é quando o óleo se incorpora ao sedimento e atinge o substrato. Uma variedade de microrganismos presentes em ambientes aquáticos é capaz de metabolizar os compostos do óleo, utilizando-os como fonte de carbono e energia.

#### **4.5. EFEITOS DA POLUIÇÃO POR ÓLEO EM AMBIENTES AQUÁTICOS**

Segundo Little et al (2015), às incumbências alusivas ao petróleo podem favorecer a contaminação de sedimentos superficiais por hidrocarbonetos, e esses acessos de contaminantes irrefutavelmente envolvem processos de arraste de sedimentos para cima dos estuários, frequentemente por períodos extensos.

Para Zhen et al (2020), os acidentes envolvendo derivados de petróleo em ambientes marinhos ultrapassam a magnitude dos impactos ambientais, tão somente o ser humano envolto nessa trama sofrerá graves consequências de um sinistro dessa amplitude, visto que além dos prejuízos diretos ao ecossistema e aos organismos do ambiente afetado, há também os efeitos socioeconômicos ligados às populações que dependem da aquicultura como meio de subsidiar seu sustento.

Outro fator importante que deve ser observado em situações envolvendo plumas de óleo em áreas aquáticas é o coeficiente de absorção dos nós de contorno terrestre. Para a identificação dos valores desses coeficientes recorre-se ao Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da bacia marítima da foz do Amazonas, também conhecidas como Cartas SAO (IEPA, 2016). Esse Atlas fornece informações quanto às características dos diversos tipos de segmentos

presentes na Foz do Amazonas ao classificá-la de acordo com o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL). Esse índice varia de 1 a 10.

As Cartas SAO produzidas pelo IEPA (2016), funcionam como instrumento auxiliar na redução e na mitigação dos impactos ambientais provocados por derrames de óleo e direcionam os esforços de contenção, limpeza e remoção do óleo, através da identificação da sensibilidade dos ecossistemas costeiros e marinhos, de seus recursos biológicos e das atividades socioeconômicas que caracterizam a ocupação dos espaços e do uso dos recursos costeiros e marinhos nas áreas estudadas.

Posto que toda amplitude da zona costeira brasileira seja suscetível a ocorrência de sinistros referentes ao derrame de óleo, Lima et al (2020), destaca que os ambientes mais sensíveis na zona costeira amazônica são as várzeas e manguezais com ISL variando de 9 a 10 na escala de Sensibilidade ambiental a óleo. Quanto maior a classificação dessa escala mais dificuldade a área tem para se recuperar de um acidente envolvendo algum tipo de óleo nocivo.

A figura 3 traz as informações referente a área de estudo, mais precisamente a carta FZA15 com todas as características da área e classificação de empreendimentos e recursos socioeconômicos, recursos biológicos, classificação geológicas e respectivas sensibilidade da costa. Essas informações serviram de parâmetro para estimar o percentual de áreas sensíveis afetadas por um derramamento de óleo nessa foz.



#### **4.6. CONVENÇÕES INTERNACIONAIS SOBRE A POLUIÇÃO POR ÓLEO**

O petróleo e seus derivados é uma mistura complexa de substâncias que em contato com a água pode ter um comportamento que desencadeia reações e efeitos potenciais diversos. A utilização desse tipo de recurso natural não renovável merece especial atenção, haja vista os graves prejuízos que causam ao ambiente (UCHÔA, 2014).

Em uma ampla revisão das atividades terrestres e das fontes poluição que afetam a qualidade e os usos do meio ambiente marinho, o Grupo Conjunto de Especialistas em Ciências Científicas das Nações Unidas Aspectos da Proteção Ambiental Marinha (GESAMP) identificou dois caminhos para melhorar o controle de derramamentos de óleo acidental: redução de risco e desenvolvimento de capacidades de resposta a derramamentos. Dentro em particular, concluiu-se que ganhos significativos podem ser obtidos por implementar tecnologias e procedimentos existentes de forma mais ampla, especialmente em países em desenvolvimento (GESAMP, 2001).

Ao longo dos anos, foram elaborados acordos e convenções que precederam as legislações que surgiram com o objetivo de evitar e impor a mitigação de eventos indesejáveis desta natureza, dentre as quais cabe destacar a Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em Casos de Poluição - Oil Pollution Preparedness, Response and CoOperation (OPRC), proposta em 1990 pela Organização Marítima Internacional (IMO). Dentre os vários objetivos, a OPRC visa a implantação, por partes dos países signatários, do Plano Nacional de Contingência.

No ano de 1948, uma conferência internacional em Genebra adotou uma convenção estabelecendo formalmente a Organização Marítima Internacional – International Maritime Organization (IMO), tendo como principal objetivo ofertar mecanismos para cooperação entre Governos no campo da regulamentação governamental e práticas relacionadas a questões técnicas de todos os tipos que afetam o transporte marítimo envolvido no comércio internacional de modo a estimular e facilitar a adoção geral dos mais elevados padrões praticáveis em matéria de segurança marítima, eficiência da navegação e principalmente na prevenção e controle da poluição marinha provocada por navios. A Convenção para a Prevenção da Poluição do Mar por Óleo – OILPOL/54 (Oil Pollution Convention) que aconteceu em 1954 teve como foco eliminar por completo a poluição intencional e minimizar as descargas acidentais de hidrocarbonetos no meio ambiente marinho e outras substâncias prejudiciais, foram estabelecidas regras internacionais com significado universal. Ela foi a

primeira convenção internacional a impor limites de descarga de misturas oleosas por navios petroleiros (IMO, 2021).

Dentre as aproximadamente 50 convenções realizadas pela organização, algumas foram regulamentadas pelo governo brasileiro, dentre elas tem-se (IMO, 2021):

- Convenção sobre a Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo (Civil Liability Convention - CLC 69), cujo objetivo principal foi estabelecer o limite de responsabilidade civil por danos a terceiros causados por derramamentos de óleo no mar, excluindo-se os derivados claros como gasolina, óleo diesel e querosene, criando assim um sistema de seguro compulsório, que se aplica aos navios petroleiros dos países signatários à esta Convenção. Esta Convenção está ratificada por 79 países, entre eles o Brasil, excluindo-se os Estados Unidos.
- Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios – MARPOL 73/78, esta por sua vez posteriormente sofreu alterações por meio do Protocolo de 1978 e por uma série de emendas a partir de 1984, visando introduzir regras específicas para estender a prevenção da poluição do mar às cargas perigosas ou equivalentes às dos hidrocarbonetos. Se divide atualmente em seis anexos: (I- Regras para prevenção da poluição por óleo, a primeira a entrar em vigor), (II- Regras para o controle da poluição por substâncias nocivas líquidas transportadas a granel), (III- Regras para prevenção da poluição ocasionada por substâncias nocivas, transportadas por mar em embalagens (fardos, containers, tanques portáteis ou vagões tanques ferroviários e rodoviários)), (IV- Regras para a prevenção da poluição por esgotos provenientes de navios), (V- Regras para prevenção da poluição por lixo provenientes dos navios), (VI- Regras para prevenção da poluição por emissões gasosas provenientes dos navios) este último entrou em vigor somente a partir do ano de 2005. Em função das inovações tecnológicas, científicas e políticas as regras que norteiam a MARPOL passam por um processo dinâmico de aperfeiçoamento.
- Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo – OPRC 90, que surgiu com a afirmação e propósito de que as partes se comprometem, conjunta ou individualmente, a tomar todas as

medidas adequadas para o preparo e a resposta em caso de incidente de poluição por óleo.

#### **4.7. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA REFERENTE À POLUIÇÃO POR ÓLEO**

De modo a regulamentar a aplicação da convenção CLC de 69 foi estabelecido o Decreto Federal nº 83.540, de 4/6/79, para tais providências, dentre as quais cumpre destacar:

Art. 2º: O proprietário de um navio que transporte óleo a granel como carga é civilmente responsável pelos danos causados por poluição por óleo no território nacional, incluindo o mar territorial. (...)

Art. 6º: Os órgãos estaduais de controle do meio ambiente que tenham jurisdição na área onde ocorrer o incidente executarão, em articulação com o IBAMA, as medidas preventivas e corretivas necessárias à redução dos danos causados por poluição por óleo, bem como supervisionar as medidas adotadas pelo proprietário do navio, concernente a essa redução dos danos. (...)

Art. 8º (...)

§1º - Qualquer incidente deverá ser comunicado imediatamente à Capitania dos Portos da área ou órgão a ela subordinado, por quem tomar conhecimento de fato que possa resultar ou tenha resultado em poluição por óleo.

§2º - A Capitania dos Portos, recebida a comunicação de que trata o parágrafo anterior deverá participar o incidente, com urgência, a SEMA e aos órgãos estaduais de controle de meio ambiente da área atingida. (BRASIL, 1979).

A Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL), foi promulgada pelo Decreto Legislativo nº 2.508 em 4 de março de 1998, na referida data a convenção já havia passado por atualizações mediante as emendas de 1984, logo o decreto já incluiu os novos anexos da mesma.

Ainda no mesmo ano a legislação brasileira promoveu mais um avanço ao promulgar mediante o Decreto Legislativo nº 2.870, de 10 de dezembro de 1998, a Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação (OPCR 90) em caso de poluição por óleo, assinada em Londres, em 30 de novembro de 1990, da qual expõe-se destaque para o seguinte artigo:

Art. 6º: Cada parte deve estabelecer um sistema nacional para responder pronta e efetivamente aos incidentes de poluição por óleo. Este sistema incluirá, como um mínimo:

a) a designação de:

I. A(s) autoridade(s) nacional(is) competente(s) responsável(eis) pelo preparo e resposta em caso de poluição por óleo;

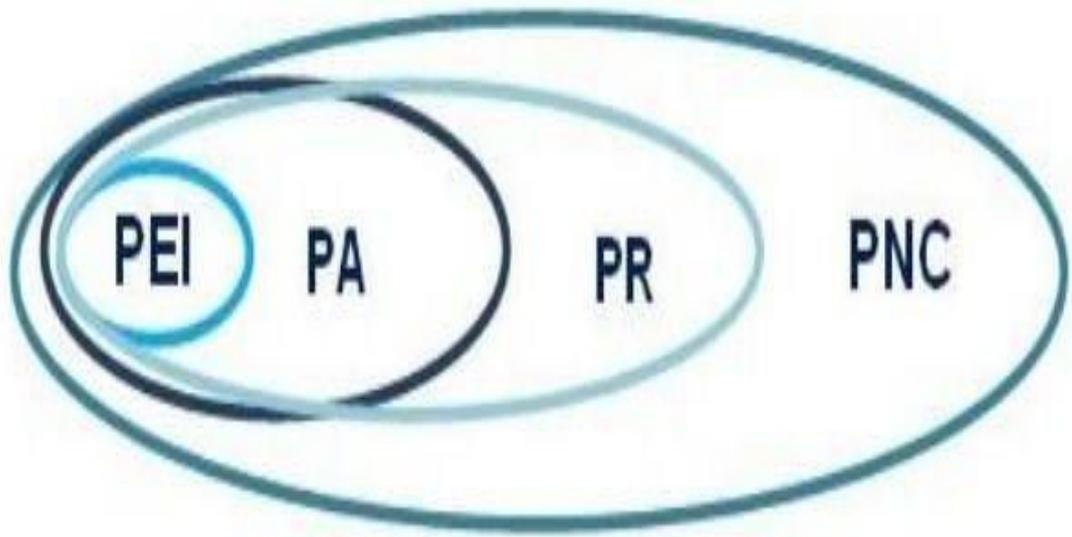
- II. O ponto ou pontos de contato operacionais, de âmbito nacional, responsável pelo recebimento e pela transmissão de relatórios sobre poluição por petróleo, como referido no artigo 4º; e
- III. Uma autoridade credenciada para agir em nome do Estado para solicitar assistência ou tomar a decisão de prestar a assistência solicitada;
  - b) Um plano nacional de contingência, para preparo e resposta que inclua a relação organizacional entre os diversos órgãos envolvidos, tanto públicos quanto privados, e que leve em consideração as diretrizes elaboradas pela Organização Marítima Internacional. (BRASIL, 1998).

Apesar de todas as iniciativas já tomadas para resguardar a integridade ambiental, o peso de maior importância até então se deu por meio da chamada “Lei dos Óleo” concebida pela Lei Federal nº 9.966, de 28/4/2000, tornando-se um grande marco na iniciativa de preservação ambiental, frente a poluição marítima. Em síntese, trata da prevenção, controle e fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e outras providências. A referida lei também teve a responsabilidade de revogar e substituir a antiga lei do óleo (Lei nº 5.357/1967), atribuindo a partir de então à Autoridade Marítima a responsabilidade pela prevenção e fiscalização da poluição ambiental causada por navios, instalações de apoio e plataformas.

Conforme o artigo 8º da referida lei, são legalmente previstos em território nacional quatro tipos de planos de combate à poluição provocada pelo derramamento de óleo:

- 1) PEI - Plano de Emergência Individual: documento obrigatório para cada instalação, sendo exigido e aprovado no âmbito do Licenciamento Ambiental do empreendimento (IBAMA, 2013);
- 2) PA - Plano de Área: consolidação de diversos Planos de Emergência Individuais de empreendimentos localizados em uma determinada área geográfica e deve ser aprovado pelo órgão de licenciamento ambiental (IBAMA, 2016);
- 3) PR - Plano de Contingência Regional: possui abrangência local ou regional, em articulação com os órgãos da defesa civil, contudo, não há no Brasil, um PR com a participação de órgãos ambientais (CETESB, 2018);
- 4) PNC - Plano Nacional de Contingência: plano adotado em acidentes de maiores proporções, onde a ação individualizada dos agentes não se mostra suficiente para a solução do problema (CETESB, 2018). A figura 4 exemplifica as áreas de abrangência dos planos de contingência brasileiros nesse cenário.

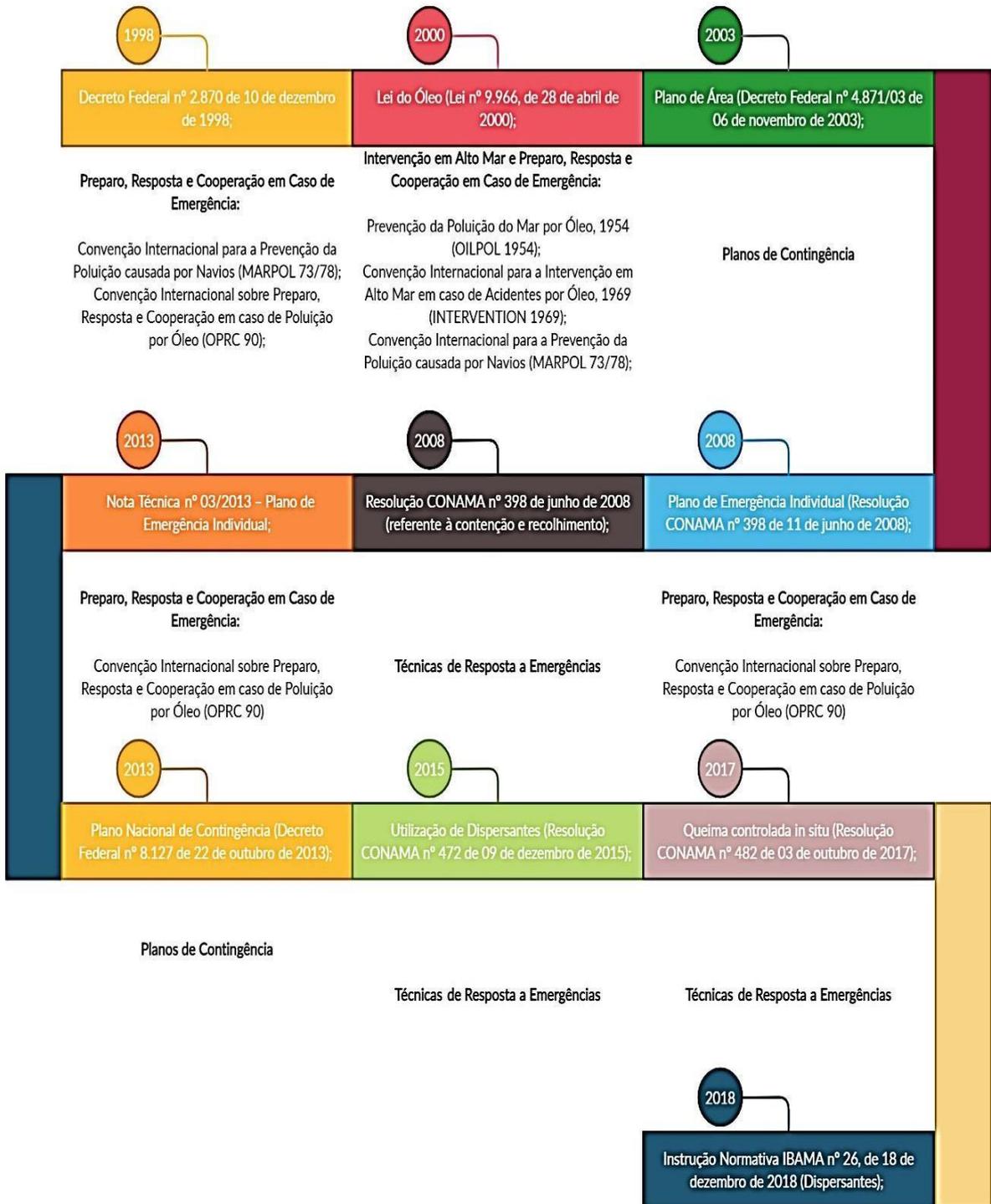
Figura 4: Abrangência dos diferentes Planos de Combate à Poluição por vazamento de óleo.



Fonte: CETESB, 2018.

Seguindo uma cronologia da legislação brasileira nesse segmento observou-se que a mesma acompanha as práticas internacionais e em determinados atos regulatórios por vezes mais restritiva e detalhada, como por exemplo, nos Planos de Contingência, Técnicas de resposta a Emergências e Monitoramento. A figura 5 demonstra um resumo desses avanços legais:

Figura 5: Cronologia das Legislações brasileiras e sua relação com as convenções



Fonte: BRASIL, 2021. Adaptado pelo autor.

