

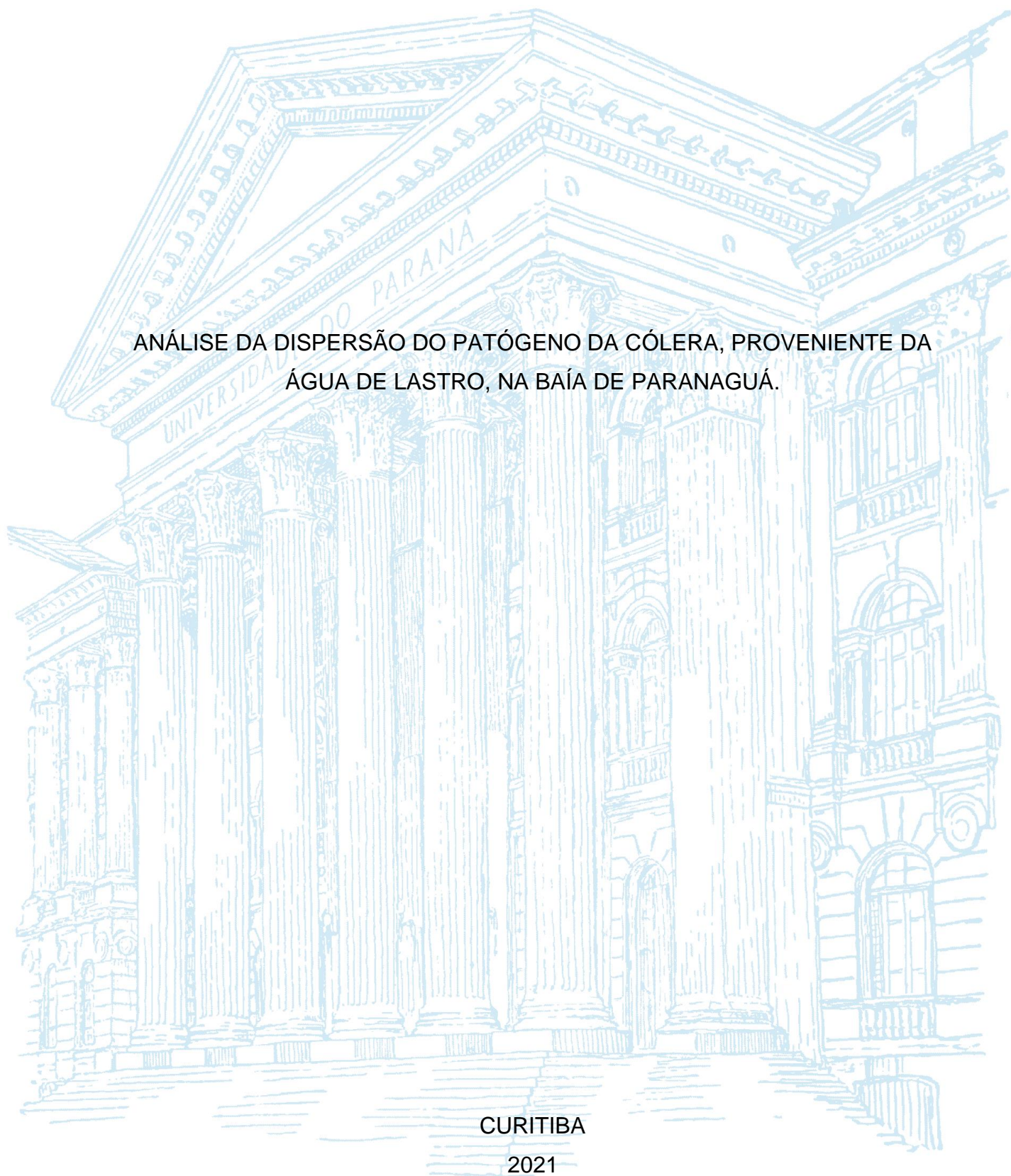
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BEATRIZ SILVESTRE PUCHALSKI

ANÁLISE DA DISPERSÃO DO PATÓGENO DA CÓLERA, PROVENIENTE DA  
ÁGUA DE LASTRO, NA BAÍA DE PARANAGUÁ.

CURITIBA

2021



BEATRIZ SILVESTRE PUCHALSKI

ANÁLISE DA DISPERSÃO DO PATÓGENO DA CÓLERA, PROVENIENTE DA  
ÁGUA DE LASTRO, NA BAÍA DE PARANAGUÁ.

TCC apresentada ao curso de 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 Nobrega da Cunha  
Coorientador(a): Prof.(a). Dr. Jean Ricardo Simões Vitule

CURITIBA

2021




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

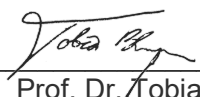
## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

BEATRIZ SILVESTRE PUCHALSKI

### ANÁLISE DA DISPERSÃO DO PATÓGENO DA CÓLERA, PROVENIENTE DA ÁGUA DE LASTRO, NA BAÍA DE PARANAGUÁ

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:

Orientadora:   
Prof. Dra. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha.  
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Federal do Paraná

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

Membro 2:   
Prof. Dr Renato Castiglia Feitosa  
Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental/ENSP-FIOCRUZ

Curitiba, 13 de dezembro de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Eu gostaria de agradecer:

Aos meus pais e avós, especialmente minha mãe, que sempre me incentivaram a estudar e me apoiaram durante toda a minha formação. A minha irmã e filosofa, Thaís, que me deu pitacos e cafés durante todo o processo. Aos meus amigos, especialmente aos da faculdade, que por meses só ouviram falar deste trabalho e me apoiaram incondicionalmente. Ao meu namorado, que mesmo em um fuso horário diferente me apoiou e torce pelas minhas conquistas. A minha professora orientadora Cynara, por todas as conversas, correções, paciência, aulas sobre o SisBaHiA e motivação. Ao meu professor coorientador Jean, por todos os artigos e por acreditar na minha proposta de projeto. Aos demais professores de engenharia ambiental pela partilha de conhecimento durante todos estes anos. A minha professora e amiga Thaís Cristine, pelas sugestões e todo o conhecimento compartilhado. Ao professor Henry Spach e aos demais profissionais que me ajudaram na busca pelos dados do rio Guaraguaçu. A APPA e ao SIMEPAR pelos dados disponibilizados, os quais foram fundamentais para a elaboração deste trabalho. E por fim, as duas doses de vacina que tomei que ajudaram a vislumbrar esperança em tempos tão difíceis de pandemia.

**Art. 225.** Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. (BRASIL, [2021]).

## RESUMO

Existe um perigo iminente que se esconde nos mares: a água de lastro. Água de lastro é a água que fica enclausurada nos tanques de embarcações cargueiras cuja função é garantir a estabilidade e manter as turbinas submersas mesmo com pouca carga. A água de lastro pode conter diversos microrganismos em seu interior, os quais podem ser carregados de uma região a outra causando danos ambientais, econômicos e sanitários. A bactéria *vibrio cholerae*, responsável pela doença da cólera, é um dos patógenos que foram encontrados nos lastros de embarcações pelo mundo. No ano de 1999, acredita-se que o surto de cólera que ocorreu na cidade de Paranaguá foi proveniente da água de lastro. Este trabalho utilizou a ferramenta computacional SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental para simular diferentes cenários de descarte de água de lastro no interior da Baía de Paranaguá, usando o patógeno *vibrio cholerae* como indicador. Foram utilizados o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte Lagrangeano, para simular a dispersão deste descarte com a bactéria. Como resultado foi observado a vulnerabilidade da região dado que o descarte no seu interior foi capaz de se dispersar por toda a baía. Não foram encontradas variações significativas em relação à dispersão do patógeno quando comparado aos períodos de verão e inverno. O lançamento realizado no porto de Paranaguá atingiu nas simulações as duas margens do estuário, no entanto não foi capaz de adentrar pontos importantes de abastecimento público como o alto rio Guaraguaçu. Neste modelo, mesmo com parâmetros e simulações relativamente simples, demonstra uma necessidade de maior cautela e de maiores monitoramentos e análises de risco para a região, visto que isso evitaria novos eventos epidêmicos na região e adjacências.

Palavras-chave: Água de lastro. Modelagem hidrodinâmica. *Vibrio Cholerae*. Baía de Paranaguá. SisBaHiA.

## ABSTRACT

There is an imminent danger that hides into the seas: the ballast water. Ballast water is the water enclosed into the tanks of cargo ships, whose function is to ensure stability and keep the turbines submerged even when the load is low. This water can contain several microorganisms, which can be carried from one region to another causing environmental, economic and sanitary damage. The bacteria *vibrio cholerae*, responsible for the cholera disease, is one of the pathogens found in the ballast of ships around the world. It is believed that the cholera outbreak that occurred in the city of Paranaguá, in 1999, came from ballast water. The current work used the computational tool SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, to simulate a ballast water discharge inside the Paranaguá Bay, using the pathogen *vibrio cholerae* as an indicator. The hydrodynamic model and the Lagrangian transport model were used to simulate the discharge. As a result, the vulnerability of the region was observed as an interior disposal was able to spread throughout the entire bay. No significant variations were found in relation to the spread of the pathogen when the summer and winter periods were compared. The launch was carried out at the port of Paranaguá and, in the simulations, reached both banks of the estuary, however the disposal was not able to enter important points of public water supply such as the upper Guaraguaçu river. Even with relatively simple parameters and simulations, this model could demonstrate a need for greater caution and greater monitoring and risk analysis for the region studied, as this would avoid new epidemic events in the region and its surroundings.

Keywords: Ballast water. Hydrodynamic modeling. *Vibrio Cholerae*. Paranaguá bay. SisBaHiA.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	2
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA .....	3
2.2 ÁGUA DE LASTRO .....	3
2.2.1 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL.....	5
2.2.2 LEGISLAÇÃO NACIONAL .....	7
2.3 PATÓGENOS NA ÁGUA DE LASTRO .....	9
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>12</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.2 SISBAHIA - SISTEMA DE MODELOS COMPUTACIONAIS .....	18
3.2.1 MODELO HIDRODINÂMICO .....	19
3.2.2 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO.....	19
3.3 AGUÁ DE LASTRO NO PORTO DE PARANAGUÁ .....	21
3.4 PATÓGENO: <i>VIBRIO CHOLERAE</i> .....	24
3.4.1 DECAIMENTO DO PATÓGENO.....	26
3.5 DADOS DE ENTRADA DO MODELO.....	27
3.5.1 DOMÍNIO DO MODELO.....	28
3.5.2 MODELO HIDRODINÂMICO .....	30
3.5.2.1 MODELO DE TRANSPORTE DE SAL .....	37
3.5.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO DO SISBAHIA .....	38
3.6 CENÁRIOS.....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
4.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	42
4.2 SALINIDADE .....	45
4.3 DISPERSÃO DA ÁGUA DE LASTRO .....	47
4.3.1 GRUPO A – VARIAÇÃO NO T90.....	47
4.3.2 GRUPO B – VARIAÇÃO DO LOCAL DA FONTE DE LANÇAMENTO.....	50
4.3.3 GRUPO C – VARIAÇÃO SAZONAL .....	51

4.3.4 GRUPO D – VARIAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES .....	52
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>57</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	57
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A baía de Paranaguá está localizada no Complexo Estuarino de Paranaguá - CEP, na região Sul do Brasil. Esta baía faz parte da maior área de preservação da Floresta Atlântica no território brasileiro, a qual abriga uma enorme biodiversidade (Estades, 2003; SECULTUR, 2021; Tabarelli et al, 2005) e, a presença dos portos de Paranaguá e de Antonina, torna este complexo relevante economicamente. Estes portos são essenciais para o escoamento da produção agrícola e industrial brasileira, pois recebem cargas de todas as regiões do país e de diversos países (APPA, 2021).

O grande fluxo de embarcações de vários países no porto de Paranaguá pode ocasionar problemas sanitários. Em 1999, a cidade de Paranaguá passou por um surto de cólera e acredita-se que foi decorrente do descarte incorreto da água de lastro de navios na região do porto de Paranaguá (ANVISA, 2003). A liberação de água de lastro também pode ser a responsável pelo número crescente de introduções de espécies potenciais invasoras no rio Guaraguaçu, um dos principais afluentes da baía de Paranaguá (Faria et al, 2021).

A água de lastro é a água que fica alocada nos tanques dos navios cargueiros cuja a função é aumentar ou diminuir o calado dos navios durante as operações portuárias garantindo a segurança da embarcação na navegação oceânica (Castro et al, 2017). Esta água pode ser transportada por longas distâncias e carregar diversos microrganismos, os quais podem sobreviver mesmo depois de longas viagens (Grob & Pollet, 2016; Mccarthy & Khambaty, 1994; Miller et al, 2011; Wang et al, 2020). Caso estes microrganismos sobrevivam ao deslastro, poderão introduzir uma espécie exótica invasora nesta região (Burkholder et al, 2007; Drake et al, 2009; Ruiz et al, 1997), e ainda, causar doenças por meio da superação das defesas de um hospedeiro.

Para analisar a dispersão da água de lastro na baía de Paranaguá é necessário um entendimento da circulação hidrodinâmica do local. Para simular a circulação é possível recorrer a modelagem computacional. Neste contexto, a ferramenta computacional SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental pode facilitar o entendimento sobre os processos de dispersão deste perigoso patógeno na região. O SisBaHiA possui um conjunto de modelos, entre eles o de

circulação hidrodinâmica e o de transporte Lagrangeano, os quais conseguem simular o descarte de um efluente lançado dentro de um corpo hídrico.

O presente trabalho simulou a dispersão da água de lastro na baía de Paranaguá, supondo a presença de propágulos de cólera (*vibrio cholerae*) na água de lastro e analisou sua dispersão. A presença do propágulos de cólera na água sofre influência da temperatura da água, da salinidade e da radiação, sendo a salinidade um dos principais fatores que influenciam a persistência do vibrião colérico. Neste contexto, a salinidade também foi simulada, juntamente com a hidrodinâmica, para um melhor entendimento da persistência do vibrião colérico no CEP.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é simular a dispersão do patógeno da cólera, proveniente do descarte da água de lastro, na Baía de Paranaguá, utilizando como ferramenta computacional o SisBaHiA®.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Tratar os dados existentes para implantação e desenvolvimento dos modelos;
- Implementar um modelo de circulação hidrodinâmica para a baía de Paranaguá;
- Implementar o modelo de transporte Lagrangeano na baía de Paranaguá;
- Simular diferentes pontos de descarte de água de lastro;
- Simular a intrusão salina no rio Guaraguaçu;
- Verificar a dispersão do patógeno da cólera na baía de Paranaguá.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA

As doenças de veiculação hídrica decorrem da presença de microrganismos patogênicos na água. Quando um ser humano entra em contato com uma água contaminada pelos patógenos, ele pode estar colocando sua saúde em risco.

Para Knap et al. (2002), entre os indivíduos expostos a águas marinhas contaminadas, o número de infecções tem se elevado, incluindo infecção gastrointestinal, dermatológica, respiratória, ocular, auricular e nasal, afetando principalmente crianças e pessoas idosas, que possuem maior risco às infecções.

De acordo com a Resolução nº 357, há dois tipos de contatos do indivíduo com um corpo hídrico: o contato primário e o contato secundário. A recreação de contato primário é aquela em que o contato é direto e prolongado com a água (tais como natação, mergulho, esqui-aquático) quando a possibilidade do banhista ingerir água é elevada; já a recreação de contato secundário refere-se àquela associada a atividades em que o contato com a água é esporádico ou acidental e a possibilidade de ingerir água é pequena, como na pesca e na navegação (tais como iatismo, por exemplo).

Além das formas de contato explicitadas pela Resolução nº357, ainda é possível a contaminação pelo contato dérmico, como o contato de uma ferida exposta com a água contaminada pelos patógenos. A ingestão de alimentos de origem marinha contaminados também pode ser uma forma de contato com os patógenos.

