

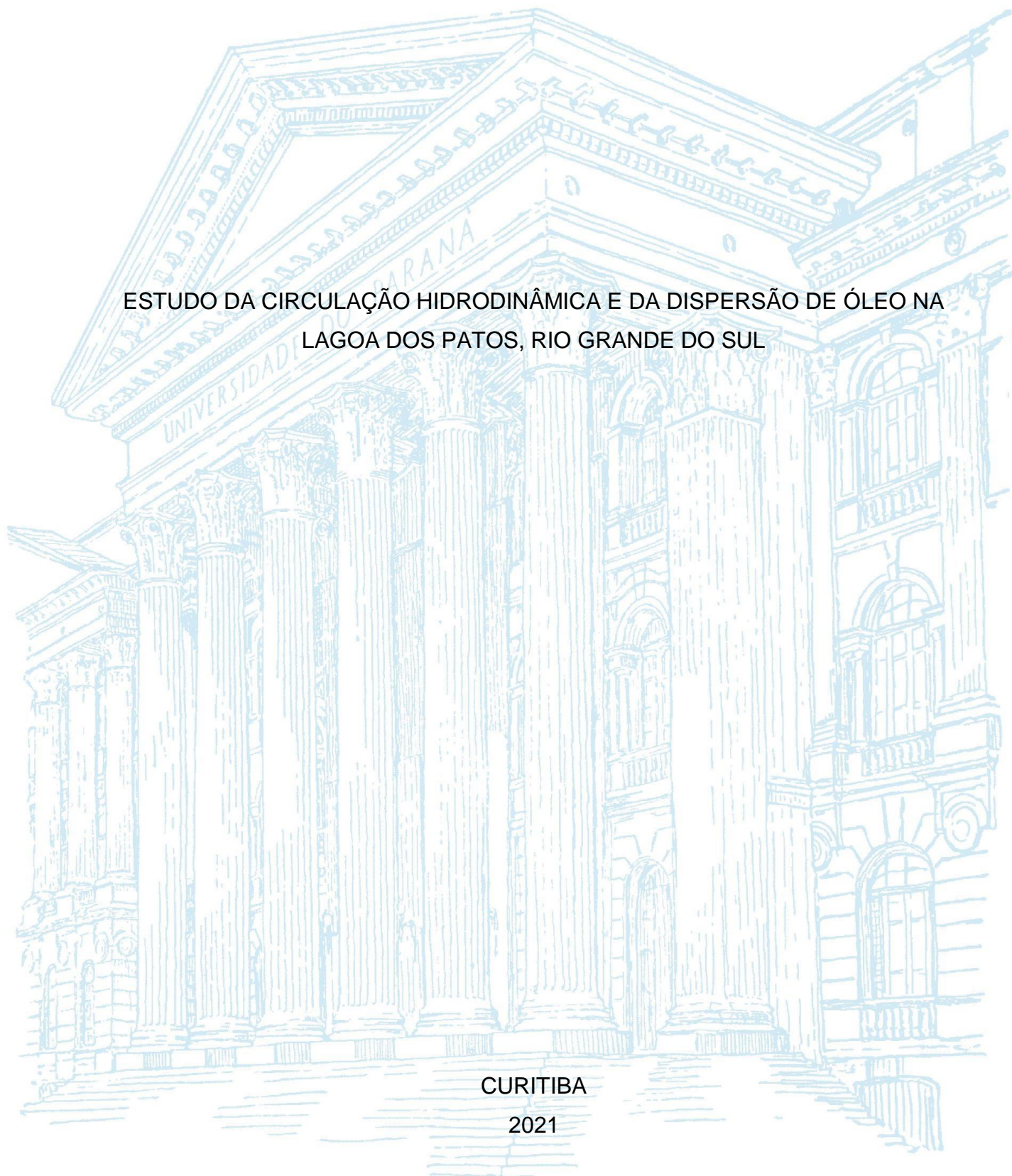
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VALERIA CRISTINA PEREIRA ANTEZANA

ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA  
LAGOA DOS PATOS, RIO GRANDE DO SUL

CURITIBA

2021



VALERIA CRISTINA PEREIRA ANTEZANA

ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA  
LAGOA DOS PATOS, RIO GRANDE DO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a).Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha.

CURITIBA


2021

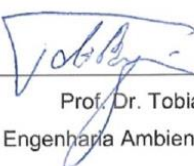
**TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL**

VALERIA CRISTINA PEREIRA ANTEZANA

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA  
LAGOA DOS PATOS, RIO GRANDE DO SUL**

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 90, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):   
Profa. Dra. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha.  
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 1:   
Prof. Dr. Tobias Bleninger  
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Paraná

Membro(a) 2:   
Dra. Diana Maria Cancelli  
Envex Consultoria

Curitiba, 15 de dezembro de 2021

## DEDICATÓRIO

Dedico este trabalho à minha mãe,  
Marilene, ao meu irmão Pablo Cesar e ao  
meu pai (*in memória*) Cesar Orlando.

## **AGRADECIMENTOS**

Á Profa Orientadora Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha, pela orientação e dedicação em transmitir seu conhecimento ao longo da elaboração do trabalho.

Á equipe do Departamento de Engenharia Ambiental o qual foram de extrema importância na base do conhecimento ao longo do curso de graduação.

Á minha mãe e meu irmão, que mesmo longe, me incentivaram a seguir meus objetivos e sonhos, mesmo que os caminhos trilhados não foram o que imaginávamos.

Aos meus amigos e familiares próximos, que estiveram presentes em todos os momentos vividos nos últimos anos.

E principalmente aos Anjos Arcanjos, meus anjos da guarda, que mesmo em momentos que não acreditei que eu era capaz, me iluminaram e me acompanharam até o fim de mais um ciclo da minha vida.

'Nós somos capazes de fazer coisas difíceis'.  
(DOYLE, G., Untamed, 2020)

## RESUMO

Os incidentes que ocorrem provenientes do derrame de óleo em ambientes marinhos, são considerados ameaças diretas e significativas ao ambiente costeiro. Neste contexto, os planos de contingência de regiões portuárias são ferramentas importantes para mitigar e prevenir este tipo de problema.

Na região do estado do Rio Grande do Sul está localizado o porto de Rio Grande, nas proximidades do canal lagunar, que interliga a Lagoa dos Patos e o Oceano. Este estudo verificou a dispersão de óleo após um derrame acidental e pontual nas proximidades no canal lagunar da Lagoa dos Patos, utilizando o sistema de modelagem ambiental SisBaHiA®.

Foram analisadas simulação de dispersão de óleo para uma situação hipotética, para um volume total de 800 m<sup>3</sup> pelo período de 72h. Os resultados da simulação apontaram que o vento não apresenta influência significativa na dispersão do óleo ao longo do canal lagunar. Dessa forma, o maior contribuinte para a advecção do óleo é a combinação meteorológica e astronômica da região, determinante nos períodos de enchente e vazante.

Palavras-Chave: dispersão de óleo; modelagem hidrodinâmica, modelo de transporte Lagrangeano, SisBaHiA®, Lagoa dos Patos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos do derrame de óleo em um corpo d'água e as escalas correspondentes. ....	22
Figura 2 - Localização da área de estudo .....	35
Figura 3 - Região portuária do Porto do Rio Grande.....	37
Figura 4 - Tela do programa ADIOS2, com as características do óleo e as curvas de decaimento da massa de óleo .....	41
Figura 5 - Curva de decaimento do óleo .....	41
Figura 6 – Valores de decaimento do óleo obtido pelo programa ADIOS2 .....	42
Figura 7 - Malha e domínio de modelagem da região da Lagoa dos Patos.....	43
Figura 8 - Batimetria da Lagoa dos Patos. ....	44
Figura 9 - Localização das estações ao longo do canal da Lagoa do Patos .....	45
Figura 10 - Localização das estações maregráfica .....	46
Figura 11 - Curva da maré astronômica .....	47
Figura 12 - Elevação da superfície livre usada como condição de contorno para o mês de janeiro de 2020.....	48
Figura 13 - Elevação da superfície livre usada como condição de contorno para o mês de julho de 2020 .....	49
Figura 14 - Localização das estações de vento na região das Lagoa dos Patos .....	50
Figura 15 - Rosa dos ventos das estações 54, 48, 42 e 35 para o mês de janeiro ...	51
Figura 16 - Rosas dos ventos das estações 54, 48, 42 e 35 para o mês de julho.....	52
Figura 17 - Localização dos pontos para a extração dos dados de nível médio do mar, temperatura e salinidade.....	53
Figura 18 - Valores de temperatura (°C) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 1.....	54
Figura 19 - Valores de salinidade (‰) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 1.....	54
Figura 20 - Valores de temperatura (°C) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 2.....	55
Figura 21 - Valores de salinidade (‰) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 2.....	55
Figura 22 - Valores das vazões diárias correspondente ao mês de janeiro/2020 .....	57
Figura 23 - Valores da vazão diária correspondente ao mês de julho/2020 .....	57

Figura 24 - Elevação obtida pelo SisBaHia nas cinco estações em janeiro de 2020	62
Figura 25 – Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) das velocidades obtidas pelos SisBaHia na estação 'Meio Canal' em janeiro/2020.....	63
Figura 26 – Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 16/01/2020 às 13h, com destaque para a região do porto de Rio Grande .....	64
Figura 27 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 16/01/2020 às 13h.....	64
Figura 28 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 14/01/2020 às 23h, com destaque para a região do porto de Rio Grande .....	65
Figura 29 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 14/01/2020 às 23h.....	65
Figura 30 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 16/01/2020, às 13h .....	66
Figura 31 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste na estação 'Meio Canal' no dia 14/01/2020 às 23h.....	67
Figura 32 - Elevação obtida pelo SisBaHia nas cinco estações em julho de 2020....	68
Figura 33 - Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) das velocidades obtidas pelos SisBaHia na estação 'Meio Canal' em julho de 2020.....	68

Figura 34 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 06/07/2020 as 22h, com destaque para a região do porto de Rio Grande .....	69
Figura 35 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 06/07/2020 as 22h.....	70
Figura 36- Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 16/07/2020 as 17h, com destaque para a região do porto de Rio Grande .....	70
Figura 37 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 16/07/2020 as 17h.....	71
Figura 38 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 16/07/2020, às 17h .....	72
Figura 39 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 06/07/2020 22h .....	72
Figura 40 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 16/01/2020 .....	73
Figura 41 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 14/01/2020 .....	74
Figura 42 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo não-conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 16/01/2020.....	75
Figura 43 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 06/07/2020 .....	76
Figura 44 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 16/07/2020 .....	77
Figura 45 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo não-conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 06/07/2020 .....	78



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Taxas de degradação de algumas espécies de HPAs. ....	22
Tabela 2 - Coeficientes de absorção ao longo das fronteiras.....	33
Tabela 3 - Valores da amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo correspondente ao tipo de sedimento .....	45
Tabela 4 - Constantes harmônicas.....	47
Tabela 5 - Estações Fluviométricas que compõe o rio Guaíba .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ADIOS2	<i>Automated Data Inquiry for Oil Spills</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTAQ	Agência Nacional de Transporte Aquático
APA	Área de Proteção Ambiental
API	<i>American Petroleum Institute</i>
Art.	Artigo
BETEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
CartasSAO	Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
HYCOM	<i>Hybrid Coordinate Ocean Model</i>
HPA	Hidrocarboneto Policíclico Aromático
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
ISL	Índice de Sensibilidade do Litoral
ITOPF	<i>The International Tanker Owners Pollution Federation Limited</i>
LES	Simulações de Grande Vórtices
LFNA	Líquido de Fase Não Aquosa
NE	Nordeste
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOPP	<i>National Ocean Partnership Program</i>
PA	Planos de Áreas
PCN	Plano Nacional de Contingência
PEI	Plano de Emergência Individual
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
SisBaHiA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SUPRG	Superintendência do Porto de Rio Grande

SW	Sudoeste
2DH	Modelos Hidrodinâmico Bidimensional
3D	Modelo Hidrodinâmico Tridimensional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS DERIVADOS DE PETRÓLEO .....	21
3.1.1	Comportamento do derrame de óleo em um corpo d'água .....	22
3.2	LEGISLAÇÃO NACIONAL .....	24
3.3	HISTÓRICO DE ACIDENTES .....	25
3.4	CARTAS DE SENSIBILIDADE E MODELAGEM COMO FERRAMENTA NA GESTÃO AMBIENTAL NO DERRAME DE ÓLEO .....	27
3.5	SISTEMA COMPUTACIONAL AMBIENTAL SISBAHIA .....	28
3.5.1	Modelo Hidrodinâmico .....	29
3.5.2	Modelo de Transporte Lagrangeano .....	30
3.5.2.1	Modelo de Decaimento do Óleo .....	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	35
4.1.1	Área portuária de Rio Grande .....	36
4.2	CENÁRIOS DE MODELAGEM .....	38
4.3	SISTEMA DE MODELAGEM APLICADO .....	39
4.3.1.1	Modelo de Decaimento do Óleo .....	40
4.4	DOMÍNIO DA ÁREA EM ESTUDO .....	42
4.5	DADOS DE MARÉ .....	46
4.6	DADOS DE VENTO .....	49
4.7	DADOS DE TEMPERATURA E SALINIDADE .....	52
4.8	DADOS DE VAZÃO .....	55
4.9	PARÂMETROS DO MODELO .....	57
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
5.1	CENÁRIO HIDRODINÂMICO PARA O VERÃO .....	61
5.2	CENÁRIO HIDRODINÂMICO PARA O INVERNO .....	67
5.3	MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGENO – VERÃO .....	73
5.4	MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO – INVERNO .....	75
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>79</b>

<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>
----------	-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Os incidentes que ocorrem provenientes do derrame de óleo em ambientes marinhos, são considerados ameaças diretas e significativas ao ambiente costeiro. Neste contexto, os planos de contingência de regiões portuárias são ferramentas importantes para mitigar e prevenir este tipo de problema. O óleo, após seu derrame nos corpos d'água oceânicos, sofre diferentes processos químicos e físicos, acarretando impactos ambientais e econômicos para toda a região. O alcance e os problemas provocados pelos derrames dependem das propriedades e volume do produto, da salinidade do corpo d'água e das condições meteorológicas, como vento e temperatura e ainda, as características hidráulicas dos corpos d'água receptores.

Os impactos ambientais produzidos pelas atividades portuárias são acarretados pela instalação da sua infraestrutura, que abriga toda a parte de entrada, armazenamento e saída dos produtos, e da infraestrutura hídrica dos canais que se destina ao trânsito de navios entre os portos e o oceano. A implantação da infraestrutura portuária demanda aos seus responsáveis a elaboração de estudos ambientais, que apresentem possíveis acidentes pontuais e análises contínuas de possíveis impactos, os quais são indispensáveis para a gestão ambiental adequada destas atividades (ANTAQ, 2021). Assim, é possível estabelecer procedimentos que auxiliem na minimização dos impactos ocorridos, principalmente acidentes, no manuseio e transportes das cargas, além dos ocorridos com as embarcações. Nestes estudos, a modelagem matemática ambiental é importante aliada na gestão adequada destas regiões.

Os três principais óleos petrolíferos presentes nos derrames de óleo em ambientes costeiros são: produtos refinados leves, refinados pesados e óleos brutos. A partir da composição do óleo, os processos de intemperismo ocorrem em diferentes proporções, considerando as propriedades do meio em que o óleo é inserido.

O transporte aquaviário de produtos perigosos, como substâncias inflamáveis, explosivos, corrosivos, gases liquefeitos ou comprimidos, entre outros, podem causar risco aos trabalhadores, ao meio ambiente e as instalações físicas. A Lei n.º 10.233 de 5 de junho de 2001 indica a responsabilidade da ANTAQ (Agência Nacional de Transporte Aquaviário) em estabelecer normas e padrões referentes ao transporte marítimo seguro de substâncias perigosas. Vale destacar que as normas e padrões estabelecidos compreendem situações dentro e fora da área portuária.

Na região sul do Brasil duas grandes áreas portuárias, no estado do Paraná, o Porto de Paranaguá e no Rio Grande do Sul, o Complexo Portuário de Rio Grande e Pelotas. O Complexo Portuário de Rio Grande e Pelotas, localizado no canal lagunar da Lagoa dos Patos, é um importante porto que serve de ligação entre os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (ANTAQ, 2021). As principais cargas movimentadas no complexo são de grãos de soja, arroz, trigo, produtos químicos, petróleo e seus derivados, entre outros (PLANO MESTRE, 2020). O Complexo Portuário de Rio Grande e Pelotas, em 2018, movimentou 43,3 milhões de toneladas de carga, com de granéis sólidos e de contêineres.

O Complexo Portuário de Rio Grande e Pelotas está localizado entre a embocadura lagunar da Lagoa dos Patos e o Canal de São Gonçalo. É interligado por um estreito canal ao Oceano Atlântico, e considerado como uma das mais importantes rotas comerciais portuárias brasileiras. As regiões lagunares são caracterizadas pela transição hídrica continental e oceânica, constituída por águas salobras ou salinas, localizadas na borda litorânea continental. Apresentam baixas profundidades, podendo apresentar bancos de areias e pequenas ilhas. A Lagoa dos Patos é uma laguna rasa do tipo sufocada, onde a maré astronômica não apresenta grande influência na circulação. Nesse tipo de lagoa, os principais forçantes são as descargas fluviais e o vento (LACERDA, 2006).

Os efeitos das marés, a geometria da lagoa, as variações de vazões fluviais provenientes da região continental, são de grande importância quando estamos interessados em estudar o transporte de poluentes nestes ambientes hídricos. Neste contexto, os modelos ambientais são ferramentas importantes, pois permitem simular, a partir de dados, um retrato mais próximo da realidade e assim auxiliar na tomada de decisão, visando minimizar os impactos no ecossistema marinho. Além disso, os modelos computacionais ambientais são ferramentas importantes e muito utilizadas na gestão ambiental de corpos d'água, levando em consideração empreendimentos de grande porte ou que apresentem atividades suscetíveis a poluição ambiental.

Neste contexto, este trabalho visa analisar o derrame acidental e pontual de óleo nas proximidades do Porto de Rio Grande, localizado na área da Lagoa dos Patos. As análises foram realizadas utilizando o sistema computacional ambiental SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). O SisBaHiA é um sistema

computacional profissional desenvolvido pelo COPPE/UFRJ, que auxilia nos estudos e projetos desenvolvidos em diversos corpos hídricos, aplicando diferentes modelos computacionais.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da dispersão de óleo após um derrame acidental e pontual nas proximidades no canal lagunar da Lagoa dos Patos, utilizando o sistema de modelagem ambiental SisBaHiA.

Os objetivos específicos são:

- Avaliação dos bancos de dados disponíveis no Projeto Baías do Brasil para a região;
- Levantamento dos dados necessários para as simulações;
- Implementação do Modelo de Hidrodinâmica para diferentes cenários;
- Implementação do Modelo de Transporte Lagrangeano para um derrame acidental e pontual de óleo;
- Avaliação da evolução da trajetória do óleo, considerando diferentes localizações do possível derrame;
- Indicação de possíveis áreas de maior vulnerabilidade ao derrame de óleo nas proximidades do Porto do Rio Grande.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS DERIVADOS DE PETRÓLEO.

O petróleo atualmente é uma fonte de energia não renovável muito utilizada em todo o mundo. O uso deste combustível primário não renovável teve início no século XIX. É constituído por uma mistura de hidrocarbonetos e por outros componentes em menor quantidade, são eles nitrogênio, oxigênio, enxofre, cobre, entre outros (BENTO, 2005).

Os derivados de petróleo se caracterizam pelo processo de refino do petróleo cru. É realizado um conjunto de operações industriais, o qual se obtém o fracionamento do petróleo (NANNI, 2003). Os hidrocarbonetos aromáticos, conhecido como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) são produzidos no processo de destilação, parte do processo de refinamento. São exemplos desse refino, produtos comerciais, como a gasolina, diesel e o querosene (NANNI, 2003).

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados por ligações de carbono e hidrogênio (BENTO, 2005). Apresentam característica apolares, classificados como hidrofóbicos, não apresentam afinidade com a água. Os óleos brutos, em sua composição total, são formados principalmente por hidrocarbonetos (98%). Constituídos por compostos orgânicos, sua degradação ocorre a partir da variação nos processos de transporte e em função do tempo de armazenamento (NANNI, 2003). Também apresenta em sua composição química fração de hidrocarbonetos voláteis, os quais se caracterizam pelo grau de toxicidade. São exemplos deles o benzeno, tolueno, xileno e outros hidrocarbonetos aromáticos. Vale destacar, que os hidrocarbonetos voláteis são encontrados em maior quantidade em produtos refinados quando comparado com os óleos crus (NANNI, 2003).

Conforme a Lei n.º 9.966 de abril de 2000, o qual dispõe do controle, prevenção e a fiscalização da poluição por lançamento de óleo em regiões marítimas, caracteriza o derrame de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em corpos hídricos como toda forma de hidrocarbonetos, tanto petróleo e seus derivados, o qual inclui óleo cru, óleo combustível e produtos refinados.

Os óleos, em destaque o petróleo e seus derivados, apresentam características individuais sobre, a sua composição química, entre eles os

Hidrocarbonetos Aromáticos e as demais substâncias. As espécies de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos apresentam em suas principais características o elevado peso molecular, assim é mais resistente à degradação microbiana, permanecendo por dias e até anos no ambiente (FRONZA, 2006). Na Tabela 1 é possível observar a taxa de degradação de algumas espécies de HPA's, classificadas por número de anéis que constituem as espécies.

Tabela 1 -Taxas de degradação de algumas espécies de HPAs.

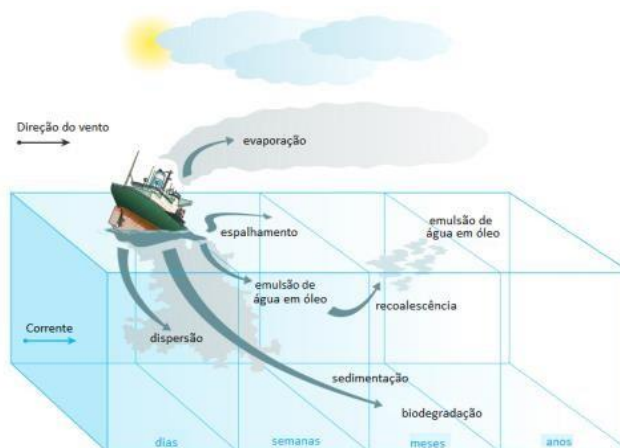
Espécies de HPA's	Números de anéis	Meia Vida (dias)
Naftaleno	2	14-320
Antraceno	3	~130
Fluoreno	3	37
Benzo(a)antraceno	4	1100
Pireno	4	238
Criseno	4	510
Benzo(a)pireno	5	>1400

Fonte: USEPA, 2003.