#### **4.8. A MODELAGEM COMO APARATO NO AUXÍLIO DA GESTÃO AMBIENTAL**

A modelagem numérica surge como um substancial aparato para assessorar o monitoramento e treinamento para a prevenção e resposta a acidentes no meio hídrico (GRAZIOTTO, 2019; ZHEN et al, 2020). Uma modelagem é uma maneira de representar um sistema ou algum objeto em uma linguagem computacional, possibilitando assim uma melhor compreensão do comportamento do fenômeno em análise. Em Oceanografia, a modelagem numérica hidrodinâmica faz uso de equações básicas de conservação de massa e movimento juntamente com medições in situ de nível médio do mar, correntes e propriedades físico-químicas da água do mar, como temperatura e salinidade. As respostas provenientes de um modelo hidrodinâmico podem ser utilizadas em outros programas para simular o trajeto de um derrame de petróleo e a sua intemperização. Uma série de modelos foram elaborados, os quais seguem diversas abordagens (ITOPF, 2021; GRAZIOTTO, 2019).

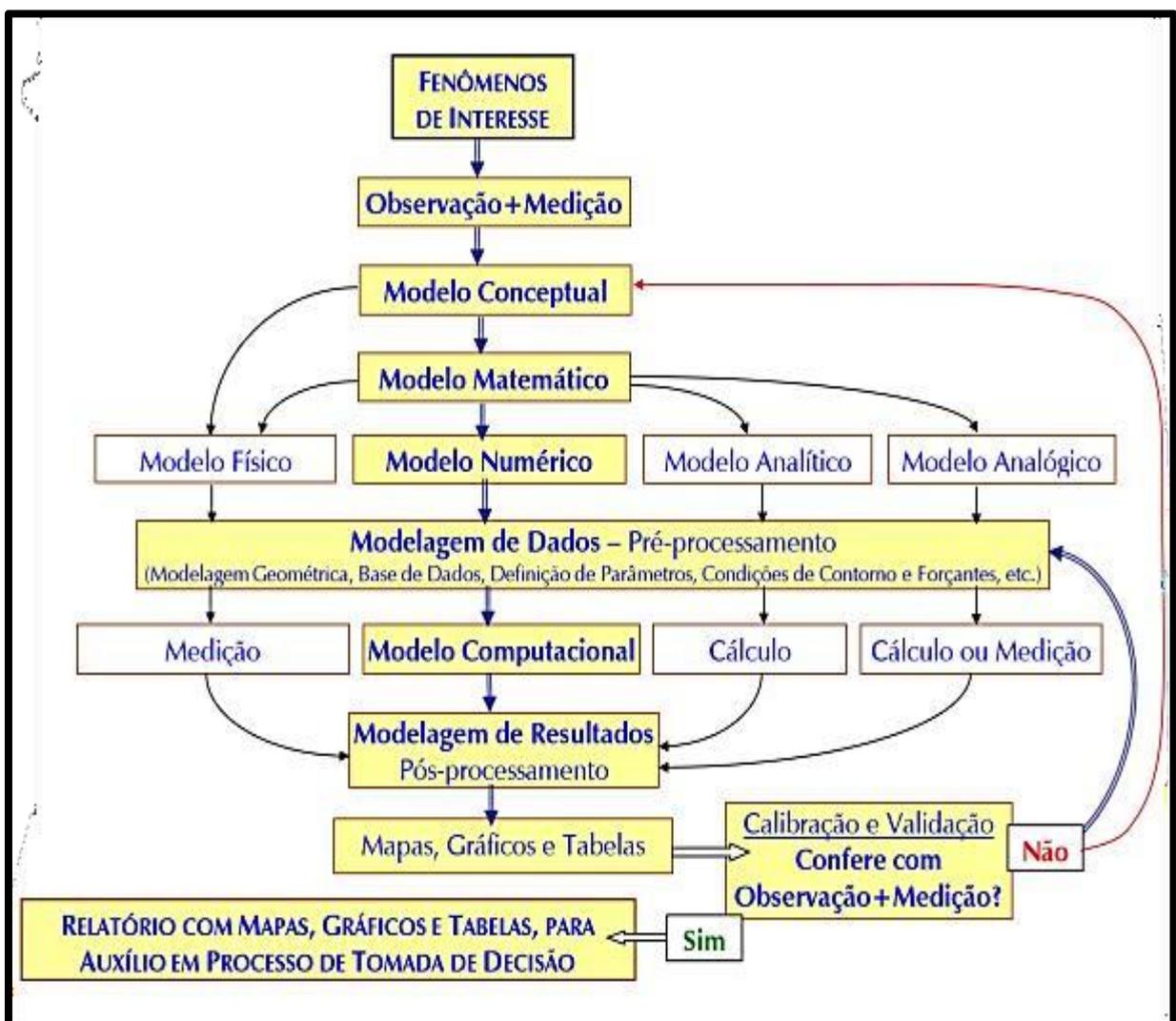
Segundo Caseiro (2011), a utilização destes modelos depende de uma série de passos, dentre eles o de compreender a dinâmica do ambiente. Posteriormente deve-se converter este conhecimento em um modelo matemático utilizando equações diferenciais. Após esta etapa, é realizado o processamento, o qual permite obterem-se informações qualitativas por dados de entradas, como, por exemplo, dados de corrente, vento e ondas. Por último, o pós-processamento envolve confirmar os resultados do pré-processamento pelo processo de calibração e validação com dado real ou provável.

Rosman (2021), expõe os modelos de hidrodinâmica ambiental como ferramentas substanciais à gestão e ao planejamento de ações em corpos de água naturais, pois permitem analisar processos relativos a circulação hidrodinâmica viabilizando a avaliação de alterações em quantidades de movimento {massa  $\times$  velocidade}, que geram variações em níveis de água e correntes, qualidade das águas, pois permite avaliar o transporte de substâncias que geram alterações nos constituintes das águas e em sua qualidade e até mesmo processos sedimentológicos possibilitando avaliar ciclos de erosão, transporte e deposição de sedimentos que geram a evolução da morfologia, ou a morfodinâmica.

Modelos são ferramentas integradoras, sem os quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica destes fenômenos em sistemas ambientais complexos como rios, lagos e reservatórios, estuários, baías e zonas costeiras. Em função da necessidade de abordagens interdisciplinares

que envolvam mecanismos difusivos e processos físicos, químicos e biológicos no transporte de substâncias, a modelagem quantitativa da qualidade da água é um grande desafio de diversos estudos, como consequência, o desenvolvimento de modelos matemáticos para quantificar esses processos tem sido objeto de intensas pesquisas nas últimas décadas (CUNHA et al., 2018; ROSMAN, 2021). A complexidade do sistema deve ser levada em consideração durante o processo de modelagem, garantindo que ele tenha a capacidade de modelar o comportamento ambiental e avaliar seus diversos efeitos, a figura 6 descreve o processo de modelagem hidrodinâmica ambiental, com ênfase no caminho mais usual. Modelos numéricos têm sido usados como uma ferramenta científica e gerencial para analisar distribuições espaço-temporais de parâmetros de qualidade de água não conservadores (CUNHA et al., 2018; ROSMAN, 2017; VENÂNCIO et al., 2017;).

Figura 6: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental, com destaque a rota mais.



A modelagem numérica considerando planícies de marés tem sido usada em diversos trabalhos para identificar feições específicas na hidrodinâmica estuarina, como mudanças na assimetria da onda de maré e nos padrões do escoamento decorrente da presença de áreas alagadas sem vegetação e cobertas de manguezais. Projetos com a iniciativa de prevenção ou mitigação frente a eventuais acidentes ambientais, como derrames de petróleo, necessitam de uma complexa avaliação da resposta às ações hidrodinâmicas e a análise do escoamento nas proximidades da costa (GALLO; VINZON 2015; ROVERSI et al., 2016).

O incentivo proposto pelos meios de modelos matemáticos, com a elaboração de modelos numéricos para o gerenciamento de sistemas hidráulicos complexos, como múltiplos usos de canais de água, facilita o desenvolvimento e análise de projetos hidráulicos, permitindo a automação das operações desejadas, o gerenciamento de sistemas e a antecipação a tomadas de decisões mitigadoras (VENÂNCIO et al., 2017). Os dados de campo e os resultados provenientes da simulação numérica podem ser usados para analisar e estudar as medidas de gerenciamento operacional através do prognóstico de sistemas hidráulicos em diferentes cenários (MONTICELLI et al, 2019; VENÂNCIO et al, 2017).

A modelagem vem se firmando e se aprimorando dentro dos estudos e gerenciamentos ambientais como importante ferramenta de trabalho, diante da dinâmica e interdisciplinaridade que a mesma pode se difundir (J LU et al, 2017). Cunha et al (2018), utilizou em seu trabalho um modelo de simulação (SisBaHiA) para estimar as distâncias máximas de dispersão de sementes por ciclo de maré, que foram então comparadas com dados de experimentos de dispersão de sementes in situ. O estudo se estabeleceu ao longo de um trecho de 27 km de um afluente do estuário do Amazonas.

Gurgel (2016), estabeleceu através de um modelo de transporte lagrangeano as características de resposta de uma possível mancha de óleo, em caso de derrames acidentais na área portuária na Enseada dos Anjos no município de Arraial do Cabo, simulando o comportamento da mancha conforme a incidência dos ventos e registrando as diversas relações em cada cenário proposto, fornecendo subsídios para se estabelecer estratégias de prevenção e gestão dos impactos ambientais. O trabalho foi desenvolvido através do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA, e proporcionou uma boa resposta ao entendimento do comportamento da pluma em diferentes cenários simulados no estudo.

O mesmo software foi aplicado por Cunha (2021) para estimar os riscos de contaminação por óleo no canal de Santana por meio do traslado de embarcações na região, o

estudo foi aplicado para diferentes cenários tanto sazonais, quanto em características do vento. Tal modelagem obteve excelentes respostas e mapeamento das possíveis reações provenientes de um acidente envolvendo combustível das embarcações, o que infere que a aplicabilidade do sistema e simular o acidente com os grânéis líquidos pode ser elaborada com eficiência e promover bons resultados.

#### **4.9. SISBAHIA**

O software SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental foi escolhido para ser utilizado na elaboração dos modelos devido possuir uma interface de trabalho extremamente amigável, necessidade computacional reduzida podendo ser instalado em computadores pessoais de uso comum, possui código aberto que pode ser cedido por meio de uma solicitação formal, de domínio público, cedido gratuitamente para usos acadêmicos e profissionais, desde que não envolvam uso comercial, além de ser um sistema produzido em âmbito nacional e poder desenvolver novas capacidades no uso do sistema.

O SisBaHiA, é um software profissional de modelos computacionais desenvolvido em conjunto entre a Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia de Oceânica e da Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1987 e deste então passa por constantes melhoramentos e atualizações, tais ampliações de escopo e aperfeiçoamentos são provenientes principalmente através dos inúmeros estudos, teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa que envolvem o sistema (COPPE, 2017). É dotado dos seguintes módulos:

- a) Módulo Hidrodinâmico:
  - Circulação hidrodinâmica promediada na vertical (2DH);
  - Circulação hidrodinâmica tridimensional (3D);
- b) Transporte Euleriano de contaminantes dissolvidos na coluna de água;
- c) Transporte Lagrangeano de contaminantes em qualquer faixa da coluna de água, podendo ser flutuantes, ou dissolvidos, incluindo modelo probabilístico;
- d) Parâmetros de Qualidade da Água: Sal, Temperatura, OD, DBO, Nitrogênio, Fósforo e Nitrogênio;
- e) Transporte de Sedimentos, coesivos e não coesivos;

- f) Geração de Ondas;
- g) Propagação de ondas;

Esse trabalho será pautado nos resultados provenientes do de transporte lagrangeano(3D). Para o perfeito funcionamento do sistema existem determinados passos a serem realizados antes mesmo da execução dos módulos, sendo o hidrodinâmico uma exigência para o funcionamento dos demais, logo, segue a relação dessa estrutura de curso a ser seguida (COPPE, 2017):

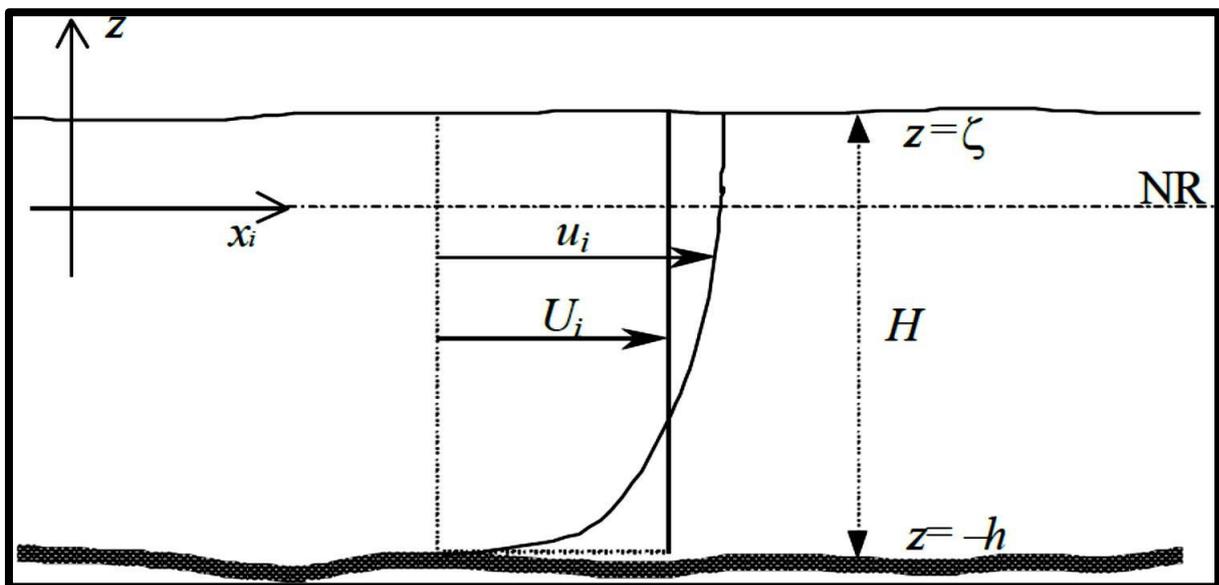
- **Definição de Contornos e Mapa Base:** O corpo d'água a ser modelado pode possuir diversas bases para a realização da definição dos contornos, como por exemplo: Imagem de satélite (principal fonte, Google Earth), cartas náuticas (Marinha), cartas topográficas e fotos aéreas. Para a obtenção dos resultados desejados as fontes devem representar o contorno mais atual e real da situação estudada, apontando qualquer alteração de curso, estradas, aterros e/ou outras ações de modificações do espaço. Ainda dentro desse item tem-se os contornos de terra e água, o primeiro representa as margens do domínio de modelagem onde são representadas as margens, estuários, como desembocaduras de rios de interesse, ilhas e ilhotas do espelho d'água, o segundo, também denominado de contorno aberto, representa um limite de conveniência demarcando o domínio em água, ou seja, o encontro da massa d'água a ser modelada com a massa d'água exterior. Ambos se complementam e juntos vão formar o mapa base do projeto, podem então seguir ao próximo passo.
- **Confecção da malha de elementos finitos:** é possível importar uma malha gerada em outro programa ou criá-la no próprio SisBaHiA®, que aceita malhas com elementos de dois tipos, quadrangulares e triangulares, na mesma malha. Como indicam os autores do próprio sistema, as malhas de elementos quadrangulares são melhores que as de elementos triangulares, e por isso são preferíveis.
- **Modelo hidrodinâmico:** Como mencionado anteriormente o software possui uma hierarquia de funcionamento, na qual os demais modelos dependem do hidrodinâmico, logo de posse dos pré-requisitos anteriores esse é o próximo passo a se seguir.

- **Modelo de transporte lagrangeano:** Nesse modelo serão gerados a modelagem de reação do óleo propriamente dita, com base nas características hidrodinâmicas já definidas anteriormente.

#### 4.9.1. MODELO HIDRODINÂMICO 3D: EQUAÇÕES GOVERNANTES

Neste tópico vamos abordar de forma resumida os principais quesitos responsáveis por nortear teoricamente toda a hidrodinâmica descrita nesse modelo. Segundo ROSMAN (2021), as equações de Navier-Stokes são responsáveis por governar a mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento. Ademais, essas equações representam o princípio da conservação de quantidade de movimento e, aliadas com a equação de continuidade, de estado e de transporte para cada integrante da equação de estado, formam o modelo matemático básico para todos os corpos hídricos. A análise da Figura 7 traz uma representação que facilita a visualização do sistema de coordenadas da modelagem. Representando o corpo de água, sendo  $u_i$  a velocidade horizontal na direção  $i$  e NR o nível de referência. Todos esses fundamentos podem ser encontrados na Referência Técnica do sistema (ROSMAN, 2021).

Figura 7: Sistema de Coordenadas de modelagem 3D.



Fonte: Rosman, 2021.

Partindo dessa análise, é possível resumir o sistema resolvido pelo programa ao apresentar as principais equações essenciais, adotadas na obtenção das quatro variáveis de circulação hidrodinâmica ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $\zeta$ ) em um escoamento 3D. Inicialmente é apresentado a seguir a equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção  $x$  (equação 01) e  $y$  (equação 02) respectivamente:

(01)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2v$$

(02)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2u$$

A seguir é descrita a equação de continuidade do volume integrada ao longo da vertical (equação 03) e a equação da continuidade do volume, considerando o fluido incompressível (equação 04) respectivamente:

(03)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^\zeta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^\zeta v dz = q_p - q_E + q_{Ia} - q_{Ie}$$

(04)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Na tabela 2 será utilizado como exemplo a equação na direção x para explicação dos respectivos termos que compõem as equações 01 e 02 de quantidade de movimento. Analogamente, o significado dos termos na direção y são semelhantes aos termos da equação na direção x, partilhando da mesma exemplificação.

Tabela 2: Explicação dos termos da equação de quantidade de movimento, aproximado hidrosticamente, na direção x e y analogamente.

Expressa a aceleração local do escoamento, i.e., em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.	$\frac{\partial u}{\partial t}$
---	---------------------------------

Expressa a aceleração advectiva do escoamento, i.e., em um específico momento, tais sentenças representam o balanço dos fluxos advectivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção $x$ , por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, essas sentenças são iguais a zero.	$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$
Expressa a mudança da pressão hidrostática na direção $x$ (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção $x$ . Este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para lugares onde o nível de água é mais baixo, conforme indica o sinal negativo.	$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$
Expressa a mudança da pressão hidrostática na direção $x$ (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade $\rho$ . O sinal negativo indica que este termo força escoamento de lugares onde a água permanece mais densa para locais onde a água é menos densa, gerando efeitos de empuxo que propendem a deixar no fundo a água mais densa. O termo $\rho$ será computado pela equação (5) apresentada nas referências técnicas de Rosman (2021), e os constituintes pelas equações de transporte.	$-\frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$
Expressa a resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, i.e., em um específico instante, tais termos representam o balanço dos fluxos difusivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção $x$ , por unidade de massa. É através desses termos que o escoamento sente o atrito do fundo e a ação do vento sobre a superfície livre gerando os perfis de velocidade.	$\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$
Expressa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra.	$2v$

Fonte: Rosman, 2021.