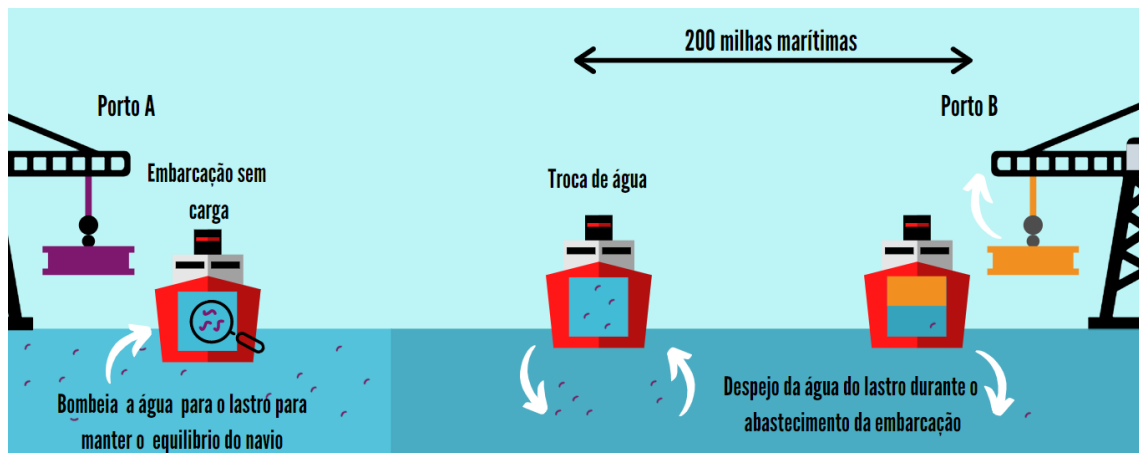
### 2.2 ÁGUA DE LASTRO

De acordo com Silva & Moreira (2019), o lastro é basicamente o peso colocado a bordo de uma embarcação para manter a estabilidade. Não é considerada uma carga e não tem valor comercial, sua necessidade é para a segurança do navio. Quando a embarcação está leve e não é atingida a estabilidade de flutuação ou as hélices propulsoras não ficam submersas, necessita-se incorporar temporariamente um peso externo.

Inicialmente uma embarcação descarrega a sua carga em um porto A. Essa retirada de peso desloca o centro de massa da embarcação gerando uma instabilidade física. Para retornar ao equilíbrio é bombeada água para o lastro do navio. Em seguida

a embarcação segue em direção ao seu destino, com a água do porto A enclausurada. Antes de atracar em um porto B é necessário trocar a água de lastro a no mínimo 200 milhas da costa e pelo menos 200 metros de profundidade. Por fim, ocorre o despejo da água de lastro durante o abastecimento da embarcação. Na FIGURA 1 é apresentada, esquematicamente, como funciona a troca da água de lastro.

FIGURA 1 – MODELO ESQUEMÁTICO DA TROCA DA ÁGUA DO LASTRO



FONTE: Adaptada de PROBIO & UnB (2016) .

Durante séculos foram utilizados rochas e outros materiais pesados como lastro, no entanto este processo demandava muito trabalho manual e ocasionava o transporte indesejado de moluscos, artrópodes e plantas pelo mundo (Carlton, 2001). A partir do século 20, a água passou a ser utilizada como lastro devido a sua larga disponibilidade e pela facilidade de utilização nos navios (NCR, 1999). No entanto, juntamente com esta água, podem ser transportados diversos microrganismos exóticos. Entre eles, constam algas, bactérias, vírus, micróbios, pequenos invertebrados, ovos, cistos e larvas de várias espécies e etc.

Alguns países exigem o tratamento da água de lastro antes do despejo, como a Alemanha, Canadá e Estados Unidos (Werschkun et al, 2014). No entanto, como não há um tratamento único que remova todos os microrganismos da água de lastro tal processo de tratamento pode ser oneroso e demorado (Tsolaki & Diamadopoulou, 2010).

A presença desses microrganismos patogênicos pode causar problemas econômicos, ecossistêmicos e de saúde, tanto animal quanto humana. Durante o processo de transporte, esses patógenos podem sobreviver e ainda se estabelecer no ambiente hospedeiro, causando uma bioinvasão (Pereira, 2018a). A bioinvasão, é o

efeito de um ou mais organismos, que invadem e se estabelecem em ambientes onde não há registros anteriores para a espécie. Há duas formas de invasão: as expansões e as introduções. A expansão ocorre devido a mecanismos naturais, já as introduções ocorrem devido às atividades antrópicas, como no caso da água de lastro (Souza, 2010).

### 2.2.1 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

Os problemas decorrentes da água de lastro são de escala global, portanto, é necessário um esforço conjunto para criar diretrizes e controles do descarte dessa água em qualquer lugar do mundo.

Em 1973, ocorreu uma convenção internacional dedicada à prevenção da poluição do meio marinho por navios, a MARPOL, adotada pela Organização Marítima Internacional (IMO), entidade vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU). Posteriormente atualizada, passou a ser conhecida como MARPOL 73/78. No Brasil, passou a fazer parte do ordenamento jurídico a partir de 1998.

Essa convenção é composta por 6 anexos técnicos, sendo a água de lastro apresentada no Anexo II – Regras para o Controle da Poluição por Substâncias Líquidas Nocivas a Granel (MARPOL ,1999).

A IMO no ano de 2004 criou a Convenção Internacional para o Controle e Gerenciamento da Água de Lastro e Sedimentos dos Navios (*International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments*) (BWMC). Essa convenção exige que todos os navios implementem um plano de gerenciamento de água de lastro; os navios devem levar um livro de registro da água de lastro e são obrigados a executar procedimentos de gerenciamento de água de lastro de acordo com um determinado padrão IMO (2004).

De acordo com a BWMC, todo navio deve cumprir a troca da água de lastro considerando:

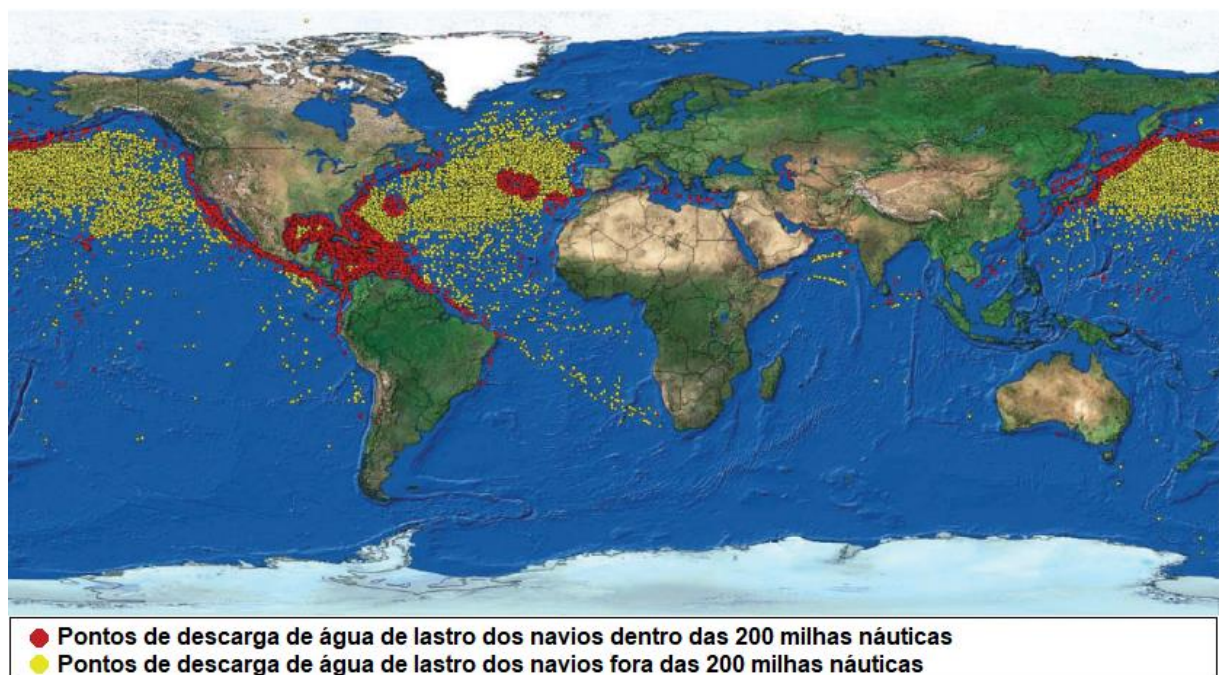
- Sempre que possível, deve se realizar a troca da água de lastro a pelo menos 200 milhas náuticas (370,4 km) da terra mais próxima e em águas com pelo menos 200 metros de profundidade levando em conta as Diretrizes desenvolvidas pela Organização;
- Nos casos em que o navio não puder realizar troca da Água de Lastro, deve buscar realizá-la o mais distante possível da terra mais próxima, e

em todos os casos à pelo menos 50 milhas náuticas (92,6 km) da terra mais próxima e em águas com pelo menos 200 metros de profundidade.

De acordo com Pereira (2018a), estes parâmetros foram implementados, pois na região portuária a profundidade é reduzida. Caso o navio despeje a água de lastro dentro das 200 milhas estará aumentado a probabilidade de uma bioinvasão.

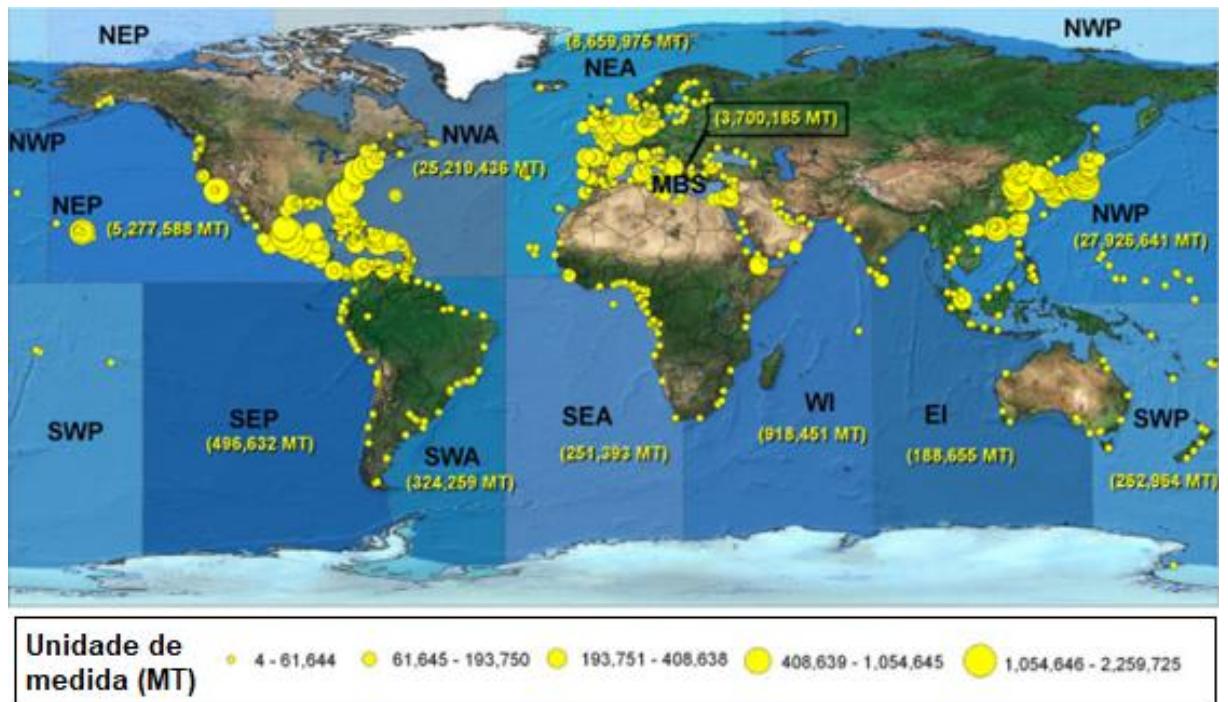
Miller et al. (2011) realizaram um estudo nos Estados Unidos, analisando 53.503 relatórios de água de lastro de 2004 a 2005. Nesse período, cerca de 18.145 navios despejaram a água de lastro dentro das milhas náuticas, isto é aproximadamente 33,91% da frota, como é observável na FIGURA 2. Neste mesmo estudo foi analisado a quantidade de água de lastro descartada pela frota de navios estrangeiros e suas respectivas fontes, como pode ser observado na FIGURA 3. A unidade de medida utilizada é a *Mega Ton* (MT), que equivale a  $10^9$  kg.

FIGURA 2 – PONTOS ONDE OCORRERAM A DESCARGA DE ÁGUA DE LASTRO DE NAVIOS AMERICANOS NO PERÍODO DE 2004 A 2005.



FONTE: Miller et al. (2011)

FIGURA 3 – FONTE DOS NAVIOS ESTRANGEIROS E SUAS RESPECTIVAS MASSAS RELACIONADAS À ÁGUA DE LASTRO.



FONTE: Miller et al. (2011)

Este estudo reforça a necessidade que todos os países devem seguir as diretrizes e programas de monitoramento, pois os problemas gerados pela água de lastro são de escala global.

## 2.2.2 LEGISLAÇÃO NACIONAL

As regulamentações sobre a água de lastro no Brasil são descritas nas Normas da Autoridade Marítima (NORMAM); a NORMAM 04/DPC e a NORMAM 20/DPC são as que regulam sobre o descarte da água de lastro.

De acordo com a NORMAM-04/DPC, as águas sob jurisdição nacional compreendem a faixa de duzentas milhas marítimas contadas a partir da costa brasileira, acrescida das águas sobrejacentes à extensão da Plataforma Continental além das duzentas milhas marítimas, onde ela ocorrer (NORMAM-04, 2013).

Segundo a NORMAM-20 (2019), no Brasil foram identificados 3 três métodos para a realizar a troca da água de lastro no mar. São eles:

**Método Sequencial** - os tanques de lastro são esgotados e em seguida cheios novamente com água oceânica;

**Método do Fluxo Contínuo** - os tanques de lastro são simultaneamente cheios e esgotados, por meio do bombeamento de água oceânica;

**Método de Diluição Brasileiro** - ocorre o carregamento de água de lastro através do topo e, simultaneamente, a descarga dessa água pelo fundo do tanque, à mesma vazão, de tal forma que o nível de água no tanque de lastro seja controlado para ser mantido constante.

A troca da água de lastro deve atingir uma eficiência de, pelo menos, 95% de troca volumétrica. Navios utilizando o método do fluxo contínuo ou diluição devem bombear pelo menos três vezes o volume do tanque a fim de atingir a eficiência mínima desejada.

No Brasil, em abril do ano 2000, foi sancionada a LEI N° 9.966, que 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. Essa lei classifica as substâncias nocivas ou perigosas nas seguintes categorias:

I – Categoria A: alto risco tanto para a saúde humana como para o ecossistema aquático;

II – Categoria B: médio risco tanto para a saúde humana como para o ecossistema aquático;

III – Categoria C: risco moderado tanto para a saúde humana como para o ecossistema aquático;

IV – Categoria D: baixo risco tanto para a saúde humana como para o ecossistema aquático.

O artigo 15 proíbe a descarga em águas sob jurisdição nacional, de substâncias nocivas ou perigosas classificadas na categoria A, inclusive aquelas provisoriamente classificadas como tal, além de água de lastro, resíduos de lavagem de tanques ou outras misturas que contenham tais substâncias. A água adicionada ao tanque lavado em quantidade superior a cinco por cento do seu volume total só poderá ser descarregada se atendidas cumulativamente as seguintes condições:

1. A situação em que ocorrer o lançamento enquadre-se nos casos permitidos pela MARPOL 73/78;
2. O navio não se encontre dentro dos limites de área ecologicamente sensível;
3. Os procedimentos para descarga sejam devidamente aprovados pelo órgão ambiental competente.

Para quantidades inferiores a cinco por cento do seu volume total, é vedada a descarga de água subsequentemente adicionada ao tanque lavado.

O anexo II da MARPOL 73/78 (1999) preconiza que é permitido o descarte da água adicionada ao tanque lavado em quantidade superior a cinco por cento do seu volume total, quando esta descarga:

1. For necessária com a finalidade de assegurar a segurança do navio ou de salvar vidas humanas no mar ou
2. For decorrente de uma avaria sofrida pelo navio ou por seus equipamentos:
  - Desde que depois da ocorrência da avaria ou da descoberta da descarga tenham sido tomadas todas as precauções razoáveis com a finalidade de impedir ou minimizar a descarga;
  - Exceto se o armador ou o Comandante tiver agido com a intenção de causar a avaria, ou imprudentemente e ciente de que provavelmente ocorreria a avaria;
3. For aprovada pela Administração, quando estiver sendo realizada com a finalidade de combater determinados incidentes de poluição para minimizar os danos causados pela poluição.