### 3.1.1 Comportamento do derrame de óleo em um corpo d'água

As ações combinadas dos processos físicos, químicos e biológicos, acarretam a remoção do óleo na superfície ou a persistência no ambiente marinho. A Figura 1 mostra os processos físicos, químicos e biológicos que o óleo é submetido em um corpo d'água: espalhamento, dispersão, evaporação, emulsificação, recoalescência, sedimentação e biodegradação.

Figura 1 - Processos do derrame de óleo em um corpo d'água e as escalas correspondentes.



Fonte: SOUZA et. al., 2019

Os processos de transformação começam a ocorrer imediatamente após o derrame de óleo no corpo hídrico. O intemperismo se caracteriza por uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos. As variações dos processos dependem das condições do meio em que o óleo foi inserido, propriedades químicas do óleo, condições climáticas da região e os processos relacionados a circulação hidrodinâmica. (SOUZA et. al., 2019).

O processo que ocorre no primeiro momento é o espalhamento, possível ser observado visualmente. A mudança da densidade do fluido oleoso também é observada e podem provocar mudança relacionada com a viscosidade.

Outro processo importante é a evaporação de alguns compostos, referente a volatilidade dos compostos presente no óleo, com a taxa de espalhamento e com as condições climáticas (BRASIL, 2021). Como a água e o óleo são fluidos imiscíveis, o fenômeno de emulsificação ocorre com o auxílio da turbulência, e pode promover uma mistura fisicamente, levando uma maior permanência da mancha e aumento significativo do volume (IPECA, 2015).

A dispersão é um processo natural, diretamente influenciada pelas condições do meio em que o óleo está inserido e das suas propriedades químicas (IPECA, 2015). A recoalescência das gotículas que permanecem em suspensão corre quando o meio apresenta pouca movimentação (SOUZA et. al., 2019).

A emulsificação pode ocorrer poucas horas após o derrame de óleo no corpo hídrico, ou após alguns dias, e depende da agitação do mar; ocorre principalmente quando há o derrame de óleos brutos ou produtos refinados pretos, atingindo uma maior abrangência da mancha de óleo, reduz a sua propagação e, por consequência, aumenta a densidade do poluente. Segundo o IPECA (2015), devido a presença de matéria em suspensão e da salinidade, a substância oleosa pode permanecer abaixo da superfície ou afundar (SOUZA et. al., 2019).

Os últimos processos, que podem levar meses, são a sedimentação e a biodegradação. A sedimentação ocorre depois da adsorção do óleo com o material particulado que está em suspensão, importante em regiões rasas (IPECA, 2015). A biodegradação terá sua taxa de eficácia diretamente relacionada com o teor de oxigênio dissolvido e pela presença de nutrientes no corpo d'água receptor, entre eles o fósforo e nitrogênio.

### 3.2 LEGISLAÇÃO NACIONAL

A primeira legislação nacional que dispõe sobre as proibições da poluição proveniente de navios com destinação ao mar está apresentada no Decreto Federal nº 3.334 de 05 de julho de 1899, o qual descreve no Art. 176:

"Proíbe o lançamento ao mar ou rio, de bordo de navios ou de quaisquer embarcações, lixo, cinza, varreduras do porão, etc, para o que as capitânicas, de acordo com a repartição sanitária ou com a câmara municipal, designarão em ilhas situadas a sotavento dos ventos reinantes nos portos, local adequado para o vazadouro."

Em maio de 1988 foi instituído o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e providencias, seguido da aprovação da resolução nº 1 em 21 de novembro de 1990 pelo Ministério da Marinha. O plano institui a responsabilidade dos estados da federação a elaboração de vias legais o desenvolvimento de um Sistema de Gerenciamento Costeiro, definição de áreas de atuação e o zoneamento de uso e atividades costeiras.

A Resolução CONAMA nº 06 de outubro de 1990, dispõe produção, importações, comercialização e do uso de dispersantes químicos empregados nas ações de combate aos derrames de petróleo e seus respectivos derivados, a responsabilidade de avaliação e registro prévio junto ao IBAMA.

O Decreto Federal nº 4.136 de 2002 sanciona infrações previstas na Lei 9.966/00, ou seja, dispõe sobre especificações relacionadas á infrações para as regras de prevenção, controle e fiscalização da poluição proporcionada pelo lançamento de óleo e seus derivados nocivos e perigosos em águas sob jurisdição nacional. As sanções podem variar de advertências e multas simples a suspensão parcial, restritiva ou total das atividades.

As orientações aos órgãos ambientais relacionadas ao Licenciamento Ambiental estão dispostas na Resolução CONAMA nº 237 de 19 de dezembro de 1997. São procedimentos seguidos pelo SISNAMA, isto é, apresenta procedimentos relativos ao licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades que apresentem suscetibilidade de impactar o meio ambiente. São caracterizados entre eles os empreendimentos de perfuração e produção de petróleo e gás natural, transporte de cargas perigosas, transporte por dutos, marinas e portos, terminais de petróleos e derivados, entre outros.

A resolução que orienta sobre possíveis alternativas de minimizar os impactos ambientais decorrentes da poluição de óleo foi colocada em vigor em 12 de dezembro de 2001, pela Resolução CONAMA n 269, determinada com Plano de Emergência Individual, apresentando conteúdos referentes aos incidentes de poluição por óleo proveniente em portos organizados, instalações portuárias ou terminais, dutos e plataformas.

O Decreto Federal 4.871 de novembro de 2003, determina Planos de Áreas, que auxiliam a combater a poluição por óleo. A PA dispõe alternativas de combater a poluição por óleo em águas delimitadas nacionalmente. Os Planos das áreas têm como finalidade de integrar e consolidar os PEIs das instalações portuárias, contendo áreas de manuseio de óleo e seus derivados. Visam também aperfeiçoar, facilitar e ampliar a capacidade de respostas diretas quando ocorrer incidentes de poluição por óleo, além de orientar ações necessárias para a minimização dos impactos, com o intuito de controlar a poluição ambiental.

### 3.3 HISTÓRICO DE ACIDENTES

Segundo a ITOFF - *The International Tanker Owners Pollution Federation Limited* (2021) o maior derrame de óleo no mundo ocorreu próximo da Ilha Tobago, pertencente a rede de Ilhas Caribenhas. Em 19 de julho de 1979 dois navios transportadores de petróleo, o ATLANTIC EXPRESS e o AEGEAN CAPTAIN, colidiram durante uma tempestade tropical, derramando óleo e, em seguida, pegaram fogo. Cerca de 287.000 toneladas de óleo foram derramadas.

Em 15 de novembro de 2004, o navio chileno *Vicuña* explodiu no porto de Paranaguá, localizado no Complexo Estuarino de Paranaguá, no estado do Paraná, causando graves danos ao ecossistema e às comunidades próximas (FIGUEIRA,2019). A explosão aconteceu na operação de descarga do óleo combustível. O vazamento desse combustível foi de aproximadamente duzentos e noventa mil litros. Vale ressaltar que, mesmo o metanol estando presente em maior quantidade no desastre, os óleos combustíveis e lubrificantes que estavam contidos nos motores do navio, foram os que mais impactaram ambientalmente a região.

A comunidade Amparo, que está localizada em frente ao porto, foi a localidade mais atingida. O vazamento e a explosão do navio *Vicuña* provocou contaminações severas nas regiões de manguezais e na restinga da região.

Outro importante acidente ocorrido em território brasileiro, em 18 de janeiro de 2000, foi o rompimento de um oleoduto pertencente a empresa Petrobras, que direcionava o óleo combustível para a Refinaria Duque de Caxias (REDUC) (SOUSA et.al,2013). Localizado no estado do Rio de Janeiro, as águas da Baía de Guanabara foram as mais atingidas durante as quatro horas de derrame, totalizando 1,3 milhões de litros de óleo cru que foram inseridos no meio aquático (ANTAQ, 2012). Com o espalhamento das águas através das marés e dos ventos, a mistura de água e óleo compromete o desenvolvimento da fauna e da flora, além de atingir os ecossistemas pertencentes à Baía, como o ambiente pelágico, manguezais e praias; o derrame de óleo afetou a Área de Proteção Ambiental (APA) de Guaramirim, importante parque ecológico que abrange diferentes ecossistemas (SOUSA et.al,2013). A mancha de óleo atingiu uma extensão de 40 km<sup>2</sup> e 23 praias, causando prejuízos sociais, econômicos e ambientais na região (ANTAQ, 2012).

Um evento recente de contaminação marinha por óleo ocorreu no final de agosto de 2019. Foi o derrame de óleo bruto na costa brasileira, atingindo 11 estados da região Nordeste e Sudeste, alcançando uma faixa litorânea de 4,334 km (PENA, 2020). Está sendo considerado um dos maiores acidentes brasileiros envolvendo o derrame de óleo bruto (PENA, 2020). Segundo a Marinha Brasileira, o óleo era proveniente da Venezuela, mas a origem e a embarcação responsável não foram oficialmente determinadas (NAZÁRIO, 2021). Os ecossistemas marinhos das regiões foram afetados diretamente, entre elas estão os frutos do mar, peixes, tartarugas e aves. Importante destacar que as influências dos prejuízos ambientais estão diretamente ligadas ao sistema econômico, considerando que a população local sobrevive do turismo, da pesca e da coleta de frutos do mar (SANTOS, 2019), atividades prejudicadas pela contaminação marinha.

A maior atenção das autoridades portuárias com os derramamentos de óleo e os planos de contingência ocorreram após os acidentes com os navios *Vicuña* e *Bahamas*<sup>1</sup>, e com os acidentes em tubulações em refinarias, como o que ocorreu na Baía de Guanabara (ANTAQ, 2012).

---

<sup>1</sup> Derrame de ácido sulfúrico que ocorreu em águas estuarinas do Porto de Rio Grande-RS, em 24 de agosto de 1998. Vale destacar que, segundo estudos da Fundação Universidade do Rio Grande (FURG), o ácido sulfúrico, em solução das águas estuarinas, não causou danos ao ecossistema local, não sendo considerado um desastre ambiental (ANTAQ, 2012)

Uma das medidas importantes utilizadas com o intuito de minimização dos riscos aos quais os portos e áreas costeiras estão sujeitos a enfrentarem após um derrame de óleo, é a elaboração de um plano de contingência. O plano de contingência deve apresentar medidas a serem tomadas em situações anormais que podem vir a ocorrer (ANTAQ, 2012).

Segundo a CETESB (2018), para a minimização das consequências que os vazamentos de petróleo e seus derivados acarretam no meio ambiente aquático, os planos de contingência investindo em projetos de prevenção, preparação e no desenvolvimento de uma resposta rápida, evitando assim, que áreas de maior sensibilidade sejam contaminadas. O Decreto Federal n.º 8.127 de 2013 institui o Plano Nacional de Contingência (PCN) para incidentes de poluição por óleo em águas sob Jurisdição Nacional e apresenta diretrizes de coordenação nacional de operações que combatam os incidentes de poluição proveniente do derrame de óleo em corpos hídricos, tanto continentais ou marinhos.

#### 3.4 CARTAS DE SENSIBILIDADE E MODELAGEM COMO FERRAMENTA NA GESTÃO AMBIENTAL NO DERRAME DE ÓLEO

As cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Cartas SAO) apresentam as ferramentas e as informações para o desenvolvimento dos planos de contingências, possibilitando implementar ações/respostas aos incidentes de poluição por óleo, permitindo identificar os ambientes prioritários, a sua conservação e eventuais áreas de sacrifício. Assim, dispõe sobre um direcionamento correto dos recursos e a mobilização das equipes de contenção (BRASIL, 2007).

As Cartas SAO classificam o litoral brasileiro com um índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), considerando o ecossistema costeiro em escalas de 1 a 10, onde o índice maior corresponde ao grau de maior sensibilidade. A classificação da sensibilidade das áreas litorâneas é definida a partir dos seguintes fatores: grau de exposição à energia de ondas e das marés, declividade do fundo e o tipo de substrato. As inter-relações dos processos físicos com diferentes fatores, contribuem para a classificação da sensibilidade, além dos padrões previsíveis relacionados ao óleo, entre eles o intemperismo, a relação do óleo e o ambiente marinho; padrões do transporte de sedimentos e os impactos biológicos suscetíveis (GURGEL, 2017).

Segundo ROSMAN (2021), os sistemas computacionais possibilitam uma visualização dinâmica dos processos complexos dos sistemas ambientais. Ainda, ROSMAN (2021) relata que os modelos são indispensáveis para a gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos, os quais permitem uma análise de diagnóstico, onde as medições integradas das informações são espacialmente dispersas, que apresentam estações pontuais, fazendo análise de área que não apresentam medições efetivas, através da interpolação e extrapolação das medidas, contribuindo para um conhecimento amplo da região de interesse. Além das análises de prognóstico, que preveem simulações para diferentes cenários; mapeamento das áreas de risco, com a previsão do deslocamento dos contaminantes; elaboração de estratégias de ações quando ocorrer acidentes; elaboração de planos de mitigação e capacidade de planejamento de ações emergenciais em tempo real.

### 3.5 SISTEMA COMPUTACIONAL AMBIENTAL SISBAHIA <sup>2</sup>

O sistema de modelagem aplicado neste trabalho é o SisBaHiA<sup>®</sup> - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, desenvolvido pela COPPE/UFRJ. As simulações computacionais deste estudo foram realizadas utilizando o modelo hidrodinâmico tridimensional e o modelo de transporte lagrangeano do SisBaHiA<sup>®</sup>.

O modelo hidrodinâmico utiliza o esquema de diferenças finitas implícito de segunda ordem, para a discretização temporal, e elementos finitos quadráticos, para a discretização espacial. Os campos de vento e atrito do fundo variam dinamicamente no tempo e no espaço e a modelagem de turbulência multi-escala é baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). O modelo de transporte lagrangeano utiliza o campo de velocidades previamente calculado no modelo hidrodinâmico tridimensional (ROSMAN, 2019).

Frequentemente, as manchas de óleo ou as plumas contaminantes têm dimensões horizontais de centenas de metros a poucos quilômetros. No caso de plumas é ainda mais comum que sua largura seja muito menor que seu comprimento. O Modelo de Transporte Lagrangeano é mais adequado para simular o transporte de manchas ou plumas contaminantes que sejam pequenas em relação

---

<sup>2</sup> Texto adaptado do Referencial Teórico do SisBaHia (ROSMAN, 2021)

ao domínio ou que apresentem fortes gradientes como, por exemplo, manchas de óleo oriundas de eventuais derrames.

### 3.5.1 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico tridimensional (3D) é composto por dois módulos: o módulo bidimensional (2DH), que calcula correntes promediadas na vertical e a elevação da superfície livre e o módulo tridimensional (3D), que calcula o campo de velocidades tridimensional. Em modelagens hidrodinâmicas 3D, os dois módulos funcionam acoplados e são interdependentes. O módulo 2DH pode ser executado como um módulo independente, se o modelador desejar apenas valores promediados na vertical. Entretanto, se um campo de escoamento 3D for desejado, existem duas opções disponíveis, e ambas são acopladas ao módulo 2DH: modelo 3D completo, totalmente numérico e o modelo 3D analítico-numérico.

Na simulação da circulação hidrodinâmica tridimensional, primeiramente é resolvido o módulo 2DH. Na sequência, o módulo 3D é resolvido, utilizando as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH. Os gradientes de elevação da superfície e as tensões de atrito no fundo acoplam os dois módulos, sendo que um acoplamento adicional é garantido ao se forçar que as velocidades médias na vertical sejam iguais em ambos os módulos. No caso da opção estritamente numérica, os perfis de velocidades calculados no módulo 3D são integrados na vertical e comparados com as velocidades 2DH obtidas no módulo 2DH. Caso necessário, os perfis de velocidade 3D são ajustados de modo a fazer coincidir as velocidades médias na vertical nos dois módulos.

A existência e unicidade de uma solução para as equações de águas rasas, que formam o modelo matemático hidrodinâmico de um determinado corpo de água, são rigorosamente dependentes de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno.

A imposição da elevação da superfície livre, ou níveis de água (NA), é geralmente o principal forçante prescrito ao longo dos contornos abertos  $\Gamma_1$ , ou Fronteira Aberta. Em um domínio de modelagem, contornos abertos representam limites do domínio, como por exemplo, a entrada de uma baía ou estuário, e não um contorno físico. Contornos  $\Gamma_1$  são chamados de Fronteira Aberta porque o fluxo de água calculado pelo modelo pode cruzar a fronteira aberta, respeitando a elevação

de nível de água prescrita. Os contornos terrestres,  $\Gamma_2$ , também chamados contornos fechados, representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem. Imposição de valores de vazões específicas ou de velocidades, em termos de componentes normais e tangenciais, é geralmente prescritas em cada nó ao longo de  $\Gamma_2$ . Contornos  $\Gamma_2$  são chamados de “fechados” porque só fluxos de água prescritos podem cruzar tais contornos, porém as elevações de NA são calculadas pelo modelo. Quando o escoamento 3D estiver sendo resolvido, devem ser consideradas também condições de contorno na superfície livre e no fundo. A condição de contorno no fundo é a imposição de velocidade nula. No limite superior da coluna de água, i.e., na superfície livre, a condição usual é a prescrição da tensão do vento.

A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, de sorte que a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível  $Z$  da transformação sigma. O esquema de discretização temporal é via um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem.

### 3.5.2 Modelo de Transporte Lagrangeano

O Modelo de Transporte Lagrangeano é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este modelo é especialmente adequado para simulações de vários tipos de problemas, por exemplo: plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa, derrames de óleo, instantâneos ou por período definido, mistura de massas de água, tempos de troca e renovação de massas de água entre diferentes setores de um corpo de água, determinação de tempos de residência em corpos de água naturais e determinação de correntes residuais Lagrangeanas. O Modelo Lagrangeano permite a utilização de praticamente qualquer tipo de reação cinética de decaimento ou produção do contaminante sendo modelado, inclusive através de curvas de decaimento fornecidas pelo modelador.

No modelo Lagrangeano, as fontes contaminantes são representadas por um dado número de partículas lançadas na região fonte, em intervalos de tempos regulares. As partículas, dispostas na região fonte aleatoriamente, são advectadas

pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. Esse tipo de modelo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, sem estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Portanto, pode ser eficientemente aplicado a problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes.

O transporte advectivo da nuvem de partículas já lançadas, em cada instante, é definido através da trajetória de cada partícula, calculando-se sua posição a cada tempo  $(n+1)\Delta t$ ,  $P^{n+1}$ . Para tal utiliza-se expansão em série de Taylor a partir da posição anterior  $P^n$ , no instante  $n\Delta t$ , como indicado:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + \text{T.A.O} \quad (01)$$

onde T.A.O são termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais da posição,  $P$ , são obtidas a partir do campo de velocidades calculado pelo modelo hidrodinâmico da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \vec{V}(u, v, w) \\ \frac{d^2P}{dt^2} &= \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \end{aligned} \quad (02)$$

As velocidades,  $\vec{V}(u, v, w)$ , para o transporte advectivo das partículas, seguem as velocidades das correntes do corpo receptor, que variam temporal e espacialmente. Está implícito no método que o contaminante é suposto passivo, e que, portanto, sua presença não interfere com a hidrodinâmica do ambiente receptor. Dependendo de como o contaminante de interesse se mistura no corpo de água receptor, camadas com campos de velocidade distintos são relevantes. Por exemplo, para contaminantes flutuantes, a velocidade na superfície livre, obtida com o módulo 3D é utilizada. Para contaminantes misturados na coluna de água, as velocidades médias na vertical, obtidas no módulo 2DH, são empregadas

De modo a simular o efeito da difusão turbulenta ambiente no espalhamento das partículas, introduz-se um desvio de velocidade  $\vec{V}$ , que é somado à velocidade

de advecção determinada pelo modelo hidrodinâmico, isto é, o valor do desvio é calculado através de um sorteio, cuja escala é baseada na formulação das difusividades turbulentas. Por exemplo, mantendo consistência com o modelo de turbulência apresentado, tal função poderia ser:

$$\bar{v} = \frac{\alpha}{\bar{V} \Delta t} v_{ij} \quad (03)$$

onde  $\alpha$  é uma função aleatória que varia no intervalo [-1, 1].

A fonte pode ser pontual ou em linha, e a área fonte, tendo a fonte centrada, representa o campo próximo da fonte. O modelo é válido somente para o campo afastado da região dos possíveis jatos existentes na fonte emissora.

A relação entre o número de partículas lançadas e a vazão do contaminante na unidade de tempo (concentração  $\times$  vazão da fonte) permite calcular a massa de cada partícula lançada. Dada uma vazão  $Q_e$  na fonte, com concentração  $C_e$  de um contaminante, determina-se a massa equivalente de contaminante em cada partícula lançada pela seguinte expressão:

$$M = \frac{Q_e C_e \Delta t}{N_p} \quad (04)$$

onde  $N_p/\Delta t$  é o número de partículas lançadas por intervalo de tempo.

O SisBaHiA admite que ao longo do tempo, a quantidade remanescente em cada partícula,  $m(t_v)$ , seja função de seu tempo de vida,  $t_v$ . Isto é, pode-se especificar reações cinéticas,  $R(t_v)$ , que alterem a quantidade inicial de cada partícula da seguinte forma:

$$m(t_v) = m_o R(t_v) \quad (05)$$

Qualquer outro tipo de reação cinética temporal pode ser especificado para o modelo Lagrangeano do SisBaHiA, bastando que se forneça uma tabela com valores de  $t_v \times R(t_v)$ . Por exemplo, na simulação de manchas de óleo há que se considerarem as perdas por evaporação.

Existem, basicamente, dois tipos de condições de contorno para o modelo de transporte Lagrangeano de partículas. O primeiro é ao longo dos contornos abertos, i.e., quando uma partícula atravessa um segmento de contorno, ela sai do domínio modelado e é perdida. Por esse motivo, não se deve usar o modelo Lagrangeano para regiões fonte próximas aos limites de contornos abertos, que deve estar suficientemente afastado da região fonte, de modo que, se as partículas deixarem o domínio, não causarão perdas sensíveis para o problema sendo modelado. O segundo tipo ocorre ao longo de contornos de terra.

Ao longo das fronteiras de terra, podem ser consideradas duas situações: 1- a partícula que atinge a fronteira retorna ao meio sem sofrer qualquer perda de massa; 2- a partícula retorna ao meio, mas tem uma fração de sua massa absorvida no trecho da fronteira atingido. A fração absorvida é dada pelo coeficiente de absorção ao longo das fronteiras de terra,  $c_A = [0, 1]$ , com valores entre zero e um.