Com relação a equação da continuidade integrada ao longo da vertical e a equação da continuidade tem-se respectivamente na tabela 3 as seguintes definições para os termos que as compõem:

Tabela 3: Explicação dos termos da equação continuidade integrada ao longo da vertical e a equação da continuidade respectivamente.

Com significado análogo ao caso anterior. Contudo, da forma que se encontra escrita à esquerda, pode-se observar que a altura da coluna de água ( $\zeta + h$ ) varia no tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna de água nas direções $x$ e $y$ respectivamente, $\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^\zeta u dz$ e $\frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^\zeta v dz$ , e do balanço dos	$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^\zeta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^\zeta v dz \\ = q_p - q_E + q_{Ia} - q_{Ie} \end{aligned}$
--	--

fluxos de precipitação $q_p$ , evaporação $q_e$ e infiltração afluyente e efluente $q_{la}$ e $q_{le}$ , por unidade de área.	
Estabelece que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo. Logo, uma massa fluida escoada de forma incompressível, i.e., mudando de forma, porém permanece com o mesmo volume conforme se movimenta.	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

Fonte: Rosman, 2021.

Há um ponto a se destacar nesse modelo, para a implementação do mesmo é preciso definir algumas características do poluente e da fonte que será analisada, a exemplo da localização do ponto de lançamento, seu respectivo tipo, característica do óleo em questão, entre outros fatores. Os dados inseridos na simulação do transporte lagrangeano estão expostos na Tabela 4, sendo os mesmos aplicados para encontrar a curva de decaimento de óleo usada no estudo:

Tabela 4: Dados de entrada no software.

<b>Lançamento</b>	<b>Vazão e Superficial</b>
<b>Localização (UTM)</b>	479441,15 m E
	9993724,29 m S
<b>Óleo</b>	Tipo: persistente
	°API: 35,2
	Massa específica: 840 kg/m <sup>3</sup>
<b>Fonte</b>	Volume: 800m <sup>3</sup> /h
	Área: 200m <sup>2</sup>
	Espessura: 0,04m
	Forma: elipse
<b>Tempo de análise pós lançamento</b>	1 hora / 4 horas / 8 horas / 12 horas

Fonte: Autor, 2021.

A localização descrita na Tabela 4 está próximo ao início do oleoduto (dentro do rio), considerado como ponto inicial de um possível lançamento do óleo. Esse ponto foi escolhido devido ao interesse do estudo em analisar o risco dessa tubulação nessa área. No que se refere ao tipo e tamanho da fonte, a escolha do óleo foi baseada nas características do combustível usado na função deste oleoduto que trata do transporte de óleo diesel, considerado na literatura como persistente no meio ambiente. O volume atribuído tem como base a capacidade do

conduto, essas características foram adquiridas no documento de autorização para esta operação, emitido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, nº 468, DE 15.10.2012 - DOU 16.10.2012.

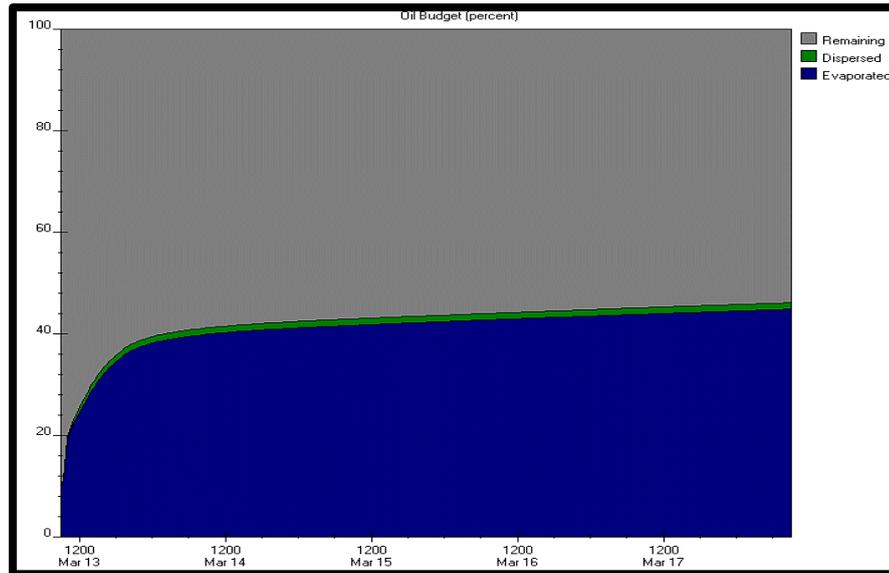
Além dos dados apresentados acima, também foi necessário apresentar a curva de decaimento do óleo. Essa curva é necessária devido aos processos físico-químicos que o petróleo sofre, sendo utilizado para tal o programa ADIOS2 (Automated Data Inquiry for Oil Spills) versão 2.0, criado pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ele apresenta licença gratuita e interface extremamente intuitiva. As curvas do ADIOS2 são bem aceitas internacionalmente e apresentam um bom modelo de decaimento da massa de óleo, levando em conta as complexidades dos mesmos de uma forma geral.

Através do espalhamento mecânico baseado nos modelos propostos pela Teoria de Fay usada no software ADIOS2 foi definida a área inicial da mancha. Assumindo-se que a mancha é elipsoidal e que a espessura do óleo na mancha é homogênea. De acordo com Fay, a mancha para de crescer quando a espessura está entre 0,1mm a 0,01mm (ROSMAN, 2021).

Vale ressaltar que esse modelo, e seus respectivos resultados, servem como um manual profícuo, para entender as estimativas de perda de massa que são geradas por um vazamento. A seguir, é apresentado o gráfico da simulação da perda de massa do óleo, a curva de decaimento, que é aplicada ao SisBaHiA®. Pode-se observar nas figuras 8 e 9 que o óleo escolhido pode perder cerca de 40% do volume na evaporação, e ainda uma pequena redução de aproximadamente 10%, pela dispersão natural.

A figura 8 representa em azul a quantidade evaporada, em verde, a quantidade dispersa e em cinza a quantidade remanescente do total simulado que são 800 m<sup>3</sup> de hidrocarboneto. Principais características: °API = 35,2, gravidade específica = 0,840 kg/m<sup>3</sup> a 22 °C, viscosidade = 40 cSt a 22 °C e ponto de fluidez = 38 °C (ADIOS2, 2021).

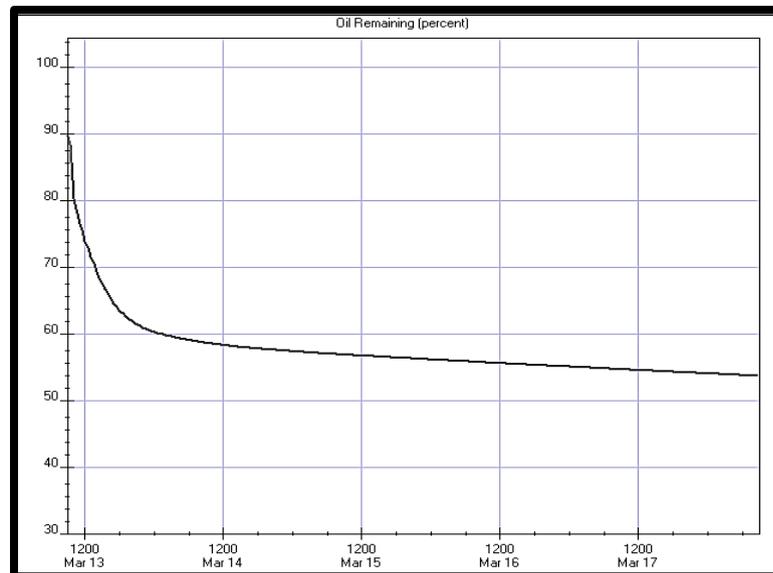
Figura 8: Representação do comportamento do óleo face a evaporação, dispersão e óleo remanescente.



Fonte: ADIOS2. Adaptado pelo autor, 2021.

A curva de decaimento do óleo, obtida pelo programa ADIOS (figura 9), demonstra que o volume remanescente em questão, após um período de 5 dias, transcorre em torno de 50% a 60% do total, o que representa em torno de 480 m<sup>3</sup>.

Figura 9: Curva de decaimento do óleo.



Fonte: ADIOS2, 2021.

Rosman (2021), ressalta que, quando a resultante da tensão superficial nas interfaces é contrabalanceada pelas forças viscosas tem-se o chamado espalhamento por tensão superficial. Uma vez que a pluma tem espessura diminuída, a força gravitacional perde sua predominância

fazendo com que o balanço entre as tensões superficiais nas extremidades das interfaces óleo-ar, água-óleo torna-se fator sobressalente no espalhamento.

O autor descreve ainda que uma vez que o espalhamento inercial é muito curto, é comum assumir que a área circular formada pelo óleo, seja considerada a área inicial da mancha, a ser incluída no modelo. O coeficiente de difusão é a base para se chegar nessa grandeza, utilizado para o cálculo do espalhamento com base em modelos de trajetórias de partículas lagrangeanas, assim utiliza-se da equação (05) para determinar o raio da mancha:

(05)

$$D = 1,14 \left( \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w} \right) g \sqrt[3]{\forall t^2}$$

Onde:

$D$  = coeficiente de difusão (raio da mancha);

$\frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_w}$  = densidade relativa entre o óleo e a água;

$\rho_w$  = densidade da água (1021,3 kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_o$  = densidade do óleo (851 kg/m<sup>3</sup>);

$g$  = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$\forall$  = volume do óleo derramado (800 m<sup>3</sup>);

$t$  = tempo de vazamento (60 minutos).

Com base no volume já definido a vazão do contaminante na fonte para o tempo de derramamento total ( $t$ ) em 60 minutos ou 3.600 segundos é definida pela equação (06), chegando ao resultado de 0,222 m<sup>3</sup>/s:

(06)

$$Q_{3600} = \frac{\forall}{t}$$

Para o volume do primeiro lançamento ( $V_i$ ) será assumido que o intervalo de tempo de lançamento das partículas ( $\Delta t$ ) será de 150 segundos, obtemos, desta forma a partir da equação (07) o resultado de 33,3 m<sup>3</sup>:

(07)

$$V_i = Q_{3600} \times \Delta t$$

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **5.1. ARTIGO**

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO BAIXO RIO AMAZONAS**

### **RESUMO**

Em 2013 ocorreu um deslizamento de talude no canal de Santana-AP, interligado ao Canal Norte do Baixo Rio Amazonas, colapsando abruptamente um significativo trecho do Porto de Santana e suas instalações. Esta área abriga terminais de graneis líquidos e oleodutos com elevado potencial poluidor. O objetivo da pesquisa é avaliar potenciais impactos ambientais de eventual derramamento de óleo em curtíssimo prazo, utilizando-se modelo de simulação numérica hidrodinâmica acoplada à de dispersão de poluentes. O software SisBaHiA®, calibrado experimentalmente com uso de métodos acústicos (ADCP), foi utilizado para gerar cenários hipotéticos nestas zonas de alto risco de deslizamento de solos. Destacam-se dois cenários hidrológicos nas simulações: a) novembro S-1 (estiagem) e b) maio S-2 (chuvoso). Em S-1 a dispersão da pluma foi superior durante a maré enchente S-1a e S-1b, atingindo em 4h, áreas de encosta urbana, desembocaduras dos rios, tributários (Matapi e Vila Nova) e Áreas de Proteção Ambiental. Em S-2, o espalhamento da pluma foi maior durante a maré vazante S-2c e S-2d, afetando o sistema de abastecimento de água de Macapá 12h pós acidente. Os cenários sugerem existência de riscos elevados associados às hipóteses de estudo. A dispersão da pluma é diretamente proporcional à vazão, indicando que a hidrodinâmica local

é provavelmente o fator dispersivo mais relevante. Concluímos que o tempo de mitigação de efeitos mais severos, é crítico nas primeiras 4 horas, pois a característica geográfica costeira tende a manter a pluma no canal de Santana.

**Palavras-chave:** Prevenção de impacto ambiental, Monitoramento de Portos, SisBaHiA.

## **1. Introdução**

Os impactos ambientais negativos causados por possível derramamento de óleo pesado em portos e hidrovias têm sido frequentes, apesar de evitáveis, sendo sua principal consequência a poluição duradoura da água e da biota [13, 34]. Contudo, a burocracia e a lentidão dos sistemas governamentais responsáveis em acionar os planos de controle, quando existentes, podem ser os principais empecilhos das ações de mitigação, principalmente no curto prazo, pois demandam modelos de simulações confiáveis para representar deslocamentos de plumas de óleo ou derivados [12, 13, 34].

A avaliação dos riscos ambientais é imprescindível em áreas de reservas de combustíveis [23]. Por exemplo, em março de 2013 ocorreu de forma inesperada e abrupta, a ruptura de um talude na margem esquerda do Canal de Santana no Amapá, local das instalações do Porto de Santana. O sinistro não forneceu sinais prévios de rupturas, trincas no terreno, ou mesmo durante a movimentação das instalações, mas provocou um grave acidente inédito, com significativas perdas materiais e econômicas, inclusive vidas humanas e inúmeras consequências ambientais [36, 35]. A identificação das características geotécnicas do local, todavia, levantou um alerta de risco potencial iminente vinculado à existência de uma rede de oleodutos instalada ao lado da cicatriz formada por este sinistro [36].

E, conforme os ensaios de perícia realizada no local, posterior ao acidente [36], identificou-se um solo sensível conhecido como “argilas rápidas”, que têm comportamento reológico similar a de um fluido quando tensionada [21, 29, 36]. Assim, evidências científicas revelaram um comportamento insólito no solo local do sinistro no Porto de Santana [36]. Daí a necessidade de estudos pontuais, que respondam aos seguintes questionamentos: a) quais as proporções e abrangência dos potenciais impactos ambientais em caso de ocorrer um acidente similar ao observado pelo deslizamento, porém envolvendo as tubulações, instalações e reservas de combustíveis locais? b) Quais áreas e momentos críticos seriam mais afetados pela pluma de óleo ao longo da zona costeira específica na região da foz do Rio Amazonas? c) qual o tempo hábil de resposta tática que os responsáveis teriam para acionar ações de mediação, contenção e mitigação dos impactos provocados por um eventual acidente dessa proporção?

Em ambientes aquáticos reconhecidamente pouco monitorado, tanto hidrologicamente quanto de qualidade da água, a modelagem e simulação computacional têm sido utilizadas para combinar diferentes variáveis e estimar cenários de derramamento de óleo com elevada precisão, apresentando resultados suficientemente realísticos para tais propósitos [31, 8]. Logo, é uma ferramenta alternativa, mas de alta precisão para nortear ações concernentes à contenção e mitigação de potenciais efeitos negativos da pluma de óleo como ação preventiva e de planejamento tático em áreas de risco de acidentes [8, 31].

A presente pesquisa tem como objetivo geral compreender e simular cenários numéricos de curtíssimo prazo para prever o deslocamento espaço-temporal de plumas de óleo causado por eventuais derramamentos no Canal de Santana, hipoteticamente causado por rompimento de talude na área de risco do oleoduto. Os cenários hipotéticos foram modelados e simulados utilizando-se o software SisBAHIA, a partir do qual foram modelados diferentes cenários hidrodinâmicos e ambientais representativos contidos na geografia local.

Além disso, a pesquisa teve como objetivo específico: a) identificar zonas críticas de contaminação e áreas sensíveis potencialmente impactadas, conforme sugerido pelo Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas, e seu impacto ambiental ao longo da costa [8, 3] e b) recomendar estratégias de prevenção e ações mitigadoras específicas de curtíssimo prazo contra acidentes na zona portuária de Santana-AP. A principal justificativa é que esta área representa maior risco potencial de acidentes, por estar próxima da cicatriz gerada pelo acidente de 2013 e por estar localizada próxima aos dois municípios mais populosos do estado do Amapá (Macapá e Santana).

## **2. Materiais e métodos**

O presente estudo seguiu três etapas principais: (a) levantamento de dados com base na perícia ambiental realizada em 2019 devido ao acidente ambiental no porto de Santana [36] e nas pesquisas provenientes dessa perícia [1, 8, 4]; (b) simulação computacional da hidrodinâmica observada em maio (período chuvoso) e novembro (período seco) (vazão, elevação da maré e velocidade da corrente) e (c) simulação do modelo de transporte hidrodinâmico e lagrangeano para os cenários pré-estabelecidos envolvendo potenciais sinistros em área de risco ambiental.

### **2.1. Caracterização do Local de Estudo**

A pesquisa abrange o Canal Norte do Rio Amazonas, precisamente o Canal de Santana, assumindo como ponto de lançamento da pluma, a extremidade do oleoduto que intercepta o canal. Esse trecho apresenta hidrogeomorfologia plana, e é fortemente influenciada por

processos fluviais (Canal Norte do Rio Amazonas) e costeiros (mesomarés semidiurnas de amplitude  $\approx 2,8$  m) que frequentemente causam a intensificação da erosão e deposição [37, 1]. A Zona Costeira Amazônica possui áreas de alta vulnerabilidade, associada a sensibilidade dos ecossistemas dominantes, estuarinos e oceânicos (manguezais, margens de rios, planícies alagadas, áreas de ressacas e ilhas vegetadas) [30, 4].

## 2.2. Condições de modelagem

Utilizou-se das condições de contorno de mar e terra, dados de batimetria e rugosidade equivalente no fundo para confecção dos domínios de modelagem. O modelo hidrodinâmico foi forçado através da maré e do vento, calibrados com dados de corrente fornecidos por um Perfilador Acústico Doppler de Correntes (ADCP) (Laboratório de Hidráulica e Saneamento Ambiental – do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP), que teve como função quantificar e determinar as descargas líquidas e os perfis de correntometria ao longo de um ciclo completo de maré, tendo como base estudos anteriores de Abreu et al, 2020 e Cunha et al, 2021.