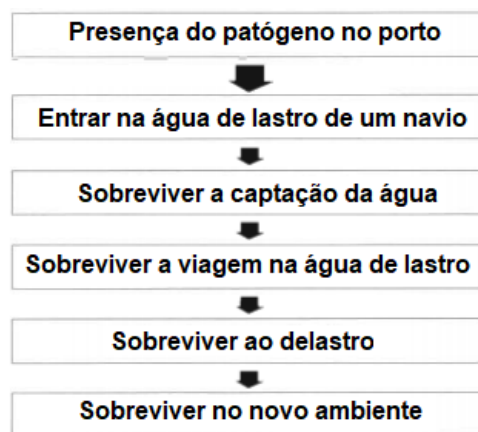
No entanto, segundo o artigo 21 da LEI N° 9.966, as circunstâncias em que a descarga, em águas sob jurisdição nacional, de óleo e substâncias nocivas ou perigosas, ou misturas que os contenham, de água de lastro e de outros resíduos poluentes for autorizada não desobrigam o responsável de reparar os danos causados ao meio ambiente e de indenizar as atividades econômicas e o patrimônio público e privado pelos prejuízos decorrentes dessa descarga.

### 2.3 PATÓGENOS NA ÁGUA DE LASTRO

A zona portuária constitui uma parte importante do sistema de transporte de cargas no Brasil, o modal marítimo é responsável por 95% da movimentação de cargas internacionais (Martins, 2013). Para Forshell & Wierup (2006), as atividades antrópicas desenvolvidas nas nesses locais têm promovido mudanças na vida marinha, além de afetar a qualidade da água. Isto impacta diretamente na vida das comunidades ribeirinhas e na água que é captada pelas embarcações no porto, o que resulta em um elevado risco de doenças de transmissão hídrica, prejudicando a saúde ambiental e pública.

Para um patógeno, proveniente da água de lastro, oferecer risco a saúde humana e ambiental, é necessário a ocorrência de algumas etapas. Inicialmente ocorre a presença do patógeno nas águas de um porto, devido ao despejo de esgoto ou alguma outra fonte contaminante. Em seguida, uma embarcação coleta essa água, juntamente com o contaminante, e armazena no seu lastro. Os patógenos sobrevivem a captação da água e a longa viagem da embarcação. Ao serem descarregados no próximo porto, caso eles conseguirem sobreviver durante o delastro, eles poderão se tornar um vetor exótico se conseguirem sobreviver no novo ambiente (Drake et al, 2009; Hall-spencer et al, 2017; Hallegraeff, 1998; Ruiz et al, 1997). Os fluxos das etapas descritas estão presentes na FIGURA 4.

FIGURA 4 – ETAPAS PARA UM PATÓGENO, PROVENIENTE DA ÁGUA DE LASTRO, OFERECER RISCO A SAÚDE HUMANA.



FONTE: Adaptada de Hallegraeff (1998).

Na TABELA 1 é exposto os principais organismos cuja a veiculação hídrica propicia a contaminação da população com doenças.

TABELA 1 – PRINCIPAIS DOENÇAS DE TRANSMISSÃO FECO-ORAL ASSOCIADAS A ÁGUA.

Organismo	Doença	Agente causal
Bactérias	Disenteria bacilar	<i>Shigella dysenteriae</i>
	Enterite por <i>Campylobacter</i>	<i>Campylobacter jejuni</i>
		<i>Campylobacter coli</i>
	Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>
	Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> - enteropatogênica
	Leptospirose	<i>Leptospira</i> spp.
	Febre paratifoides	<i>Salmonella</i> spp.
Febre tifoide		<i>Salmonella typhi</i>
Vírus	Hepatite Infecciosa	Vírus hepatite A
	Doenças respiratórias	Adenovírus - vários tipos
	Gastroenterite	Enterovírus, Norwalk, rotavírus
	Meningite	Enterovírus
	Poliomielite	Poliomyelitis vírus
Protozoários	Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>
	Giardiase	<i>Giardia lamblia</i>
	Criptosporidiose Balantidíase	<i>Cryptosporidium Balantidium coli</i>
Helmintos	Ascariíase	<i>Ascaris lumbricoides</i>
	Tricuríase	<i>Trichuris trichiura</i>

FONTE: Adaptada de Sperling (1996).

A detecção desses patógenos em tanques de lastro indica um risco potencial para o meio ambiente onde a água de lastro será despejada. Na China, em um estudo realizado por Wang et al. (2020), mostrou a presença de alguns desses patógenos. Durante o período de 2015-2016 foram coletadas água de lastro com o objetivo de analisar as bactérias presentes. O filo de bactérias Proteobacteria foi o filo dominante, compreendendo mais de 50% das unidades taxonômicas operacionais em quase todas as embarcações, seguido por *Bacteroidetes* (12,08%), Actinobacteria (4,86%) Planctomycetes (3,24%) e Cyanobacteria (1,95%). Foi constatada uma variação na abundância relativa do gênero *Vibrio* de 0,003% a 24,88% entre as diferentes embarcações.

Já no Brasil, um estudo pioneiro elaborado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA, no ano de 2003, analisou a água de lastro em navios atracados em nove portos brasileiros, entre eles o Porto de Paranaguá, para identificar e caracterizar agentes patogênicos presentes (ANVISA, 2003). Foi verificado que em 99 amostras coletadas, 71 % das amostras de água de lastro possuíam aproximadamente  $10^3$  a  $10^6$  UFC (Unidade Formadora de Colônia) /L

(Litro), as seguintes bactérias: *Escherichia coli* (5%), *Clostridium perfringens* (15%), *Vibrio cholerae* (7%).

Estes patógenos possuem diferentes características biológicas as quais podem garantir ou não sua sobrevivência no novo ambiente. Para descobrir o tempo que um patógeno sobrevive no meio aquático é utilizado o parâmetro taxa de decaimento. Quanto maior a permanência desses patógenos na água, maior a probabilidade de contágio de seres humanos.

De acordo com Feitosa & Rosman (2007), os principais fatores que interferem na taxa de decaimento bacteriano em águas marinhas são as variações de temperatura, de salinidade, de radiação solar e de nutrientes. A água do lastro segue enclausurada de um porto ao outro, sem contato direto com a radiação solar, o que pode prolongar o tempo de decaimento dos patógenos.

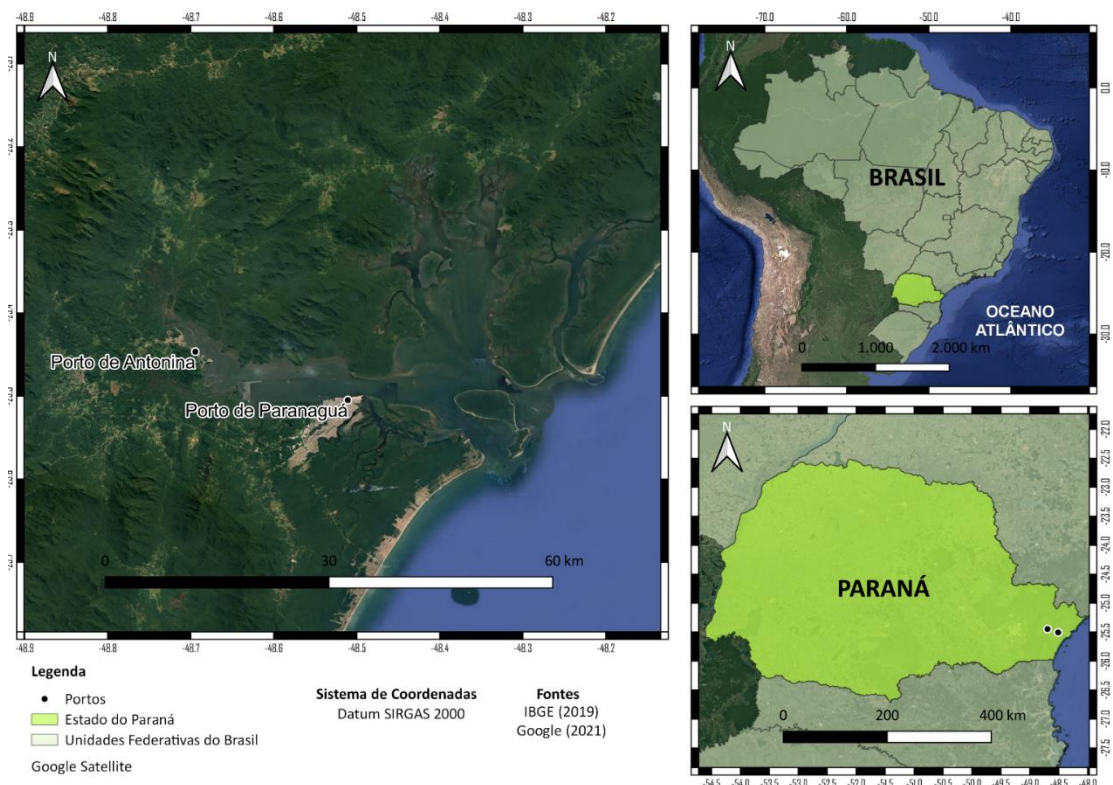
Conforme Tortora et al. (2017), quando uma célula se encontra em um ambiente cuja a concentração de sais é superior à concentração no seu interior, a água passa de dentro para fora da célula, através da membrana plasmática. Esse fenômeno inibe o crescimento microbiano devido à plasmólise, efeito da diminuição da membrana plasmática da célula. Devido a esse mecanismo, em ambientes com maior concentração de sais, o decaimento bacteriano é maior.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

A baía de Paranaguá está localizada no Complexo Estuarino de Paranaguá – CEP, na região Sul do Brasil (FIGURA 5). Esta baía é a maior do Estado do Paraná e faz parte da maior área de preservação da Floresta Atlântica no território brasileiro, a qual abriga uma enorme diversidade de flora e fauna (Estades, 2003; SECULTUR, 2021; Tabarelli et al, 2005). A baía de Paranaguá também abriga extensas áreas de manguezais (SECULTUR, 2021).

FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BAÍA DE PARANAGUÁ.



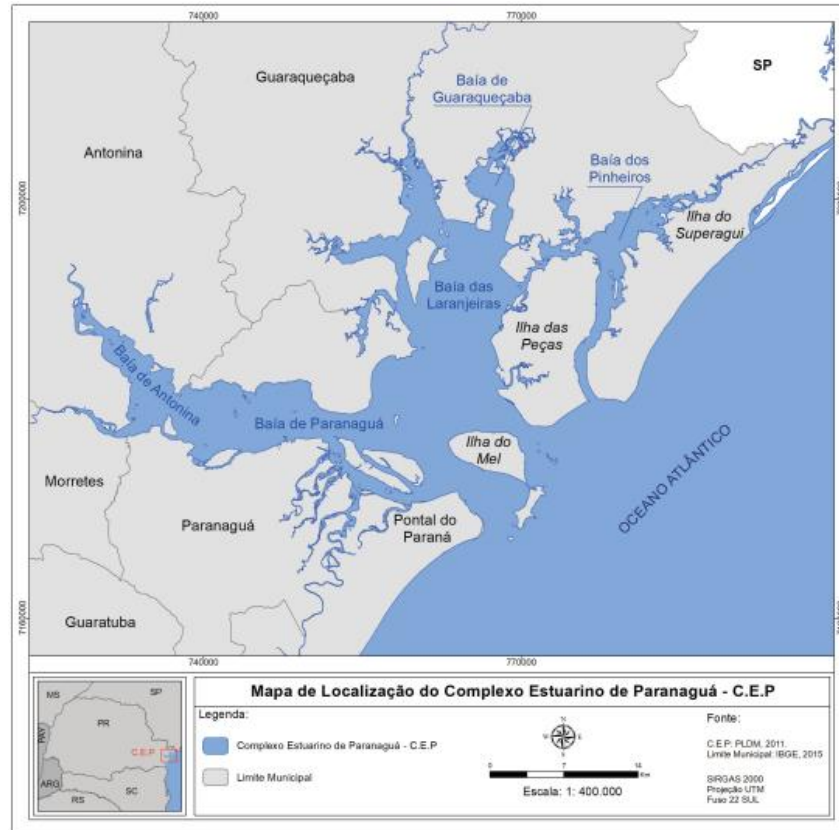
FONTE: Elaborada pela autora.

O CEP é uma região de grande importância econômica, devido a presença dos portos de Paranaguá e o de Antonina (FIGURA 5), essenciais para o escoamento da produção agrícola e industrial brasileira, pois recebem cargas de todas as regiões do país. O porto de Paranaguá é o segundo maior porto público do Brasil, estabelecendo uma corrente de comércio com diversos países. A quantidade de cargas movimentadas anualmente pelos dois portos juntos ultrapassa 57 milhões de toneladas. As exportações têm como principais destinos a China, Holanda, Coreia do Sul, Hong Kong e Japão. Além das exportações, os portos do Paraná também são importantes portas de entrada dos produtos estrangeiros para o Brasil. As principais origens das cargas recebidas são China, Estados Unidos, Rússia, Alemanha e Argentina (APPA, 2021).

A área superficial do CEP é de 612 km<sup>2</sup> e abrange cinco municípios: Antonina, Guaraqueçaba, Morretes, Paranaguá e Pontal do Paraná (Petry Dalazen, 2017). Esse estuário é composto por dois eixos principais de orientação: o primeiro, denominado baía de Paranaguá, com 56 km de extensão no eixo leste oeste; e o segundo, denominado baía das Laranjeiras, com 30 km de extensão no eixo norte

sul (Lamour et al, 2004); detalhe da localização do Complexo Estuarino de Paranaguá pode ser observado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ



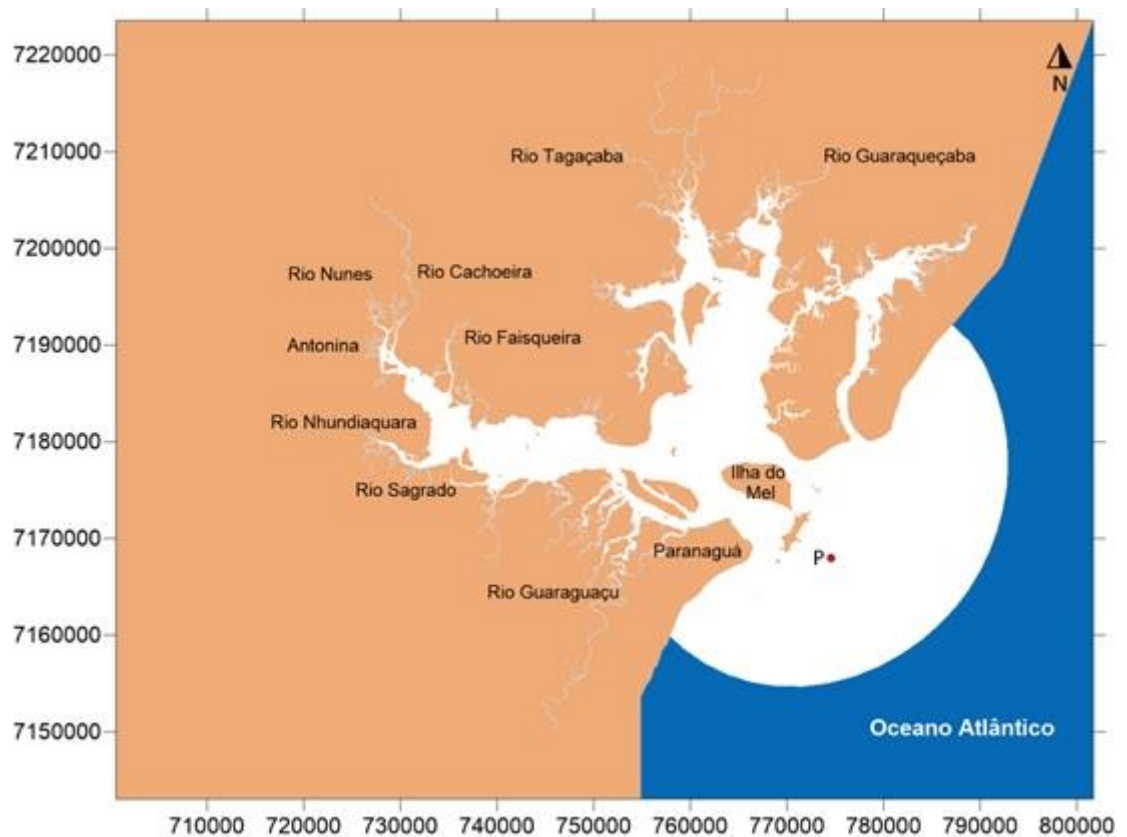
FONTE: Petry Dalazen (2017).