Para marcar se um determinado trecho de litoral é ou não tocado pela nuvem de partículas, basta especificar  $c_A > 0$  em nós de tal trecho. Valores de  $c_A > 0$  são especialmente empregados para simulações de derrames de óleo. Exemplos de valores dos coeficientes, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de absorção ao longo das fronteiras.

Costões rochosos	$c_A$	0.05
Praias de areias finas	$c_A$	0.2
Praias de areias médias	$c_A$	0.3
Praias de areias grossas	$c_A$	0.4
Áreas vegetadas	$c_A$	0.5
Manguezais	$c_A$	0.6

Os valores acima são empíricos e objetivam exemplificar como diferenciar trechos de litoral.

### 3.5.2.1 Modelo de Decaimento do Óleo

Uma das análises importantes para avaliar a confiabilidade dos processos de interação entre o óleo, o mar e a atmosfera envolvem os modelos empíricos, considerando características específicas dos hidrocarbonetos comerciais. Os óleos

são classificados em não persistentes, que tendem a apresentar características de volatilidade mais elevadas quando inseridos no mar; porém os óleos persistentes, demandam um período maior para sua dissipação completa, geralmente são tipos de óleos que exigem ações técnicas de contenção imediatas.

Algumas das propriedades devem ser levadas em consideração quando houver o derrame de óleo no mar, são elas: a caracterização da volatilidade, variação da temperatura em que há a mudança física da substância, de líquido para gasoso; a viscosidade está relacionada com a persistência do poluente na advecção, fluidez no ambiente marinho, com relevante interferência da temperatura, radiação solar e a temperatura do ambiente marinho; por fim, a gravidade específica, considera a fluidez do contaminante, diretamente relacionada com o valor API (*American Petroleum Institute*).

Para a definição da curva de decaimento do óleo (valores de  $t_v \times R(t_v)$ ) foi utilizado o programa ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*), segunda versão, desenvolvida pela *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), que apresenta um banco de dados de diferentes tipos de óleos, estimando a quantidade de tempo que o óleo derramado permanecerá no ambiente marinho. Os calculos são combinações dos dados ambientais em tempo real inserido, como a velocidade do vento, com propriedades físicas e químicas com base ao óleo definido. Obtendo assim, resposta da melhor estimativa e calculando possíveis intervalos do valores das propriedades de derramamento estimado.

A curva de decaimento apresentada pelo programa ADIOS2 é desenvolvida a partir de alguns parâmetros: tipo do óleo, temperatura da água, temperatura do ar, velocidade do vento, velocidade média da corrente marítima da região, volume do derrame e salinidade.

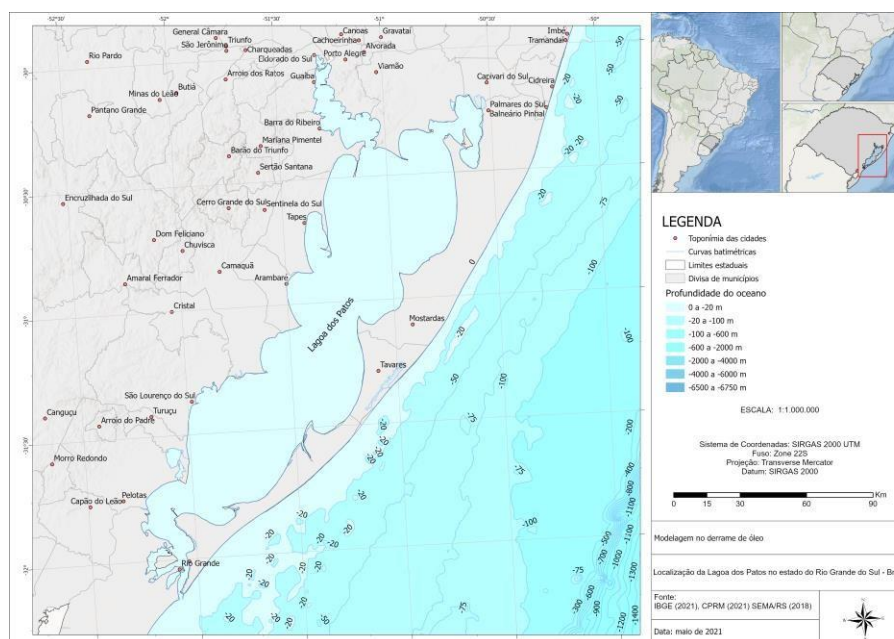
Para obter mais informações sobre o modelo e as equações pertinentes, o leitor interessado pode consultar <https://adios2.readthedocs.io/en/latest/>.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa dos Patos localizada no estado do Rio Grande do Sul, na região sul do Brasil, é a maior lagoa continental sul-americana. Abrange uma área de 10.360 km<sup>2</sup> (Möller et al., 1996). É um corpo d'água litorâneo, apresentando características lagunar, conectada ao Oceano Atlântico por um estreito canal. O rio Guaíba, Camaquã e o Canal de São Gonçalo s principais rios que drenam para a Lagoa dos Patos. A Figura 2 mostra a localização da Lagoa dos Patos.

Figura 2 - Localização da área de estudo.



O sistema hidroviário do estado do Rio Grande do Sul apresenta importantes redes hidroviárias, aplicadas para a movimentação de navios de diferentes cargas, desenvolvendo a rota de mercadorias nacionais e internacionais (PLANO MESTRE, 2020). As rotas navegáveis são desenvolvidas entre a Lagoa dos Patos e o Lago Guaíba que interliga outros importantes rios, onde estão localizados terminais comerciais no interior do estado.

A Lagoa dos Patos é o meio hidroviário que liga o Porto de Rio Grande, localizado próxima à embocadura da Lagoa, com o Porto de Pelotas, a oeste e Porto de Porto Alegre, localizado ao norte. A instalação de portos nessa

região é estratégica, pela proximidade com os países pertencentes ao MERCOSUL. As necessidades de transporte de grãos, combustíveis, fertilizantes, minério, produtos químicos entre outros, aumenta a importância da exportação e importação desses produtos a partir do Porto de Rio Grande (PLANO MESTRE, 2020).

A área lagunar da Lagoa dos Patos apresenta em determinados trechos uma batimetria natural, já em outros pontos é necessária uma dragagem periódica. Essa profundidade pode variar de 6,5 a 7,0 metros (PLANO MESTRE, 2020). A bacia de drenagem da Lagoa dos Patos é cerca de 200 mil km<sup>2</sup>.

Considerando a quantidade de água trocada com a região costeira adjacente e o amortecimento da onda de maré na embocadura e nos canais de ligação entre as lagoas e a região adjacente, é possível classificar as lagoas ou lagoas costeiras. Seguindo esta classificação, a Lagoa dos Patos forma um sistema de lagoas sufocadas, conectadas com o oceano Atlântico por um único canal, que funciona como um filtro, que amortece a onda de maré, fazendo com que a amplitude da maré na lagoa seja reduzida. Neste tipo de lagoa caracteriza por elevado tempo de residência; os principais forçantes da circulação hidrodinâmica são o vento e o aporte fluvial, com pouca contribuição da maré (OLIVEIRA E KJERFVE, 1993)

Na Lagoa dos Patos, os ventos ocorrem predominantemente nas direções Nordeste (NE) e Sudoeste (SW) com velocidades que variam entre 3,0 e 5,0 m/s; os ventos predominantes de outono e inverno são os de Nordeste e os ventos predominantes no verão e na primavera são os de Sudoeste (MARQUES et al., 2006). Os níveis d'água podem variar em até 1,0 m nas áreas costeiras da laguna, quando ocorrer situações de ventos fortes. Quando não apresenta ventos de grande intensidade, as oscilações do sistema da laguna serão decorrentes das oscilações de maré. (PLANO MESTRE, 2020).

#### 4.1.1 Área portuária de Rio Grande

O Porto de Rio Grande, está localizado no Complexo Lagunar do Rio Grande e Pelotas, à margem direita do Canal do Norte. Situado entre os municípios de Rio Grande e São José do Norte, na embocadura da Lagoa dos Patos com o oceano Atlântico.

A infraestrutura do Porto de Rio Grande é dividida em quatro áreas: o Porto Velho, o qual não apresenta operações atualmente; Porto Novo, onde estão instalados os Cais Públicos; o Superporto, uma área destinada aos terminais especializados, arrendamentos e terminais de uso privado, utilizado para a movimentação de cargas de trigo, soja, arroz, contêineres, petróleo e seus derivados e por produtos químicos; e por fim a área de São José do Norte, destinada para a expansão portuária (PLANO MESTRE, 2020). A Figura 3 apresenta as regiões portuárias de interesse do Porto de Rio Grande.

Figura 3 - Região portuária do Porto do Rio Grande.



Fonte: Plano Mestre (2020)

O principal canal de acesso ao Porto de Rio Grande, do ponto de embarque prático ( $32^{\circ}4'46.73''S$ ;  $52^{\circ}5'15.2''W$ ) até o final do Superporto, apresenta uma extensão de 24,8 km e uma largura que varia entre 200 a 300 metros (PLANO MESTRE, 2020).

As áreas arrendadas na infraestrutura de acostagem do Superporto do Porto de Rio Grande abrigam quatro principais terminais, entre eles o da Petrobras Transportes S.A, conhecida como Transpetro, com um píer de 318 metros de comprimento em Berço Sul, Norte e Barcaça. A operação do píer está destinada às mercadorias de petróleo, derivados de petróleo, produtos químicos e GLP, GNL e outro gases. A partir do píer da Transpetro é transportado pelos oleodutos o óleo bruto até a Refinaria de Petróleo Riograndense (PLANO MESTRE, 2020). Segundo a Lei n.º 7.877 de 1983, o transporte de cargas perigosas ou altamente poluidoras, somente poderá ser transportado no canal do Porto em período diurno e com condições atmosféricas favoráveis.

Determinado pela Resolução Conama n.º 428 de 2010, as Unidades de Conservação Ambiental (UCs) devem estar situadas a um raio mínimo de 3,0 km do complexo portuário. Com base nisso, a área de Proteção Ambiental (APA) localizada aos redores do porto do Rio Grande é chamada de APA da Lagoa Verde, caracterizada pelo bioma Pampa, constituído por banhados de água doce, dunas e habitat de importantes espécies (PLANO MESTRE, 2020).

Com base no que foi apresentado, este trabalho utilizará o sistema computacional SisBaHia. As simulações computacionais serão feitas usando o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte Lagrangeano, para um derrame de óleo na área da Lagoa dos Patos, nas proximidades Porto de Rio Grande.

Nas próximas seções são apresentados os dados de vento, maré, vazão, temperatura e salinidade da Lagoa dos Patos, no trecho próximo do Porto de Rio Grande, são utilizados na modelagem. As simulações da circulação, e do transporte da pluma serão feitas usando como base o ano de 2020.

#### 4.2 CENÁRIOS DE MODELAGEM

Neste trabalho foram realizadas duas simulações da circulação hidrodinâmica: a primeira para o mês de janeiro de 2020, com valores médios de vazão fluvial dos rios que drenam para a Lagoa, de vento e a curva de maré para o período, e a segunda, para o mês de julho de 2020, usando dados de vazão fluvial, vento e curva de maré para o segundo período. As simulações caracterizam as estações de verão e inverno, respectivamente. Nas duas simulações foram usados o mesmo domínio, malha, batimetria e rugosidade. Nas simulações tridimensionais foram usados 20 níveis, para compreender melhor a dinâmica da Lagoa, além de avaliar, a partir dos resultados obtidos pelo modelo 3D, a velocidade média e a velocidade um nível abaixo da superfície.

Para as simulações derrame de óleo no canal lagunar, foi utilizado o óleo brasileiro da localidade Salvador-BA, classificado como tipo de óleo cru, seguindo as especificações do programa ADIOS2. A definição do volume derramado foi seguindo as especificações do cenário mais extremo, da Resolução CONAMA n.º 398 (BRASIL, 2008; UMEZU, 2019). Foi considerado um ambiente hipotético proposto através do naufrágio de uma embarcação graneleira no canal de navegação, considerando o volume total de 800 m<sup>3</sup> liberado, ao ambiente marinho, pela embarcação.

Nas proximidades do Porto de Rio Grande a embarcação mais utilizada é o graneleiro Panamax, que é a referência para as dimensões da fonte e do volume aplicado nas simulações. Suas dimensões são: comprimento de 294 metros e largura de 32,3 metros. Foi determinado que as simulações ocorressem em uma fonte pontual, em um intervalo 72 horas.

O comportamento do óleo em um ambiente lagunar foi avaliado em duas simulações: a primeira o óleo é considerado conservativo, ou seja, não há perda de massa ao longo do tempo segunda simulação considera as perdas de massa do óleo, definida a partir da curva de decaimento acoplada ao modelo de transporte, obtidas pelo programa ADIOS2.

O ponto hipotético que ocorreu as simulações de derrame de óleo foi definido no canal de navegação. O ponto definido na fonte, é denominado de 'Meio\_canal', e está apresentado na Figura 8. Na avaliação, a embarcação se encontrava em manobra no canal, para posteriormente atracar ao porto. Na determinação desse local, foi levado em consideração possível e reais acidentes que podem ocorrer, auxiliando na elaboração dos planos de contingência, principalmente por apresentar uma intensa movimentação de embarcações. Na seção seguinte são apresentados os resultados e discussões pertinentes para a compressão e análise dos cenários modelados.

#### 4.3 SISTEMA DE MODELAGEM APLICADO

As simulações computacionais foram feitas usando o modelo hidrodinâmico e o Modelo de Transporte Lagrangeano, para um derrame de óleo na área da Lagoa dos Patos, nas proximidades ao Porto de Rio Grande.

Sabe-se que o derrame de óleo em um corpo d'água influencia no desenvolvimento natural do ambiente. Uma das alternativas mais importantes para tentar conter o avanço da poluição e recuperação do derrame de óleo, são as simulações da trajetória e a determinação das áreas que conseqüentemente podem ser atingidas (SOTTO, 2004).

O mapeamento das áreas oceânicas suscetíveis aos impactos da poluição é um instrumento importante e relevante para o planejamento das ações que devem ocorrer imediatamente após o derramamento de óleo (CETESB,2018). É possível identificar as áreas de maior sensibilidade ambiental associando as áreas de maior

vulnerabilidade dos ecossistemas marinhos e costeiros, a partir da modelagem computacional.

As simulações que utilizam dados medidos podem apresentar uma boa resposta das áreas em análises, auxiliando na obtenção de diagnósticos e prognósticos de áreas simuladas a partir de diferentes cenários, sendo possível determinar as áreas de maior vulnerabilidade aos impactos ambientais. Os corpos d'água apresentam dinâmicas complexas, assim, a modelagem computacional é uma ferramenta importante na gestão desses recursos hídricos.

#### 4.3.1.1 Modelo de Decaimento do Óleo

As curvas obtidas pelo ADIOS2 são internacionalmente aceitas, e apresenta um modelo de decaimento da massa de óleo, considerando a sua complexidade. O óleo escolhido foi baseado nas características do combustível brasileiro contido na plataforma (GURGEL, 2017). Foi avaliado um lançamento de uma fonte de óleo com as seguintes características definidas: temperatura da água a 25 °C, salinidade de 32 ppt, concentração de sedimentos em suspensão de 5 g/m<sup>3</sup>, sem advecção (correntenula) e vento permanente, com 5 m/s e direção Nordeste. As características do óleo obtidas pela biblioteca do programa ADIOS2: densidade de 0,849 g/cc, viscosidade cinemática de 34,4 mm<sup>2</sup>/s ou centiStokes, ambos para a temperatura de 25 °C. e °API igual a 35,2.

A porcentagem do produto dispersante e a quantidade remanescente do total de 5028 bbl de hidrocarboneto são representados na pela faixa verde e cinza, respectivamente. A faixa em azul mostra a quantidade evaporada do óleo. Todas as telas do programa com as características do óleo e as curvas de decaimento de massa do óleo estão dispostas em anexo.

O óleo escolhido apresentou uma perda de 15% do volume por evaporação, além de uma pequena redução na dispersão natural, menor que 5% (Figura 4). Com os dados obtidos pelo ADIOS2, é possível definir a curva de decaimento que é usada pelo SisBaHiA® (Figura 4).



#### 4.4 DOMÍNIO DA ÁREA EM ESTUDO<sup>3</sup>

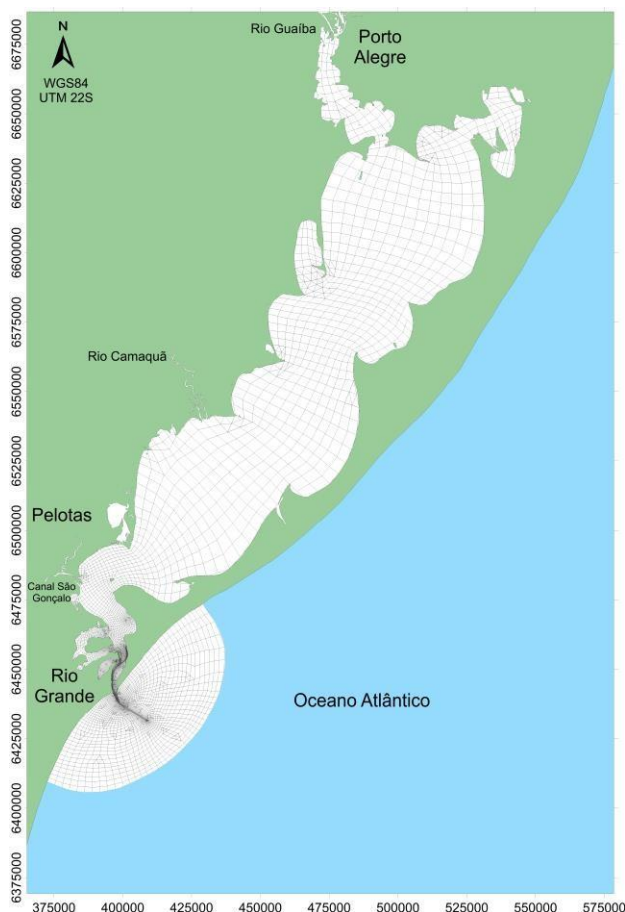
A definição do domínio de interesse, a batimetria, a malha e a rugosidade equivalentes, foram obtidas do Projeto Baías do Brasil (2019). Este projeto é uma plataforma que disponibilizam dados e mapas de alguns corpos hídricos brasileiros, com a finalidade de auxiliarem no desenvolvimento de trabalhos de modelagem, podendo obter uma análise hidrodinâmica da região. Na Figura 7 é identificado o domínio de modelagem e a malha da região da Lagoa dos Patos.

Ao todo o domínio de modelagem apresenta 8149 nós, destes 1160 no contorno de terra e 41 contornos abertos. Além disso, são 1982 elementos ao todo, 1799 quadrangulares e 183 triangulares dispostos pela malha.

---

<sup>3</sup> As referências completas estão no “**Relatório Lagoa dos Patos – RS**”, disponibilizado no sítio eletrônico: <http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/>. Acesso em: 02 Jul. 2021

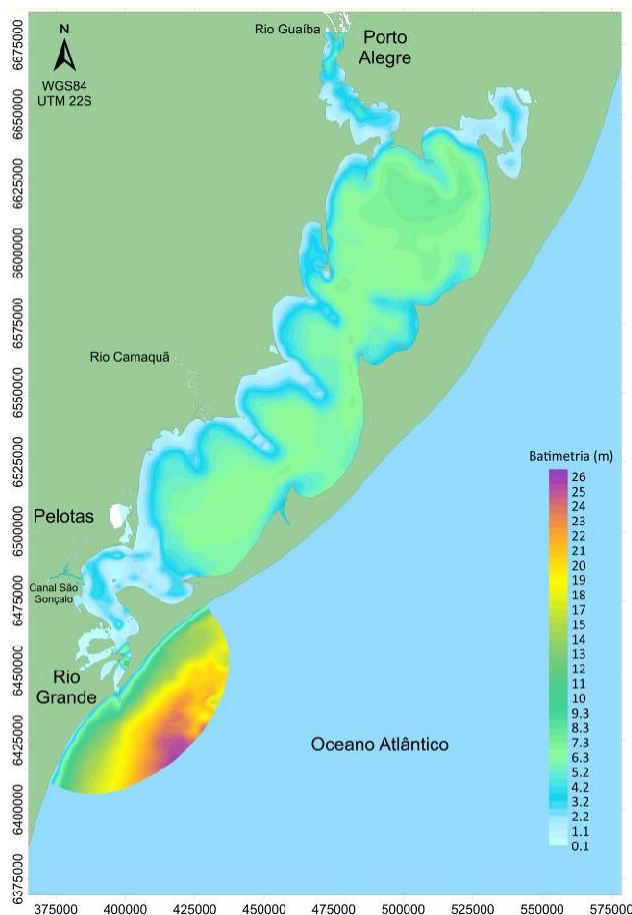
Figura 7 - Malha e domínio de modelagem da região da Lagoa dos Patos.



Os resultados obtidos da batimetria para a região da Lagoa dos Patos, foram interpolados através do SisBaHiA®, utilizando o método Kriging, a batimetria é apresentada na Figura 8. A região da embocadura da Lagoa dos Patos apresenta um canal dragado que possibilita a locomoção dos navios do Oceano Atlântico ao interior da Lagoa. A profundidade média na Lagoa é de 6,940m. Devido à baixa profundidade na região do canal de Rio Grande, o calado dos navios não deve ultrapassar 5,6 m (LACERDA, 2006).

Os dados de batimetria foram extraídos das cartas náuticas da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), levantamento da Hidrotopo, Levantamento da Internave, Levantamento da PJ Serviços Hidrográficos e das Cotas do Projeto geométrico do INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias).

Figura 8 - Batimetria da Lagoa dos Patos.



Os sedimentos na Lagoa dos Patos, nas áreas mais distantes dos canais de navegação, foram caracterizados como predominantemente siltoso, com frações de areias e argila. Já para a região portuária, utilizaram-se dados de levantamentos de sondagens feitas nos canais de navegação para os projetos de dragagem dos canais de acesso e bacias de evolução do Porto Novo e Porto de São José do Norte em 2007 e 2008. Também foram utilizadas medições feitas no canal de acesso ao Porto de Rio Grande de 29 a 30/06/2006, na região ao largo do canal de navegação e da praia do DNIT (2007). Foi considerada a predominância de sites e finos (0,0001m). Os valores da amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo que foram utilizados no modelo hidrodinâmico correspondem ao tipo de material de fundo da lagoa, seguindo os valores dispostos na Tabela 3.