O volume de derramamento utilizado na modelagem baseia-se na vazão registrada para o oleoduto, conforme autorização de funcionamento ANP Nº 468, DE 15.10.2012, de  $800 \text{ m}^3/\text{h}$ , quando em operação de transporte para os reservatórios em terra. Os cenários foram distribuídos por intervalos de tempo curtos após derramamento, de 1, 4, 8 e 12 horas. Cada intervalo de tempo foi analisado conforme as características climáticas: um cenário em período hidrológico amazônico predominantemente seco (novembro) e o segundo em período predominantemente chuvoso (maio). Cada período sazonal totalizou 4 cenários. Considerando-se a variação hidrológica sazonal, infere-se a amplitude da variação e abrangência espaço-temporal e a precisão do comportamento hipotético da pluma em diferentes condições do ambiente.

Os intervalos de velocidade do vento foram obtidos de uma série temporal de 8 anos (2010 - 2018) disponibilizados pela estação meteorológica de Macapá (MACAPA-AP- OMM: 82098), localizada próximo à APA da Fazendinha. Os dados meteorológicos foram coletados no Banco de Dados Meteorológicos de Ensino e Pesquisa- BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET) e apresentam registros de precipitação entre  $\approx 400$  mm na estação chuvosa e  $\approx 60$  mm na estação seca, enquanto a intensidade do vento permaneceu entre os intervalos:  $[0 \leq V_{(\text{vento chuvoso})} \leq 2 \text{ m s}^{-1}]$  e  $[1 \leq V_{(\text{vento seco})} \leq 3 \text{ m s}^{-1}]$  nas respectivas estações.

O modelo hidrodinâmico e os cenários de transporte foram gerados pelo software SisBaHiA® - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, o qual utiliza um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH otimizado para corpos d'água naturais, além do Euleriano

e Lagrangiano (dispersão de poluentes) para fenômenos de transporte [31]. O modelo 3D (Eqs. (1) - (4)) foi usado para simular o comportamento hidrodinâmico da corrente, enquanto o modelo Lagrangeano foi usado para simular seu processo dispersivo e comportamento da pluma (acoplado ao hidrodinâmico).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2 \Phi \sin \theta v \quad (01)$$

$$(02)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2 \Phi \sin \theta u \quad (03)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^\zeta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^\zeta v dz = q_p - q_E + q_{Ia} - q_{Ie} \quad (04)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Onde  $u$ ,  $v$ , e  $w$  são, respectivamente, as componentes do vetor velocidade nas direções  $x$ ,  $y$ , e  $z$  em (m/s). A direção vertical  $z$  é positiva para cima e sua origem e pode ser convenientemente definida no nível médio da superfície da água,  $P$  é a pressão,  $\rho$  é a massa específica local do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ ), e  $\rho_0$  é uma massa específica constante de referência ( $\text{kg m}^{-3}$ ).  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local ( $\text{rad s}^{-1}$ ) e os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, onde  $\theta$  é o ângulo de Latitude.  $\zeta$  representa a elevação livre da superfície da água (m), as componentes ( $q_p$ ,  $q_E$ ,  $q_{Ia}$ ,  $q_{Ie}$ ) representam o balanço dos fluxos de precipitação, evaporação e infiltração afluyente e efluente, respectivamente, por unidade de área [1, 8, 31, 4].

A malha de domínio do modelo computacional é constituída por 2.238 elementos, gerando 10.627 nós que estão distribuídos em uma área aproximada de  $3 \times 10^7 \text{ km}^2$  [1, 8, 4]. As constantes harmônicas mais relevantes para o local de estudo foram utilizadas na geração de maré no limite do domínio (M2, S2, N2, K1, O1 e M4), com ênfase para a constante M2 com a maior influência no litoral brasileiro, sendo responsável por representar cerca de 70% da variação do comportamento físico das marés na região [7, 16].

O comportamento do óleo S500 (decaimento) necessário para alimentar modelo Lagrangeano do SisBaHIA foi obtido através do software ADIOS2 adotando um volume 800  $\text{m}^3$  de hidrocarboneto do tipo persistente com as seguintes características: °API = 35,2,

gravidade específica =  $0,840 \text{ kg m}^{-3}$  a  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , viscosidade =  $40 \text{ cSt}$  a  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  e ponto de fluidez =  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  (ADIOS2, 2021). As coordenadas UTM de lançamento da fonte contaminante são o encontro do oleoduto na margem do canal de Santana:  $X = 479441,15 \text{ m E}$  e  $Y = 9993724,29 \text{ m S}$ . O tempo de lançamento da fonte contínua foi estimado em no máximo 1h. Portanto, a pluma de óleo simulado no presente estudo foi o S500, o mais comum transportado e armazenado na Amazônia [8].

O objetivo do modelo foi simular probabilisticamente um dia aleatório do mês para o derramamento acidental de óleo. Esta hipótese foi fundamentada no fato de que eventual acidente poderia ocorrer em qualquer instante, neste intervalo sazonal, uma vez que as características geotécnicas representadas pela argila sensível foram identificadas no local. Portanto, não manifesta previamente sinais físicos de ruptura do solo que sirvam de alerta [21, 29, 36].

### 3. Resultados e Discussão

Foram simulados dois cenários para cada período hidrológico predominante da região amazônica. A saber: 1) período seco, destaca-se o mês de novembro (cenário S-1), e 2) período chuvoso, destaca-se o mês de maio (cenário S-2). Ambos os períodos foram identificados pelas seguintes características de um ciclo normal de maré semidiurna local ( $\approx 12:40 \text{ h}$ ): a) início da maré enchente, b) fim da maré enchente, c) início da maré vazante e d) fim da maré vazante). Portanto, compreende hipotético comportamento da pluma dentro de um ciclo de maré semidiurna, gerando-se até 4 cenários em cada período sazonal estudado

O acidente hipotético se estabelece no início da estrutura de oleoduto, instalada no Porto de Santana (latitude:  $-3.810178^\circ$ , longitude:  $-49.560781^\circ$ ). A presença de ilhas e dois grandes afluentes (Rio Matapi e Rio Vila Nova), foram consideradas como condição inicial e de contorno influentes na presente simulação [2, 14, 8, 4].

As figuras (1-4) mostram os resultados dos cenários modelados e simulados S-1 do mês de novembro (seco) em 1 hora, 4 horas, 8 horas e 12 horas respectivamente, para a melhor visualização possível do processo dispersivo. Esta configuração temporal de dispersão foi considerada a mais conveniente para avaliar o movimento da pluma dentro de um ciclo de maré em curtíssimo prazo [8]. Este curtíssimo prazo serviu para estabelecer parâmetros de gerenciamento de crise e potenciais ações de mitigação em tempo hábil [38], imediatamente

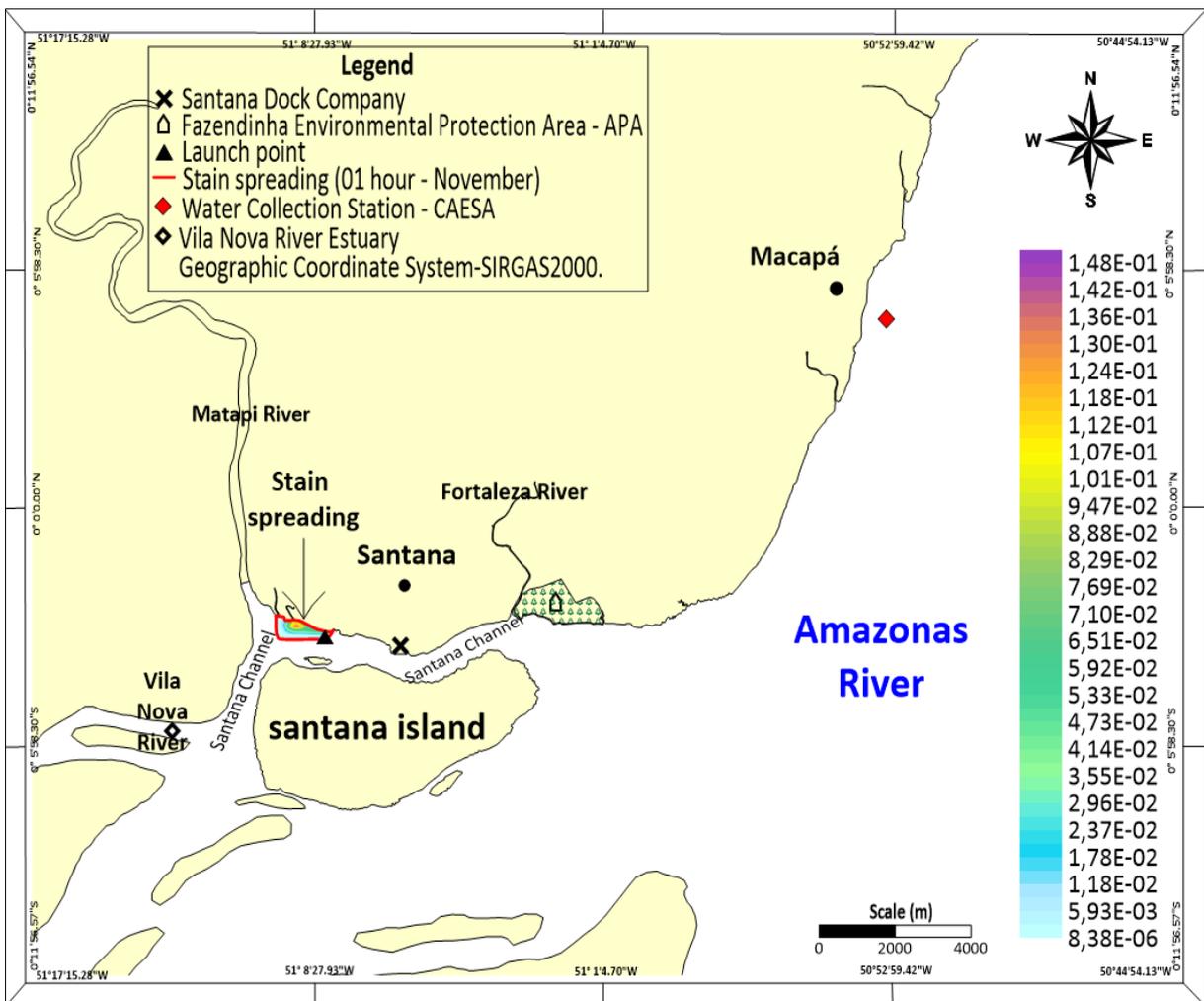
após um provável deslizamento de terras que, potencialmente, afetariam as instalações a ponto de provocar vazamento de óleo armazenado [36].

É importante evidenciar as primeiras horas pós acidente [38], pois devido a hidrodinâmica e as correntes superficiais influenciadas pelo vento [2, 5] surge um processo de recirculação da pluma no entorno do ponto de lançamento ampliando o contato das margens com partículas contaminantes e que majoram os impactos ambientais [38, 8]. E como o processo dispersivo de poluentes é influenciado diretamente pela hidrodinâmica desses ambientes estuarinos [10, 14, 8] e pelo efeito dos ventos [2, 5], essa interferência também atua sobre as taxas de evaporação e fragmentação das partículas, pois o óleo de superfície emulsificado seria mais disperso pelo vento [28].

As características hidrodinâmicas iniciais de lançamento do Canal de Santana eram de fim da maré vazante (esquerda para a direita no mapa), com vazão de  $4.125,75 \text{ m}^3/\text{s}$ . Logo após esta fase a maré iniciou a fase de enchente (reversão do fluxo) (direita para a esquerda no mapa). A fase exata da maré em que ocorreu o hipotético derramamento de óleo é determinante para empreender ações de gerenciamento de crise e mitigação de potenciais impactos. Devido ao reconhecimento hábil e antecipado do provável percurso deste contaminante no curtíssimo prazo.

Uma hora após o acidente no cenário S-1a (figura 1), com vazão do Canal de Santana de 15.197,17 m<sup>3</sup>/s a mancha ocupou uma área de aproximadamente 0,53 km<sup>2</sup>. Nessa configuração a corrente do rio e maré estavam quase se anulando, direcionando levemente a pluma para oeste do ponto de lançamento. E decorre também da ausência de correntes ou efeito de ventos fortes. A ausência de interações entre estes dois fatores pode ser decorrente da ausência momentânea dessas forçantes neste intervalo inicial, favorecendo um espalhamento radial (aparentemente mais difusivo).

Figura 1: S-1a\_ 1h pós derramamento do óleo (período de estiagem em novembro).



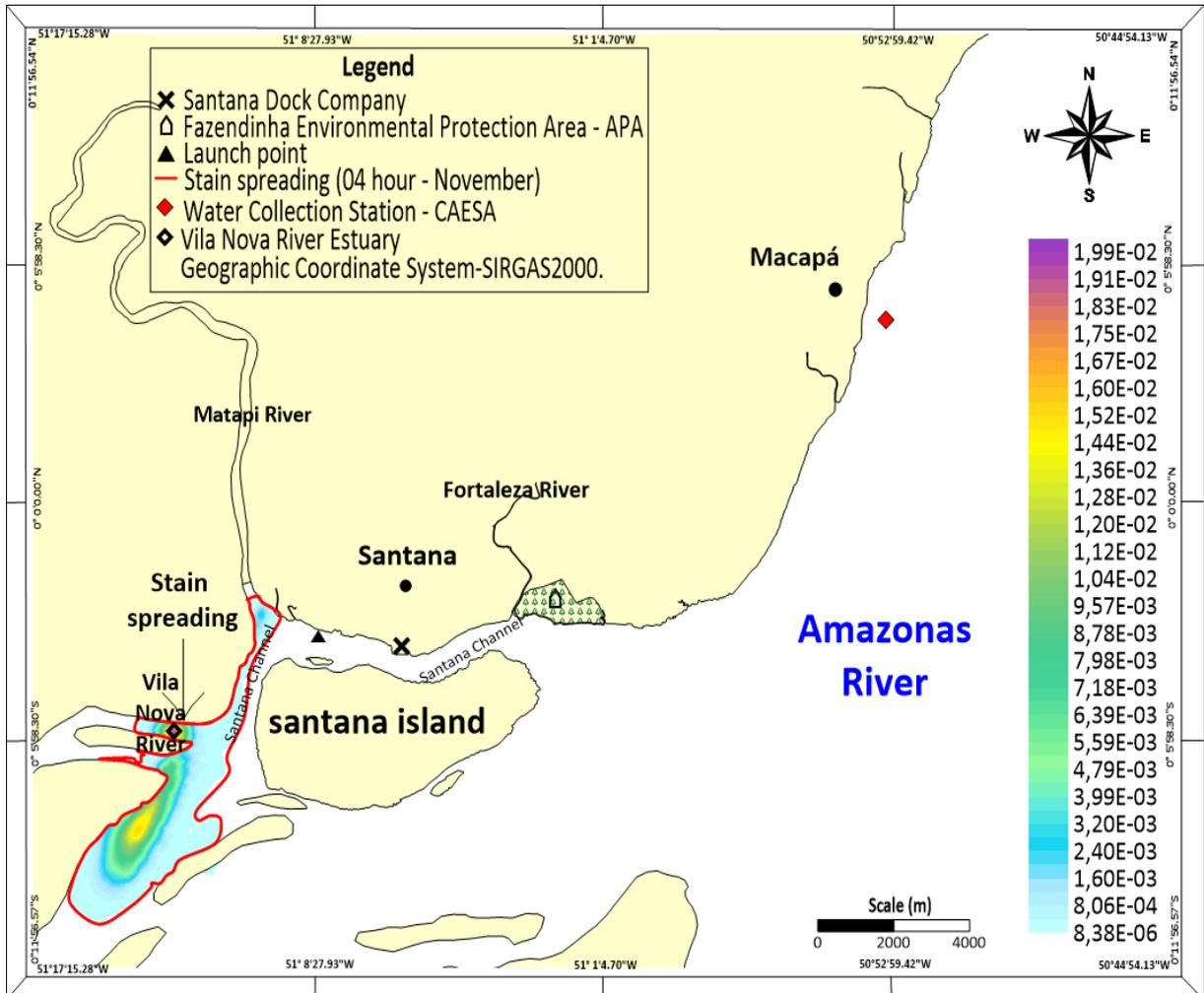
Fonte: Autor,2022.

No momento  $t = 4$  horas, referente ao cenário S-1b (figura 2), o fluxo de maré de enchente se intensifica (em direção oeste), quando a pluma é direcionada para montante do ponto de despejo, atingindo uma área de  $\approx 11,27$  km<sup>2</sup> e vazão do Canal de Santana de 10.194,36 m<sup>3</sup>/s. As zonas impactadas até este momento foram principalmente a margem oeste, com ênfase

na foz do Rio Vila Nova, tributário do rio Amazonas, onde surgiram maiores concentrações de óleo.

As condições hidrodinâmicas, meteorológicas, tempo de residência da água e propriedades do óleo, são características que estabelecem um dinamismo intrínseco no

Figura 2: S-1b\_ 4h pós derramamento do óleo (período de estiagem em novembro).



Fonte: Autor, 2022.