Segundo a classificação de Köppen, o clima nas áreas de planície da região da baía de Paranaguá, até aproximadamente 700 metros de altitude na Serra do Mar, é do tipo Clima Subtropical Úmido, mesotérmico, com média de temperatura no mensal superior a 22°C no mês mais quente, e no média mensal inferior a 18°C no mês mais frio, com tendência de concentrar as chuvas nos meses de verão, porém sem estação seca definida (Bigarella & Klein, 1978).

A temperatura da água e a salinidade na região externa do CEP foram obtidas através dos valores disponíveis na plataforma do modelo HYCOM - *Hybrid Coordinate Ocean Model* (Wallcraft et al., 2009). A FIGURA 10 mostra a localização do ponto onde os valores foram obtidos. O HYCOM é um modelo de circulação global do oceano, que fornece dados de condições de contorno de modelos costeiros e para modelos de previsão de atmosfera oceânica global acoplada. No período do verão, nota-se valores mais elevados de temperatura da água além de

uma leve estratificação térmica. No inverno essa região possui valores temperatura de água menores, com a coluna d'água completamente misturada. Durante o ano, a temperatura da água do mar variou de 18,01°C – 30,49°C, já a salinidade apresentou pouca variação durante o ano. As diferenças entre a salinidade na superfície e no fundo variaram menos de 3% durante o ano. O valor de salinidade se encontra na faixa de 35,19 – 36,06 psu.

FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO P, ONDE FOI OBTIDO OS DADOS TEMPERATURA DA ÁGUA E SALINIDADE PELO HYCOM



FONTE: Elaborada pela autora.

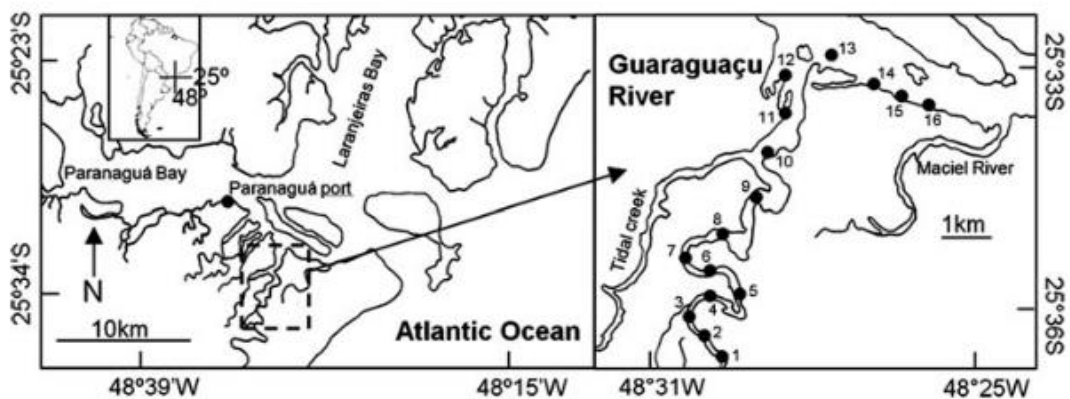
Mello et al. (2017) realizaram uma análise das variáveis meteorológicas no período de 1961 até 2016, na cidade de Paranaguá e constataram que a direção predominante dos ventos é de quadrante Sul durante quase todas as estações de ano, com exceção do verão, que os ventos de quadrantes Leste são mais frequentes.

Dentre os rios que compõe a bacia hidrográfica da baía, destaca-se a importância do rio Guaraguaçu, o maior rio da planície costeira do Paraná, que

conecta a baía com a Estação Ecológica do Guaraguaçu (Cavallini et al, 2020). Além da importância ambiental, o abastecimento de água de parte da população do litoral paranaense depende do Guaraguaçu, pois ele abastece o município de Pontal do Paraná, que abrange 48 balneários (Gazola, 2008). Este rio tem um número crescente de introduções de espécies exóticas e potenciais invasoras, as quais podem estar relacionadas à liberação de água de lastro (Faria et al, 2021).

Feltrin et al (2011) mostraram medições de salinidade em um trecho do rio Guaraguaçu (Figura 8). As medições foram realizadas durante a manhã, uma vez por mês, entre junho de 2005 até maio de 2006, no período de maré de quadratura. A Figura 9 mostra a faixa de salinidade durante este período para os pontos P\_01, P\_05, P\_09 e P\_13 o qual indica o decréscimo da salinidade conforme se adentra o rio.

FIGURA 8 – PONTOS DE AMOSTRAGEM DA SALINIDADE AO LONGO DO GUARAGUAÇU.

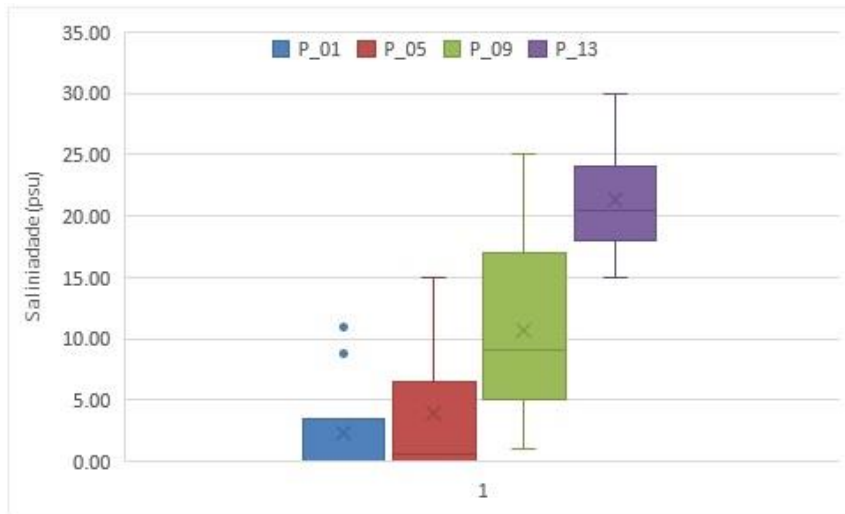


FONTE: Feltrin et al (2011).

A Figura 10 mostra perfis longitudinais de salinidade ao longo do rio Guaraguaçu para o mês de janeiro e o mês de junho. Nota-se valores mais elevados no período do inverno que no período do verão, possivelmente devido ao menor aporte fluvial no inverno. No entanto, os dois perfis são semelhantes, conforme se adentra o rio, a salinidade decresce.

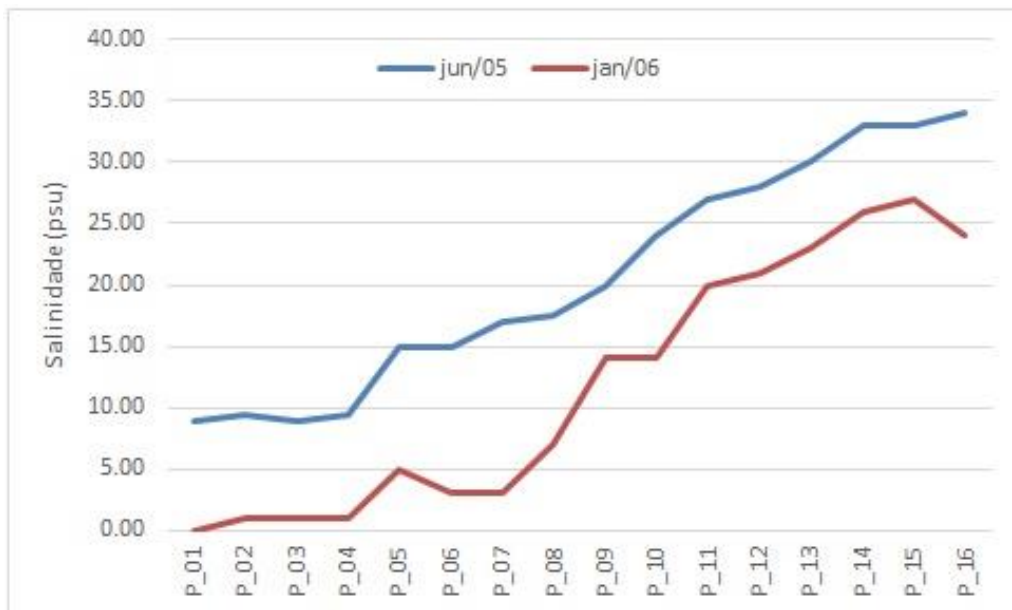
A região de Paranaguá, no ano de 1999, passou por um surto de cólera quando 467 casos foram confirmados. De acordo com a ANVISA (2003), existem evidências que mostram que os primeiros casos de cólera aconteceram na região dos portos, o que sugere que o surto pode ter sido provocado pela água de lastro de navios provenientes de áreas contaminadas pela cólera.

FIGURA 9 – VALORES DE SALINIDADE NO RIO GUARAGUAÇU ENTRE JUNHO DE 2005 E MAIO DE 2006.



FONTE: Adaptado de Feltrin et al (2011).

FIGURA 10 – VARIAÇÃO SAZONAL DA SALINIDADE NO RIO GUARAGUAÇU EM JUNHO DE 2005 E JANEIRO DE 2006.



Fonte: Adaptado de Feltrin et al (2011).

As principais atividades de lazer realizadas na região são: passeio de barco, pesca, caiaque, stand-up e jet-ski (SECULTUR, 2021). Todas essas atividades possuem contato primário ou secundário com a água do estuário.

### 3.2 SISBAHIA - SISTEMA DE MODELOS COMPUTACIONAIS <sup>1</sup>

Muitos trabalhos dedicados a estudos em estuários e baías baseiam-se na modelagem computacional e utilizam o SisBaHiA– Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. O SisBaHiA é um sistema de modelos computacionais registrado COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (Rosman, 2021). Este estudo utilizou o modelo hidrodinâmico bidimensional e o modelo de transporte Lagrangeano do SisBaHiA.

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 bidimensional (ROSMAN, 2019).

O modelo de transporte Lagrangeano é adequado para simular situações onde a região fonte possui dimensões diminutas em relação ao domínio de interesse, isto é, o domínio do modelo hidrodinâmico, ou quando as frentes de contaminação apresentam fortes gradientes de concentração como, por exemplo, descarte de fontes pontuais de água de lastro.

Muitos estudos sobre o transporte de plumas contaminantes em estuários e baías estão disponíveis, podendo ser destacados: *i)* Feitosa & Rosman (2007), que utilizaram os modelo de circulação de campo próximo com o modelo de campo afastado acoplados, com o objetivo de avaliar a concentração de coliformes fecais em águas próximas aos emissários submarinos da região metropolitana de Salvador-BA. Com os resultados da modelagem foi possível analisar a concentração de coliformes fecais, ressaltando a importância da radiação solar como uma das responsáveis pelo decaimento de bactérias em ambiente marinho; *ii)* Costa & Cunha (2018), em uma aplicação do SisBaHiA para a baía de Guaratuba, analisaram as concentrações de *Escherichia Coli* e relacionaram com a balneabilidade da região.

---

<sup>1</sup> Texto adaptado do Referencial Teórico do SisBaHiA (ROSMAN, 2021)

As plumas de concentração de *Escherichia Coli* foram maiores no verão devido a um aumento de quase 20 vezes da população nesse período.

### 3.2.1 MODELO HIDRODINÂMICO

O SisBaHiA possui dois modelos de circulação hidrodinâmica: o bidimensional em planta (2DH) e o tridimensional (3D). Nesse estudo foi utilizado o modelo 2DH, que calcula a posição da superfície livre e as componentes da velocidade integradas na direção vertical ( $U$ ,  $V$ ).

O contorno do domínio pode ser aberto (fronteira aberta) ou fechado (contorno de terra). As condições iniciais e de contorno consistentes garantem a uma solução única para as equações de águas rasas, as quais constituem o modelo matemático hidrodinâmico.

Nos contornos abertos, a elevação da superfície livre é o principal forçante. O fluxo de água calculado pelo modelo pode atravessar a fronteira aberta, contanto que a elevação de nível de água acate as condições previamente definidas.

Para os contornos terrestres, é imposto valores de vazões ou de velocidades para cada nó ao longo de contorno de terra. Somente fluxos de água previamente determinados podem atravessar estes contornos, já a altura da elevação da superfície livre é calculada pelo modelo.

### 3.2.2 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO

Conhecido o padrão de circulação hidrodinâmico é possível simular a trajetória da água de lastro após o descarte, usando o modelo de transporte Lagrangeano do SisBaHiA. O patógeno indicador da água de lastro, o *vibrio cholerae*, foi considerado um contaminante passivo, ou seja, não altera a velocidade do meio, portanto seu transporte é dado a partir do campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico.

O modelo de transporte Lagrangeano é utilizado para simular transportes advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 3D ou 2DH. É possível incorporar diversos tipos de reações cinéticas de decaimento ou produção do contaminante modelado. Para este estudo foi utilizado o modelo 2DH e foi incorporado o decaimento do contaminante.

No modelo de transporte Lagrangeano, a fonte de contaminante é representada por uma quantidade finita de partículas lançadas, em intervalos periódicos, na região da fonte. Estas partículas são distribuídas aleatoriamente na região fonte e seguem as correntes geradas pelo modelo hidrodinâmico.

As velocidades obtidas pelo modelo hidrodinâmico são utilizadas no modelo de transporte Lagrangeano. Esta aplicação é eficiente para situações onde a fonte contaminante é de pequena escala comparada ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes, como é o caso do descarte da água de lastro em relação a baía.

Feitosa & Rosman (2007) explicam que a mortalidade dos patógenos no ambiente marinho pode ser representada por meio do parâmetro  $T_{90}$ , que se refere ao tempo necessário para que aconteça uma redução de 90% da concentração inicial destes microrganismos, não considerando os efeitos de diluição e dispersão.

O parâmetro  $T_{90}$  pode ser determinado a partir da taxa de decaimento bacteriano ( $K_d$ ). Esse parâmetro geralmente é determinado em laboratório, em ambiente controlado. A relação entre as duas variáveis,  $T_{90}$  e  $K_d$ , é dada por:

$$\frac{c}{c_0} = \exp(-K_d t) \rightarrow 0,1 = \exp(-K_d T_{90}) \rightarrow K_d = -\frac{\ln(0,1)}{T_{90}} \quad (01)$$

Onde  $C$  é a concentração em um instante  $t$  e  $C_0$  é a concentração inicial.

Existem, basicamente, dois tipos de condições de contorno para o modelo de transporte Lagrangeano: contorno aberto e contorno fechado. Quando uma partícula atravessa um contorno aberto, ela sai do domínio. No contorno fechado pode ocorrer duas situações:

- a partícula que atinge o contorno fechado e retorna ao meio sem sofrer qualquer perda de massa;
- a partícula atinge o contorno fechado e retorna ao meio, mas tem uma parte de sua massa absorvida.

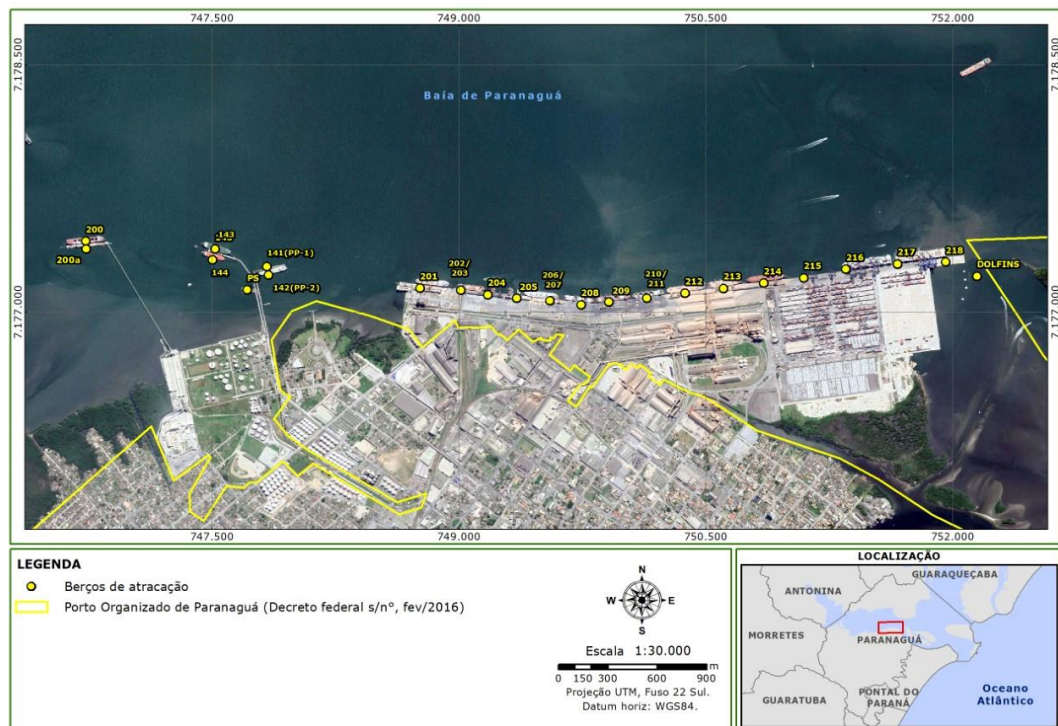
A fração absorvida é dada pelo coeficiente de absorção ao longo dos contornos fechados,  $C_A$ , com valores entre zero e um. Dado o objetivo de analisar a dispersão espacial do patógeno da cólera na baía de Paranaguá, foi definido um coeficiente de absorção igual a 1 nas fronteiras do domínio, isto é, quando uma

partícula atinge uma borda, ela ficará retida. Com esse mecanismo é possível observar os pontos de acúmulo do patógeno no domínio.