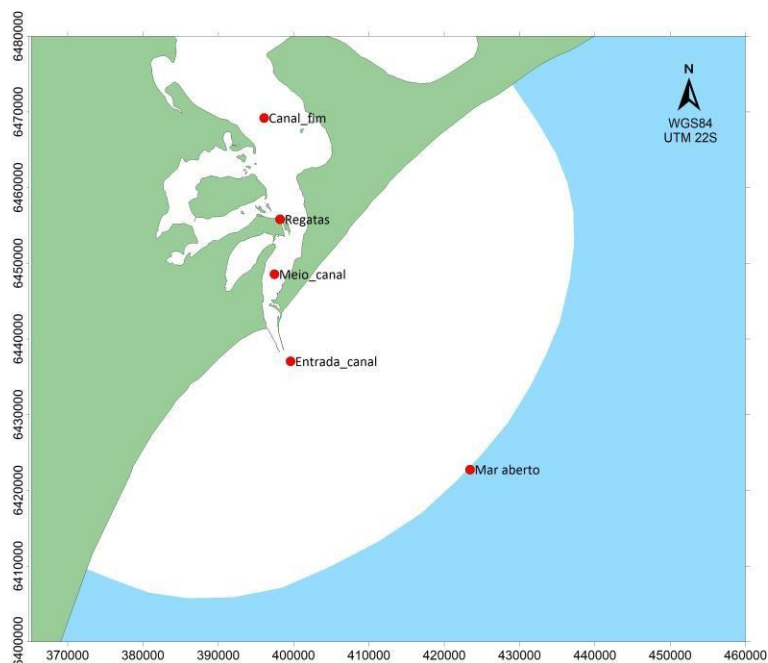
Tabela 3 - Valores da amplitude efetiva da rugosidade equivalente do fundo correspondente ao tipo de sedimento.

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	0.0001 m < $\epsilon$ < 0.0100 m
Predominância de areias finas	0.0070 m < $\epsilon$ < 0.0150 m
Predominância de areias médias	0.0100 m < $\epsilon$ < 0.0300 m
Predominância de areias grossas	0.0250 m < $\epsilon$ < 0.0500 m
Predominância de areias muito grossas	0.0400 m < $\epsilon$ < 0.0800 m
Predominância de areias com cascalho	0.0500 m < $\epsilon$ < 0.1200 m
Sedimentos com vegetação	0.0500 m < $\epsilon$ < 0.1500 m
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	0.1500 m < $\epsilon$ < 0.4000 m

Fonte: ROSMAN, 2019

Para os resultados temporais foram determinadas cinco estações que são apresentadas na Figura 9. São localizadas na região costeira adjacente, na entrada, meio, final do canal, e nas proximidades da cidade de Rio Grande, nomeada de Regata. A determinação dessa estação na região costeira da Lagoa é caracterizada pela presença de uma estação de monitoramento fluviométrico, além de compreende o município costeiro na região.

Figura 9 - Localização das estações ao longo do canal da Lagoa do Patos

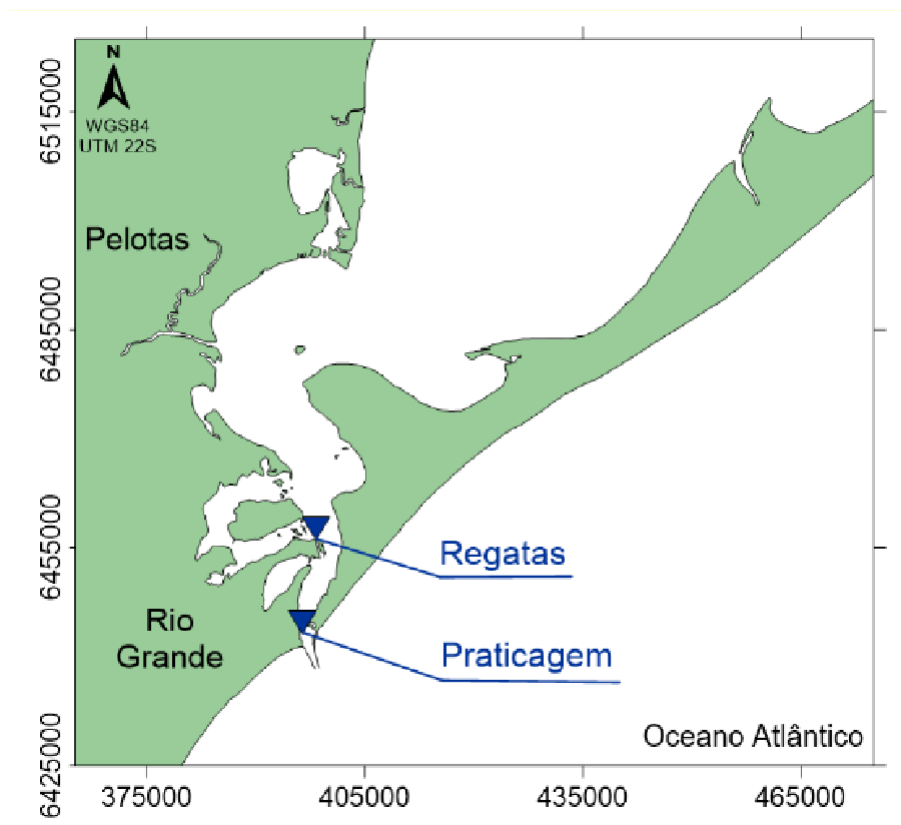


#### 4.5 DADOS DE MARÉ

A fronteira aberta é formada por 41 nós, onde a posição da superfície livre é prescrita, impondo a curva de maré astronômica, obtida a partir das constantes harmônicas disponíveis na estação maregráfica Praticagem. Na Figura 10 é apresentada a localização das duas estações utilizadas como base para a entrada dos dados de maré.

A curva de maré astronômica foi obtida a partir de constantes harmônicas definidas para a estação maregráfica Praticagem ( $32^{\circ}08'11,71\text{S}$  e  $52^{\circ}06'12,19\text{W}$ , Figura 10), com nível médio ( $z_0$ ) de 0,17 m e mostradas na Tabela 4.

Figura 10 - Localização das estações maregráfica.



Fonte: Projeto Baías do Brasil, 2019

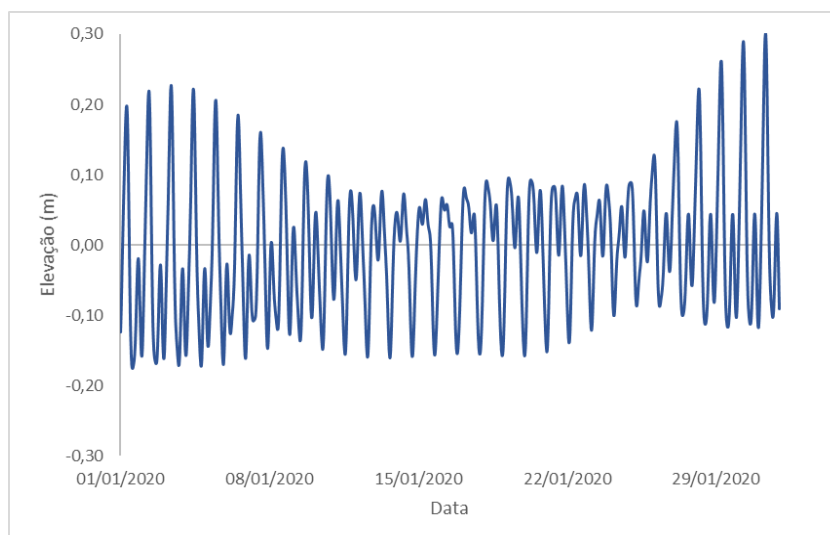
Tabela 4 - Constantes harmônicas.

Constante	Amplitude (cm)	Fase (grau)
Sa	9,15	88,0
O1	8,11	63,78
N2	7,25	183,57
Ssa	3,95	180,0
S2	2,57	28,57
K1	2,52	129,78
M2	1,81	220,57
Q1	1,59	22,78
M4	1,29	94,17
K2	0,99	21,57
P1	0,93	125,78
MN4	0,82	58,17
M3	0,73	150,89
2N2	0,64	135,57
L2	0,59	274,57
Nu2	0,53	198,57
M1	0,44	91,78
MS4	0,37	170,17
MK3	0,36	323,89
Mu2	0,29	120,57
MO3	0,16	305,89

Fonte: Baías do Brasil, 2019

A Figura 11 mostra a curva de maré astronômica entre 01/01/2020 e 31/12/2020. A Lagoa dos Patos apresenta um regime de marés semi-diurno, com uma amplitude máxima de 0,3 metros.

Figura 11 - Curva da maré astronômica.



É possível usar os valores de elevação de nível médio extraídos do HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), que trazem em si os efeitos de marés

meteorológicas para compor com maré astronômica obtida a partir das constantes harmônicas que produzirão séries sintéticas similares a registros medidos. O HYCOM representa um consórcio multi-institucional patrocinado pelo *National Ocean Partnership Program* (NOPP) como parte do U.S. GODAE – *Global Ocean Data Assimilation Experiment*, que trabalha para o desenvolvimento e avaliação do próprio modelo oceânico HYCOM e seu sistema de assimilação de dados denominado NCODA – *Navy Coupled Ocean Data Assimilation*. Foram utilizados dados da elevação da superfície, obtidos no ponto 2 do HYCOM (localização pode ser observada na Figura 17), somados a maré astronômica, obtida com base nas constantes harmônicas apresentadas na Tabela 4. A Figura 12 e 13 mostram as elevações da superfície livre usada como condição de contorno para o mês de janeiro e julho de 2020, respectivamente.

Figura 12 - Elevação da superfície livre usada como condição de contorno para o mês de janeiro de 2020

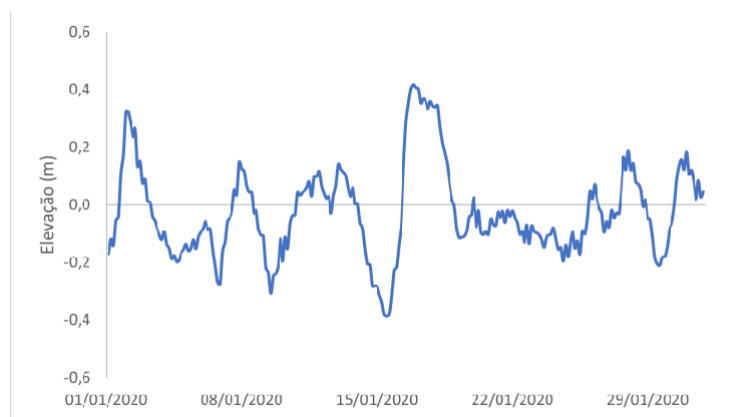
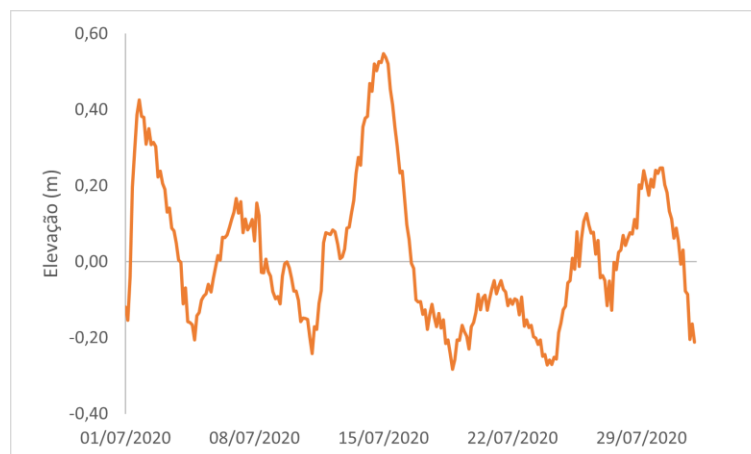


Figura 13 - Elevação da superfície livre usada como condição de contorno para o mês de julho de 2020

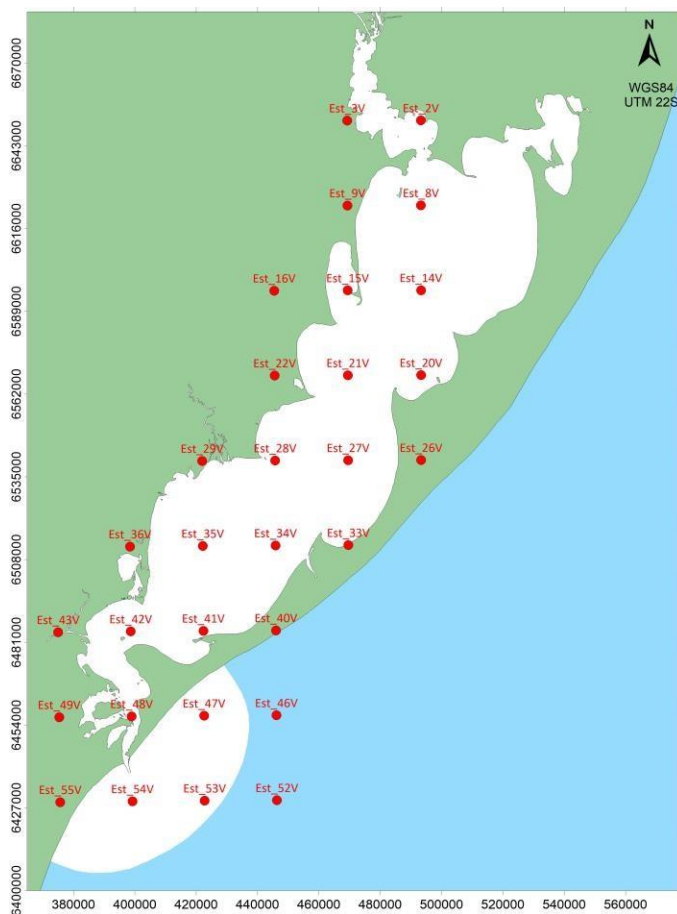


#### 4.6 DADOS DE VENTO

O vento tem um papel importante na circulação hidrodinâmica e na mistura na Lagoa dos Patos, principalmente na estação seca, quando o aporte fluvial é menor. A plataforma utilizada para a extração dos dados de vento foi a *Copernicus Climate Change Service (C3S)*. A C3S é uma plataforma de observações do sistema climático, isto é, são obtidos resultados através do sistema de observações in-situ e por satélites, em conjunto com recursos de modelagem, desenvolvendo informações confiáveis e de qualidade de diferentes períodos e localidades.

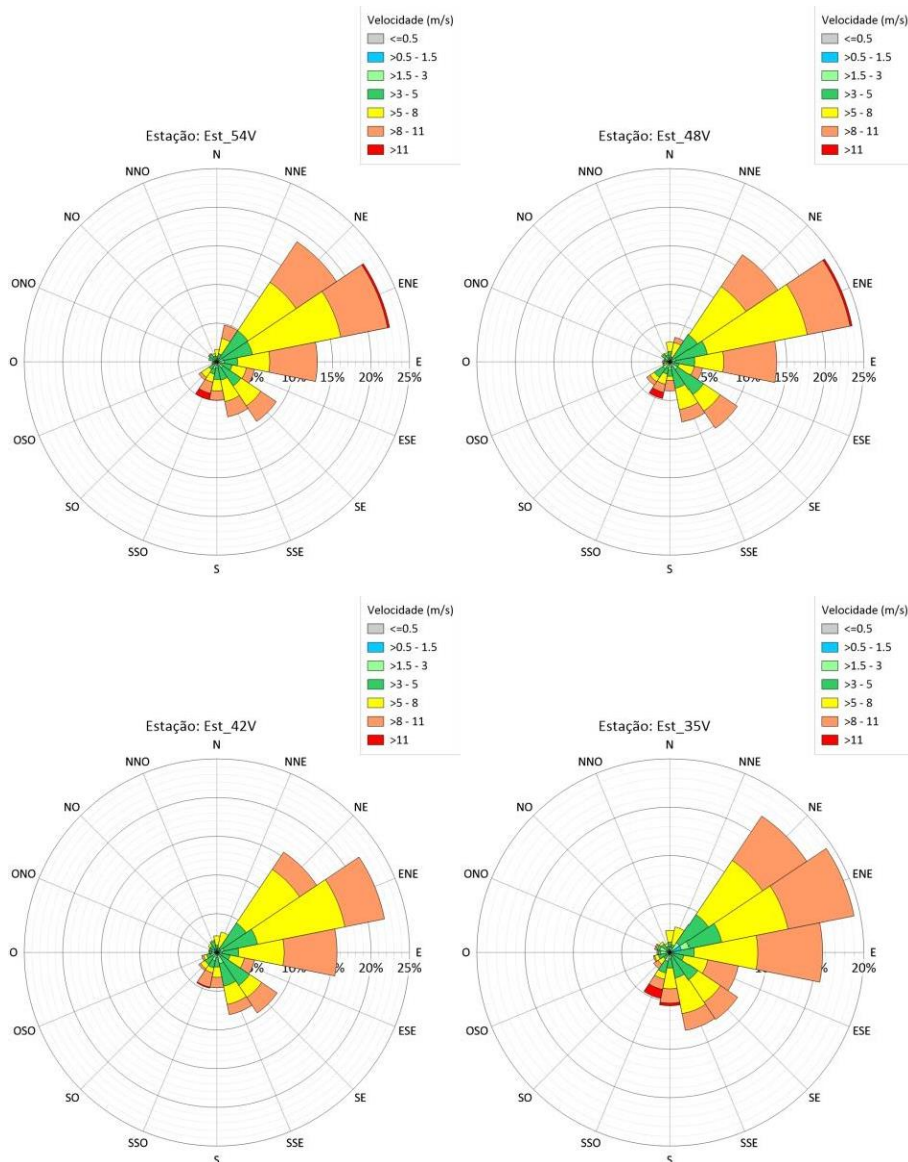
Foram determinadas 30 estações na região da Lagoa dos Patos, com dados obtidos a cada hora. As estações para a extração dos valores de ventos estão localizadas no limite do domínio da Lagoa e em regiões próximas. As estações de vento usadas no modelo hidrodinâmico e sua localização ao longo da Lagoa dos Patos são apresentadas na Figura 14.

Figura 14 - Localização das estações de vento na região das Lagoa dos Patos.



Foram escolhidas as estações 54, 48 42 e 35 para avaliar o comportamento do vento na região do canal da Lagoa dos Patos, tanto para os meses de janeiro e julho. A Figura 15 apresenta as rosas dos ventos destas estações para o mês de janeiro e a Figura 16 para o mês de julho.

Figura 15 - Rosa dos ventos das estações 54, 48, 42 e 35 para o mês de janeiro.

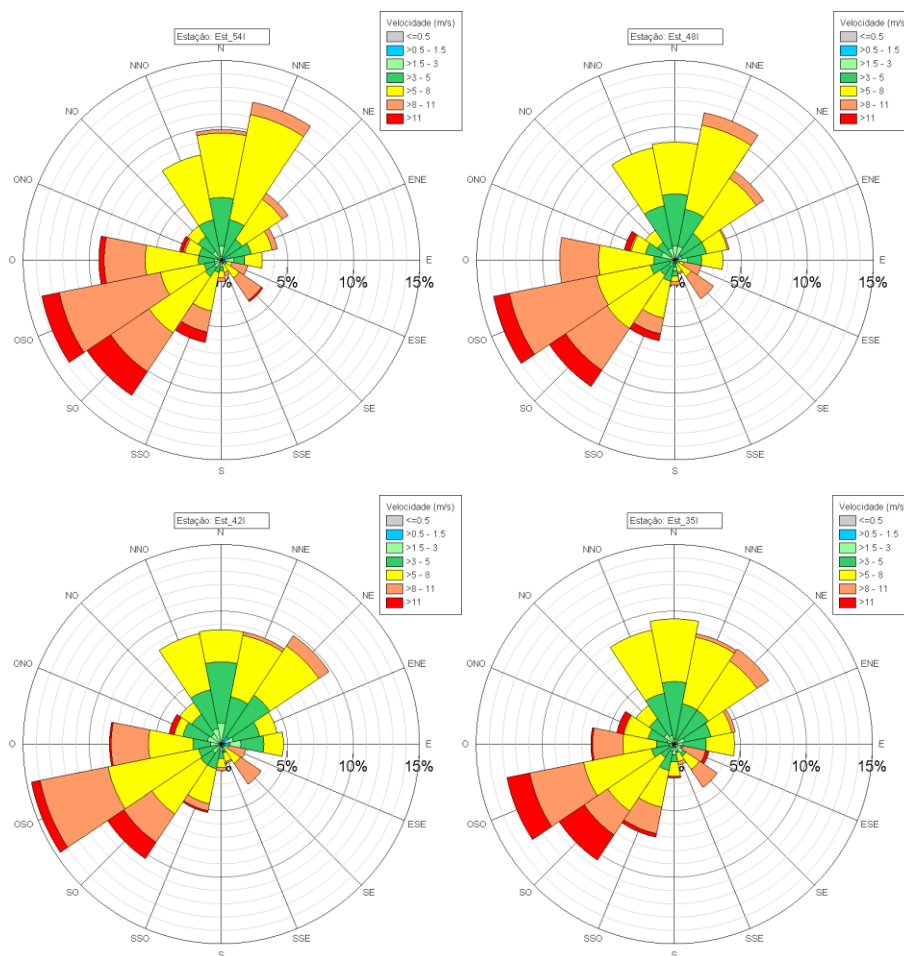


A predominância dos ventos no mês de janeiro, na região do canal da Lagoa dos Patos é nas direções NE (Nordeste) e ENE (Leste-nordeste), com velocidades variando entre 3,0 e 11,0 m/s. As estações 54 e 48 apresentam velocidades superiores a 11,0 m/s. Nas demais estações (42 e 35), as velocidades predominantes variam entre 8,0 e 11,0 m/s.

No mês de julho, a predominância dos ventos é nas direções OSO (Oeste-Sudoeste), SO (Sudoeste) e NNE (Norte-Nordeste), com velocidades maiores, com valores superiores a 11,0 m/s. Entre as estações observadas, tanto para o mês de janeiro quanto par o mês de julho, não apresentam variações significativas, o que

compreendem uma uniformidade da intensidade dos ventos ao longo da Lagoa e no canal lagunar. Nas simulações realizadas, o vento é considerado não-permanente e variado.

Figura 16 - Rosas dos ventos das estações 54, 48, 42 e 35 para o mês de julho.