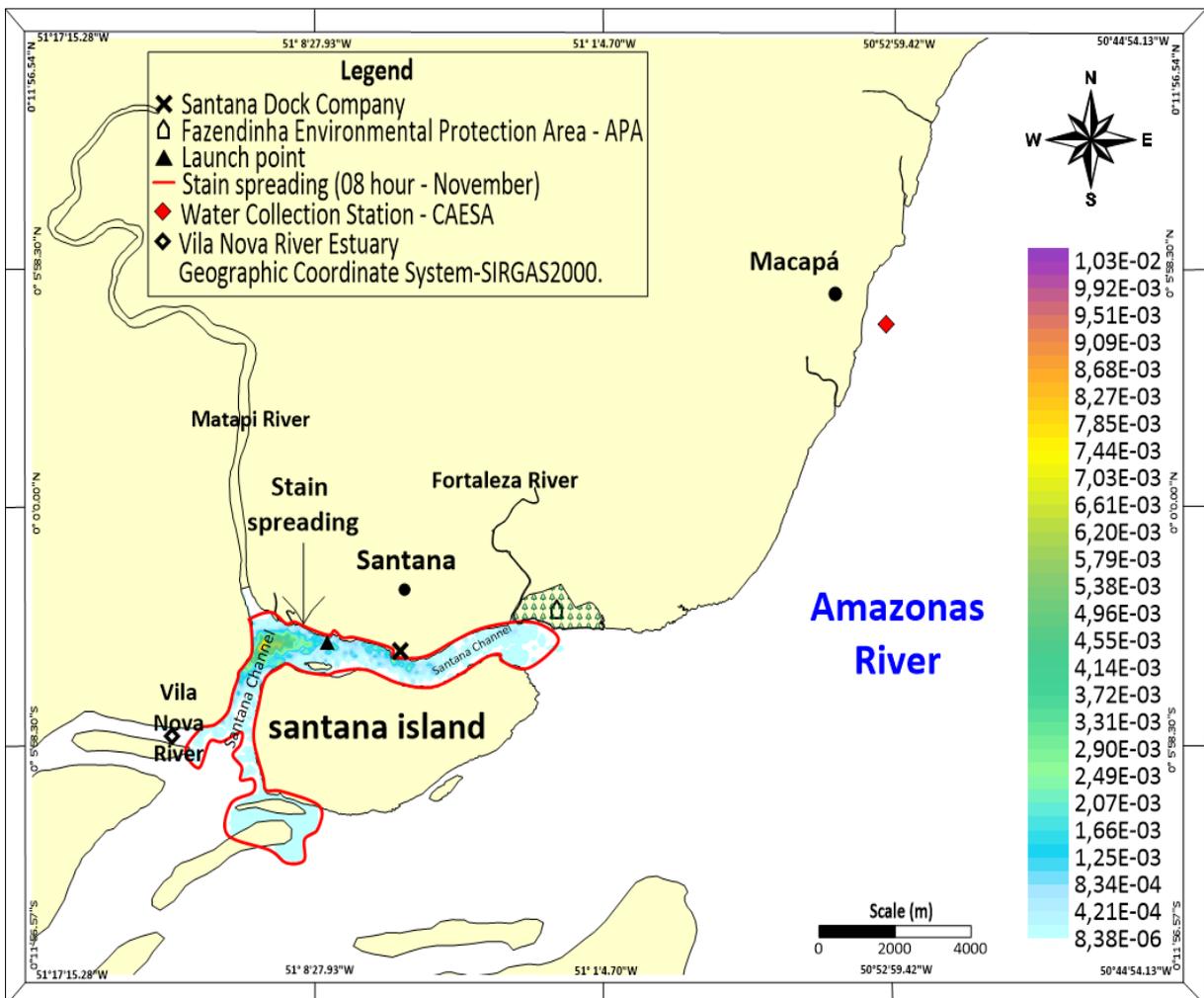
comportamento hidrodinâmico e taxas de renovação das águas, influenciando a dinâmica de dispersão do óleo no ambiente aquático [1, 8, 4]. Nesse contato, o óleo já poderia alterar a densidade e a porosidade do solo, afetando a absorção de contaminantes ao longo dos perfis do solo atingidos [6, 20, 42]. A poluição por óleo em solos estuarinos e zonas úmidas, representa um alto risco ecológico [8, 3, 4].

Portanto, a resposta ambiental em função das contaminações implica na diminuição da diversidade bacteriológica dos solos [40]. Nos ecossistemas aquáticos pode interferir na composição isotópica estável do  $O_2$  dissolvido, que é regulada por processos de troca gasosa ar-água, respiração e fotossíntese [15] e a diversidade microbiana é essencial para os ciclos

biogeoquímicos [40]. Logo, sua perda imediata implicaria na iminente deterioração do potencial estuarino para ativar processos ecológicos essenciais como a produção primária [26, 41, 40].

Na análise de 8h, cenário S-1c (figura 3), a corrente começa a se direcionar para a foz do Amazonas, mas ainda se concentrando na zona portuária no canal de Santana. A área atingida foi de aproximadamente 10,04 km<sup>2</sup> e vazão de 18.571,13 m<sup>3</sup>/s. O fluxo da corrente de vazante está iniciando seu processo devido a modificação da maré. Contudo, por estar ainda no início da maré vazante, os fluxos da maré enchente (intervalo anterior) e maré vazante (intervalo recém-iniciado) ainda se contrapõem. Esse equilíbrio de forças [33] retém parcialmente o contaminante no trecho entre o continente e a Ilha de Santana. Logo, a pluma tende a permanecer parcialmente aprisionada no canal de Santana, e ilhas vizinhas, afetando ambas as margens do canal e foz do Rio Vila Nova.

Figura 3: S-1c\_ 8h pós derramamento do óleo (período de estiagem em novembro).



Fonte: Autor, 2022.

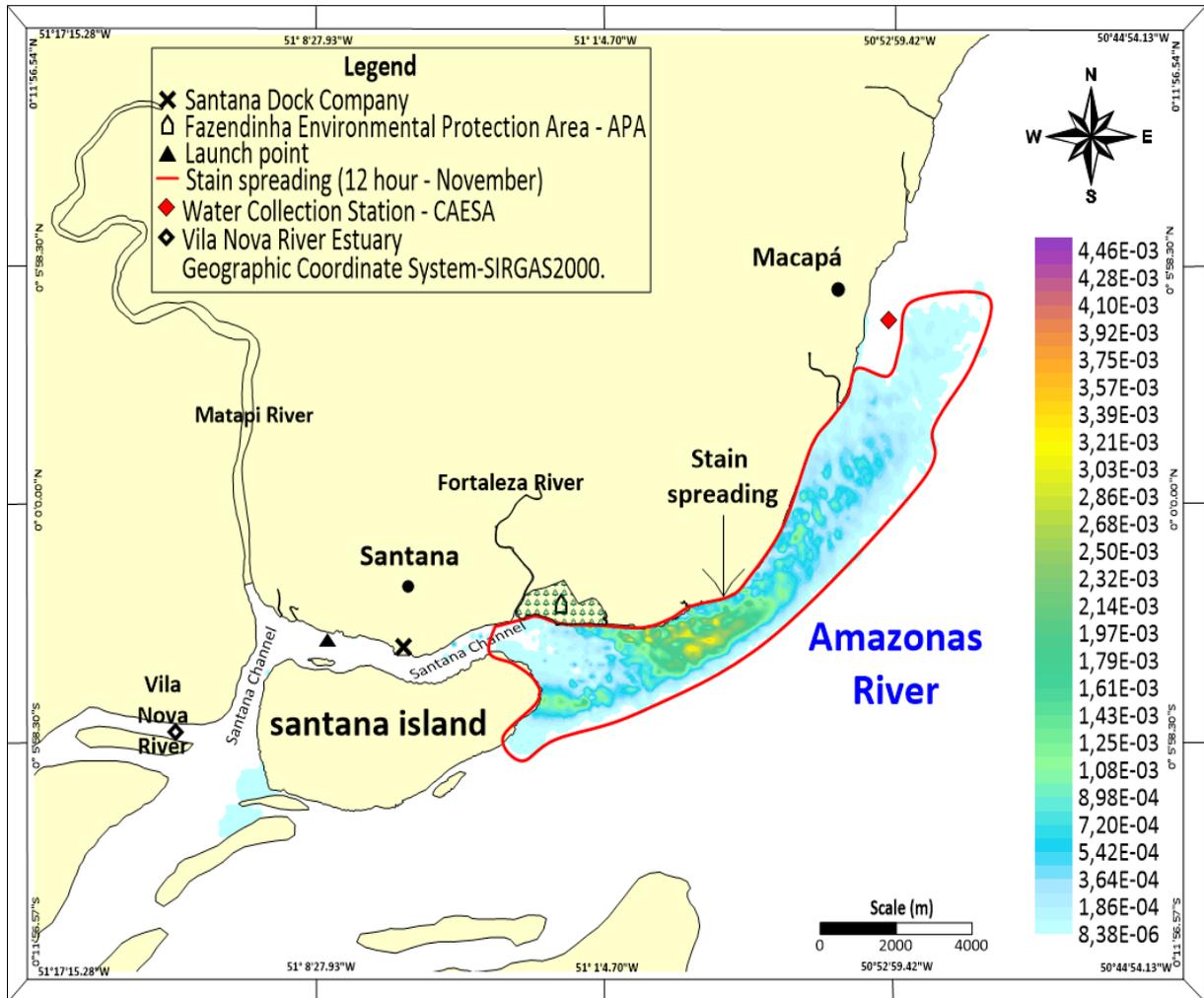
Nessas circunstâncias a pluma impactaria toda a zona portuária local, foz do Igarapé da Fortaleza, áreas urbanas das cidades de Macapá e Santana, inclusive a Área de Proteção

Ambiental da “Fazendinha” cuja área de fronteira coincide com a margem do canal afetado. Além das alterações dos processos microbianos apontados como impactos ambientais relevantes [40], outros fatores ambientais extrínsecos também poderiam influenciar o potencial de degradação dos derivados de petróleo, tais como o regime hidrológico. Por exemplo, as inundações eventuais poderiam promover ou intensificar as condições anaeróbicas no nível de sedimentos e dificultariam ainda mais a biodegradação de hidrocarbonetos [19].

Esse cenário coincide com índice de sensibilidade da área de estudo [8, 3, 4], uma vez que ambientes estuarinos possuem uma ampla variação hidrológica [15] que caracteriza seu potencial de autodepuração natural. Neste sentido, o contaminante pode atingir tanto o solo quanto as raízes expostas dos manguezais, incluindo-se as folhas e brotos [24]. Assim, a presença de óleo no ambiente provoca severos efeitos físicos adversos (fotossíntese), biofísicos (membranas celulares) e bioquímicos (inibição enzimática) [19, 40, 24].

Na análise de 12 horas, cenário S-1d (figura 4), a maré vazante ainda é predominante com vazão de  $11.362,22 \text{ m}^3/\text{s}$  intensificando o espalhamento das partículas alcançando uma área de  $32,08 \text{ km}^2$ . Nesse estágio a pluma atingiria as proximidades da estação de captação de água da companhia de água e esgoto do amapá (CAESA), provavelmente alterando os parâmetros da qualidade da água do manancial e forçando um maior controle quantitativo e qualitativo e suas condições potáveis [4], ou mesmo a completa paralisação em momento crítico por motivos de segurança e saúde pública.

Figura 4: S-1d\_ 12h pós derramamento do óleo (período de estiagem em novembro).



Fonte: Autor, 2022.

Isto provocaria uma ação de emergência e uma necessária ação de mediação adotada para o derramamento de óleo [23, 32]. Por exemplo, os surfactantes presentes em dispersantes contribuem para a contaminação das águas superficiais e prejudicam o processo de tratamento de água [24], proporcionando transtornos operacionais e de contingências além da simples remediação devido a potencial contaminação inicial por óleo.

As margens afetadas no cenário S-1d seriam áreas de múltiplos usos dos recursos hídricos pela comunidade local [3, 4]. Destacam-se o sistema de captação de água de Macapá, a principal do Estado do Amapá, de importância para o saneamento básico, subsistência econômica, a pesca, a recreação e a proteção ambiental [35, 8, 3, 4]. Os impactos apresentam importância pelo provável e evidente contato com derivados de petróleo, o qual seria extremamente prejudicial à saúde humana por ser facilmente absorvido pela pele [27], ingerido ou inalado [9, 27]. Além disso, os problemas de saúde decorrentes englobariam desde dermatites, irritação nos olhos, garganta e até problemas psicológicos, [27]. Mas tais efeitos

dependem das características do contaminante, concentração e do tempo de contato ou exposição [9].

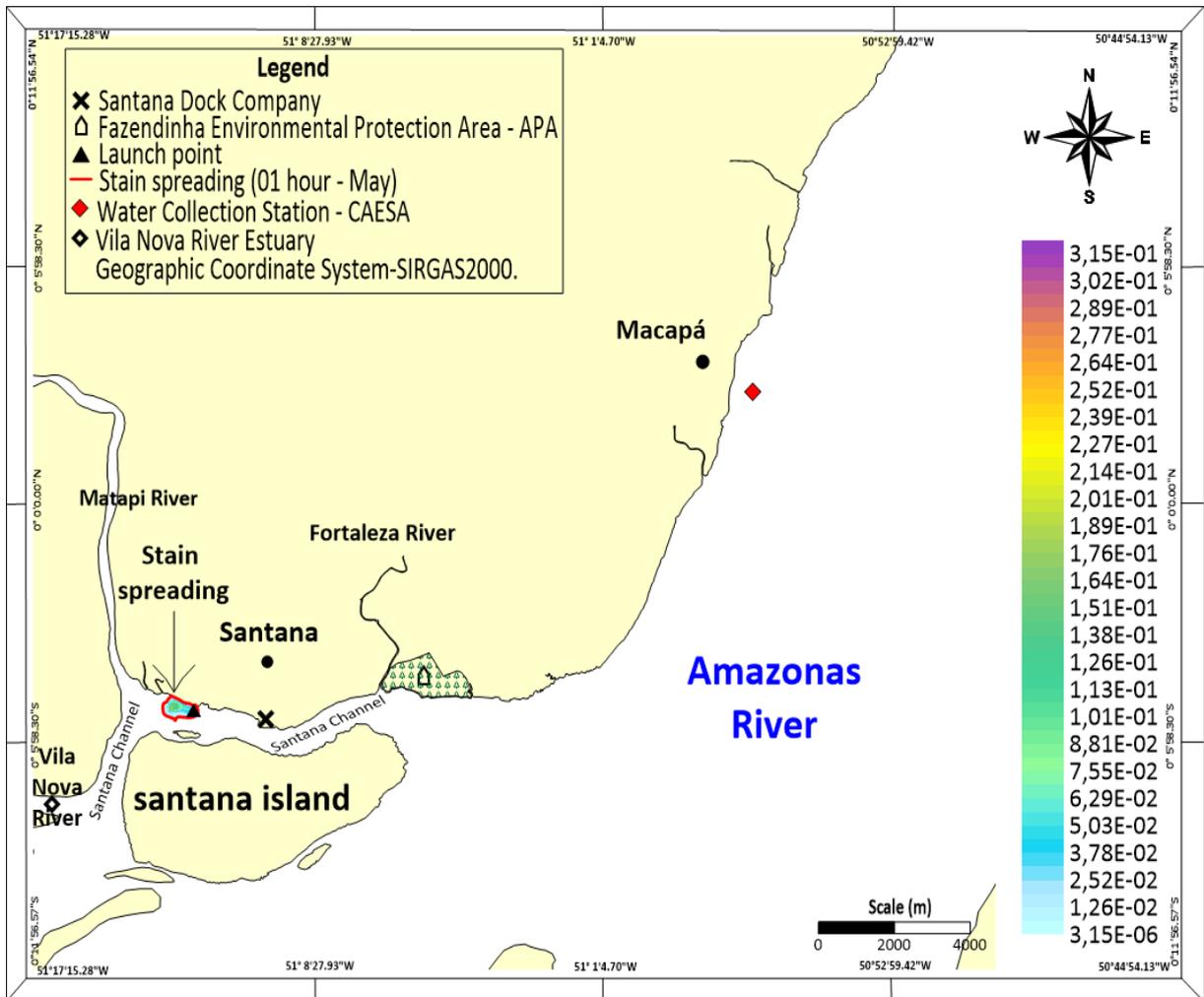
No intervalo de avaliação entre  $\approx 4$  h até  $\approx 12$  h correspondente as figuras 2 e 4 respectivamente, a pluma percorreu aproximadamente 26 km. A distância longitudinal da pluma variou entre a foz do Rio Vila Nova até significativo trecho da orla de Macapá, quase alcançando a Estação de Captação de Água. Em resultados são similares aos apresentados por Cunha et al., (2021), onde a pluma nesse mesmo intervalo percorreu  $\approx 25$  km, distinguindo-se apenas pelos trechos alcançadas, devido às diferenças entre os pontos de lançamento desses estudos, mas com comportamentos das plumas equivalentes.

No cenário S-2, simulada para o período chuvoso amazônico (maio), as figuras (5-8) mostram os resultados deste período, considerando-se características hidrodinâmicas similares de maré aplicada para o mês de novembro, objetivando a equivalência comparativa da análise de espalhamento da pluma. Todavia, no instante do derramamento, a vazão do Canal de Santana era de  $6757,24 \text{ m}^3/\text{s}$ , caracterizando o fim da maré vazante, tal qual o cenário S-1.

Apesar da vazão inicial do Canal de Santana ser levemente superior ao do cenário de novembro, a pluma mostrou um espalhamento discreto na primeira hora analisada, visto que a força do vento não teve praticamente nenhuma influência significativa no arraste de contaminantes no mês de maio [8]. Logo, a dispersão nesse cenário ficou condicionada principalmente às características hidrodinâmicas, isto é, com efeitos meteorológicos desprezíveis para esta simulação [8, 3].

Na análise de 1h S-2a (figura 5) a pluma atingiu uma área de  $0,34 \text{ km}^2$  e vazão do Canal de Santana era de  $12.103,63 \text{ m}^3/\text{s}$ , demonstrando um acentuado recuo comparado ao cenário S-1a, mesmo com intervalos e fases de maré equivalentes em ambas as avaliações. Assim, o formato da pluma manteve-se geometricamente similar ao do período de novembro, apenas distinguindo-se em proporção, fato corroborado pelas baixas velocidades de vento registradas em maio [8].

Figura 5: S-2a\_ 1h pós derramamento do óleo (período chuvoso em maio).

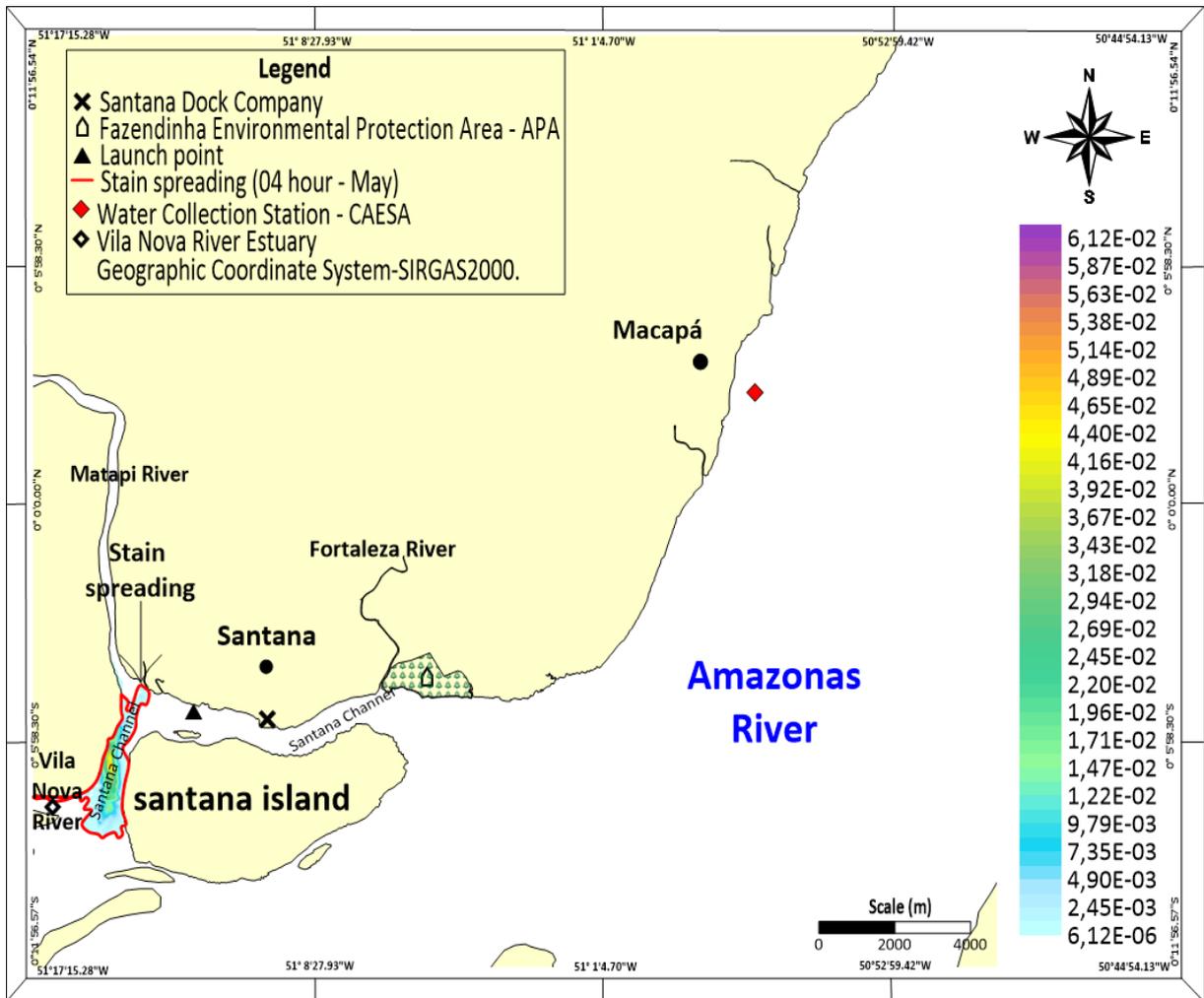


Fonte: Autor, 2022.