### 3.3 AGUÁ DE LASTRO NO PORTO DE PARANAGUÁ

A água de lastro deve ser lançada distante da costa, como predispõe a NORMAM (NORMAM-20 (2019)). No entanto, pode ocorrer situações, previstas na NORMAM, em que o lançamento da água de lastro pelos navios ocorre nas regiões dos berços de atracação dos portos. A FIGURA 11 mostra a localização dos berços de atracação do porto de Paranaguá, possíveis pontos de descarga da água de lastro das embarcações, fornecida pela Administração dos portos de Paranaguá e Antonina – APPA, que ainda forneceu dados referente a água de lastro presente nas embarcações do Porto de Paranaguá no período de 2016 até 2020.

FIGURA 11 – BERÇOS DE ATRAÇÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ



FONTE: APPA (2016).

A APPA monitora dados referente a água de lastro das embarcações que usam o Porto de Paranaguá, no período entre 2016 e 2020, e a origem das embarcações que atracam no porto. Estes dados foram sintetizados e são

mostrados na TABELA 2. Os dados mostram que a maioria das embarcações que chegam ao Porto de Paranaguá são de origem nacional, representando cerca de 36% do total. Devido as dimensões continentais do Brasil e a variedade de ecossistemas, a troca de água de lastro na navegação interior também pode introduzir espécies exóticas na região de Paranaguá (NORMAM-20, 2019).

Cerca de 28% das embarcações que atracam no porto de Paranaguá vem da Ásia, o comercio com este continente vem apresentando um crescimento expressivo neste período. Aproximadamente 6,75% destas embarcações provenientes da Ásia vieram de Bangladesh, que de acordo com Siddique et al (1991) é uma região endêmica da cólera. Hipoteticamente, se um navio sair de Bangladesh com o vibrião colérico na água lastro, e o vibrião resistir a viagem e for descartado próximo ao porto Paranaguá, seria possível a contaminação desta região.

TABELA 2 — NÚMERO DE EMBARCAÇÕES QUE CHEGARAM AO PORTO DE PARANAGUÁ POR SUA ORIGEM.

	2016	2017	2018	2019	2020
África	127	113	116	118	113
América Central	3	2	0	0	2
América do Norte	70	79	36	53	34
América do Sul	182	117	83	91	105
Ásia	236	297	319	296	331
Brasil	459	411	376	393	336
Europa	100	90	89	82	81
Oceania	2	2	3	5	4
<b>Total</b>	<b>1179</b>	<b>1111</b>	<b>1022</b>	<b>1038</b>	<b>1006</b>

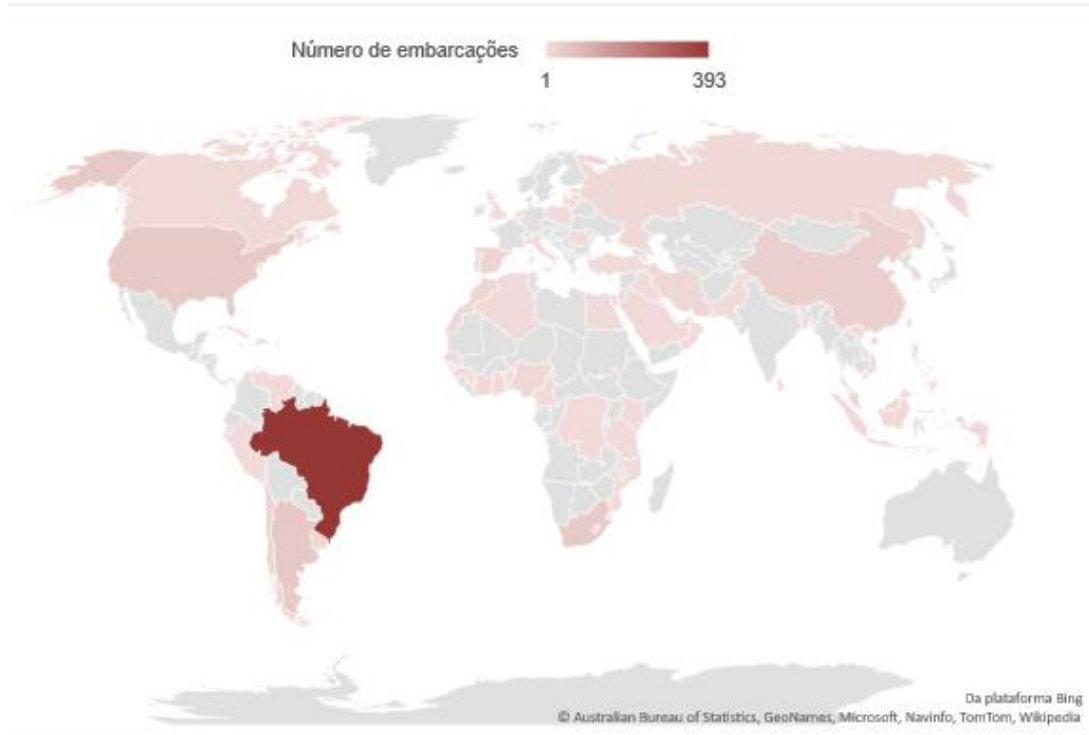
FONTE: Adaptada de APPA (2021).

Os dados das embarcações fornecidos pela APPA explicitam a globalidade do problema da água de lastro. Em 2019, atracaram no porto de Paranaguá embarcações de 70 países diferentes. A FIGURA 12 mostra a distribuição espacial da origem das embarcações que atracaram no Porto de Paranaguá em 2019.

A Tabela 3 Traz uma síntese quantitativa do volume de água de lastro presente nas embarcações. O ano de 2018 obteve o maior volume médio de água de lastro por embarcação: 17207m<sup>3</sup>, já o ano com a embarcação que transportou o

maior volume de água de lastro foi 2020. O período de janeiro de 2016 a outubro de 2017 não há dados referentes ao volume de água de lastro das embarcações.

FIGURA 12 – ORIGEM DAS EMBARCAÇÕES QUE CHEGARAM AO PORTO DE PARANAGUÁ NO ANO DE 2019.



FONTE: Adaptada de APPA (2021).

TABELA 3 — VOLUME TOTAL DE ÁGUA DE LASTRO A BORDO.

	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Volume máximo (m<sup>3</sup>)</b>	-	28705	37664	37411	214554
<b>Volume médio (m<sup>3</sup>)</b>	-	12094	17207	13945	15427

FONTE: Adaptada de APPA (2021).

Os agentes do porto de Paranaguá coletam amostras da água de lastro no interior das embarcações e utilizam um salinômetro para mensurar os níveis de salinidade. Com essa medida é possível averiguar se a troca da água foi realizada como predispõe a NORMAN-20. A TABELA 4 mostra a porcentagem de salinidade presente na água de lastro para o período de 2016 – 2020.

TABELA 4 — SALINIDADE DA ÁGUA DE LASTRO

	2016	2017	2018	2019	2020
Salinidade mínima (‰)	2,50	3,00	3,00	3,00	3,30
Salinidade máxima (‰)	4,10	4,00	4,00	3,90	3,70
Salinidade média (‰)	3,48	3,41	3,42	3,43	3,45

FONTE: Adaptada de APPA (2021).

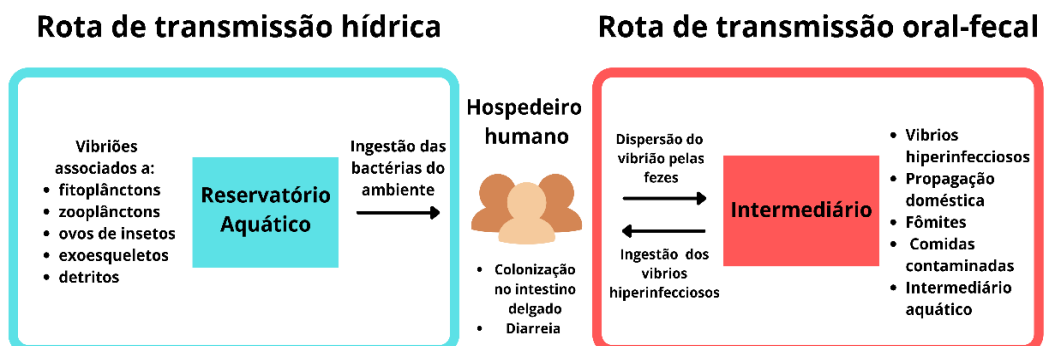
### 3.4 PATÓGENO: *VIBRIO CHOLERAE*

Neste trabalho o patógeno utilizado como indicador de contaminação é o agente causador da cólera, a bactéria gram-negativa *vibrio cholerae*. Este patógeno foi escolhido devido ao histórico da região de Paranaguá, sua presença em amostras de água de lastro e sua capacidade de adaptação em diversos ambientes.

Este patógeno pode desenvolver seu ciclo de vida tanto no corpo humano quanto no ambiente. A FIGURA 13 apresenta o ciclo da bactéria *vibrio cholerae*. Quando um ser humano ingere essas bactérias, em alimentos ou água contaminados, os vibriões podem colonizar o intestino delgado do hospedeiro, se multiplicar e secretar a toxina da cólera durante um evento de diarreia. Os patógenos eliminados pelas fezes estão em um estado hiper infeccioso transitório que serve para amplificar o surto por meio da transmissão para hospedeiros subsequentes (Nelson et al, 2009).

FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA BACTÉRIA *VIBRIO CHOLERAE*

## ***Vibrio cholerae***



FONTE: Adaptada de Nelson et al. (2009).

O patógeno da cólera, induz rapidamente um episódio diarreico que coloca em risco a vida de seu hospedeiro, devido à perda de líquidos e sais. Também cria

uma forma de transmitir o patógeno de um hospedeiro a outro pela contaminação de fontes de água (Tortora et al, 2017).

A coevolução entre o patógeno e seu hospedeiro parece ocorrer: o comportamento de um influencia diretamente o do outro. As duas rotas de transmissão são complementares, porém o foco deste estudo é a presença da bactéria *vibrio cholerae* na água de lastro e sua dispersão na Baía de Paranaguá.

Segundo a revisão sistemática de Escobar et al. (2015), que reuniu dados de 759 artigos, foram encontradas *Vibrio cholerae* em 15 localidades, presentes em 9 países: Brasil, Peru, Estados Unidos, Venezuela, Colômbia, Alemanha, Uruguai, Argentina e Bangladesh. Também apresentaram a faixa de variação de parâmetros onde a bactéria da cólera sobrevive (TABELA 5), mostrando que este patógeno sobrevive em uma ampla variedade de condições ambientais.

TABELA 5 – FAIXA DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS ONDE A *VIBRIO CHOLERA*E PODE SOBREVIVER

Variáveis	Mínimo	Máximo
Clorofila (mg/m <sup>3</sup> )	21,88	22,08
Temperatura superfície do mar (°C)	-1,53	34,46
pH	7,52	8,34
Salinidade (PSU)	5,36	36,72
Oxigênio dissolvido (mL/L)	4,14	7,46

Fonte: Adaptado de Escobar et al. (2015).

Observando os valores de temperatura da água, 18,01°C – 30,49°C, e de salinidade no CEP, 35,19 – 36,06 psu, é possível afirmar que o patógeno da cólera terá plena capacidade de sobreviver no CEP, considerando os valores em que a *vibrio cholerae* pode sobreviver, mostrados na Tabela 5.

No rio Guaraguaçu, a salinidade apresenta uma grande oscilação conforme se adentra o rio. Essa variação pode restringir a sobrevivência do patógeno da cólera. Sendo assim, a salinidade no rio Guaraguaçu foi simulada juntamente com o modelo hidrodinâmico, para melhor entendimento dos processos que ocorrem nesta região de grande importância ecológica.

### 3.4.1 DECAIMENTO DO PATÓGENO

Neste estudo foram consideradas duas hipóteses sobre a mortalidade da bactéria *vibrio cholerae*: as bactérias tem seu decaimento baseado em uma curva exponencial representada pelo valor de  $T_{90}$  ou as bactérias não decaem.

Na TABELA 6 é possível observar alguns valores já obtidos para  $T_{90}$  para diferentes patógenos. O  $T_{90}$  varia com a salinidade, temperatura, pH, radiação solar, entre outros fatores. De modo a simplificar o problema, neste trabalho foi utilizado dois valores de  $T_{90}$  para o patógeno da cólera: 18h como  $T_{90}$  mínimo e 95h como o  $T_{90}$  máximo.

Xu et al (1982) ressaltaram a necessidade de reavaliar o conceito do decaimento dos patógenos, devido a capacidade do vibrião colérico de mudar para um estado de inativação, isto é a bactéria permanece viva, mas não infecta. Estas bactérias em estado inativo podem voltar a se tornar ativas caso as condições tornem favoráveis. Jubair et al. (2012) demonstraram, em laboratório, ao longo tempo de sobrevivência de *vibrio cholerae*, 700 dias.

Novitsky & Morita (1978) mostraram que a bactéria da cólera respondeu à falta de nutrientes reduzindo suas atividades metabólicas e passando por mudanças morfológicas, como por exemplo, mudando a forma de vibrio para uma forma de cócoide e produzindo células descendentes com um volume menor. Estas alterações decorrem da disponibilidade de nutrientes ou alterações ambientais (Colwell et al,1985; Grob & Pollet, 2016; Islam et al, 2017).

TABELA 6 – VALORES DE T90 PARA ALGUNS PATÓGENOS

Organismo	T90 (horas)	Observação
<i>Escherichia coli</i>	27,63 - 690	Água do mar - salinidade 10-30%
<i>Streptococcus bovis</i>	36,84	Água pluvial -- 20°C
<i>Salmonella typhimurium</i>	50,24 552,62	Água pluvial -- 20°C -- 3 dias Água pluvial -- 20°C -- 3 - 14 dias
<i>Salmonella thompson</i>	18,42 - 110,52 552,62	Lago -- 18°C -- 0 - 10 dias Lago -- 18°C -- 10 - 28 dias
Coxsackie	77,76	Lago 21°C -- 23°C
	460,52	Água do mar -- 25°C
	1842,07	Água do mar -- 4°C
Echovirus 6	690,77	Água do mar -- 25°C
	1842,07	Água do mar -- 4°C
Poliovirus type	345,38	Água do mar -- 25°C
	1105,24	Água do mar -- 4°C
	212,55	Lago 21°C -- 23°C
<i>Vibrio cholerae</i>	18	Água doce
	95	Água do mar

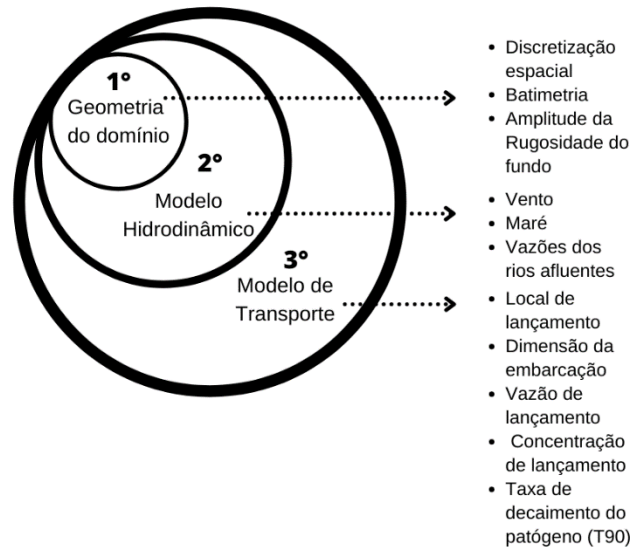
FONTE: Adaptada de Thomann & Muller (1987) e Colwell & Spira (1992).