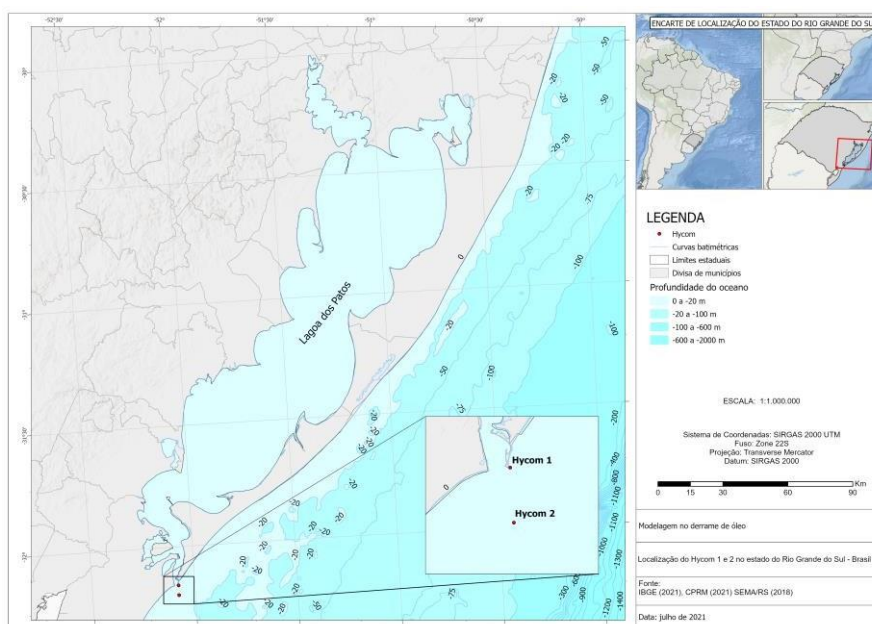


#### 4.7 DADOS DE TEMPERATURA E SALINIDADE

Os valores de salinidade e temperatura na região da Lagoa dos Patos, que foram usados para definir as curvas de decaimento do óleo, foram obtidos a partir do modelo oceanográfico HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*). O consócio HYCOM é constituído por algumas instituições patrocinadas pela *National Ocean Partnership Program* (NOPP). Um dos objetivos do modelo HYCOM é prover condições de contorno para modelos costeiros e regionais, além de disponibilizar

dados oceanográficos globais (Wallcraft et al., 2009). O SisBAHIA® possui uma ferramenta que extrai dados do modelo HYCOM. Assim, foram obtidos os valores médios da temperatura e salinidade nos períodos de janeiro e julho de 2020, para dois pontos na região da entrada da embocadura da Lagoa dos Patos; a localização dos pontos pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Localização dos pontos para a extração dos dados de nível médio do mar, temperatura e salinidade.



O modelo HYCOM disponibiliza dados em diferentes posições da coluna d'água, tomando como referência a superfície. Com isto, foram obtidos dados na superfície, 2 metros e a 4 metros da superfície. As variações dos valores de salinidade e temperatura, nas 3 posições analisadas, apresentaram pequenas variações, para todo o período. Nas Figura 18 e Figura 21 são apresentados valores de temperatura e salinidade para o ano de 2020, referente aos dois pontos apresentados na Figura 17.

É observado que a temperatura da água, nos meses de junho, julho e agosto, apresenta valores menores que 15°C. A menor temperatura registrada nos pontos 1 e 2, no dia 17 de julho, foi 11,12°C e 11,23°C, respectivamente. E a maior temperatura foi registrada em 8 de fevereiro, 25,97°C, para os dois pontos. A salinidade apresentou uma queda nos meses de setembro e outubro, mas com

valores sempre superiores a 30 ‰. A variação da temperatura e a salinidade entre os pontos 1 e 2 não apresentam mudanças significativas.

Figura 18 - Valores de temperatura (°C) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 1.

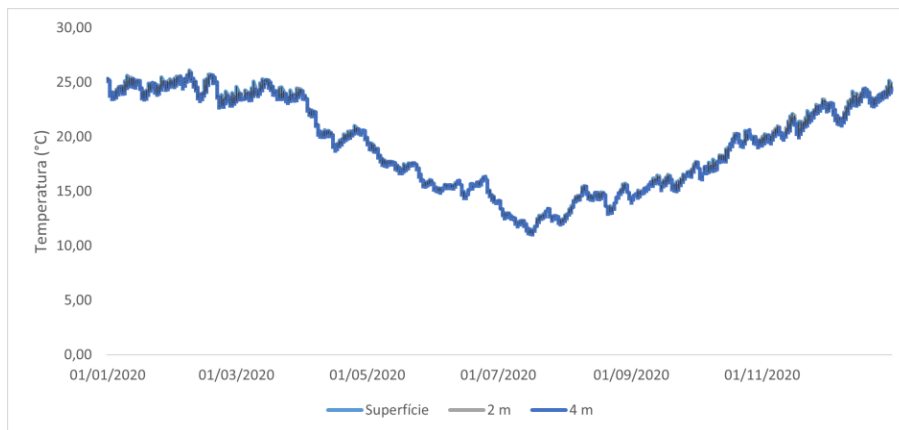


Figura 19 - Valores de salinidade (‰) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 1.

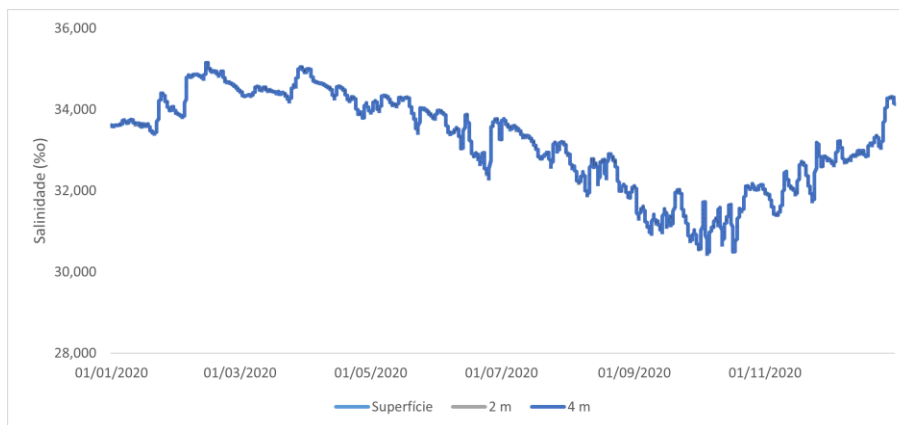


Figura 20 - Valores de temperatura (°C) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 2.

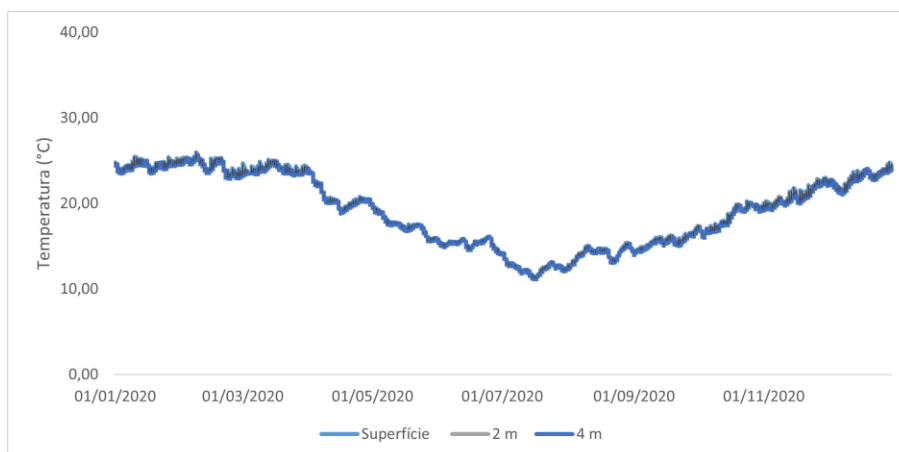
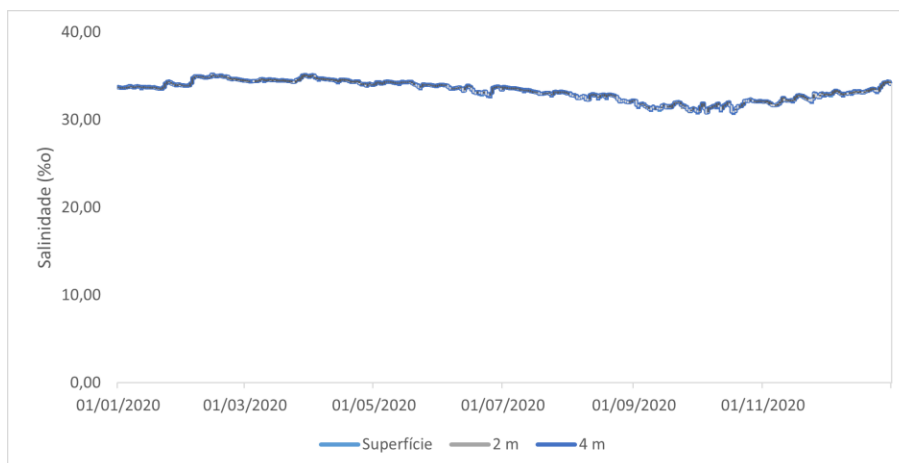


Figura 21 - Valores de salinidade (‰) obtidos a partir do modelo HYCOM no Ponto 2.



#### 4.8 DADOS DE VAZÃO

O aporte fluvial é um fator importante para a caracterização da dinâmica do sistema em estudo. A Lagoa dos Patos está localizada na região Sul do Brasil, que apresenta um clima temperado do tipo subtropical, classificado como mesotérmico úmido segundo o Sistema de Classificação Climática de Köppen (KÖPPEN e GEIGER, 1928), com duas estações bem definidas, seca e chuvosa. Os rios Guaíba, Camaquã e o Canal de São Gonçalo são as principais fontes de água doce da Lagoa. A localização dos rios está disposta na Figura 7.

Os dados de vazão dos rios foram obtidos pela plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA,2021), para o intervalo temporal de janeiro a

dezembro de 2020. Para o rio Guaíba, a vazão usada corresponde ao somatório das vazões de 5 estações fluviométricas, que formam o rio Guaíba, sendo apresentadas na Tabela 5. Assim, foi possível obter a sua vazão total.

Tabela 5 - Estações Fluviométricas que compõe o rio Guaíba.

Rio	Nome da estação	Código da estação
Jacuí	Muçum	85900000
Taquari	Pardo	86510000
Jacuí (Pardinho)	Santa Cruz	85830000
Caí	Nova Palmira	87160000
Sinos	São Leopoldo	87382000

A vazão do Rio Camaquã, outro importante afluente da Lagoa dos Patos, foi obtida usando os dados da estação Passo do Mendonça, código 87905000, coordenadas 28°50'00"S e 53°00'00" W, do Hidroweb (ANA, 2021). Para o canal de São Gonçalo foi usada uma vazão permanente, correspondente a média anual de 700 m<sup>3</sup>/s (Santos et. al., 2019).

As vazões dos aportes fluviais significativos para a formação da Lagoa dos Patos foram obtidas valores diários referentes aos meses de janeiro e julho, correspondente aos meses de seca e chuva, respectivamente. As vazões usadas nas simulações são mostradas na Figuras 22 e 23. Os dados de vazão obtidos para o ano de 2020 indicam que os meses de novembro a maio como a estação seca, e junho a outubro, como a estação chuvosa.

Figura 22 - Valores das vazões diárias correspondente ao mês de janeiro/2020.

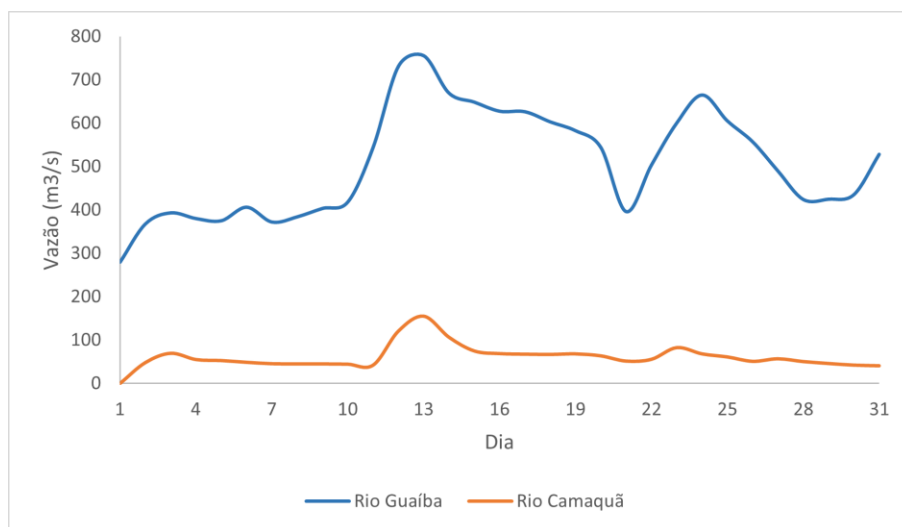
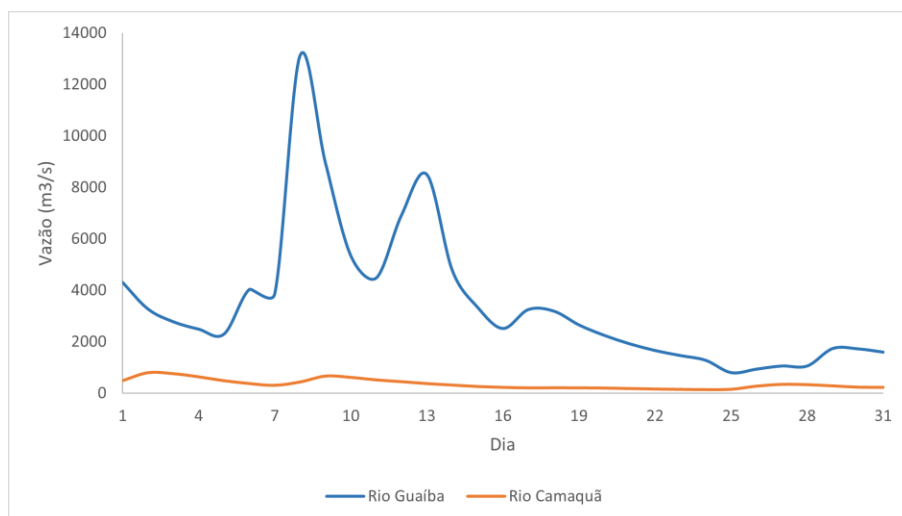


Figura 23 - Valores da vazão diária correspondente ao mês de julho/2020.



#### 4.9 PARÂMETROS DO MODELO

Para a simulação da circulação hidrodinâmica e do transporte de óleo, um conjunto de parâmetros foi definido, dentro da faixa de variação definida em Rosman (2021), garantindo assim o significado físico dos parâmetros. Foi definido o passo de tempo (100 segundos) e os termos definidos para as tensões

turbulentas.

Os parâmetros relacionados na simulação numérica do transporte advectivo e difusivo do modelo de transporte de sal e temperatura foram acoplados ao programa. O coeficiente de difusão turbulenta representa a mistura devido à turbulência gerada principalmente pelo atrito no fundo, podendo ser decomposto segundo as direções longitudinais e transversais. Fischer (1979) parametrizou o coeficiente de difusão como função das escalas da dispersão longitudinal e transversal, usadas para facilitar a calibração, e da velocidade de atrito característica. Somada a este modelo é possível considerar valores constantes, fornecidos pelo modelador.

O modelo de transporte Lagrangeano foi utilizado para analisar o derrame de óleo a partir de uma fonte pontual, no meio do canal, nas proximidades do Porto de Rio Grande. A simulação considerou um derrame com duração de 72 horas, com um passo de tempo de 100 segundos. Todas as especificações definidas no programa de modelagem estão apresentadas em anexo deste trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem da circulação hidrodinâmica e modelo de transporte Lagrangeano para o derrame de óleo na Lagoa dos Patos deve ser considerado qualitativamente considerando que foi possível fazer a calibração e validação dos modelos. Os resultados gerados pelo SisBaHiA® foram avaliados em cinco estações definidas no Canal da Lagoa dos Patos para a modelagem em dois diferentes níveis do corpo d'água, na posição da superfície e um nível abaixo.

Para verificar a influência do vento e do aporte fluvial sobre a circulação hidrodinâmica, foram desenvolvidos dois cenários com condições ambientais diferentes, de modo a obter os resultados em duas estações do ano, estação de seca e chuvosa. Os dois cenários foram definidos nos meses de janeiro/2020 e julho/2020.

### 5.1 CENÁRIO HIDRODINÂMICO PARA O VERÃO

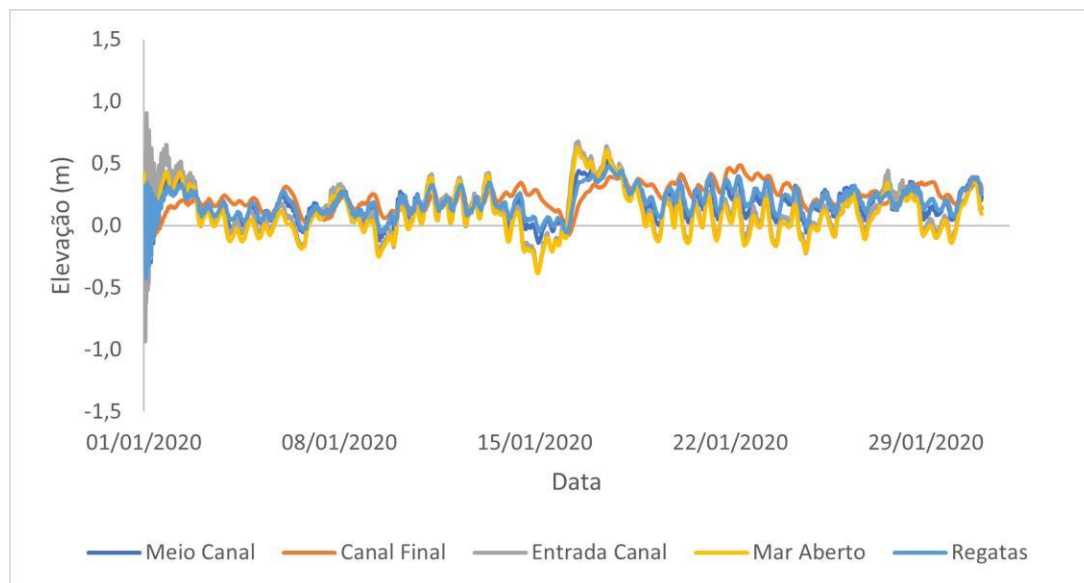
Os resultados apresentados nesta seção são referentes as simulações para o verão, durante o período de 01/01/2020 a 31/01/2020.

A Figura 24 apresenta os valores de elevação para as cinco estações na região de interesse de estudo, entre região costeira adjacente e o canal lagunar. A costa do Rio Grande do Sul apresenta um regime de micromarés, isto é, a amplitude das marés astronômicas é pequena e secundária com relação a variação das ações de agentes meteorológicos (SILVA, 2010).

Na costa do Rio Grande do Sul, os efeitos das marés são menores pela proximidade do ponto anfidrômico ao sul do Chuí, além da configuração da linha da costa plana, aberta, sem reatância e irregularidades, pelos efeitos de ressonância ou convergência, das amplitudes das marés (CALLIARI et al., 1997).

Os picos de elevação observados para as cinco estações podem caracterizar eventos meteorológicos. É possível observar alguns eventos durante o mês de janeiro (Figura 24).

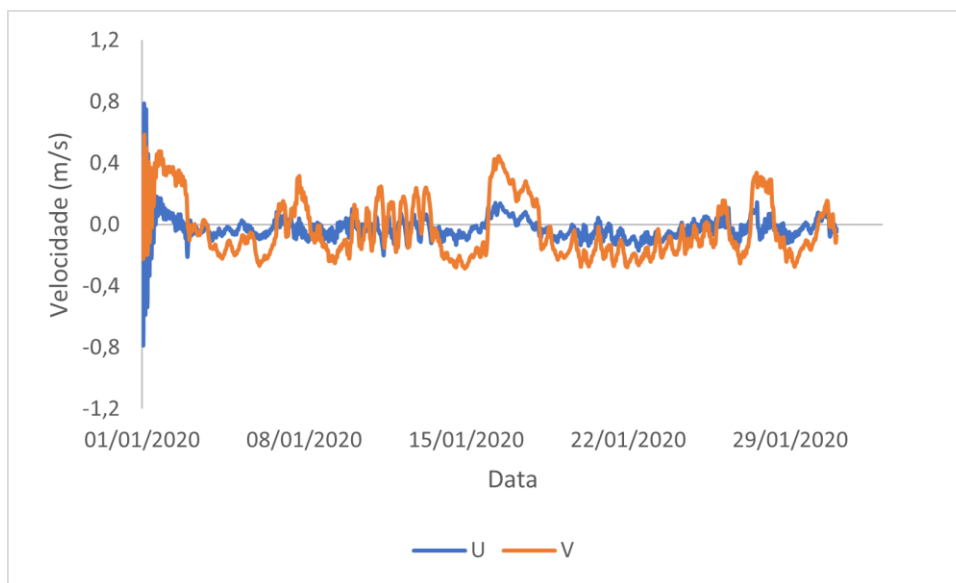
Figura 24 - Elevação obtida pelo SisBaHia nas cinco estações em janeiro de 2020



As componentes das velocidades médias obtidas pelo modelo 2DH são importantes para as análises tridimensionais relacionadas as velocidades médias e as velocidades na superfície nas suas componentes Norte-Sul e Leste-Oeste. A componente Norte-Sul da velocidade foi a predominante em quatro das estações analisadas. Apenas na estação ‘Entrada do Canal’ a componente Leste-Oeste da velocidade foi dominante entre o dia 08/01/2020 e 27/01/2020.

A estação usada para as análises comparativas entre a da velocidade média e a velocidade a um nível a baixo da superfie é a estação denominada de “Meio Canal”. Nesta estação é predominante a componente Norte-Sul da velocidade. O maior valor desta componente foi observado no dia 16/01/2020, as 13:45h, com valor igual a 0,40 m/s, caracterizando um período de enchente. Já para o menor valor da componente Norte-Sul da velocidade foi obtida no dia 14/01/2020 a 23:15 h, com uma velocidade de -0,28 m/s, caracterizando um período de vazante (Figura 25).

Figura 25 – Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) das velocidades obtidas pelos SisBaHia na estação 'Meio Canal' em janeiro/2020



Para as análises dos campos de correntes médios na vertical e um nível abaixo da superfície, obtido no modelo tridimensional, foram escolhidos dois instantes que correspondem a enchente e a vazante, considerando as componentes da velocidade na estação 'Meio Canal', Figuras 26 a 29 são apresentados os campos de correntes médios e um nível abaixo da superfície. É possível observar que o vento tem pouco efeito nas velocidades um nível abaixo da superfície, mostrando que são semelhantes as velocidades médias. No dia 16/01/2020 às 13h é possível verificar uma enchente na região em estudo. Apenas na vazante, no dia 14/01/2020 às 23h, a velocidade abaixo da superfície mostra uma pequena variação de direção.

Figura 26 – Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 16/01/2020 às 13h, com destaque para a região do porto de Rio Grande.