A mancha em S-2a espalhou-se 36% menos do que em S-1a. Devendo-se à vazão registrada em S-2a também ter sido 21% menor que em S-1a, contribuindo para a narrativa da influência do regime hidrológico no transporte de poluentes [1, 8, 31].

Na análise correspondente às 4 horas após derrame, representando o cenário S-2b (figura 6), a pluma acompanhou a tendência do comportamento hidrodinâmico, seguindo a direção das correntes de maré mais intensas. Contudo, com uma vazão do Canal de Santana de 7.716,667 m<sup>3</sup>/s a área atingida pelo espalhamento do contaminante neste estágio foi de apenas 2,54 km<sup>2</sup>, alcançando discretamente a foz do estuário do Rio Vila Nova. Esse comportamento mais tímido da pluma de óleo ocorreria devido à reduzida influência do vento e, conseqüentemente, mais sujeitas às correntes hídricas superficiais [5, 8]. Portanto, mais dependentes de fatores hidrodinâmicos [8].

Figura 6: S-2b\_ 4h pós derramamento do óleo (período chuvoso em maio).



Fonte: Autor, 2022.

O cenário S-2b também se destaca pela diferença de vazão no Canal de Santana em comparação ao mesmo momento do cenário S-1b, registrando um fluxo 24,3% menor. Assim, sua dispersão ficou 77% menor quando comparados entre si. No entanto, aqui percebe-se uma diferença ainda mais acentuada das plumas para o mesmo intervalo de tempo após o derramamento hipotético, visto que a pluma de maio já vinha de um cenário com menor dispersão devido a menor vazão e menor influência dos ventos. Isso acentuou a diferença entre cenários nos intervalos analisados posteriormente, gerando um menor espalhamento no período chuvoso. Percebe-se que a condição de saturação hidrológica (cheia dos rios) contribuiu para essa menor variação de fluxo referente à maré de enchente, de modo que as forças resultantes do fluxo natural da foz se contrabalançassem [17, 22]. Além disso, há também a influência das vazões dos seus afluentes Matapi e Vila Nova escoando na vazante em sua capacidade máxima, diminuindo a influência de maré.

É importante ressaltar que a influência desses dois afluentes no Canal de Santana (Matapi e Vila Nova) são pouco conhecidos. Todavia, o rio Matapi tem sido melhor estudado, sendo suas características hidroclimáticas e hidrometeorológicas, bem como sua hidrodinâmica razoavelmente conhecidas, não ocorrendo o mesmo sobre o rio Vila Nova. No caso do rio Matapi, por exemplo, no mês de abril/2015 ocorreu a maior descarga líquida naquele período [ $-434,6 \leq Q \leq 686,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ], explicada pela incidência pluviométrica de 340 mm (média), a maior do período de monções da época [11]. Esse fato teve implicações diretas no fluxo da maré vazante, maior que a enchente apenas neste período, evidenciando a influência das chuvas no escoamento superficial e na hidrodinâmica na foz da bacia do rio Matapi [11].

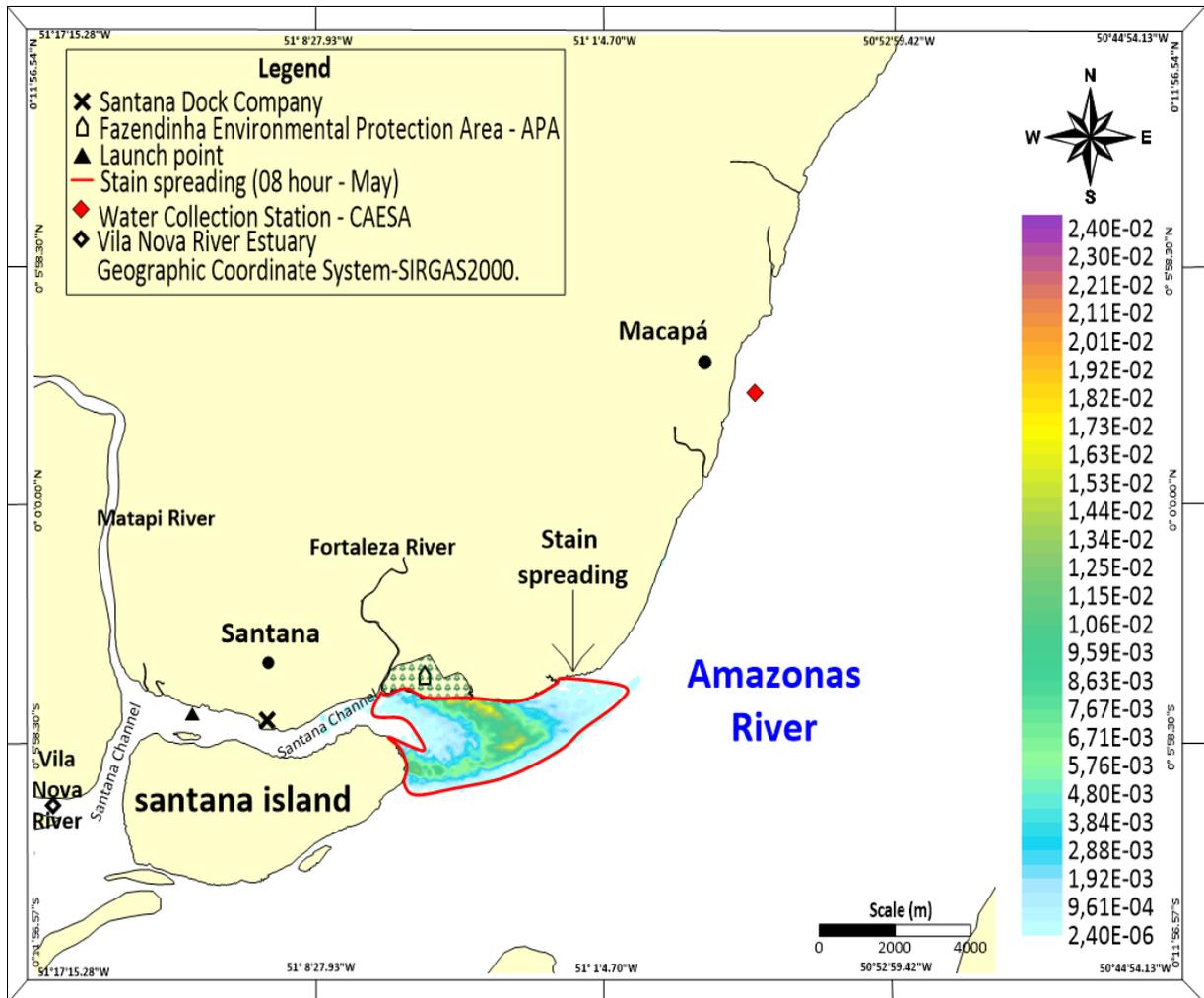
No período de transição, no mês de junho de 2015, a vazão variou  $-539,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $436,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , representando o período de transição chuvoso-seco, com precipitação média de 230 mm, bem maior do que a dos meses seguintes, única diferença positiva em relação à climatologia. Em setembro de 2015 comentou-se sobre a influência do equinócio, com um intervalo de vazão oscilando de  $-808,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a  $477,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , e o maior valor de descarga líquida total ( $1.285,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) superando a do mês de abril, apesar de apresentar apenas 8 mm de precipitação média naquela época. Em outubro de 2015 foi estimada a descarga líquida de [ $-612,8 \leq Q \leq 348,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ], e precipitação média de 12 mm, pouco maior do que setembro daquele ano. Contudo, sem a influência da oscilação oceânica provocada pelo equinócio [11].

Em dezembro de 2015, final do período seco, foram registrados os menores valores de descarga líquida observados [ $-568,2 \leq Q \leq 338,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ], sendo possível deduzir que nesse período ocorreu níveis de coluna d'água mais baixos devido ao término da estação de estiagem. Esses valores fornecem uma ideia da influência do rio Matapi no Canal de Santana. Em todo caso, não há dados disponíveis de medidas de vazões no rio Vila Nova. Entretanto, estima-se que este último tenha uma vazão com valor relativamente maior (20 a 40%) superior às do rio Matapi [11].

Retornando à análise da presente pesquisa, posteriormente, na análise do cenário S-2c (figura 7), após 8 horas de um eventual sinistro, com características de maré vazante, assumindo novamente seu maior potencial hidrodinâmico, a pluma de poluente percorre novamente o canal

de Santana. E, devido ao pico da maré vazante, manteve-se com tendência à leste, quase deixando o canal por completo.

Figura 7: S-2c\_ 8h pós derramamento do óleo (período chuvoso em maio).



Fonte: Autor, 2022.

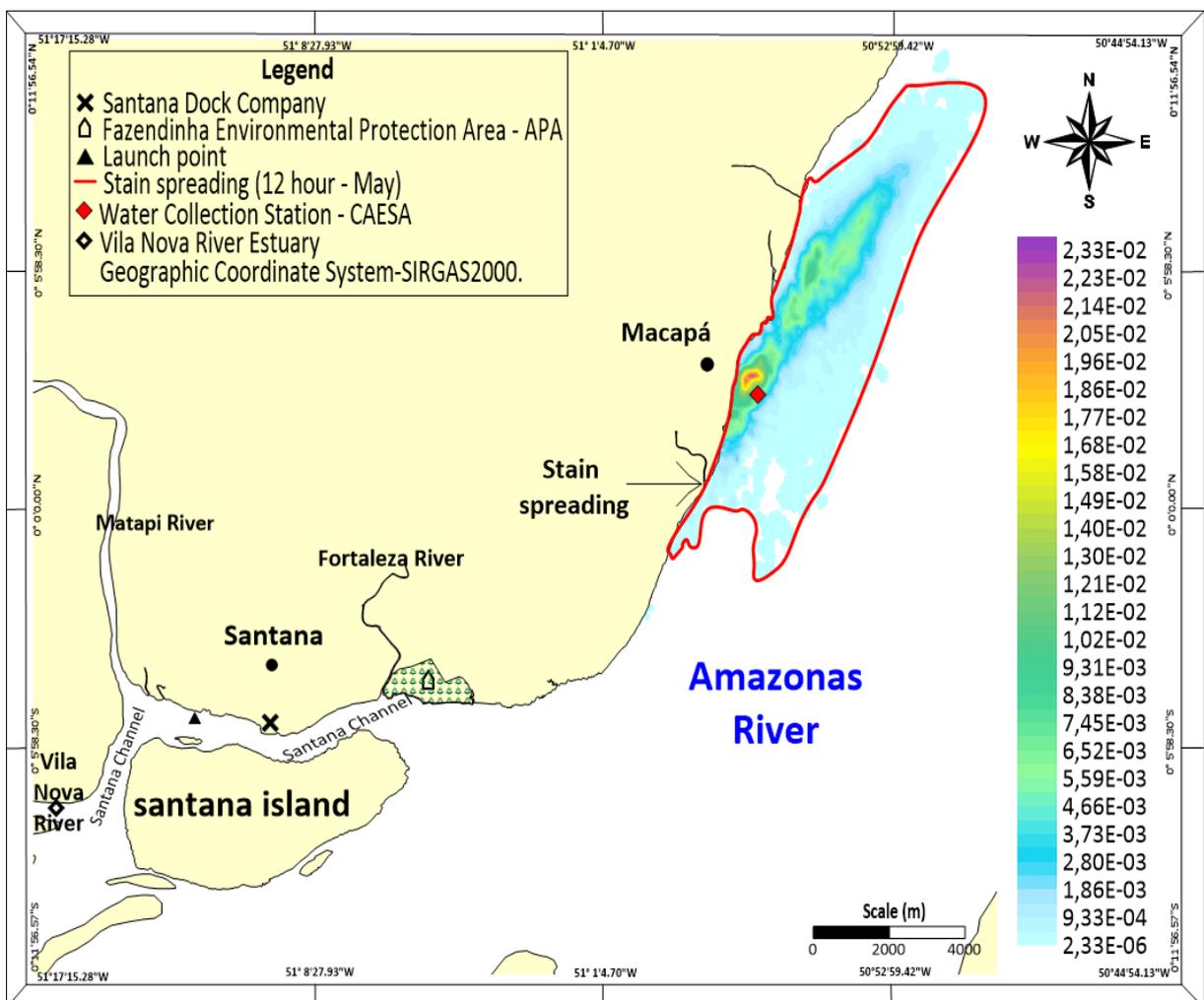
Neste momento ocorreu a maior concentração de óleo, tocando as margens da Área de Proteção Ambiental da Fazendinha. Nessa simulação a área afetada abrange 11,29 km<sup>2</sup> e a vazão registrada foi de 24.013,57 m<sup>3</sup>/s, 3 vezes superior ao cenário anterior, registrando a maior vazão do modelo. Este fato é importante, pois explica a extensão percorrida pela pluma neste intervalo de análise.

Nas fases de vazante durante o período chuvoso há uma maior influência fluvial e menor influência das águas marinhas adentrando no estuário [17, 22, 33]. Logo, a vazão registrada neste sentido de fluxo é maior. O inverso se aplica no período de estiagem pois o baixo nível do rio faz com que o nível de maré enchente tenha maior influência sobre a quantidade de água que entra no canal [22, 33], contribuindo para a inversão da vazão no rio Amazonas [1] e seus

afluentes [11]. Portanto, este fenômeno também foi observado em ambos os cenários S-1 (a-b) e S-2 (a-b).

A última análise, às 12 horas, é referente ao cenário S-2d (figura 8), representando o fim da fase da maré vazante. Nesta fase, se concentrou a pluma ao norte do Rio Amazonas, predominantemente concentrada junto à orla da cidade de Macapá. Neste intervalo, com vazão de 14.263,46 m<sup>3</sup>/s a mancha ocupou uma área de 36,23 km<sup>2</sup>, registrando o pior cenário de espalhamento possível em comparação aos mesmos horários analisados do mês de maio. Ademais, a pluma já teria se deslocado completamente além do centro urbano de Macapá, se concentrando na orla da zona norte, após o canal do Jandiá. Portanto, esse foi considerado o pior cenário possível de espalhamento dentre todos os intervalos analisados, em ambos os períodos hidrológicos sazonais.

Figura 8: S-2d\_ 12h pós derramamento do óleo (período chuvoso em maio).



Fonte: Autor, 2022.

No cenário de novembro (figuras 3 e 4) a pluma tocou toda a margem da Área de Proteção Ambiental da Fazendinha, enquanto em maio a pluma se estendeu mais para jusante,

em sentido da foz do Rio Amazonas. Sua extensão alcançou as proximidades das instalações da Estação de captação de água de Macapá, majorando os riscos e os perigos de impactos ambientais e econômicos, podendo comprometer as operações de captação e tratamento da água por períodos significativos [24]. Em casos extremos, a Estação de Tratamento de Água - ETA de Macapá necessitaria de tempo hábil e de tecnologias avançadas para tornar os recursos hídricos, potencialmente atingidos, menos impactantes, para se tornarem novamente acessíveis e úteis para consumo.

Comparando as áreas atingidas nos cenários propostos com a Carta SAO [18], referente à área estudada, os índices de sensibilidade do Litoral registrados são praticamente todos iguais ou superiores a 9 ( $ISL \geq 9$ ), frequentemente atingindo  $ISL = 10$  em longas extensões. Indicando zonas de vulnerabilidade alta e muito alta, englobando principalmente os ambientes fluviais [25]. Assim, somente esses resultados ao longo da zona costeira-estuarina já seriam critério suficiente para justificar análises similares às do presente estudo, mesmo sendo reconhecidas as limitações de dados experimentais hidrológicos, meteorológicos, batimétricos e de qualidade da água nesta região para alimentar com maior confiabilidade os modelos de simulação [8]. Entretanto, a presente análise é mais uma contribuição científica no sentido do fortalecimento das ferramentas de suporte ao planejamento, prevenção de acidentes de gerenciamento de recursos hídricos e ecossistemas costeiros no estuário do rio Amazonas no Estado do Amapá [3].

Essas análises, preencheram importantes lacunas de conhecimento sobre um hipotético comportamento de pluma de poluentes na zona portuária de Santana. Assim, em caso de acidentes, e considerando curtíssimos prazos ou prazos imediatos, é possível projetar o alcance máximo desses impactos nestes intervalos de tempo crítico, chamando a atenção de urgentes providências de prevenção, mitigação e controle ambiental junto aos setores de gestão de recursos hídricos, conservação de ecossistemas, saneamento básico e análise de risco ambiental da área portuária.

Acreditamos que os cenários gerados na presente pesquisa são extremamente úteis em caso de ocorrência de algum sinistro similar local e sem avisos prévios (argila fluida). Devido ao que ocorre com as plumas hipotéticas simuladas durante somente um ciclo de maré, foi constatado que haveria uma significativa demanda por providências urgentes de mitigação de efeito e ao controle necessário para conter os impactos ambientais resultantes [8, 3, 4, 25].