### 3.5 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

Para realizar a simulação do transporte de contaminantes são necessárias vencer algumas etapas. A primeira é estabelecer o domínio de modelagem e, posteriormente, definir a malha em elementos finitos usada pelo SisBaHiA. A malha é utilizada pelo modelo hidrodinâmico, que determina a circulação na região de interesse. Com a circulação definida é possível simular o transporte dos contaminantes e analisar os fenômenos de interesse. A FIGURA 14 mostra o esquema da interação entre as ferramentas e as variáveis necessárias em cada etapa.

A correta definição dos dados de entrada é fundamental para o estudo. Portanto, buscou-se os dados disponíveis mais recentes. Neste sentido, o ano escolhido foi o de 2019 para a construção dos cenários.

FIGURA 14 – ESQUEMA DA INTERAÇÃO DOS MODELOS NO SISBAHIA



FONTE: Elaborada pela autora.

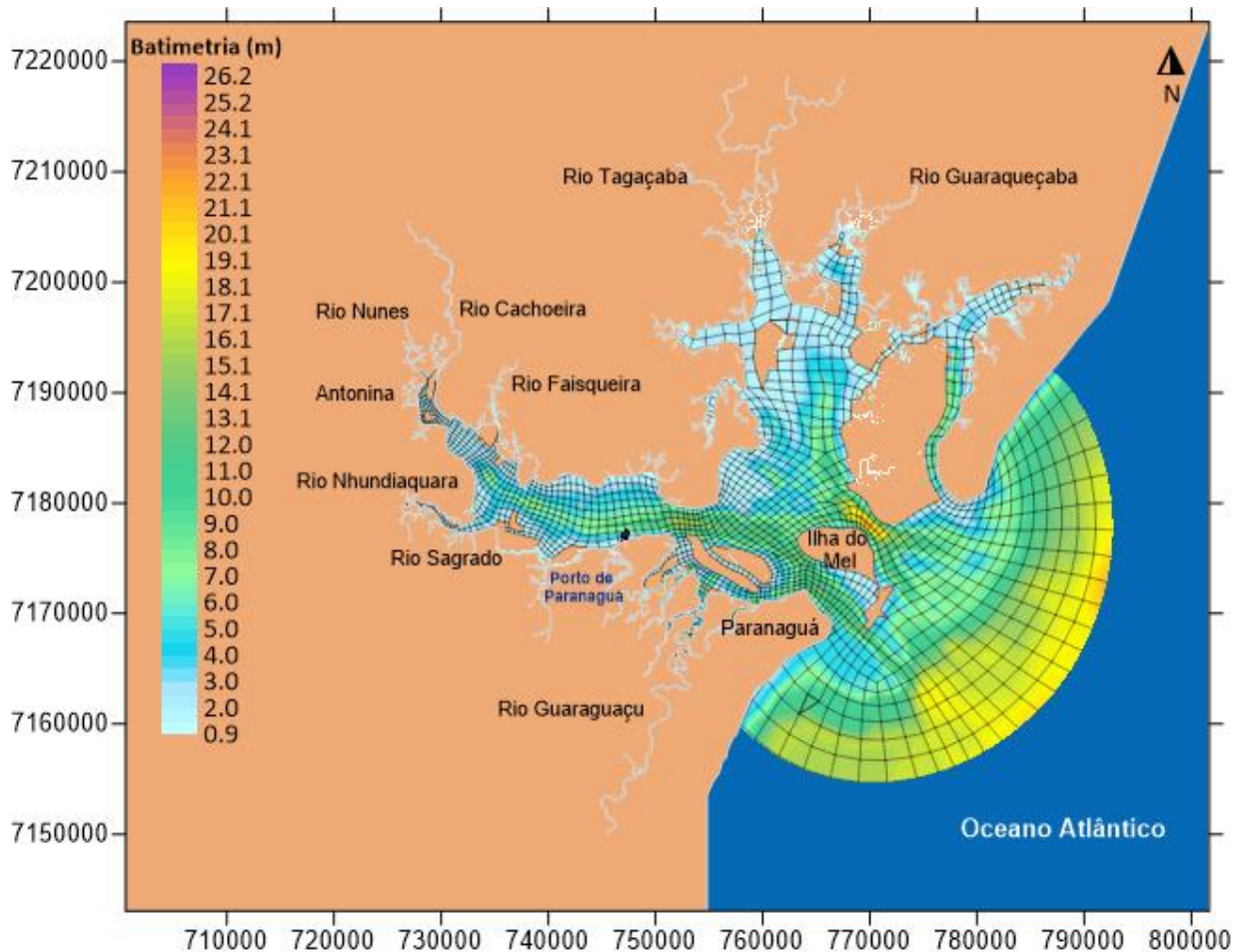
### 3.5.1 DOMÍNIO DO MODELO

A primeira etapa da modelagem consiste na definição do domínio, cuja as componentes são: a geometria da área estudada, a batimetria e a amplitude da rugosidade do fundo, que será usada para calcular as tensões de atrito.

O domínio de modelagem do Complexo Estuarino de Paranaguá utilizado neste trabalho foi adaptado do trabalho realizado por Dalazen et al. (2020), acrescentado ao domínio a região do Rio Guaraguaçu. A discretização espacial foi feita utilizando o método dos elementos finitos; a malha usada neste trabalho contém 8391 nós e 1841 elementos finitos. A batimetria foi definida a partir das cartas náuticas (nº 1820, 1821 e 1822) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e de dados fornecidos pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria Ambiental. A FIGURA 15 apresenta o domínio da modelagem com a malha e a batimetria do CEP.

Para calcular as tensões de fundo no modelo hidrodinâmico é necessário ser calculado o coeficiente de Chèzy. Esse coeficiente é obtido a partir da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo do estuário, e da profundidade.

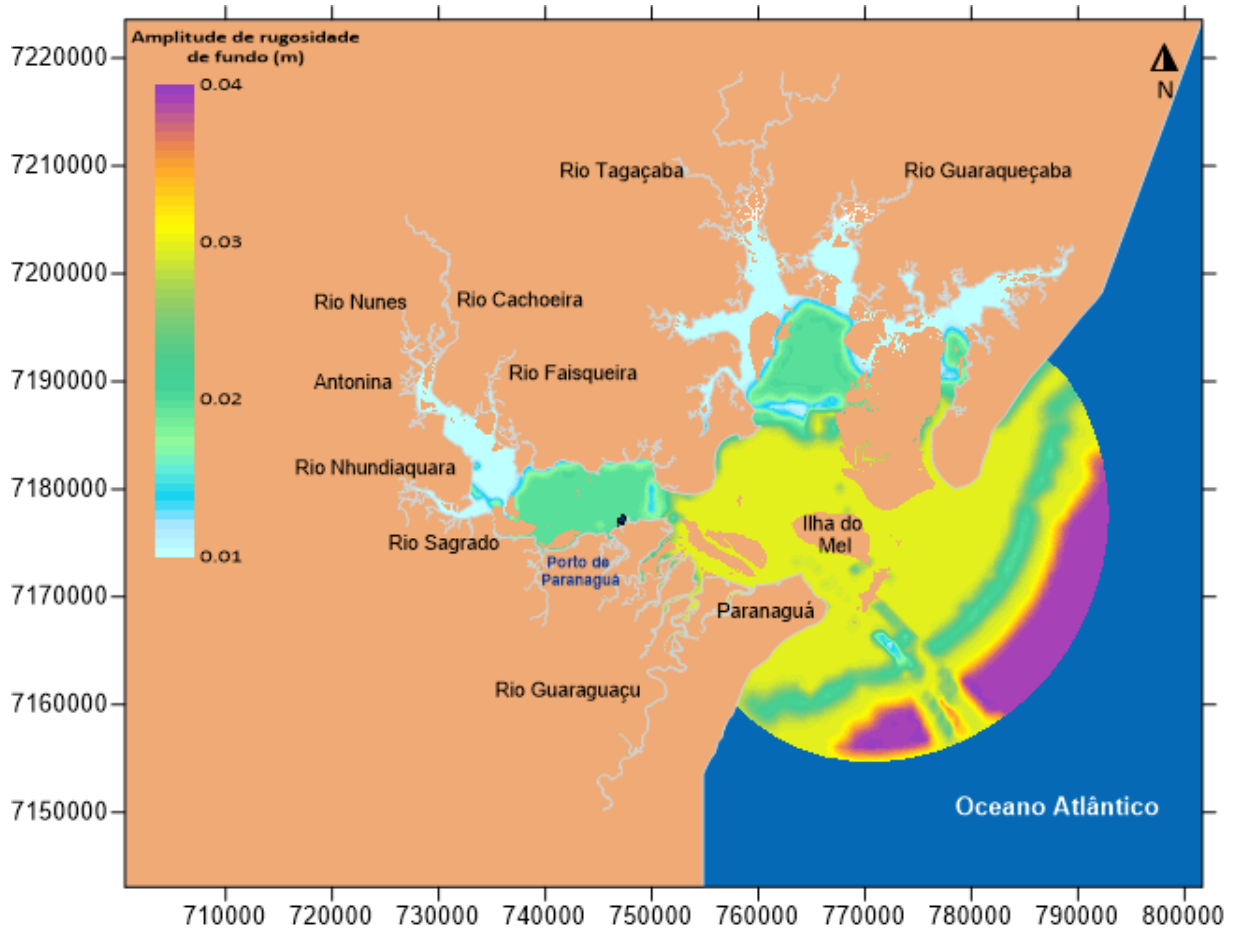
FIGURA 15 – DOMÍNIO DE MODELAGEM DO CEP, COM A MALHA E A BATIMETRIA E A LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS RIOS.



FONTE: Elaborada pela autora.

A TABELA 7 mostra os valores da amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo em função do tipo de sedimento presente no fundo; a composição dos sedimentos foi obtida em Lamour (2007) e pode ser observado na FIGURA 16. É possível inferir que os sedimentos de fundo do CEP apresentam areias médias e grossas na sua porção central e siltes finos na região mais interna da baía.

FIGURA 16 – AMPLITUDE DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ.



FONTE: Elaborada pela autora.

TABELA 7 – VALORES SUGERIDOS PARA A AMPLITUDE EFETIVA DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO EM FUNÇÃO DO TIPO DE SEDIMENTO

Sedimentos	Amplitude de rugosidade de fundo (m)
Predominância de siltes finos	0,0001 - 0,0100
Predominância de areias médias	0,0100 - 0,0250
Predominância de areias grossas	0,0250 - 0,0500

FONTE: Adaptada de Rosman (2021).

### 3.5.2 MODELO HIDRODINÂMICO

Para simular a circulação hidrodinâmica no CEP são necessários os seguintes dados: o campo de vento (direção e velocidade), as vazões fluviais e as curvas de maré.

O vento tem um papel importante na circulação hidrodinâmica. Os dados usados neste trabalho são de dois tipos: os dados de ventos medidos e os dados de vento obtidos por reanálise. Os dados medidos são obtidos diretamente de estações meteorológicas enquanto os de reanálise são um conjunto de dados obtidos a partir de modelos de circulação global abastecidos com dados medidos, sintetizando os dados disponíveis em um contexto físico (Stüker et al, 2016).

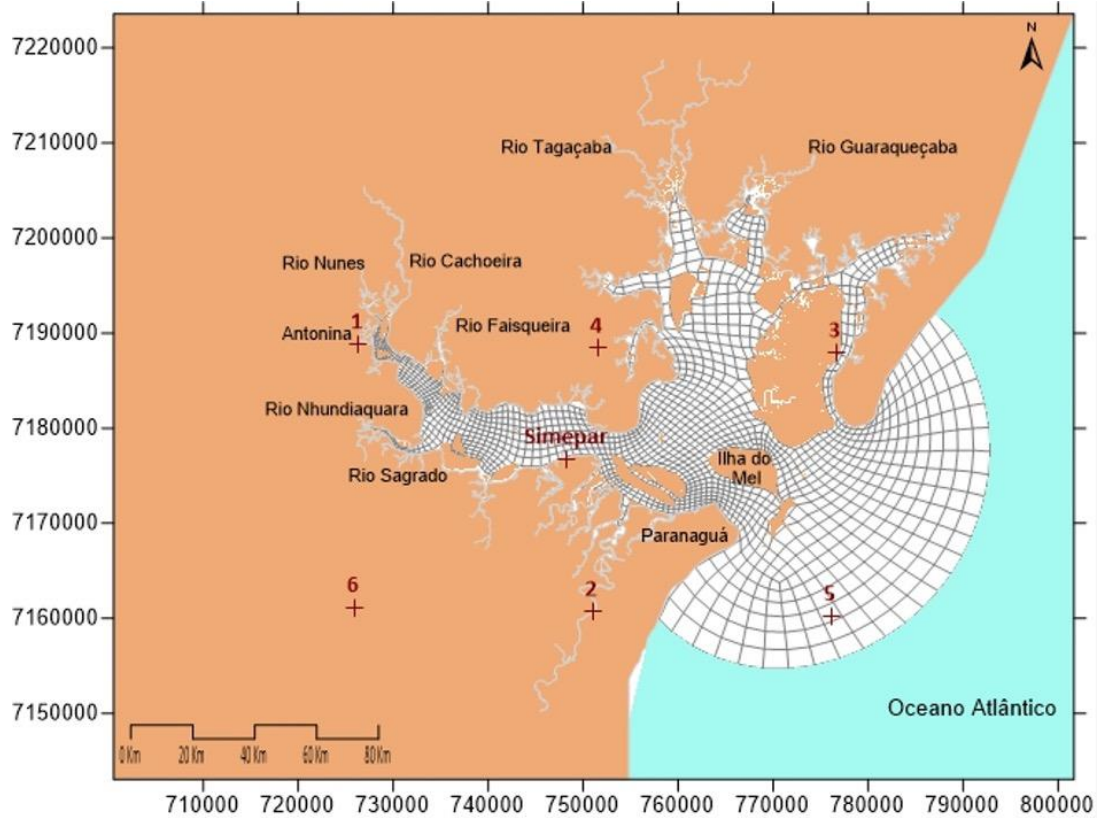
Os dados medidos são provenientes da estação Paranaguá (código: 25534852), latitude 25°30'21,719S e longitude -48°31'47,906" O, localizada próxima ao CEP, com medições horárias de intensidade e direção. Os dados medidos de velocidade foram fornecidos pelo SIMEPAR – Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná, para o ano de 2019.

Já os dados de reanálise são obtidos a partir da combinação de dados anteriores observados com modelos que geram séries temporais de diversas variáveis climáticas. Os dados extraídos de reanálises do ERA-Interim pelo sistema C3S – Copernicus Climate Change Service (C3S, 2021). O período e a periodicidade são os mesmos da estação de Paranaguá.

A FIGURA 17 mostra a localização da estação Paranaguá (Est\_SIMEPAR) e das estações do ERA-Interim.

A partir destes dados foi possível comparar os dados medidos na estação Paranaguá com os dados de reanálise do ERA-Interim. A FIGURA 18 mostra as velocidades do vento da estação de Paranaguá e das estações 2 e 4 do ERA-Interim. Estas estações foram selecionadas devido à proximidade com a estação Paranaguá. Na Tabela 8 é mostrado a velocidade média, máxima e mínima para o ano de 2019 para as estações 2 e 4 do ERA-Interim e para estação de Paranaguá. É possível observar que os valores obtidos são próximos para as três estações. Stüker et al, 2016 mostram que os dados de reanálise do ERA-Interim são adequados como uma análise preliminar ou então como condição de contorno para um modelo regional, pois a direção do vento não é bem representada pelas reanálises.

FIGURA 17 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VENTO.



FONTE: Denes (2021).