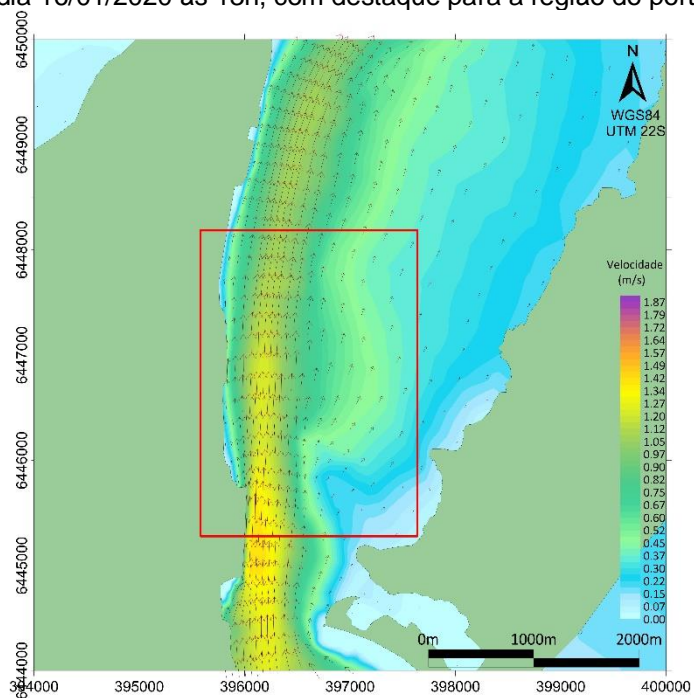


Figura 27 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 16/01/2020 às 13h

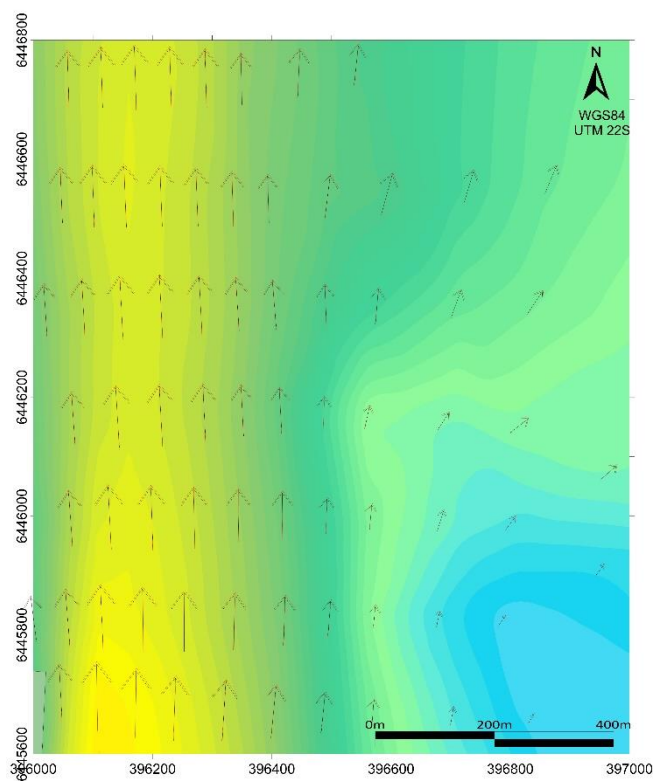


Figura 28 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 14/01/2020 às 23h, com destaque para a região do porto de Rio Grande.

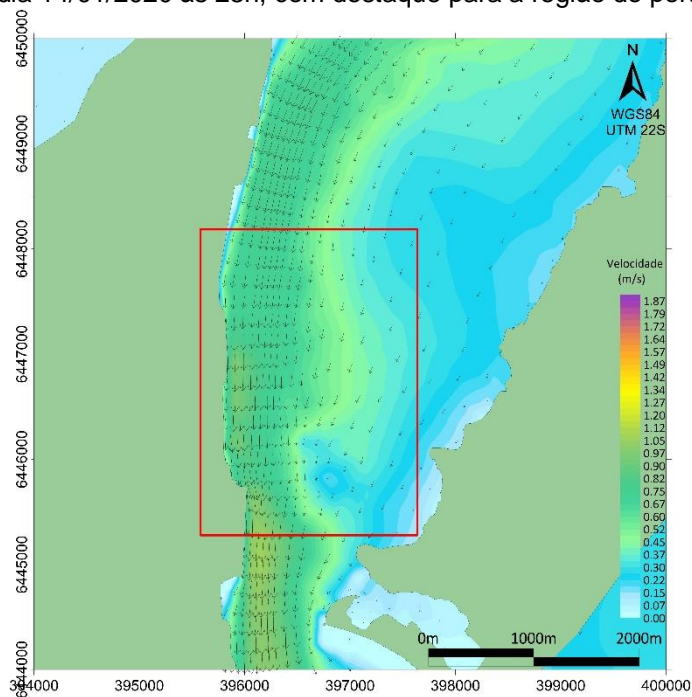
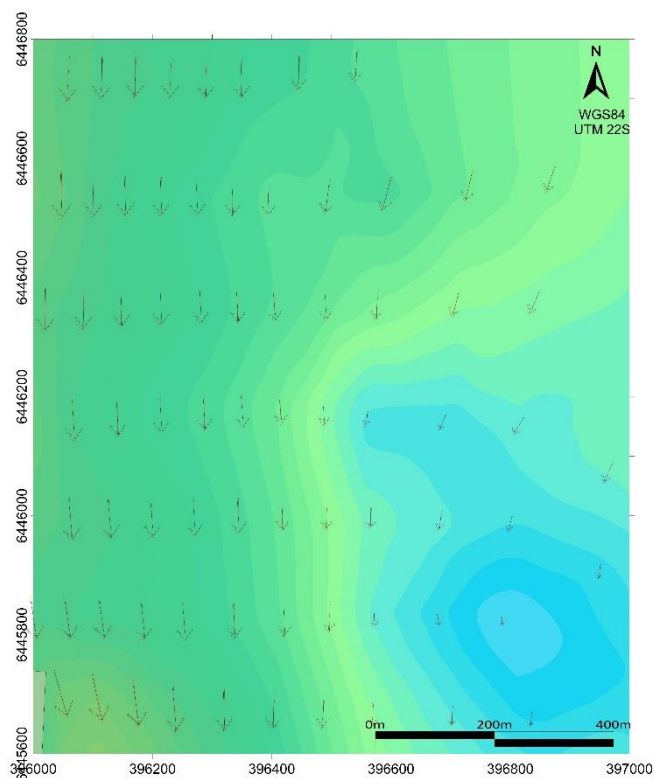
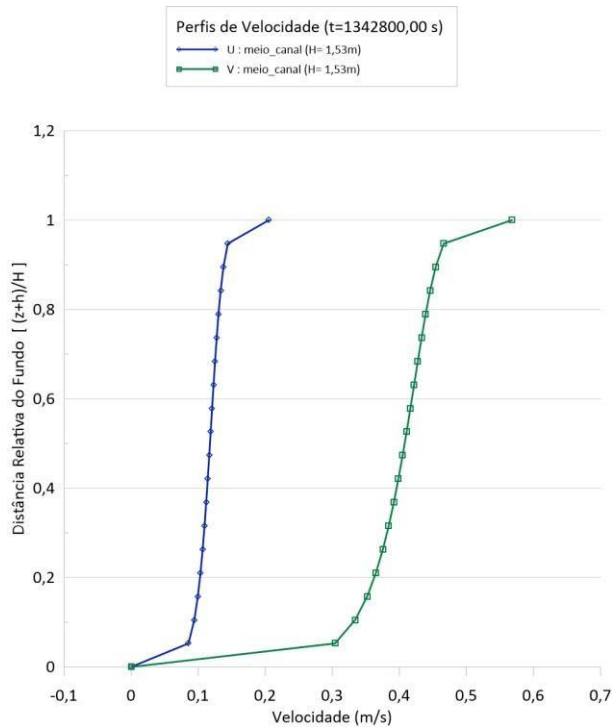


Figura 29 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 14/01/2020 às 23h.



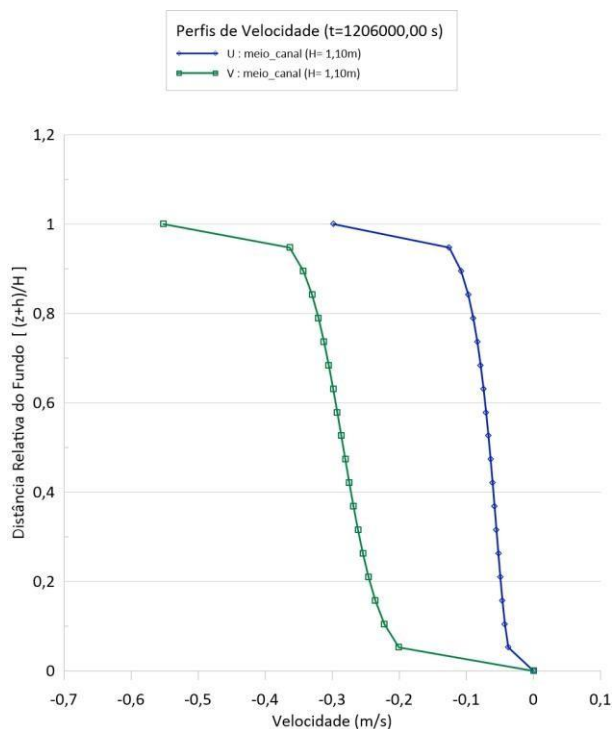
A Figura 30 e 31 mostram os perfis verticais das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da velocidade na estação 'Meio Canal' em dois instantes: no 16/01/2020 às 13h e no dia 14/01/2020 às 23h. É possível observar que as velocidades na superfície são sensivelmente superiores à velocidade média, tanto para a componente Norte-Sul quanto para a componente Leste-Oeste, nos dois instantes. Esta análise é importante porque o óleo é advectado próximo a superfície e não dissolvido na coluna d'água. Logo, os campos de correntes, usados no modelo Lagrangeano de transporte, são os obtidos em um nível abaixo da superfície. O módulo tridimensional usa 20 níveis na vertical em todo o domínio. Como é usual na transformação  $\sigma$  padrão, é utilizado o mesmo número de pontos de discretização na vertical para toda a coluna d'água.

Figura 30 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 16/01/2020, às 13h.



Fonte: A autora (2021)

Figura 31 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste na estação 'Meio Canal' no dia 14/01/2020 às 23h.

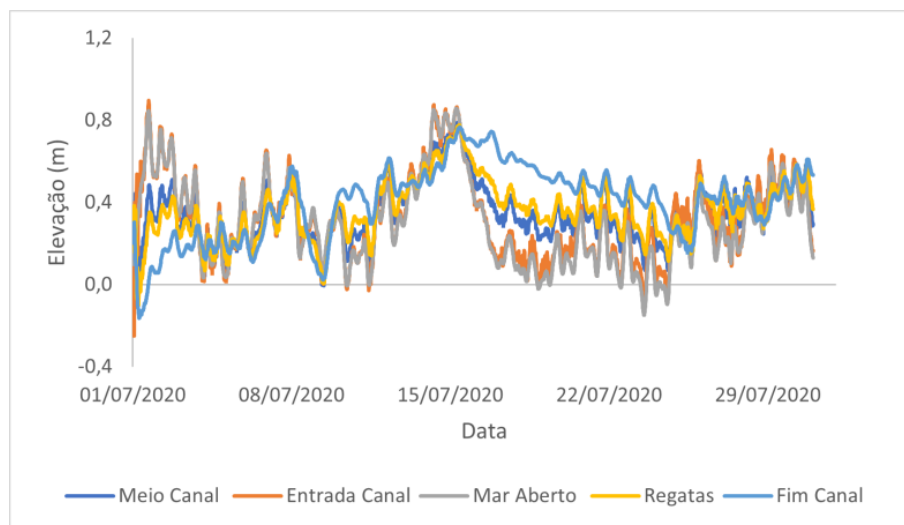


## 5.2 CENÁRIO HIDRODINÂMICO PARA O INVERNO

Os resultados apresentados nesta seção são referentes às simulações para o inverno, durante o período de 01/07/2020 a 31/07/2020.

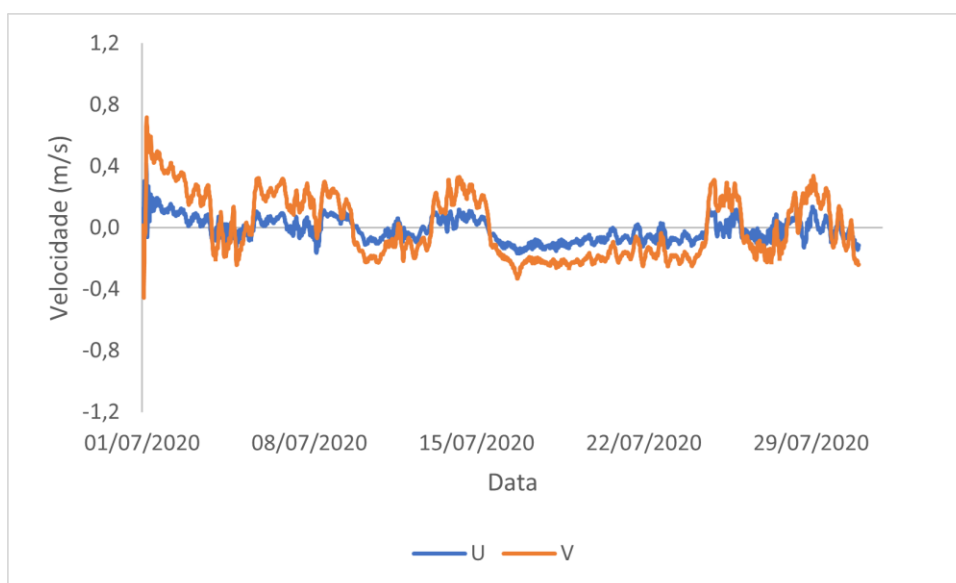
A Figura 32 apresenta os valores de elevação para as cinco estações na região de interesse, entre região de contorno adjacente e o canal lagunar. Na Lagoa dos Patos as elevações são muito pequenas e os resultados apresentam influência dos efeitos da maré astronômica obtida como referência á fronteira aberta.

Figura 32 - Elevação obtida pelo SisBaHia nas cinco estações em julho de 2020



A Figuras 33 mostra as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste das velocidades obtidas na estação 'Meio Canal', para o mês de julho. As maiores velocidades são observadas na mesma estação, no dia 06/07/2020 às 22:15h, na componente Norte- Sul da velocidade apresentou magnitude de 0,30 m/s, caracterizando um período de cheia. A vazante expressiva pode ser observada no dia 16/07/2020, as 17:15h com velocidades de aproximadamente -0,33 m/s.

Figura 33 - Componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) das velocidades obtidas pelos SisBaHia na estação 'Meio Canal' em julho de 2020



Nas Figuras 34 a 37 são apresentados os campos de velocidade média e a um nível abaixo da superfície, para os períodos definidos anteriormente. Como observado no verão, o vento tem pouco efeito nas velocidades um nível abaixo da superfície, mostrando-se semelhantes às velocidades médias. Mas diferente do verão, em períodos de vazante ocorre uma pequena variação de direção.

Figura 34 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 06/07/2020 as 22h, com destaque para a região do porto de Rio Grande.

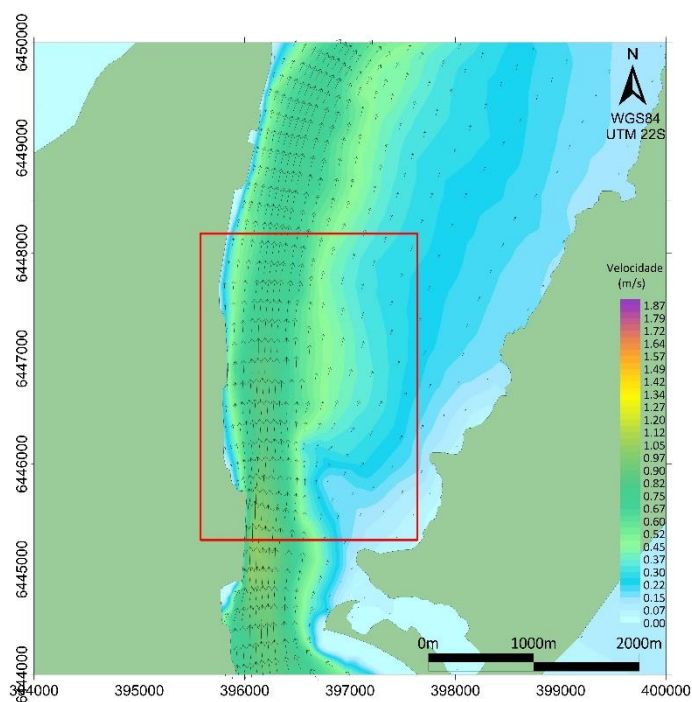


Figura 35 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 06/07/2020 as 22h.

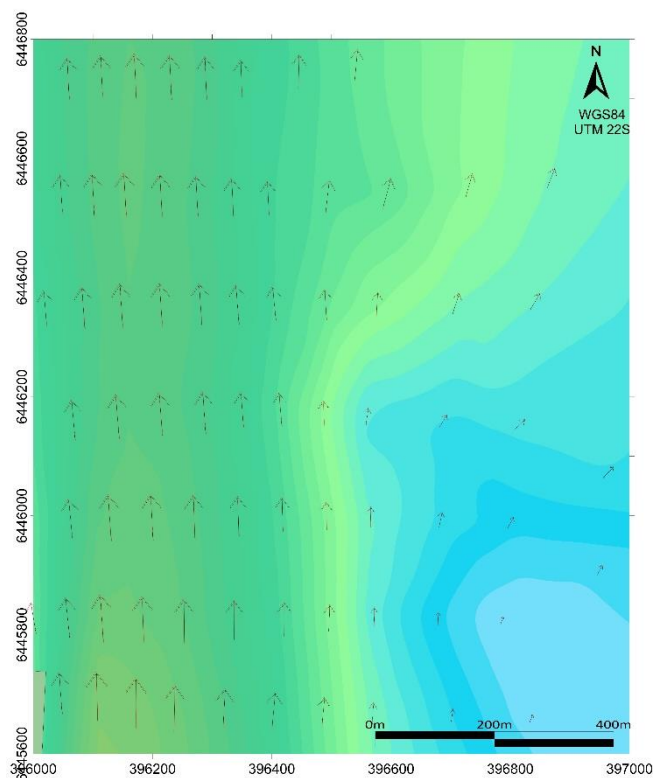


Figura 36 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) no dia 16/07/2020 as 17h, com destaque para a região do porto de Rio Grande.

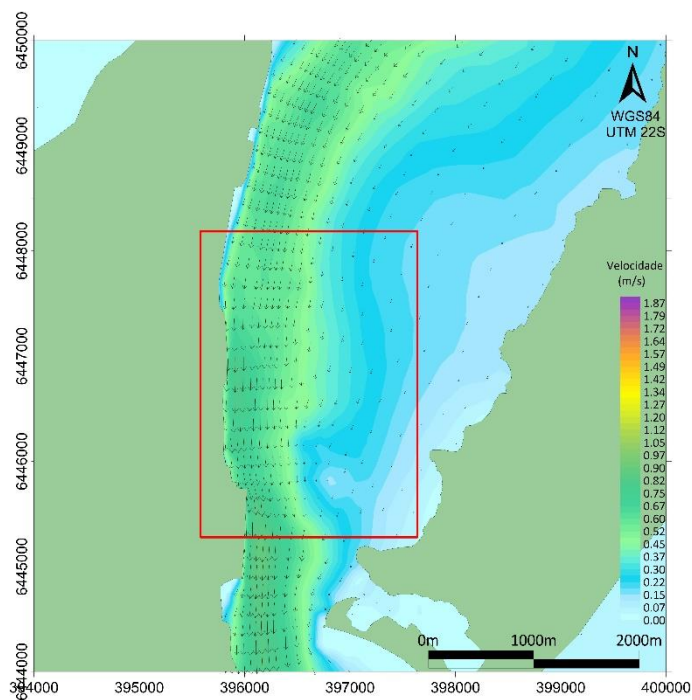
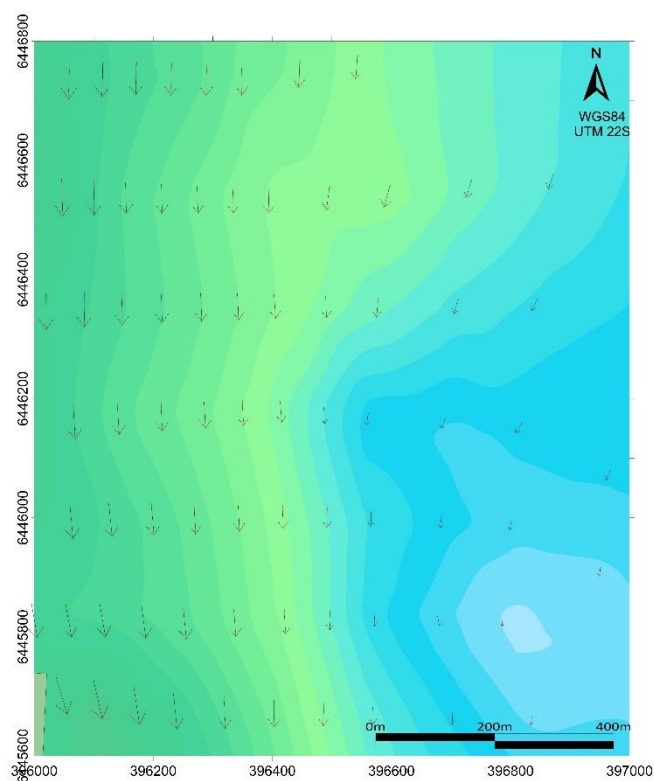


Figura 37 - Campos de correntes médias na vertical (preto) e um nível abaixo da superfície (vermelho) nas proximidades da estação 'Meio do canal' no dia 16/07/2020 as 17h.



O perfil vertical das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste da velocidade na estação 'Meio Canal' é apresentada nas Figuras 38 e 39. Como já observado no mês de janeiro, estação do verão, as velocidades na superfície são sensivelmente maiores que a velocidade média, para as duas componentes da velocidade, referente aos dois instantes estudados.

Figura 38 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 16/07/2020, às 17h.