Neste aspecto é importante ressaltar o papel das características meteorológicas que dividiram as análises (período de estiagem versus período chuvoso). Mas, nestes cenários, o critério hidrometeorológico não foram fatores tão relevantes para definir a pior situação de

espalhamento do contaminante. Por exemplo, nas primeiras 4h, em ambos os cenários analisados o espalhamento foi mais amplo no período de estiagem (novembro). Por outro lado, depois de 8h de derramamento, os cenários registraram pior situação (maior espalhamento e concentração) no período mais chuvoso (maio). Contudo, foi possível constatar pela correlação entre vazão e área de pluma que a dimensão da pluma foi proporcional à vazão da respectiva análise, como seria esperado.

Em ambas as simulações a vazão foi predominante para o espalhamento da pluma mesmo frente à relevância da influência do vento no período de estiagem, quando este último era comparado a resultados anteriores [1, 8]. Isso demonstrou certa neutralidade dos efeitos do vento em maio, e não favorável em 25% dos cenários de novembro. Essa condição de vento mais favorável em novembro [8], associada ao volume de vazão aproximadamente 25% maior nas 4 primeiras horas explica o motivo das plumas em novembro S-1 (a - b) terem tido os piores resultados de concentração e espalhamento do poluente quando comparadas ao cenário de maio S-2 (a - b).

Mas em novembro a velocidade do vento é tipicamente mais intensa. Assim, o vento foi associado com as primeiras horas do derrame, com influência direta sobre a espessura da pluma [5, 8, 31]. Isso mostra a importância aleatória do instante do derramamento do poluente na água (fase da maré), mesmo reconhecendo que o efeito da tensão de cisalhamento do vento, principal condutor da circulação de superfície, é gradualmente perdido ao longo da coluna d'água [5]. Este pode ter sido o fator principal que culminou na diferença de dispersão da pluma nas primeiras 4 horas de estudo entre novembro e maio. Essa diferença foi de cerca de 6 km e 3 km respectivamente. É importante frisar também que, justamente nesse intervalo, as operações de controle e mitigação dos impactos da expansão das plumas necessitam também ser mais eficazes.

Em contrapartida, nos cenários S-1 (c - d) e S-2 (c - d), o segundo registrou uma vazão  $\approx 30\%$  superior ao primeiro, considerado o maior volume de água fluindo pelo Canal de Santana e, conseqüentemente, a significativa influência de sua vazão fluvial, os cenários S-2 (c - d) configuraram a maior capacidade de dispersão das plumas de contaminante neste intervalo de tempo definido. O estágio de 8h após derrame registrou o pico de vazão do modelo, o que fez as partículas percorrerem aproximadamente 25 km, apenas durante as últimas 8h da simulação. Todavia no cenário S-1 (a - b) as mesmas delimitações de intervalo registraram um percurso de apenas 12 km, ratificando o papel da vazão no transporte das partículas.

A abrangência desse eventual acidente mostra a fragilidade e a sensibilidade ambiental da área, pois o impacto de um acidente atingiria ecossistemas extremamente vulneráveis,

comunidades urbanas e rurais [23, 32]. O estreito contato do contaminante com as margens mostrado nas simulações é um sério alerta sobre o quanto a biodiversidade costeira seria afetada [19, 40, 3, 4]. Essa área apresenta uma das maiores áreas contínuas de manguezais do mundo, elevando o risco ambiental de contaminação cujos impactos seriam inestimáveis do ponto de vista ecológico e socioeconômico [1, 37, 39].

A eventual exposição da população ao contaminante foi evidenciada na presente pesquisa, demonstrando que a vulnerabilidade ecológico-ambiental e socioeconômica é evidente. Haja vista que em apenas 12h pós derrame a captação de água de Macapá já seria comprometida apesar da distância do local do acidente, ocasionando problemas no sistema de tratamento [24, 8, 3, 4]. Além disso, um desastre de média ou grande proporção também poderia colapsar grande parte do sistema de abastecimento de água, e até inviabilizar o turismo local, causando paralisações sistêmicas de atividades econômicas, como a pesca, o lazer, e serviços relacionados com saneamento e saúde pública e paralizações no funcionamento do porto [23].

O momento exato do derramamento é imprevisível para definição das primeiras ações de mitigação. Pois, como foi observado pelos 8 cenários numéricos hipotéticos, o sentido do escoamento é um gatilho relevante que pode intensificar ou reduzir a intensidade do impacto das plumas durante o processo de espalhamento, variando de acordo com a vazão a cada intervalo seguinte da fase da maré. Portanto, tornando-se precursora e controladora da intensidade dispersiva, retroalimentando-se sucessivamente. Esse fato pode ser observado em ambos os cenários, principalmente nas 4 primeiras horas do derrame, momentos considerados essenciais para quaisquer tipos de ações mitigadoras. Mas, as fases seguintes podem se tornar ainda mais críticas. E sem o devido controle, forma-se um amplo rastro de contaminação atingindo zonas geográficas mais amplas, e conseqüentemente, os ecossistemas e biodiversidades contidas nessas áreas.

#### **4. Conclusões**

Os estudos demonstraram que durante o período de estiagem (novembro), os maiores riscos foram atribuídos ao período de maré enchente (S-1a e S-1b), quando a vazão de maré se contrapõe com a vazão fluvial de montante do rio Amazonas e dos afluentes próximos (Rio Matapi e Vila Nova), provocando a chamada vazão inversa. Outrora, durante o período chuvoso (maio), a vazão fluvial tipicamente intensa, se amplia graças ao volume de água das chuvas intensificando a vazão do Rio Amazonas no seu sentido natural. Nesse período os riscos de espalhamento da pluma se tornam maiores em decorrência da maré vazante (S-2a e S-2b).

Foi confirmada a hipótese de que, no curtíssimo prazo de um ciclo de maré, as plumas afetam significativas áreas de encostas sensíveis ao óleo, classificadas com  $[ISL \geq 9,0]$ , elevando o potencial de impacto ambiental. A configuração geográfica possibilita a delimitação da área afetada usando barreiras de contenção, de modo que, se essas medidas forem aplicadas em tempo hábil, as chances de mitigação são ampliadas.

Considerando o deslizamento de 2013, esse estudo contribui como subsídio no gerenciamento de riscos imediatos das instalações portuárias e reservas energéticas (tanques de combustível) estabelecidas na área do Porto de Santana, de modo a subvencionar iniciativas de atuação em acidentes ambientais similares na região, focado em respostas imediatas. E ainda pode ter sua metodologia aplicada em diversas áreas ambientais importantes, como por exemplo a dispersão de contaminantes causados por rompimentos de barragens.

Todavia, as limitações do presente estudo incorporam a aleatoriedade de eventos extremos em caso de acidentes e sugerem principalmente pesquisas em outros períodos hidrológicos sazonais, com a ampliação de novos estudos sobre o comportamento do óleo em diferentes novos cenários.

Ademais, trabalhos de campo e experimentais devem ser fomentados para produzir malhas computacionais mais robustas, de modo que o comportamento da hidrodinâmica local seja melhor compreendido, a fim de viabilizar uma representação mais precisa do escoamento local, possibilitando prever eventuais acidentes ambientais com maior eficiência.

### **Agradecimentos**

Conselho Nacional de Pesquisa – CNPQ, Processo No. 314830/2021-9 e ao apoio dos Laboratórios de Hidráulica e Saneamento do Curso de Engenharia Civil/UNIFAP e Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA) do curso de Ciências Ambientais da UNIFAP.

Apoio da PROPESP/UFPA (PAPQ).

### **Referências**

1. ABREU, C. H. M.; BRITO, D.C.; BARROS, M. L. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. *Water*, 29/02/2020. <https://doi.org/10.3390/w12030660>.
2. ADAMO M, DE CAROLIS G, PASQUALE V, PASQUARIELLO G (2009) Detection and Tracking of Oil Slicks on Sun-Glittered Visible and Near Infrared Satellite Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 30:6403-27. doi:

- 10.1080/01431160902865772.
3. ARAÚJO E. P.; CUNHA H. F. A.; BRITO A. U.; CUNHA A. C. Indicators of water supply and water transmission diseases in Eastern Amazonian municipalities. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2022a. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200179>.
  4. ARAÚJO, E. P.; ABREU, C. H. .M; CUNHA, H.F.A.; BRITO, A.U.; PEREIRA, N.N and CUNHA, A.C. Vulnerability of biological resources to potential oil spills in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol 59. 2022b (im press).
  5. ARMENIO E, MEFTAH MB, DE PADOVA D, SERIO FD, MOSSA M (2019) Monitoring Systems and Numerical Models to Study Coastal Sites. *Sensors* 19:1552. <https://doi.org/10.3390/s19071552>.
  6. BAI JH, XIAO R, ZHANG KJ, GAO HF (2012) Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China. *Journal of Hydrology* 450:244–253.
  7. BEARDSLEY, R. C; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; GEYER, WR; LENTZ, SJ; CASTRO, BM; CACCHIONE, D.; CARNEIRO, N. Maré M 2 na Plataforma Amazônica. *J. Geophys.Res.* 1995, 100, 2283-2319. <https://doi.org/10.1029/94JC01688>.
  8. CUNHA, A. C.; ABREU C. H. M.; CRIZANTO J. L. P.; CUNHA H. F. A.; BRITO A. U.; PEREIRA N. N. Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic areas of the Lower Amazon River. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 168, 2021, 112404, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112404>.
  9. D'ANDREA, M. A; REDDY, G. K. Health Risks Associated with Crude Oil Spill xposure, *The American Journal of Medicine*, Volume 127, Issue 9, 2014, Pages 886.e9-886.e13, ISSN 0002-9343, <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2014.04.035>.
  10. DYER, K.R. Sediment Transport Processes in Estuaries, in Perillo, G.M.E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries: Developments in Sedimentology*, New York, Elsevier Science B.V., pp. 423-449, 1995.
  11. FELIX NETO, J. C.; SOUZA, L. J.; ABREU, C. H. M.; BARBARA, V. F.; CUNHA, H. F. A; Dias, M. T; CUNHA, A. C, Impactos hidroclimáticos de curto prazo no padrão hidrodinâmico de Rio de Estuário Amazônico, Amapá (AP), Brasil. *Ibero-American Journal of Environmental Sciences* Jan 2021 - v.12 - n.1.
  12. FENSTERSEIFER, T. A responsabilidade do Estado pelos danos causados às pessoas atingidas pelos desastres ambientais associados às mudanças climáticas: Uma análise à luz dos deveres de proteção ambiental do Estado e da proibição de insuficiência na tutela do direito fundamental ao ambiente. *R. Opin. Jur*, Fortaleza, ano 9, n. 13, p.322-354, jan./dez. 2011. <https://periodicos.unichristus.edu.br/opiniaojuridica/article/viewFile/794/254>.
  13. FERGUSON, A.; SOLO-GABRIELE, H.; MENA, K. Assessment for oil spill

- chemicals: Current knowledge, data gaps, and uncertainties addressing human physical health risk. *Marine Pollution Bulletin*, [S.l], v.120. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110746>.
14. FRAGOSO-NETO, J., PEREIRA, NN, CUNHA, AC, 2018. Monitoramento da qualidade da água de lastro como suporte à ` Gestão o no porto de Santana-AP, Amazônia Estuarina / Brasil. In: Pereira, NN (Org.). *UMA ` gua de Lastro Gestão oe Controle*. 1a ed. São Paulo: Blucher 1, 171 - 197. <https://doi.org/10.5151/9788580393064>
  15. GAGNE-MAYNARD, W. ; WARD, N. D. ; KEIL, R. G. ; SAWAKUCHI, H. O. ; CUNHA, A. C. ; NEU, V. ; BRITO, D. C. ; LESS, D. F. S. ; DINIZ, J. E. ; MATOS, A. ; KAMPEL, M. ; Krusche, A. V. ; RICHKEY, J. E. . Evaluation of Primary Production in the Lower Amazon River Based on a Dissolved Oxygen Stable Isotopic Mass Balance. *Frontiers in Marine Science*. v. 4, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00026>.
  16. GALLO, M. N; VINZON, S. B. Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal Norte (estuário do rio Amazonas). *Ribagua*, 2:1, 38-50, Brasil, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.002>.
  17. GALLO, M. N; VINZON, S. B. Geração de sobremarés e marés compostas no estuário do Amazonas. *Oceano Din*. 2005, 55, 441-448. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0003-8>
  18. IEPA - Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, 2016. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia ` Marítima da Foz do Amaz ` como em. Coord. Santos, VF et al. Núcleo de P ` esquisas Aqu ` áticas (NUPAq). <https://repositorio.museu-goeldi.br/handle/mgoeldi/1205>.
  19. IRVING, A; MENDELSSOHN, G. L; ANDERSEN, D. M; BALTZ, R. H; CAFFEY, K. R; CARMAN, J. W; FLEEGER, S. B; JOYE, Q. L; EDWARD, M; EDWARD, B. Overton, Lawrence P. Rozas, Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill, *BioScience*, Volume 62, Issue 6, June 2012, Pages 562–574, <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.7>
  20. LESS, DFS, CUNHA, AC, SAWAKUCHI, HO, NEU, V., VAL ` ÉRIO, AM, WARD, ND, BRITO, D.C., DINIZ, JEM, GAGNE-MAYNARD, W., ABREU, CM, KAMPEL, M., KRUSCHE, AV, RICHEY, JE, 2018.O papel da hidrodinâmica e biogeoquímica no fluxo de CO2 e pCO2 na foz do Rio Amazonas. *Biogeosci. Discutir*. 1, 1 - 26.
  21. L'Heureux, JS., Locat, A., Leroueil, S., Demers, D., Locat, J. (2014). Deslizamentos em Argila Sensível – Das Geociências à Gestão de Riscos. In: L'Heureux, JS., Locat, A., Leroueil, S., Demers, D., Locat, J. (eds) *Deslizamentos de terra em argilas sensíveis. Avanços na Pesquisa de Riscos Naturais e Tecnológicos*, vol 36. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7079-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7079-9_1).
  22. LINS, S. R. R. M; MEDEIROS, C. Propagação da maré salina em um estuário tropical estrangulado, ipojuca, ne-brasil. *Tropical Oceanography*, ISSN 1679-3013 (online) / ISSN 1679-3005 (print), Recife, v. 46, n. 1, p. 70-91, 2018.

- <https://doi.org/10.5914/tropocean.v46i1.237251>.
23. LU, J.; YUAN, V.; MIKKELSEN, JD, OHM, C.; STANGE, E., HOLANDA, M. 2017. Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 82, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012010>.
  24. OKORO, O; SOLLIEC, M; PAPINEAU, I; FRADETTE, L; BARBEAU, B. Contribution of surfactants and micelles to contamination and treatability of crude oil-contaminated surface water, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 9, Issue 6, 2021, 106425, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106425>.
  25. PALHETA, D; DOURADO, F; MENESES, A; RODRIGUES, S; ANDRADE, M. (2022). Vulnerabilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo em Santarém (PA). Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science. 11. 276-287. 10.21664/2238-8869.2022v11i1.p276-287.
  26. PHILIPPOT, L., SPOR, A., HÉNAULT, C. ET AL. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. ISME J 7, 1609–1619 (2013). <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.34>.
  27. RAMIREZ, M. I; AREVALO, A. P; SOTOMAYOR, S; BAILON-MOSCOSO, N. Contamination by oil crude extraction – Refinement and their effects on human health, Environmental Pollution, Volume 231, Part 1, 2017, Pages 415-425, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.017>.
  28. REED M; TURNER C; ODULO A. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories, Spill Science & Technology Bulletin, Volume 1, Issue 2, 1994, Pages 143-157, ISSN 1353-2561, [https://doi.org/10.1016/1353-2561\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/1353-2561(94)90022-1).
  29. RICHER, B.; SAEIDI, A.; BOIVIN, M.; ROULEAU, A. Overview of Retrogressive Landslide Risk Analysis in Sensitive Clay Slope. Geosciences 2020, 10 (8), 279. Departamento de Ciências Aplicadas, Universidade de Quebec em Chicoutimi, Chicoutimi, QC G7H 2B1, Canadá. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080279>.
  30. RODRIGUES, M. R. C.; JUNIOR, O. M. S. Panorama Geral Da Zona Costeira Do Estado Do Amapá. Revista Brasileira de Geografia Física, ISSN:1984-2295. 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674>.
  31. ROSMAN, P. C. C. Sistema base de hidrodinâmica ambiental. Referência Técnica. Programa de Engenharia Oceânica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 426p. [http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V10d.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V10d.pdf).
  32. SHI, X; WANGA, Y; LUOB, M; ZHANG, C. Avaliação da viabilidade de derramamento de óleo marinho planos de contingência do ponto de vista da informação. Saf. Sci. 112 (2019), 38 - 47 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.09.014>.
  33. SILVA, E; CRIZANTO, J. P; ABREU, C; SANTOS, E; CUNHA, H; BRITO, A; OLIVEIRA, G; OLIVEIRA, L; MORTATI, A; ANDRE, T; SCHÖNGART, J;

- PIEDADE, M. T; CUNHA, A. (2022). Experimentation, modelling, and simulation of hydrochory in an Amazonian river. *Freshwater Biology*. 10.1111/fwb.14015.
34. SILVA, O. M. JR; SANTOS L. S; RODRIGUES, M. R. C. Panorama Dos Riscos Costeiros No Estado Do Amapá: Conhecer Para Agir. *Revista Ciência Geográfica*. 2020. [https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/Reducao2020/Reducao\\_2ed-2020-25.pdf](https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/Reducao2020/Reducao_2ed-2020-25.pdf).
35. SOUZA, K. O. DA. S; BARATA, I. Desabamento do porto de Santana-AP em março de 2013: Perspectivas de um impacto socioambiental sobre o Rio Amazonas, Brasil. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 04, Ed. 12, Vol. 05, pp. 48-64. dezembro de 2019. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/desabamento-do-porto-de-santana-ap>
36. TEIXEIRA, M. R.; CRISPIM, F. A.; BAYMA, R. S.; ANGÉLICA, R. S.; PAZ, S. P. A. Laudo pericial. Ação Civil Pública que tramita na Justiça do Trabalho, Tribunal Regional do Trabalho da 8ª Região, 6ª Vara do Trabalho de Macapá, 2019.
37. TORRES, A. M; EL-ROBRINI, M; COSTA, W. J. P. Panorama da agilidade—Amapá. Em *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*; Muehe, D., Ed.; Ministério do Meio Ambiente: Macapá, Brasil, 2018; pág. 761. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Panorama+da+eros%C3%A3o+costeira%E2%80%94Amap%C3%A1&author=Torres,+A.M.&author=El-Robrini,+M.&author=Costa,+W.J.P.&publication\\_year=2018&pages=761](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Panorama+da+eros%C3%A3o+costeira%E2%80%94Amap%C3%A1&author=Torres,+A.M.&author=El-Robrini,+M.&author=Costa,+W.J.P.&publication_year=2018&pages=761)
38. VAIRO, T., QUAGLIATI, M., DEL GIUDICE, T., BARBUCCI, A., FABIANO, B., 2016. From land- to planejamento do uso da água: um estudo de caso baseado em consequências relacionado ao risco de navios de cruzeiro. *Safety Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.024>.
39. VALERIO, A.M; KAMPEL, M; VANTREPOTTE, V; WARD, N. D; SAWAKUCHI, H. O; LESS, D. F. S; NEU, V; CUNHA, A. C; RICHEY, J. E. Usando as propriedades ópticas do CDOM para estimar as concentrações de DOC e pCO no baixo rio Amazonas. 2018. *Optar. Expressar* 26, A657 - A677. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A657>.
40. WANG, MIN; SHA, CHENYAN; WU, JIAN; SU, JINGHUA; WU, JIANQIANG; WANG, QING; TAN, JUAN; HUANG, SHENFA. Bacterial community response to petroleum contamination in brackish tidal marsh sediments in the Yangtze River Estuary, China, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 99, 2021, Pages 160-167, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.015>.
41. YANG, Y., WANG, J., LIAO, J. ET AL. Abundance and diversity of soil petroleum hydrocarbon-degrading microbial communities in oil exploring areas. *Appl Microbiol Biotechnol* 99, 1935–1946 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6074-z>.
42. YAO, X., XIAO, R., MA, Z. ET AL. Distribution and contamination assessment of heavy metals in soils from tidal flat, oil exploitation zone and restored wetland in the Yellow River Estuary. *Wetlands* 36 (Suppl 1), 153–165 (2016). <https://doi.org.ez429.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13157-015-0637-3>.