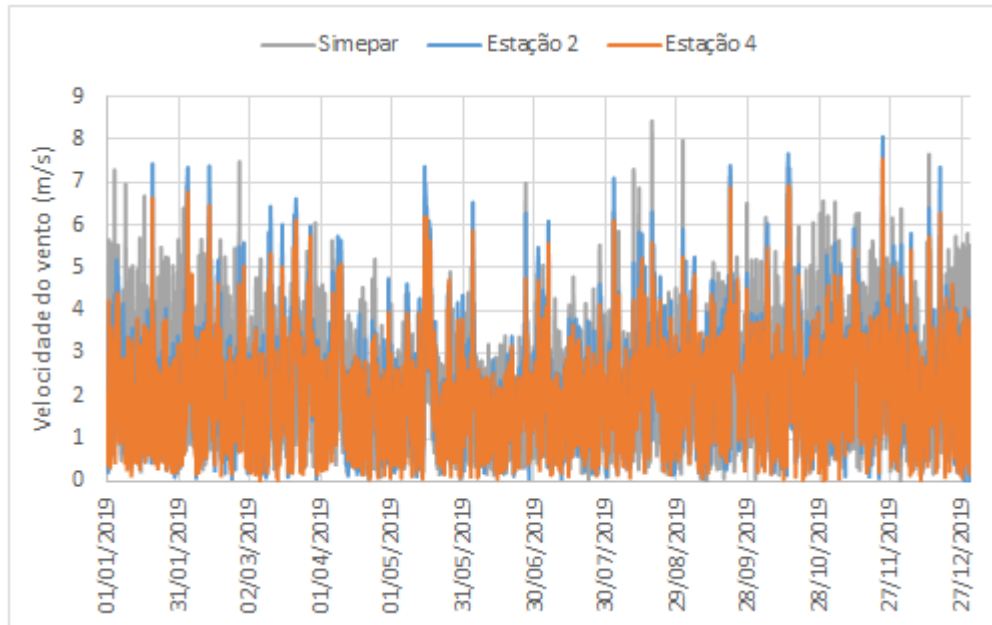
TABELA 8 – VALORES VELOCIDADES MÉDIA, MÁXIMA E MÍNIMA DO VENTO DA ESTAÇÃO DO SIMEPAR E DAS ESTAÇÕES 2 E 4 (REANÁLISE DO ERA-INTERIM) PARA O ANO DE 2019.

	Média	Máximo	Minímo
<b>Estação 2</b>	2.28	08.04	0.02
<b>Estação 4</b>	02.05	7.54	0.02
<b>Simepar</b>	02.06	8.43	0.00

FONTE: Elaborado pela autora.

Na FIGURA 19 e FIGURA 20 mostram as rosas dos ventos para o ano de 2019 para as estações ERA-Interim e de estação de Paranaguá, respectivamente. A direção predominante do vento foi de Sul-Sudeste (SSE) com velocidades variando entre 0,5 m/s até 8 m/s. A estação Est\_5 apresentou velocidades mais altas, atingindo valores superiores a 11 m/s.

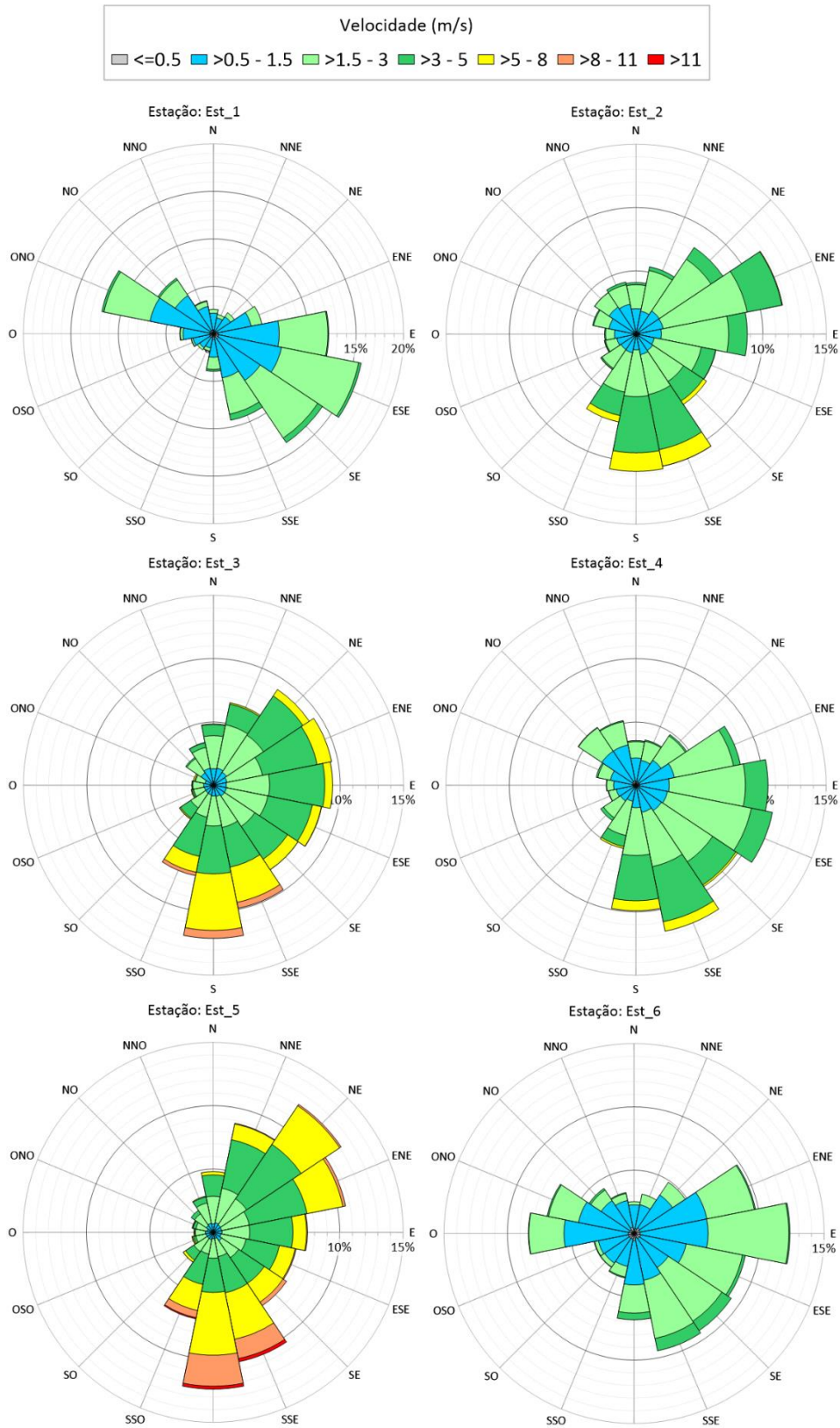
FIGURA 18 – GRÁFICO DA VELOCIDADE DO VENTO DA ESTAÇÃO DO SIMEPAR E DAS ESTAÇÕES 2 E 4 DE REANÁLISE DO ERA-INTERIM.



Fonte: Adaptada de Denes (2021).

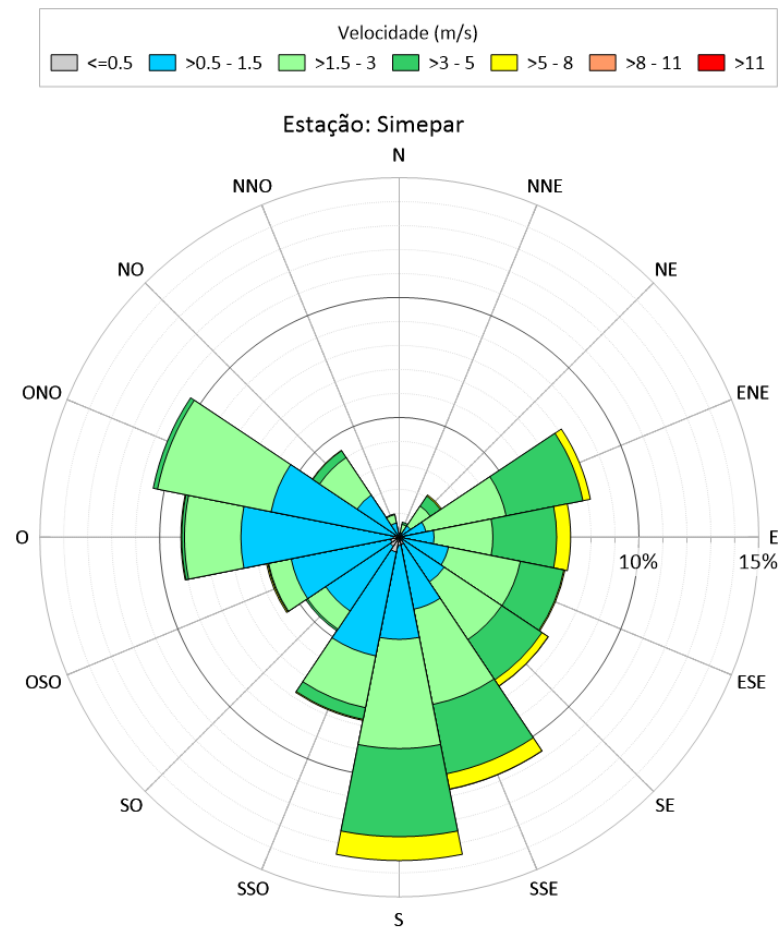
É possível observar que o comportamento do vento obtido na reanálise e os dados medidos são condizentes com o descrito por Mello et al, 2017: predominância de ventos de Sudeste e baixa frequência dos ventos de quadrante N, NW, W e SW durante todo o ano.

FIGURA 19 – ROSA DOS VENTOS DAS ESTAÇÕES DO ERA-INTERIM PARA O ANO DE 2019, COM PERIODICIDADE HORÁRIA.



FONTE: Elaborada pela autora.

FIGURA 20 – ROSA DOS VENTOS DA ESTAÇÃO DO SIMEPAR PARA O ANO DE 2019, COM PERIODICIDADE HORÁRIA.



FONTE: Elaborada pela autora.

Os principais forçantes da circulação hidrodinâmica no CEP são as marés e o aporte fluvial dos rios (Knoppers; Brandini (1987). Ondas, principalmente de Sudeste, são importantes apenas na entrada da baía, onde variam de uma altura média de cerca de 0,5 m (períodos 3-7 s) a uma altura máxima de 2-3m durante eventos de tempestade (Lana et al, 2001). As marés na região são semi-diurnas com desigualdades diurnas. Marone & Camargo (1994), em estudo realizado na baía de Paranaguá, mostraram que a diferença que a maré meteorológica pode elevar, em até 80 cm, a curva de maré astronômica na região da baía de Paranaguá.

A curva de maré astronômica no CEP, usada neste trabalho, foi determinada a partir de constantes harmônicas obtidas por Marone & Jamiyanna (1997) e pelo Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras, disponibilizado pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e estão mostradas na TABELA 9. Devido à falta de dados da curva de maré medida, este estudo utilizará apenas a curva de maré

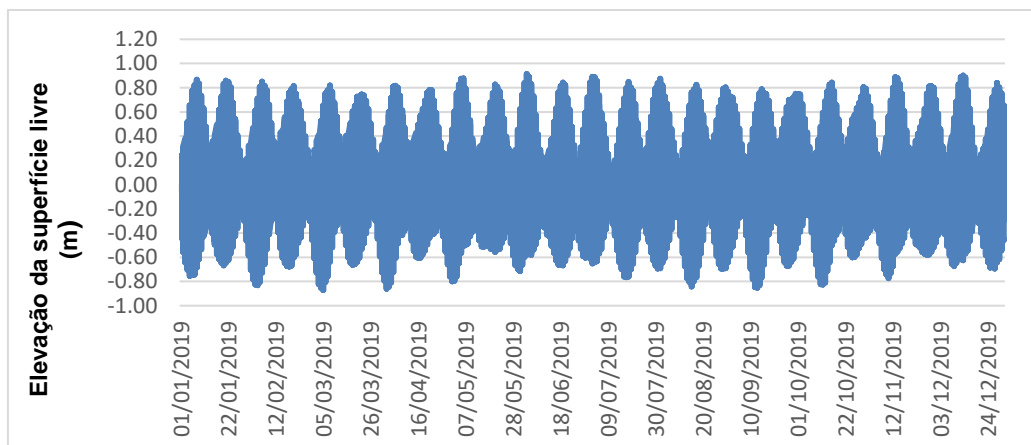
astronômica, mesmo sabendo que os valores da posição da superfície livre podem ser subestimados. A FIGURA 21 mostra a curva de maré na embocadura do CEP para o ano de 2019. É possível observar a ciclicidade da maré, as alturas variam de -0,90 m e 0,90 m.

TABELA 9 – AMPLITUDE E FASE DAS CONSTANTES HARMÔNICAS USADAS NO MODELO HIDRODINÂMICO.

Componentes	Amplitude (m)	Fase (rad)
$M_2$	0,491	1,675
$S_2$	0,333	1,763
$M_3$	0,162	4,573
$M_4$	0,160	4,747
$O_1$	0,111	1,396
$MO_3$	0,105	1,065
$K_1$	0,076	2,409
$N_2$	0,074	2,915
$MN_4$	0,067	3,857
$MS_4$	0,067	6,213
$MK_3$	0,059	2,635
$\mu_2$	0,040	2,513
$Q_1$	0,033	0,995
$L_2$	0,029	1,833
$M_1$	0,016	4,765

FONTE: Marone & Jamiyanna (1997).

FIGURA 21 – CURVA DE MARÉ PREVISTA PARA O ANO DE 2019 DE ACORDO COM AS CONSTANTES HARMÔNICAS MOSTRADAS NA TABELA 9.



FONTE: Elaborada pela autora.

Os principais rios afluentes ao CEP são os rios Cachoeira, Nhundiaquara, Tagaçaba, Guaraqueçaba, Guaraguaçu, Sagrado, Nunes e Faisqueira; a localização pode ser observada na FIGURA 15.

Os dados de vazão média mensal dos rios Cachoeira, Nhundiaquara, Tagaçaba, Guaraqueçaba foram obtidos através do Portal *Hidroweb* (ANA, 2021), que é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A vazão média do rio Guaraguaçu, foi obtida a partir do Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário do Porto de Paranaguá (ÁGUAS PARANÁ, 2018). Nos rios, Sagrado, Nunes e Faisqueira, foram usadas vazões permanentes e os valores foram retirados de Mantovanelli (1999). A TABELA 10 mostra os valores das vazões médias mensais para os rios Cachoeira, Nhundiaquara, Tagaçaba, Guaraqueçaba e as vazões consideradas permanentes para os rios Sagrado, Guaraguaçu, Nunes e Faisqueira.

TABELA 10 – VAZÃO DOS PRINCIPAIS AFLUENTES DO CEP.

	Rio Cachoeira	Rio Nhundiaquara	Rio Tagaçaba	Rio Guaraqueçaba	Rio Sagrado	Rio Nunes	Rio Faisqueira	Rio Guaraguaçu
Janeiro	54,89	18,58	12,55	11,40	36,30	6,40	10,47	8,85
Fevereiro	46,63	15,47	16,34	15,80	47,10	5,90	10,47	8,85
Março	52,06	10,72	11,89	12,40	37,40	2,50	10,47	8,85
Abril	36,36	9,10	9,84	9,70	28,10	3,70	10,47	8,85
Maió	26,40	6,42	7,34	5,00	14,50	1,90	10,47	8,85
Junho	29,00	5,67	5,81	3,90	7,80	1,50	10,47	8,85
Julho	44,30	15,14	9,75	7,30	7,20	2,50	10,47	8,85
Agosto	23,30	8,92	7,31	4,40	3,50	1,50	10,47	8,85
Setembro	39,70	18,91	10,14	7,90	1,80	1,30	10,47	8,85
Outubro	52,27	21,08	10,51	6,50	6,60	1,70	10,47	8,85
Novembro	47,91	15,35	9,46	5,20	6,20	1,80	10,47	8,85
Dezembro	51,22	17,67	9,91	5,60	6,00	2,30	10,47	8,85

FONTE: Hidroweb e Mantovanelli (1999).