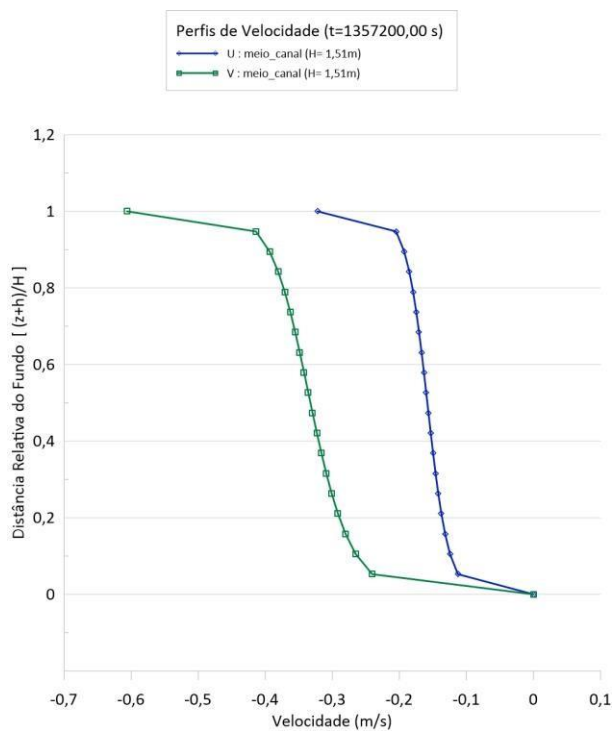
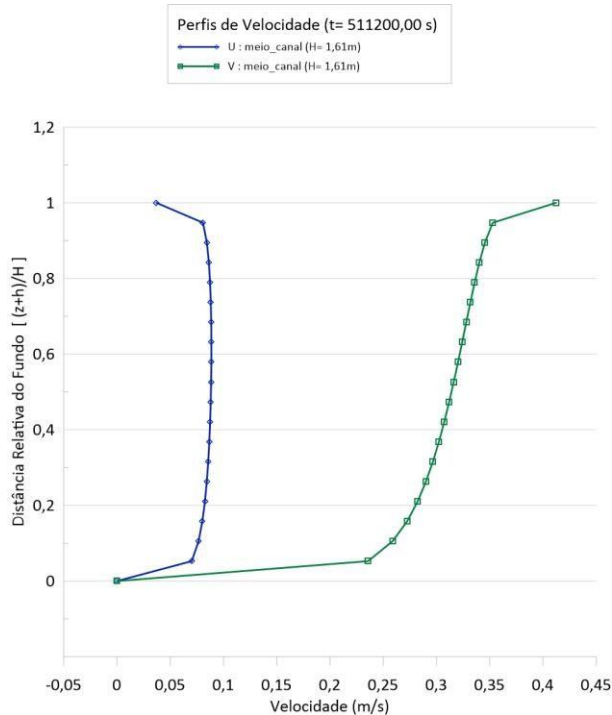


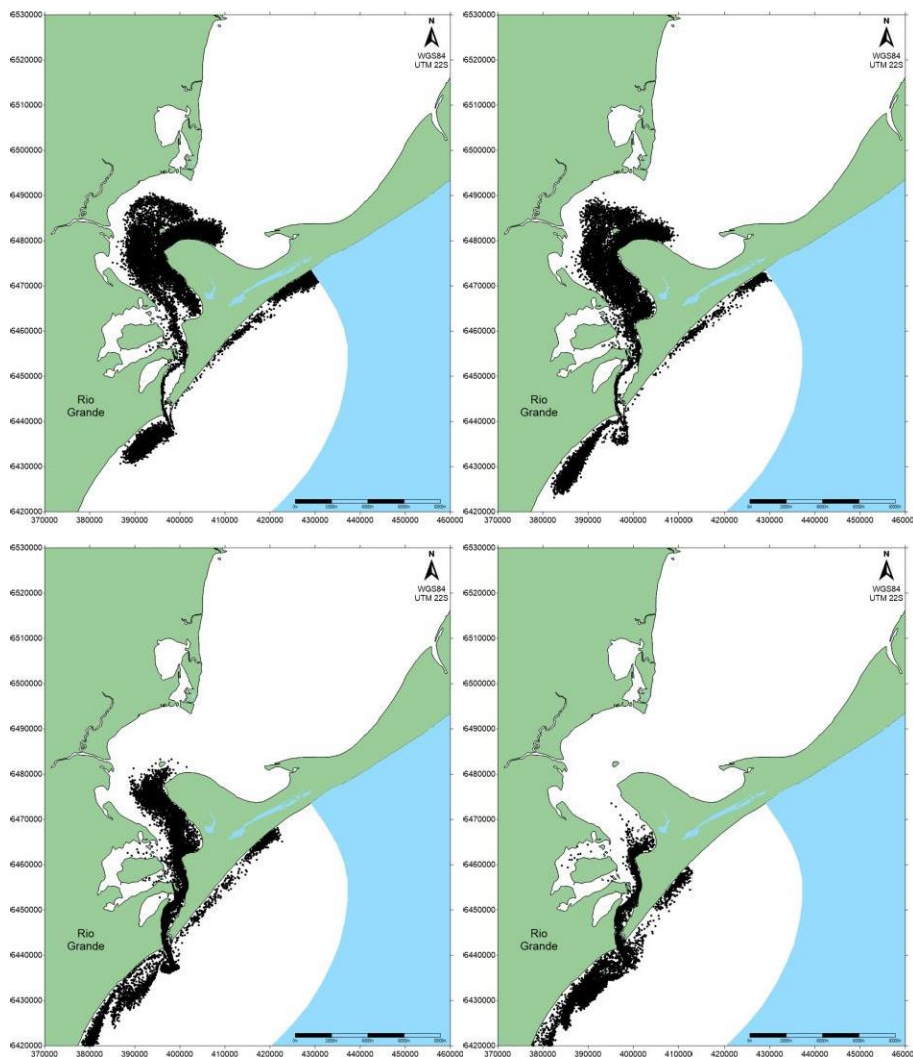
Figura 39 - Perfis verticais das componentes Norte-Sul (V) e Leste-Oeste (U) na estação 'Meio Canal' no dia 06/07/2020 22h



### 5.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGENO – VERÃO

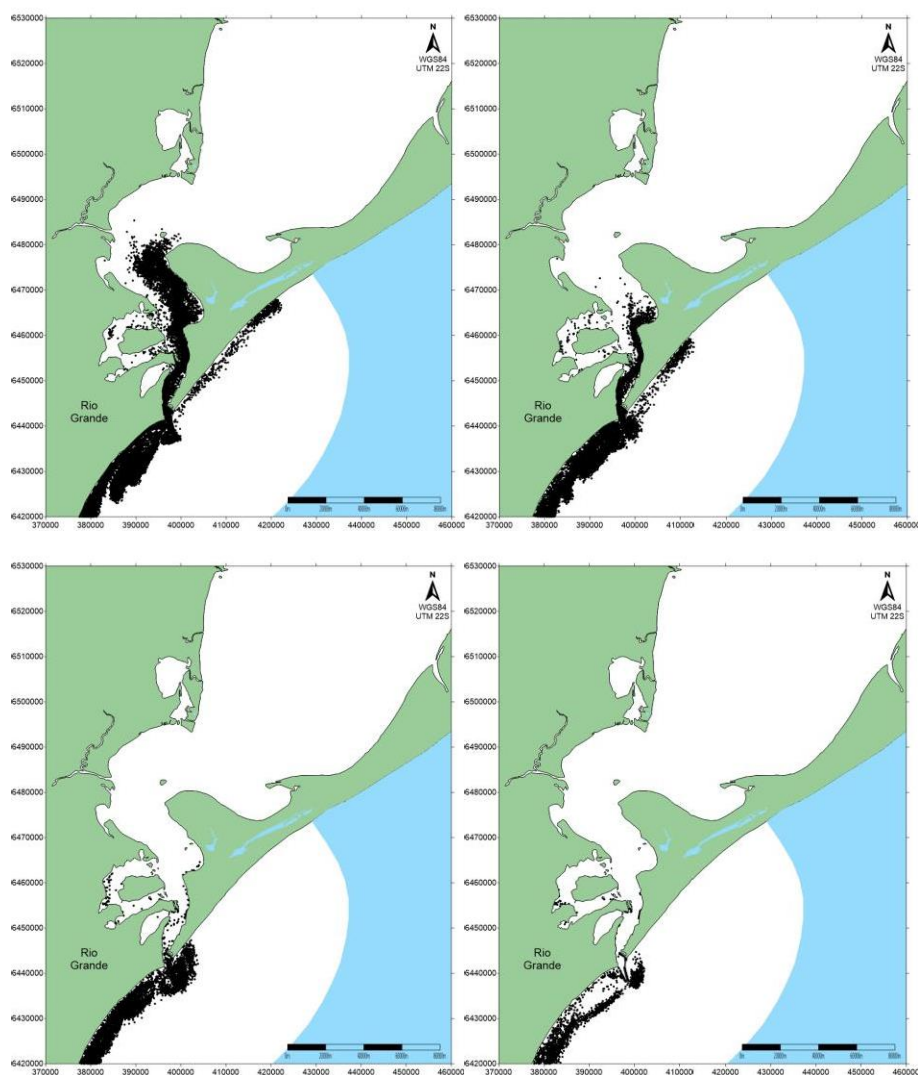
Os resultados encontrados para a distribuição de partículas após um lançamento de uma fonte pelo período de 72h, no mês de janeiro, que corresponde a época de estiagem, para um instante de enchente, é mostrado na Figura 40, desconsiderando o decaimento de massa de óleo. Neste período, as vazões são baixas, principalmente no rio Guaíba que é um dos maiores afluentes que compõe a Lagoa dos Patos. Outro ponto a se destacar, é observado que após 24 horas do derrame, o óleo não atingi a região central da lagoa, permanecendo no canal e saindo para a região costeira adjacente. Após 96h, o óleo já atingiu as praias ao Norte e ao Sul, na região costeira.

Figura 40 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 16/01/2020.



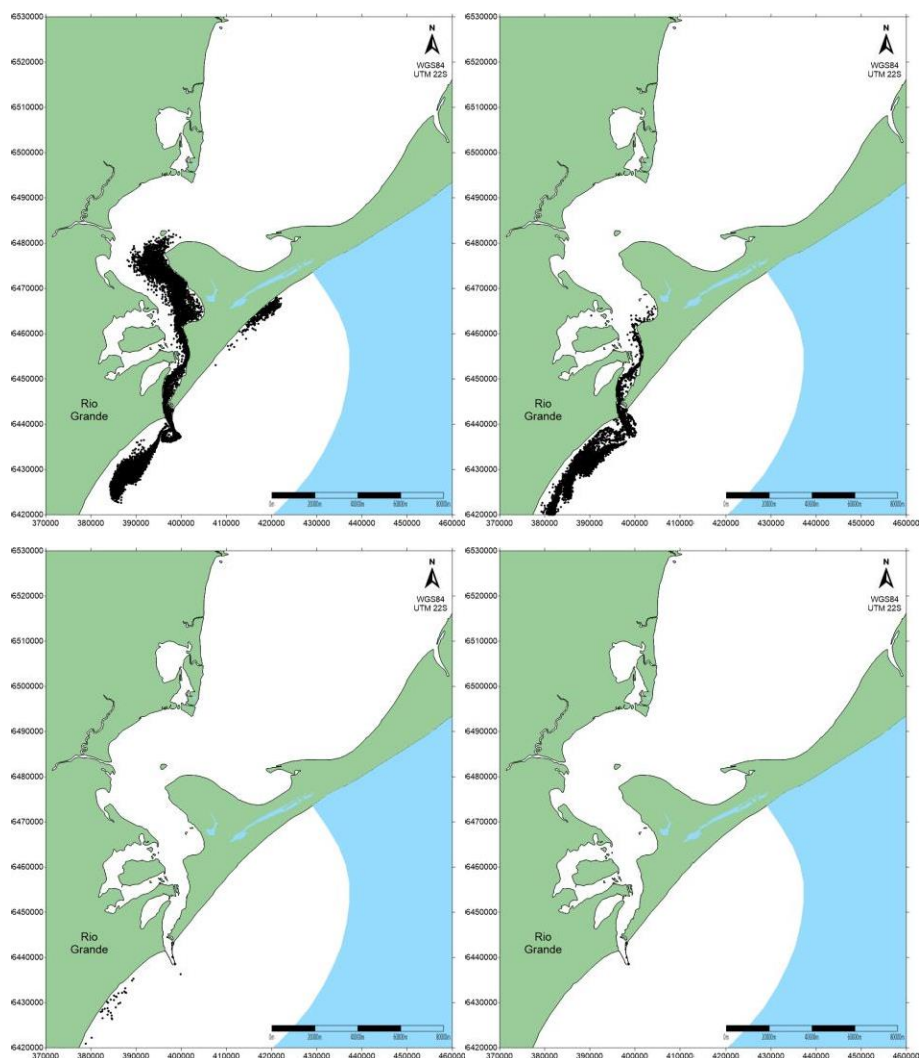
Na Figura 41 é observado o derrame de óleo com início no dia 14/01/2020, desconsiderando o decaimento de massa do óleo, para um instante de vazante. A pluma do contaminante o derrame se espalha atingindo uma área maior no final do canal, entre as 24h e 48h após. Após as 96h a pluma de poluente está concentrada na entrada do canal e na região costeira adjacente. Diferente da situação de enchente, quando a atinge a região da lagoa, na situação de vazante, a pluma fica retida na região do canal. Este resultado mostra a diferença entre o espalhamento da pluma também é função do instante em que ocorre o derrame, se é um instante de vazante ou enchente.

Figura 41 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 14/01/2020



Com a inserção de uma curva de decaimento do óleo, foi possível observar a distribuição das partículas para os instantes 24, 48, 72 e 96 horas após o término do derrame de óleo no canal da Lagoa dos Patos, que ocorreu durante 72 horas ( Figura 42). É possível verificar um comportamento semelhante, quando se considerada o óleo conservativo, nos dois primeiros dias. Após 72 horas, as partículas estão presentes apenas na região costeira. Após 96 horas, as partículas ou foram advectadas para fora do domínio.

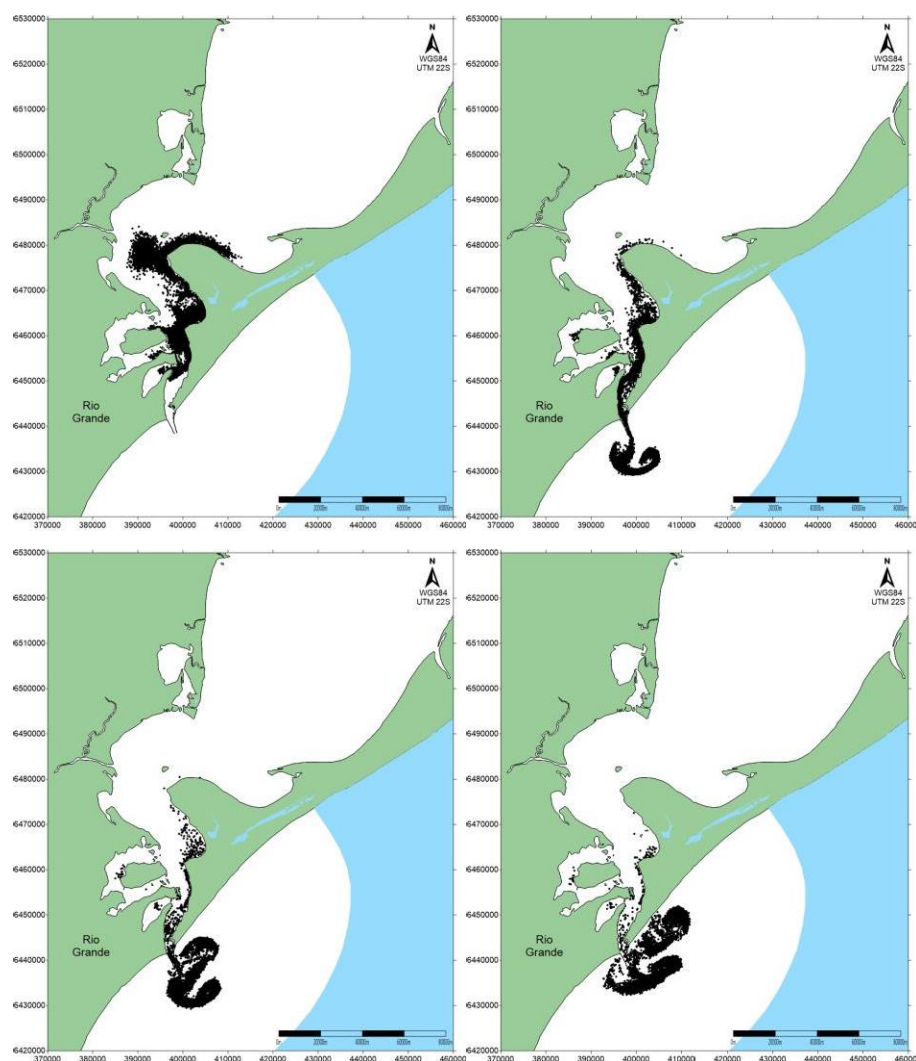
Figura 42 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo não-conservativo em janeiro de 2020, início do derrame no dia 16/01/2020



## 5.4 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO – INVERNO

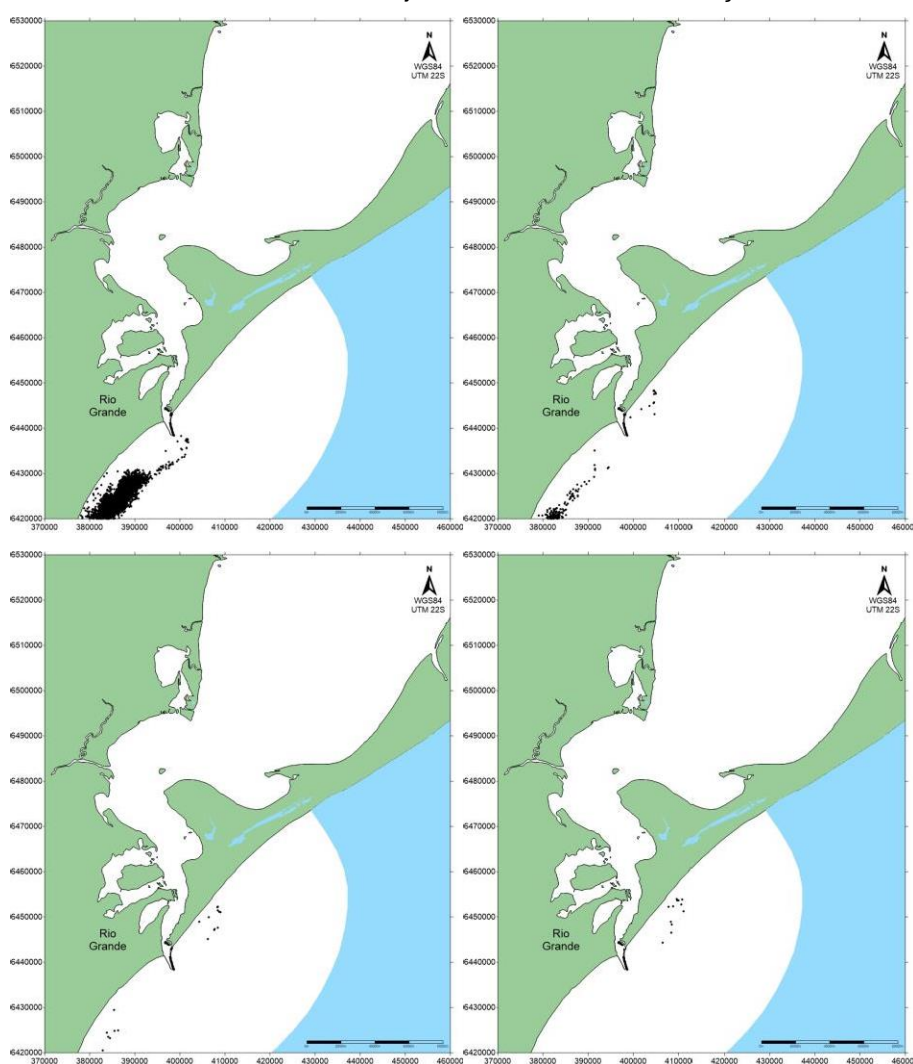
Na Figura 43 é apresentada a distribuição das partículas na região do canal lagunar, considerando um lançamento de 72h, e sem consumo de massa das partículas, ou seja, o óleo foi considerado conservativo em um instante de cheia. É observado que a pluma de contaminante permanece somente na região do canal e na região costeira adjacente, não é transportada para o centro da lagoa. Nas seguintes imagens é observado também que parte do contaminante vai no sentido do oceano, e se dispersa na região costeira. A movimentação da pluma é influenciada pelo período determinado e da maré astronômica, que indica importante forçante dos resultados obtidos.

Figura 43 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 06/07/2020.



Com a simulação do derrame de óleo com início no dia 16/07/2020, é observado na Figura 44, após 24h do término do derrame, na extensão do canal não é observada a pluma de contaminante, toda a pluma foi em sentido da região costeira. Possivelmente este resultado está associado a um período de vazante longo. Neste mês, a vazante teve uma duração de 2 dias, o que impediu a pluma de entrar na lagoa. Este resultado mostra que o “caminho da pluma” após o derrame é sentido a região costeira adjacente, atingindo as praias nas proximidades do canal.