➤ **REVISTA**

**Link da Revista:** <https://www.mdpi.com/journal/water/instructions#submission>

**Classificações de periódicos Quadriênio 2017-2020**

**Título: WATER**

**ISSN: 2073-4441**

**Área de Avaliação: ENGENHARIAS I**

**Classificação (WEBQUALIS/ ENGENHARIA I): A3**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (Texto Agregador)**

ABREU, C. H. M.; BRITO, D.C.; BARROS, M. L. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. *Water*, 29/02/2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12030660>> Acesso em: 10/06/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). Estatístico Aquaviário. Disponível em: < <http://web.antaq.gov.br/anuario/>>. Acesso em 06 de maio de 2021.

API (American Petroleum Institute). “Fate of spilled oil in marine waters: Where does it go? What does it do? How do dispersants affect it?” In API Publication, n. 4691, USA. 1999.

BARRETO, E. C. G. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica, do solo mole no Porto de Santana, no Amapá. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015. Disponível em: <  
<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/consultas.php?tipBusca=autor&nrseqtip=1&vog=E&pessoa=58047>> Acesso em: 03/06/2021.

BRASIL. Decreto Federal nº 2.870, de 10 de dezembro de 1998. Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo.

BRASIL. Decreto Federal nº 8.127, de 22 de outubro de 2013. Plano Nacional de Contingência para Incidentes de Poluição por Óleo em Águas sob Jurisdição Nacional.

BRASIL. Lei Federal nº 4.871, de 6 de novembro de 2003. Plano de Área.

BRASIL. Lei federal nº 9.966, de 28 de abril de 2000. Dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19966.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19966.htm)>. Acesso em: 25 de abril de 2021.

Brasil. Rev. Tamoios, São Gonçalo (RJ), ano 16, n. 3, pág. 85-113, jul-dez 2020. Disponível em: <[10.12957/tamoios.2020.49034](https://doi.org/10.12957/tamoios.2020.49034)> Acesso em: 03/06/2021.

CASEIRO, A. M. Simulação de um eventual vazamento de óleo no oleoduto da Baía da Babitonga - SC. Universidade do Vale do Itajaí, 2011.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - Planos de contingência para vazamentos de óleo no mar. 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tiposde-acidentes/vazamentos-de-oleo/preparacao-para-resposta/planos-de-contingencia-paravazamentos-de-oleo-no-mar/>> Acessado em: 16/05/2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução nº 398, de 11 de junho de 2008. Estabelece o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 472 de 09 de dezembro de 2015. Regulamento para uso de dispersantes químicos em derrames de óleo no mar.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº 482 de 03 de outubro de 2017. Regulamento para queima controlada in situ em derrames de óleo no mar.

CUNHA, A. C.; ABREU C. H. M.; CRIZANTO J. L. P.; CUNHA H. F. A.; BRITO A. U.; PEREIRA N. N. Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic areas of the Lower Amazon River. Marine Pollution Bulletin, Volume 168, 2021, 112404, ISSN 0025-326X, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112404>>. Acesso em: 23 de maio de 2021.

CUNHA, C. L. N; CORRÊA, G. P; ROSMAN, P. C. C. Um modelo acoplado de circulação hidrodinâmica e qualidade da água aplicado ao reservatório de Rio Verde, Brasil. Revista Ambiente e Água vol.13 no.6 Taubaté, 14 de novembro de 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2244>> Acesso em: 23 maio de 2021.

FENSTERSEIFER, T. A responsabilidade do Estado pelos danos causados às pessoas atingidas pelos desastres ambientais associados às mudanças climáticas: Uma análise à luz dos deveres de proteção ambiental do Estado e da proibição de insuficiência na tutela do direito fundamental ao ambiente. R. Opin. Jur, Fortaleza, ano 9, n. 13, p.322-354, jan./dez. 2011. Disponível em:

<https://periodicos.unichristus.edu.br/opiniaojuridica/article/viewFile/794/254>. Acesso: 03 de outubro de 2021.

FERGUSON, A.; SOLO-GABRIELE, H.; MENA, K. Assessment for oil spill chemicals: Current knowledge, data gaps, and uncertainties addressing human physical health risk. *Marine Pollution Bulletin*, [S.l], v.120. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110746>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X19309026?via%3Dihub>. Acesso em: 03 de outubro de 2021.

FERREIRA, P. N. C. Avaliação estratégica e econômica de um terminal de granel líquido no Porto de Santos. São Paulo, 2017. Disponível em: <[http://pro.poli.usp.br/wp-content/uploads/2017/09/TF2\\_Pedro\\_Nosralla\\_Castanheira\\_Ferreira\\_v41.pdf](http://pro.poli.usp.br/wp-content/uploads/2017/09/TF2_Pedro_Nosralla_Castanheira_Ferreira_v41.pdf)>. Acesso em: 16 de Junho de 2021.

GALLO, M. N; VINZON, S. B. Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal Norte (estuário do rio Amazonas). Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Programa de Engenharia Oceânica, Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 2015.

GESAMP. Protecting the oceans from land-based activities - Land-based sources and activities affecting the quality and uses of the marine, coastal and associated freshwater environment. (BVIO/FAO/UNESCOIOC/ WMO/WHO/IAEA/ UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 71, 162 pp. 2001. ISBN 82-7701-011-7.

GRAZIOTTO, M. P. L. Modelagem numérica como ferramenta para caracterizar a dispersão da pluma de um derrame de óleo em São Francisco do Sul, Santa Catarina. Dissertação de mestrado. Programa de pós graduação em oceanografia. Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

GURGEL, F. O. M. J. Aplicações de modelagem hidrodinâmica para ações de resposta a incidentes de poluição por derrame de óleo: estudo de caso da enseada dos anjos em Arraial do Cabo-RJ. Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2016.

IBAMA. Instrução Normativa nº 26, de 18 de dezembro de 2018. Definição dos parâmetros e procedimentos para monitoramento ambiental da aplicação de dispersante químico no mar. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=138329>> Acessado em 16/05/2021.

IBAMA. Nota Técnica nº 03/2013 - Diretrizes para aprovação dos Planos de Emergência Individual (PEI). 2013. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/petroleo-e-gas/notas-tecnicas/4-2013-03-nota-tecnica-plano-de-emergencia-individual.pdf>>. > Acessado em: 16/05/2021.

IBAMA. Planos de Área (PA). 2016. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/emergenciasambientais/petroleo-e-derivados/planos-de-area>>. Acessado em 16/05/2021.

IPCC. Climate Change and Land an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. 2019.43 p. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM\\_Approved\\_Microsite\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf)> Acesso em: 01 de junho de 2021.

ISSII, T. M.; ROMERO, A. C.; PEREIRA-SILVA, E. F.; JUNIOR, M. R. A. & HARDT, E. The role of legal protection in forest conservation in an urban matrix. Land Use Policy, 91, 104366. 2020.

ITOPF - International Tanker Owners Pollution Federation, Accidental Tanker Oil Spill Statistics. International Tanker Owners Pollution Federation Ltd. London, 2001.

ITOPF, I. T. O. P. F. Oil Spill Modelling. Disponível em: <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770><https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/oil-spill-modelling/>>. Acesso em: 23 maio. 2021.

ITOPF. Response marine oil spill. Whither by & The International Tanker Owners Pollution Federation. Londres, Reino Unido. 150p. 1986.

L.; CUNHA, A. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of the Total Environment*. n. 624, p. 887- 899, 2018.

L'Heureux, J.-S. ; Locat, A. ; Leroueil, S. ; Demers, D. ; Locat, J. Landslides in Sensitive Clays — From Geosciences to Risk Management. Em deslizamentos de terra em argilas sensíveis - das geociências ao gerenciamento de riscos; Springer: New York, NY, USA, 2014; pp. 1–12. Disponível em: < [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-7079-9\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-7079-9_1)>. Acesso em 17 de junho de 2021.

LIMA, L. M. J. A.; OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, G. T. S.; FRANCO, L. C. E MALCHER, I. Y. M. Oil Spill on Amazon Coastal Environments: Review of Mapping and Recovery Techniques. *Journal of Applied Hydro-Environment and Climate*, v.2, n.1, p. 32-42, 2020. Disponível em: < <https://jahec.ufra.edu.br/index.php?journal=JAHEC>> Acesso em: 02 de junho de 2021.

LIRA, G. M.; HAWK, M. T.; AMORIM, E. L.; FORTES, F. C. A. & SOUZA, L. M. Analysis of the Impact of Implementation of a Risk-Flood Retention Basin. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(1). 2020.

LITTLE, D. I.; GALPERIN, Y.; BULLIMORE, B.; E CAMPLIN, M. Environmental forensics evaluation of sources of sediment hydrocarbon contamination in Milford Haven Waterway. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2015,17, 398-420. Disponível em: < <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1039/C4EM00522H> > Acesso em: 02 de junho de 2021.

LIU, G.; GUO, H.; PERSKI, A.; FAN B.; BAI, C.; YAN, D.; SONG, E. Monitoring of the Shuping landslide slope movement in the Three Gorges Reservoir of China, using X- band time series SAR interferometry. *Avanços na pesquisa espacial* Volume 57, Edição 12 , 15 de junho de 2016 , Páginas 2487-2495. Disponível em: < <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.asr.2016.03.043>>. Acesso em 17 de junho de 2021.

LOPES, C. F.; MILANELLI, J. C. C.; POFFO, I. R. F. Ambientes costeiros contaminados

LU, J.; YUAN, V.; MIKKELSEN, JD, OHM, C.; STANGE, E., HOLANDA, M. 2017. Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 82, 012010.

Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012010> Acesso em 31 de maio de 2021.

MASSEY, C. I.; PETLEY, D. N.; MCSAVENEY, M. J. Padrões de movimento em deslizamentos reativados. *Geologia de Engenharia* Volume 159 , 12 de junho de 2013 , páginas 1-19. Disponível em: <<https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.enggeo.2013.03.011>>. Acesso em 17 de junho de 2021.

MICHEL, V. F. Considerações sobre a lei de combate à poluição por óleo em águas jurisdicionais brasileiras (Lei nº 9.966/00). In: *Revista do Ministério Público / Procuradoria Geral de Justiça do Estado do Rio Grande do Sul*, n. 49, p. 291-308, jan./mar. 2003.

MONTICELLI, C. O; ZABADAL, J. R; QUEVEDO, D. M; NASCIMENTO, C. A. Solução analítica para o modelo estacionário de propagação de poluentes em meio aquático. *Rev. Ambient. Água* vol.14 no.2 Taubaté 2019 Epub 25 de março de 2019. Disponível em:<<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2298>> Acesso em: 23 maio. 2021.

PABÓN-CAICEDO, J.; YCAZA, R.; FRIEND, F.; ESPINOZA, D. FENZL, N.; APOSTOLOVA, M. Vulnerabilidad de la cuenca amazónica ante fenómenos hidroclimáticos extremos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, v. 27, n. 1, p. 27-49, jan.-jun. 2018.

PNLP. Plano Nacional de Logística Portuária. Projeção de demanda e carregamento da malha – ano base 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/2-7-pdf>>. Acesso em 16 de junho de 2021.

por óleo: procedimentos de limpeza – manual de orientação. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007.

PORTUGAL, B. B. C.; TOITO, J. F. N.; FRANCO, S. C. Medidas de segurança em terminais de graneis líquidos e as vantagens vistas nos terminais estrangeiros. *X fateclog- logística 4.0 & a sociedade do conhecimento*, issn 2357-9684, Guarulhos/SP – Brasil, 2019. Disponível em:<<https://fateclog.com.br/anais/2019/MEDIDAS%20DE%20SEGURAN%c3%87A%20EM%20TERMINAIS%20DE%20GRAN%c3%89IS%20L%c3%8dQUIDOS%20E%20AS%20VANTAGENS%20VISTAS%20NOS%20TERMINAIS%20ESTRANGEIROS.pdf>>. Acesso em 06 de maio de 2021.

RICHER, B.; SAEIDI, A.; BOIVIN, M.; ROULEAU, A. Overview of Retrogressive Landslide Risk Analysis in Sensitive Clay Slope. *Geosciences* 2020, 10 (8), 279. Departamento de Ciências Aplicadas, Universidade de Quebec em Chicoutimi, Chicoutimi, QC G7H 2B1, Canadá. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/geosciences10080279>>. Acesso em 17 de junho de 2021.

RODRIGUES, J. C.; SARDINHA, J. C. S.; SILVA, J. C.; COUTO, M. E. A.; ALMEIDA, J. C.; LIMA, R. A. P. Produção Territorial Portuária Na Amazônia: Ajustes, Ordenamentos E Práticas Espaciais Face A Produção Do Complexo Portuário De Santana, Amapá.

RODRIGUES, M. R. C.; JUNIOR, O. M. S. Panorama Geral Da Zona Costeira Do Estado Do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, ISSN:1984-2295. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674>. Acesso: 30 de outubro de 2021.

ROSMAN, P. C. C. Sistema base de hidrodinâmica ambiental. Referência Técnica. Programa de Engenharia Oceânica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 426 p. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V10d.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V10d.pdf)>. Acesso em: 22 de abril de 2021.

ROVERSI, F; ROSMAN, P. C.C; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. *Revista Ambiente e Água* vol.11 no.3 Taubaté July/Sept. 2016. Disponível em:< <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>> Acesso em: 23 maio. 2021.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de Impacto Ambiental - Conceitos e Métodos. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. ISBN 978-85-7975-090-8

SANTOS, E.; LOPES, P.; PEREIRA, H.; NASCIMENTO, O.; RENNIE, D.; STERNBERG,

SILVA, O. M. JR; SANTOS L. S; RODRIGUES, M. R. C. Panorama Dos Riscos Costeiros No Estado Do Amapá: Conhecer Para Agir. *Revista Ciência Geográfica*. 2020. Disponível em:< [https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/Reducao2020/Reducao\\_2ed-2020-25.pdf](https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/Reducao2020/Reducao_2ed-2020-25.pdf)>. Acesso em: 26 maio. 2021.

SOARES, J. L. Manual do usuário do SisBaHiA. Programas de Pós Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Fundação

Coppetec. Disponível em:<  
<http://www.sisbahia.coppe.ufrr.br/ManualSisBAHIA/A1Index.htm>>.2017.

TAKIYAMA, L.R.; SILVA, U.R.L.; Experiências na Utilização de Metodologias Participativas para a Construção de Instrumentos de Gestão Costeira no Estado do Amapá, Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management 9, 33-45. 2009.

TAVARES, J. P. N. Características da climatologia de Macapá-AP. Caminhos de geografia, ISSN 1678-6343. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Disponível em:<<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/26031/14965>>. Acesso em: 26 maio. 2021.

TEIXEIRA, M. R.; CRISPIM, F. A.; BAYMA, R. S.; ANGÉLICA, R. S.; PAZ, S. P. A. Laudo pericial. Ação Civil Pública que tramita na Justiça do Trabalho, Tribunal Regional do Trabalho da 8ª Região, 6ª Vara do Trabalho de Macapá, 2019.

UCHÔA, A. C. C. O transporte de óleo diesel como potencial fonte de poluição na região do Porto de Santana-AP. 110p. Dissertação (Mestre em Desenvolvimento Regional) Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Mestrado Integrado em Desenvolvimento Regional- Macapá, 2014.

VENÂNCIO, S.D.S.; VILLELA, S.M.; PINHO, J.L.D.S E VIEIRA, J.M.P (2017), Modelo numérico para simulações hidrodinâmicas do canal Trabalhador. Gestão da Qualidade Ambiental, vol. 28 No. 2, pp. 175-190. Disponível em:<<https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1108/MEQ-07-2015-0148>> Acesso em: 23 de maio. de 2021.

WON, J. et al. Ten Years after the Oil Spill in Taean: The Recovery of the Ecosystem, the Life of Women, and the Community. Asian Women, [S.l], v. 35, n. 4, pp.1-22. 2019. DOI:118 <https://doi.org/10.14431/aw.2019.12.35.4.1>. Disponível em: [http://easianwomen.org/\\_common/do.php?a=full&b=21&bidx=1805&aidx=22262](http://easianwomen.org/_common/do.php?a=full&b=21&bidx=1805&aidx=22262). Acesso em: 28 de setembro de 2021.

ZHEN, Z.; LI, D.; LI, Y.; CHEN, S.; BU, S. Trajectory and weathering of oil spill in Daya bay, the South China sea. Environmental Pollution, Volume 267, 2020, 115562, ISSN 0269-

7491. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin, 300072, China. Disponível em: <  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115562> > Acesso em: 10/06/2021.