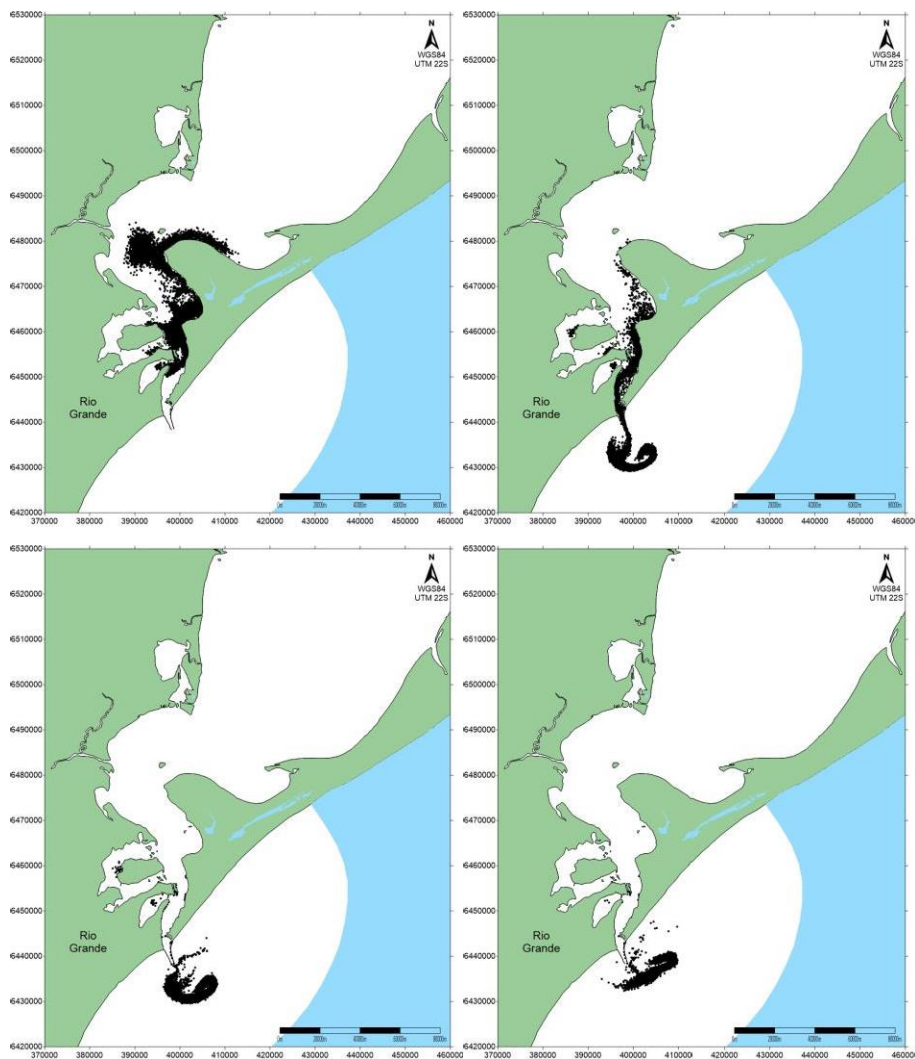
Figura 44 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 16/07/2020



Com a aplicação da curva de decaimento do óleo, o comportamento da pluma foi mantido, com início do lançamento no dia 06/07/2020, visto que todo o contaminante permaneceu no canal da Lagoa e parte foi para alto mar. Já após 96

horas do acidente, é apresentada uma redução da pluma de contaminante, se concentrando na entrada do canal, em alto mar (Figura 45).

Figura 45 - Distribuição das partículas após o derrame contínuo de 72h após 24h, 48h, 72h e 96h do lançamento, considerando o óleo não-conservativo em julho de 2020, início do lançamento dia 06/07/2020.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento da pluma de óleo gerada no ambiente marinho tem uma relação direta com as forçantes, além de intemperismo químico que o óleo sofre no ambiente. Os cenários simulados de dispersão da pluma de óleo na Lagoa dos Patos, mostrados neste trabalho, apresentaram uma influência dos ventos e do aporte fluvial na dispersão do óleo derramado no canal lagunar da Lagoa. É observado uma variação na hidrodinâmica e, conseqüente, no transporte, dependentes da temporalidade e da sazonalidade quando o derrame ocorre.

Foi observado uma variação na direção entre a velocidade média e a um nível abaixo da superfície. Nesta posição da coluna d'água que o óleo é advectado.

No modelo de transporte, a sazonalidade tem uma influência, mas, principalmente a curva de decaimento do tipo de óleo é um dos aspectos determinantes para a acurácia da modelagem.

Nas simulações, seria interessante considerar eventos climático extremos, como entrada de frente frias e ocorrência de maré meteorológica, além de avaliar áreas suscetíveis aos impactos ambientais.

## 7 REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. Plataforma Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 16 jul. 2021.

ANTAQ. Meio Ambiente - Impactos Ambientais. Disponível em: [http://web.antaq.gov.br/portaltv3/MeioAmbiente\\_ImpactosAmbientais.asp](http://web.antaq.gov.br/portaltv3/MeioAmbiente_ImpactosAmbientais.asp). Acesso em: 11 jun. 2021.

ANTAQ. PORTO DE RIO GRANDE. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Portaltv3/Anuarios/Portuario2001/Portos/RioGrande.htm>. Acesso em: 11 jun. 2021.

Atlas Socioeconômico Rio Grande do Sul. Clima, temperatura e precipitação. 2020. Apresentação. SPGG-RG. Disponível em <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>>. Acesso em: 16 de maio de 2021

Atlas Socioeconômico Rio Grande do Sul. Bacias e sub-bacias hidrográficas. Meio Ambiente. SPGG-RG. 2020. Disponível em <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/bacias-e-sub-bacias-hidrograficas>>. Acesso em: 16 de maio de 2021

BENTO, D. M. Análise química da degradação dos hidrocarbonetos de óleo diesel no estuário da Lagoa dos Patos–Rio Grande/RS. 2005. Dissertação de Mestrado.

BRASIL, Ministério da Defesa Marinha do. Informações sobre o Óleo. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/combate-ao-oleo/informacoes-sobre-o-oleo>. Acesso em: 29 outubro 2021.

BRASIL. Comando da Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. Norma Técnica Ambiental para Elaboração de Laudo Técnico Ambiental. 62p. 2007.

BRASIL. Comando da Marinha. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. IEAPM 30 anos: (1984-2014). Arraial do Cabo, RJ, Public Editora & Publicidade, 2014. 113

BRASIL. Comando da Marinha. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Roteiro: Costa Sul – Do Cabo Frio ao Arroio Chuí. Lagoas dos Patos e Mirim – 12. ed.; 5. – Niterói, RJ: A Diretoria, 2013. 282 p.

BRASIL. Comando da Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. Norma Técnica Ambiental para Elaboração de Laudo Técnico Ambiental. 62p. 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 398/2008. Plano de Emergência Individual. Brasília, DF. 2008. Disponível em: <http://www.mpce.mp.br/wp-content/uploads/2015/12/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CONAMA-n%C2%BA-398-08-Plano-Emerg%C3%Aancia-Individual-para->

polui%C3%A7%C3%A3o-por-%C3%B3leo.pdf. Acesso em: 22 de novembro de 2021.

BRASIL. Lei nº 9.966/2000. 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.

BRASIL. Lei nº 8.127/2013. Institui o Plano Nacional de Contingência para Incidentes de Poluição por Óleo em Águas sob Jurisdição Nacional.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Cartas de Sensibilidade ao Óleo. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/cartasde-sensibilidade-ao-oleo>>. Acesso em: 20 de novembro de 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/\\_arquivos/cartassao2007port.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/projeto/_arquivos/cartassao2007port.pdf) >. Acesso em: 12 de maio de 2021.

CALLIARI, L.J.; PAIM, P.S.; MÖLLER, O.O.; NIENCHESKI, L. F. H. & PAZ, R.S. Operação Geocosta Sul, Súmula. In: SEMINÁRIO SOBRE PESQUISA DA LAGUNA DOS PATOS, I. Porto Alegre, 1984, p. 98-107.

CALLIARI, L.J., KLEIN, A.H.F. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo, Anais... São Paulo, 1992.

CALLIARI, L.J. & FACHIN, S. Lagoa dos Patos: Influência nos depósitos lamíticos costeiros. Pesquisas, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 57-69, 1993.

CALLIARI, L. J. Características Geológicas do Estuário da Lagoa dos Patos. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C. & CASTEALO, J.P. (eds). Os ecossistemas Costeiro e Marinho do Extremo Sul do Brasil. Rio Grande: Ecoscientia, 1997, p. 13-18.

CETESB. Mapeamento Ambiental. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de-acidentes/vazamentos-de-oleo/preparacao-para-resposta/mapeamento-ambiental/>. Acesso em: 04 jul. 2021.

DE FRANÇA UMEZU, A. K. A. VULNERABILIDADE DOS MANGUEZAIS DA BAÍA DE SEPETIBA A DERRAMES DE ÓLEO NA ÁREA PORTUÁRIA. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FIGUEIRA, P. O. Memórias do Desastre Ambiental do Navio Vicuña (2004). Faces da História, v. 6, n. 1, p. 120-140, 21 jun. 2019

FRONZA, L. Capacidade de liberação de hidrocarbonetos dos sedimentos de áreas contaminadas do estuário da Lagoa dos Patos–RS. 2006. Dissertação de Mestrado.

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 /2016.

IТОPF. Oil Tanker Spill Statistics 2020. London, Uk: Itopf Limited, 2020. No. 944863. Disponível em:  
[https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Company\\_Lit/Oil\\_Spill\\_Stats\\_publication\\_2020.pdf](https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_Stats_publication_2020.pdf). Acesso em: 06 jun. 2021.

IPIECA, IMO, OGP, e CEDRE. (2015). Aerial observation of oil spills at sea. IPIECA resources.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LACERDA, C. S. Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo – Cartas SAO – para a Costa Oeste da Lagoa dos Patos, RS, Brasil. 2006. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Departamento de Geociências Laboratório de Oceanografia Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2006.

MARQUES, W. C., et al., A dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos, Brasil. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica IV. 2006. Rio Grande-RS.

MARQUES, W. C. 2005. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade do Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

MARTINHO, V. ESTUDO DA DISPERSÃO DE MANCHAS DE ÓLEO NA ÁREA DE ATUAÇÃO DO PORTO DO RIO GRANDE – RS. 2010. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina Programa de Recursos Humanos N° 27 – Anp/Mme/McT, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010

Melo, E. J. V., de Biodiversidade bacteriana em água do mar: isolamento, caracterização e aplicação no tratamento de águas contaminadas pelo óleo combustível marítimo MF-380/, 2015.

MÖLLER, O. O., LORENZZETI, J. A., STECH, J. L., MATA, M. M. . The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. Continental Shelf Research, v.16, p.335-351,1996

NANNI, A. S. CONTAMINAÇÃO DO MEIO FÍSICO POR HIDROCARBONETOS E METAIS NA ÁREA DA REFINARIA ALBERTO PASQUALINI, CANOAS, RS. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS-BR, 2003.

NAZÁRIO, H. R.. Pesquisadores vão analisar fragmentos remanescentes do derrame de óleo no litoral sul do Nordeste. 2021. Disponível em:  
<https://ufsb.edu.br/ufsb-ciencia/2783-pesquisadores-va0-analisar-fragmentos->

remanescentes-do-derrame-de-oleo-no-litoral-sul-do-nordeste. Acesso em: 06 jul. 2021.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1985. Oil in the sea, inputs, fates and effects. National Academy Press, Washington.

PENA, P.G.L., et al. Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. Reports in public health. 2020

Plano Mestre-Complexo Portuário de Rio Grande e Peloras-Volume 1. SEP/PR 2020. Disponível em:

[https://antigo.infraestrutura.gov.br/images/2020/documentos/01/plano\\_mestre/RIG\\_PET\\_VF\\_Vol1.pdf](https://antigo.infraestrutura.gov.br/images/2020/documentos/01/plano_mestre/RIG_PET_VF_Vol1.pdf). Acesso em: 06 jun. 2021.

Plano Mestre-Complexo Portuário de Rio Grande e Peloras-Volume 2. SEP/PR 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/rig-pet-vf-vol2-pdf/view>. Acesso em: 06 jun. 2021.

POFFO, Iris R. F.. Planos de contingência para vazamentos de óleo no mar. 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de-acidentes/vazamentos-de-oleo/preparacao-para-resposta/planos-de-contingencia-para-vazamentos-de-oleo-no-mar/#1526068309857-a8fe1b09-da5d>. Acesso em: 04 jul. 2021.

PIOVESAN, R. B.; ALVES, F. N.; SOARES, Ivan D. Aplicação de um Modelo de Transporte de Partículas para Determinação da Trajetória de Manchas de Óleo na Lagoa dos Patos–RS. In: III Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás. 2005. p. 2-5.

Rosman, P. C. C. (2017). Referência Técnica do SisBaHiA.

SANTOS, D. O que se sabe até agora sobre o derramamento de óleo no Nordeste. 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?73944/O-que-se-sabe-ate-agora-sobre-o-derramamento-de-oleo-no-Nordeste>. Acesso em: 01 jul. 2021.

SILVA, S. C. C. A influência do El Niño e La Niña nos depósitos lamínicos e na dispersão sedimentar na praia do Cassino e na desembocadura da Lagoa dos Patos, Rio Grande, RS-Brasil. 2010.

SOTO, Y. J. M. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2004.

SOUSA, L. G. R., et al. IMPACTO AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICO DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA BAÍA DE GUANABARA. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, [s. l], v. 9, n. 2, p. 94-108, jun. 2013.

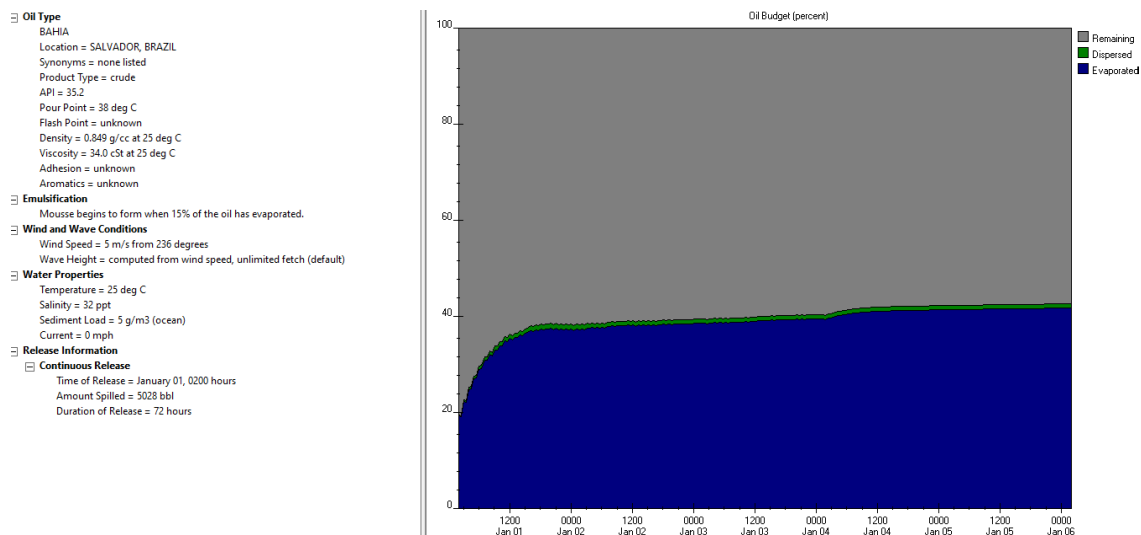
A265a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Brasil). Contingências portuárias / Agência Nacional de Transportes Aquaviários. - Brasília: ANTAQ, 2012

SOUZA, S.S., et al. Modelagem e simulação de derrames de dois tipos de petróleo baseado na experiência de Tramandaí/RS. Ripe- Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, Pelotas/RS, doi: 10.26512/ripe.v5i1.19242, n. 5, p. 96-107, jan. 2019.

SÃO PAULO. CETESB. . Mapas de sensibilidade. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de-acidentes/vazamentos-de-oleo/preparacao-para-resposta/mapeamento-ambiental/mapas-de-sensibilidade/>. Acesso em: 04 jul. 2021.

USEPA - U.S. Environmental Protection Agency. Procedures for the Derivation of Equilibrium Partitioning Sediment Benchmarks (ESBs) for the Protection of Benthic Organisms: PAH Mixtures. Washington, Dc 20460, 2003. Disponível em: <https://clu-in.org/conf/tio/porewater1/resources/EPA-ESB-Procedures-PAH-mixtures.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2021.

## ANEXO 1 - Tela do programa ADIOS2, com as características do óleo e as curvas de decaimento da massa de óleo.



## ANEXO 2 - Imagem da tela de modelos hidrodinâmicos do SisBaHiA® com os valores dos parâmetros usados nas simulações.

Parâmetros | Fronteiras | Infiltração & Viscosidade | Dados Meteorológicos | Condições Iniciais | Absorção | Estruturas | Observações | Resultados

---

Malha  
Nome: Malha Lagoa dos Patos | Nós: 8149 | Elementos: 1982

---

Termos da Equação | Interfaces Dissipativas | Alaga & Seca | Ondas

Termos da equação do movimento

- Advecção
- Viscosidade turbulenta
- Atrito no fundo
- Filtragem espacial de turbulência
- Filtragem temporal de turbulência
- Efeito de Coriolis
- Gradiente de Densidade (Barodínico)

Escala dos termos

Filtro espacial em X: 1,00

Filtro espacial em Y: 1,00

Filtro temporal: 1,00

Viscosidade: 1,00

Cte. de Von Karman: 0,4040

---

Modelo Sal & Temperatura Acoplado

Título: 1.Janeiro\_2020

Passo de Tempo (s): 100,0000

---

Subdiretório de Resultados: MH130643772

---

Simulação

Instante Inicial (s): 0,0000 | Passo de Tempo (s): 100,0000

Instante Final (s): 2592000,0000 | Data Inicial: 01/01/2020

---

Modelo 3D

Número de Níveis: 20

Modo de Cálculo do Modelo 3D: Calcula via módulo analítico-numérico

---

Computa Evolução Morfológica do Fundo

Sedimentos Coesivos ou SST

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [dropdown]

Passo de Tempo (s): [input]

---

Sedimentos não Coesivos

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [dropdown]

Passo de Tempo (s): [input] | Fórmula: van Rijn (2007)

### ANEXO 3 - Imagem da tela de modelos hidrodinâmicos do SisBaHiA® com os dados de vento das estações ao longo da Lagoa.

Parâmetros | Fronteiras | Infiltração & Viscosidade | **Dados Meteorológicos** | Condições Iniciais | Absorção | Estruturas | Observações | Resultados

Vento | Evaporação | Precipitação

Campo de Vento: Nós Específicos

Modo no tempo e no espaço: Variável e Variado em N estações

Distância Mínima: 50000,0000 | Potência: 2,0000

Est.	Coordenada X	Coordenada Y
Est_14V	493301,4190	6595885,2490
Est_15V	469377,7382	6595843,5940
Est_16V	445453,7775	6595748,5326
Est_20V	493318,7992	6568179,4100
Est_21V	469457,1925	6568137,5600
Est_22V	445595,3111	6568042,0510
Est_26V	493336,3068	6540472,4980
Est_27V	469537,2286	6540430,4540
Est_28V	445737,8808	6540334,5050
Est_29V	421938,0530	6540184,6450
Est_2V	493267,0414	6651293,7250
Est_33V	469617,8449	6512722,2730
Est_34V	445881,4842	6512625,8910
Est_35V	422144,6528	6512475,3560
Est_36V	398407,1441	6512270,6560
Est_3V	469220,5805	6651252,4710

Tipo de Direção do Vento: Calibra CD (Azimute / AngVento\_X) | Valor: 1,0000

Intervalo de Tempo (s): 3600,0000

Tempo	Intensidade	Direção
0,0000	2,3900	308,2400
3600,0000	2,7000	294,5600
7200,0000	2,9100	295,0800
10800,0000	3,0800	307,7800
14400,0000	3,3800	318,3700
18000,0000	3,5400	315,8500
21600,0000	3,6000	311,4100
25200,0000	2,7000	316,2900
28800,0000	3,4300	301,2700
32400,0000	3,3600	285,3300
36000,0000	2,9900	267,7100
39600,0000	2,8200	242,0000
43200,0000	3,0300	223,8300
46800,0000	3,2300	217,0800
50400,0000	4,5400	196,1000
54000,0000	6,8600	192,5600

Tempo: Segundos / Horas / Dias / Data & Hora

### ANEXO 4 - Imagem da tela de modelos de qualidade de água do SisBaHiA®, para o sal com os valores dos parâmetros usados nas

Parâmetros | Fronteiras | **Condições Internas** | Fontes | Condição Inicial | Infiltração | Absorção | Observações | Resultados

Hidrodinâmicos | Reações Químicas

Malha: Malha Lagoa dos Patos | Nós: 8149 | Elementos: 1982

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa

Tipo: Apenas Valores Constantes / Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes: Dxx (1,0000E+00), Dxy (=Dyx) (5,0000E-02), Dyy (5,0000E-01)

Escala da Dispersão: Longitudinal (1,0000), Transversal (1,0000)

Calcula usando Espessura da Camada (1,0000) | Num. Pelet Máximo (50,0000) | Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico: 2.Janeiro\_2020

Simulação do Modelo Hidrodinâmico: Instante Inicial (s) 0,0000 | Instante Final (s) 2592000,0000 | Int. de Tempo (s) 3600,0000

Data Inicial: 01/01/2020 | Tipo de Escoamento: 2DH

Simulação: Instante Inicial (s) 0,0000 | Instante Final (s) 2592000,0000 | Passo de Tempo (s) 100,0000

Subdiretório de Resultados: MQA140144786

simulações.

### ANEXO 5 - Imagem da tela de modelos transporte do SisBaHiA®, com os valores dos parâmetros usados nas simulações.

Parâmetros | Fontes | Marcar Regiões | Fronteira | Barreira | Campo Próximo - Emissários | Contenção & Recolhimento | Observações | Resultados

Malha: Malha Lagoa dos Patos | Nós: 8149 | Elementos: 1982

Dados Hidrodinâmicos | Dados de Onda | **Transporte** | Concentração

Título do Modelo: 2.Janeiro\_2020

Simulação do Modelo Hidrodinâmico: Instante Inicial (s) 0,0000 | Instante Final (s) 2592000,0000 | Int. de Tempo (s) 3600,0000

Data Inicial: 01/01/2020 | Tipo de Escoamento: 2DH

Simulação: Instante Inicial (s) 0,0000 | Instante Final (s) 2592000,0000 | Passo Tempo (s) 20,0000

Lançamento de Partículas: Tempo Inicial (s) 0,0000 | Tempo Final (s) 259200,0000

Grade de Sedimentação: Mínimo (372547,7499), Máximo (545384,9500), Espaçamento (2787,697), Subdivisões (63)

Com resuspensão: Número Prandtl (0,7000)

Sedimento: Velocidade Erosão (m/s) (1,0000E-05), Massa Específica (2500,0000)

Porosidade (0,4000) | Erosão Mínima (m) (5,0000E-05)

Tensão Crítica N/m² (0,2000) | Vel. Sedimentação (m/s) (1,0000E-05)

Subdiretório de Resultados: ML156709606

**ANEXO 6 - Imagem da tela do modelo de transporte do SisBaHiA®, com os parâmetros da fonte.**

Fonte ? X

Número	Forma da Região Fonte	
1	<input type="radio"/> Elíptica	<input checked="" type="radio"/> Retangular
Valor Condicionante	Posição do Centro da Região Fonte	
1,0000E-03	Coordenada X	Coordenada Y
Tolerância (t%)	397447,6160	6448549,4200
25	Profundidade	
Vel. Sedimenta. (m/s)	1,0000	
0,0000E+00		
Dimensões da Região Fonte		
Comprimento (m)	Largura (m)	Ângulo com X
294,0000	32,2000	-140,0000
<input type="checkbox"/> Espessura da coluna de água local		Espessura Definida
		3,0000
Lançamento de Partículas		
Começo (s)	Fim (s)	
0,0000	259200,0000	
Vazão Efluente	Concentr. Efluente	Partículas/DT
8,0000E+02	1,000E+02	2