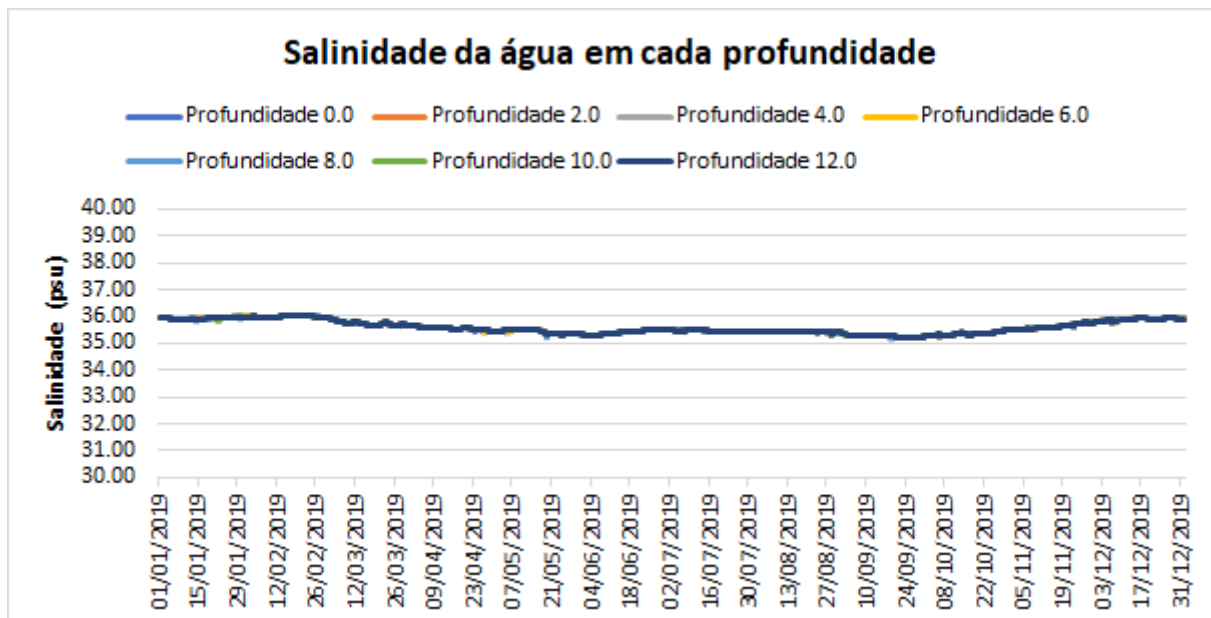
### 3.5.2.1 MODELO DE TRANSPORTE DE SAL

A salinidade é um parâmetro importante para a sobrevivência do vibrião colérico. Como existem poucos dados de salinidade medidos dentro do CEP, foi feita a simulação do transporte de sal em conjunto com a simulação hidrodinâmica. Nas simulações, os parâmetros usados foram:

- 1) A malha é a mesma usada no modelo de circulação hidrodinâmico. O intervalo de tempo usado nas simulações foi 60,0 segundos.

- 2) Condição inicial. O modelo teve um período de aquecimento de dez dias.
- 3) Fronteira aberta: no caso de afluxo, valores de salinidade são prescritos a partir do modelo oceanográfico HYCOM. A Figura 22 mostra os valores para o ano de 2019, usados na simulação.
- 4) Fronteira de terra: nos nós que correspondem aos rios, os valores prescritos de salinidade variaram entre 5,0 e 2,0 psu. No rio Guaraguaçu, a salinidade prescrita foi de 0,5 psu. Os demais nós de contorno foram considerados impermeáveis, com fluxo normal nulo.

FIGURA 22 – VALORES DE SALINIDADE DA ÁGUA PARA O ANO DE 2019 NO PONTO P.



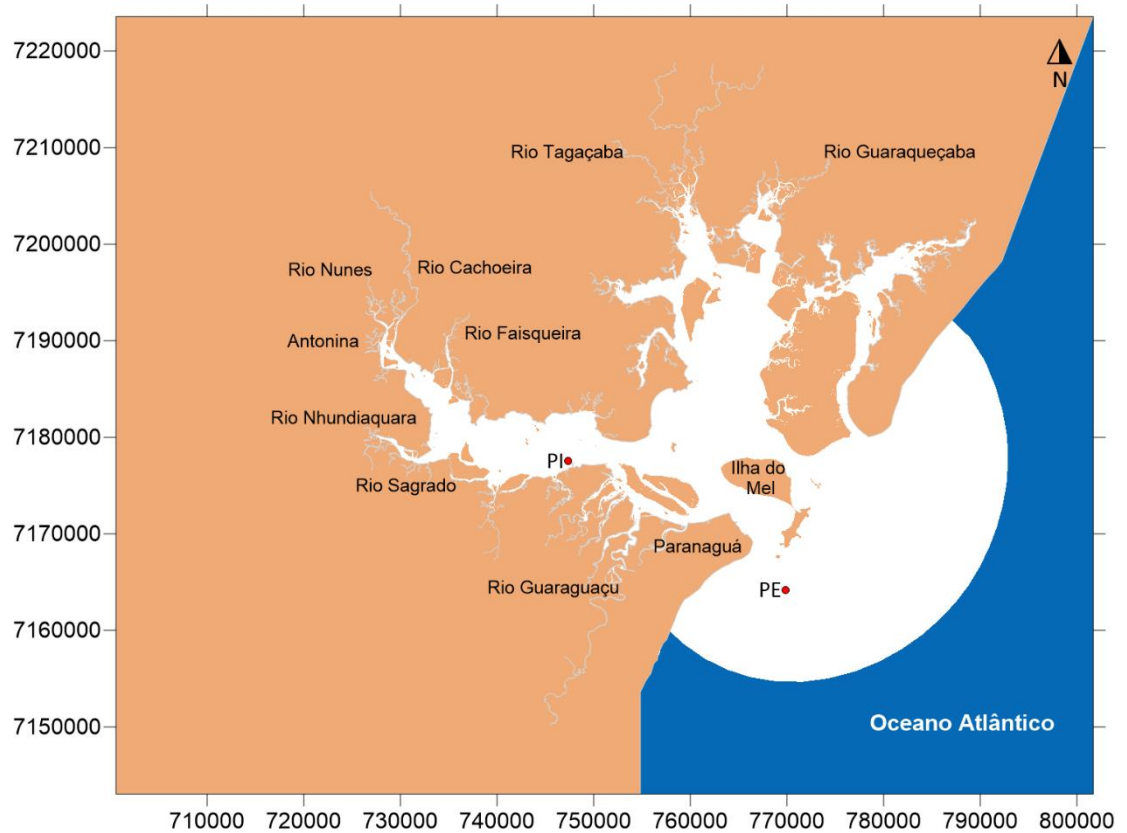
FONTE: Elaborada pela autora.

### 3.5.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO DO SISBAHIA

Os parâmetros necessários para esta simulação do lançamento da água de lastro pelos navios, que funcionam como fontes emissoras, são: locais de lançamento, dimensão da embarcação, vazão de lançamento, concentração de lançamento e a taxa de decaimento do patógeno.

Neste trabalho foram selecionados 2 pontos para a simulação de descarte da água de lastro: um ponto no porto de Paranaguá (PI) e um ponto externo a baía (PE), como mostra a FIGURA 23. Estes pontos foram escolhidos para analisar a diferença, na dispersão da pluma, em regiões dentro e fora da baía de Paranaguá.

FIGURA 23 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE DESCARTE DA ÁGUA DE LASTRO



FONTE: Elaborada pela autora.

As fontes correspondem as embarcações. Neste sentido, é necessário determinar as dimensões das fontes. As dimensões da embarcação foram baseadas nos dados apresentados pelo Plano Mestre - Complexo Portuário de Paranaguá e Antonina, desenvolvidos pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação MTPA (2016). A embarcação fictícia, usada no trabalho, possui 200 metros de comprimento, 30 metros de largura e 10 metros de calado submerso. O volume da embarcação imersa é de 60.000 m<sup>3</sup>.

A vazão de lançamento da água de lastro depende da capacidade da bomba de lançamento. Em uma situação com duas bombas operando com uma vazão de 2000 m<sup>3</sup>/hora, a vazão final de lançamento é de 4000 m<sup>3</sup>/hora (ABWMR, 2020).

Para todos os lançamentos, o período do deslastro durou 6 horas, ou seja, a partir deste período não há mais lançamento de partículas no sistema, apenas a sua dispersão. O volume total da água de lastro lançado foi de 24.000 m<sup>3</sup>, valor acima da média do ano de 2019, mas inferior ao valor máximo deste mesmo ano (Tabela 3).

As fontes emissoras foram representadas por um número de partículas lançadas na região fonte, 2 partículas por passo de tempo. Nas simulações o passo de tempo considerado foi de 100 segundos. Cada partícula carrega uma parcela da massa inicial do contaminante, sendo esta massa pode ser alterada (ganho ou perda) ao longo da simulação ou não.

Rivera et al. (2012), em estudo realizado entre de outubro de 2001 a outubro de 2002, mostraram que a concentração de *vibrio cholerae* na água, na região do porto de Paranaguá, variava entre  $1,5 \cdot 10^1$  UFC/ml  $3,3 \cdot 10^3$  UFC/ml. A partir desses valores, foi estimado a concentração inicial da fonte emissora, supondo que *vibrio cholerae* ser proveniente da água de lastro de uma embarcação. A relação entre a concentração de patógenos na água e a concentração de patógenos lançada é dada por:

$$C_a = C_p \cdot S \quad (02)$$

onde  $C_p$  é a concentração de patógenos na água do porto,  $C_a$  é a concentração de patógenos na água de lastro que é lançada e  $S$  é o fator de diluição (Rosman, 2021). O fator de diluição é dado por:

$$S = \frac{V}{Q_e \cdot \Delta t} \quad (03)$$

onde  $V$  é o volume da embarcação,  $Q_e$  é a vazão do efluente e  $\Delta t$  é o passo temporal do lançamento das partículas (100 segundos). Para as condições observadas na baía de Paranaguá, o valor de  $S$  foi 540. Com isso foi obtida a concentração mínima ( $8,1 \cdot 10^3$  UFC/ml) e máxima ( $1,8 \cdot 10^5$  UFC/ml), que hipoteticamente foi lançada por uma embarcação.

Para este trabalho foram analisadas duas condições de dispersão do patógeno da *Vibrio cholerae*: a dispersão simulando o estado de inativação (para acompanhar a trajetória das bactérias e os pontos de acúmulo) e a dispersão com decaimento bacteriano (variando entre um decaimento máximo e mínimo). No caso da simulação de estado de inativação a massa associada as partículas é considerada conservativa. Nos cenários com decaimento bacteriano a massa não é conservativa, pois as bactérias decairão ao longo da simulação.

### 3.6 CENÁRIOS

Para analisar a dispersão dos patógenos provenientes na água de lastro lançada no CEP, foram definidos 7 cenários. Nos cenários 4 parâmetros foram modificados: **o tipo de decaimento, a localização da fonte, a sazonalidade e a concentração de patógeno presente na água de lastro.**

Com o intuito de observar o caminho que a água de lastro e, conseqüentemente, o vibrião colérico, teria na baía de Paranaguá, ou seja, a trajetória das partículas (*particle tracking*), foram definidas diferentes configurações, cujo os cenários podem ser observados na TABELA 11. Para os grupos A, B e C, a concentração o patógeno na água de lastro não é relevante, pois o objetivo é observar apenas o comportamento da pluma da água de lastro, ou seja, o possível “caminho” que a água de lastro após o lançamento.

TABELA 11 – CENÁRIOS PARA VISUALIZAR O *TRACKING* DAS PARTÍCULAS DE *VIBRIO CHOLERA*E NO CEP.

	Cenário	Decaimento	Local de lançamento	Sazonalidade
Grupo A	A1	T90 = 18 h		
	A2	T90 = 95 h	Porto de Paranaguá	Verão
	A3	Bactéria inativa		
Grupo B	B1		Porto de Paranaguá	
	B2	Bactéria inativa	Fora da baía de Paranaguá	Verão
Grupo C	C1	Bactéria inativa	Porto de Paranaguá	Verão
	C2			Inverno

FONTE: Elaborada pela autora.

Nos cenários do grupo A, o parâmetro que varia é a perda de massa da bactéria *vibrio cholerae* durante a simulação, isto é o decaimento das bactérias. Para esta análise são considerados duas formas de vida do patógeno: estado ativo, com decaimento (A1 e A2) e estado de inativação (A3), sem decaimento. No cenário A1 e A2, ao final da simulação, a massa associada a cada partícula é nula. No cenário A3, não ocorre alteração da massa associada as partículas durante a simulação

Nos cenários do grupo B, ocorreu uma variação no local da fonte de lançamento, isto é, posição fictícia da embarcação. Para esta análise são considerados duas localidades: um ponto no Porto de Paranaguá (B1) e um ponto

na região externa da baía de Paranaguá (B2). Em ambos os cenários deste grupo, a bactéria *vibrio cholerae* foi considerada no estado de inativação. Os pontos de lançamento podem ser observados na FIGURA 23.

A sazonalidade está relacionada aos padrões de circulação, que foram obtidos pelo modelo hidrodinâmico para o período representativo do verão (janeiro e fevereiro de 2019), e para o período representativo de inverno (junho e julho de 2019), quando o aporte fluvial é menor.

O cenário A3 é igual aos cenários B1 e C1, a nomenclatura foi alterada para facilitar a comparação, que será feita entre grupos.

Para observar as variações das concentrações do patógeno na baía de Paranaguá foram acrescentados mais dois cenários: o grupo D (TABELA 12), quando foram alteradas as concentrações do efluente: para o cenário D1 a concentração do efluente foi a mínima calculada e, para o cenário D2, a concentração máxima.

TABELA 12 – CENÁRIOS PARA VISUALIZAR AS CONCENTRAÇÕES DE *VIBRIO CHOLERA*E NO CEP.

	Cenário	Decaimento	Local	Sazonalidade	Concentração
Grupo D	D1	Bactéria inativa	Porto de Paranaguá	Verão	Mínima (8,1E+03 UFC/mL)
	D2				Mínima (1,8E+05 UFC/mL)

FONTE: Elaborada pela autora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

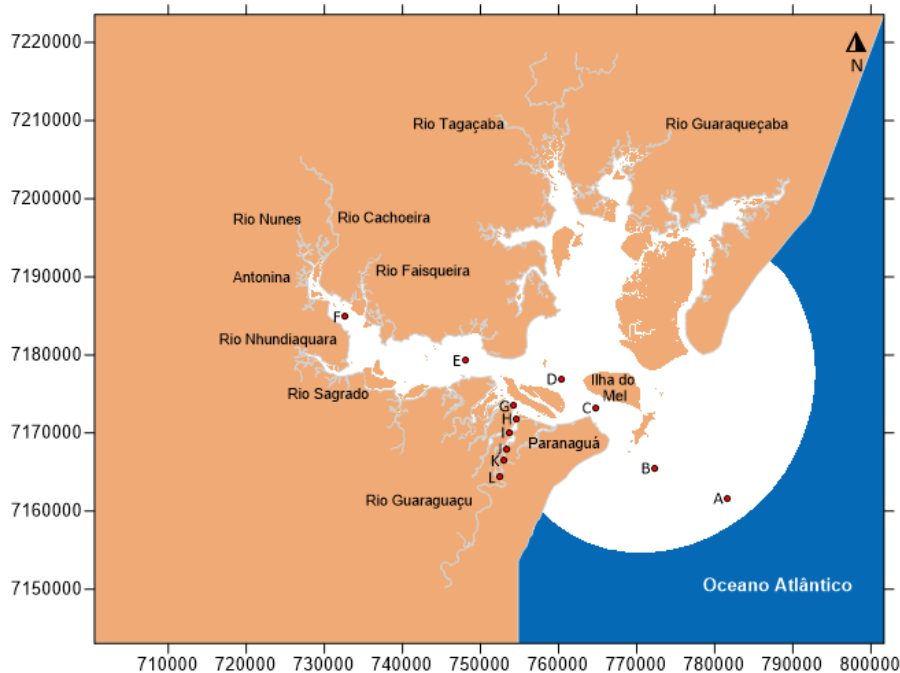
### 4.1 CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Segundo Knoppers & Brandini (1987), a maré é a principal forçante da circulação na região do CEP. Polli et al, 2019 mostram que o vento causa pouca influência na circulação hidrodinâmica nesta mesma região. De forma a verificar se o modelo está propagando a onda de maré corretamente para dentro do CEP, foram selecionadas algumas estações, mostradas na FIGURA 24, para observar a propagação de onda de maré e a relação entre a elevação e as componentes Leste-Oeste e Norte-Sul das velocidades.

A onda de maré sofre amplificação e atraso à medida que se propaga no interior do CEP. Esta análise tem como objetivo verificar se o modelo está propagando a onda corretamente, em relação ao atraso e à amplificação. De acordo com o estudo de Tamura & Cunha (2016), as componentes de maré se amplificam conforme adentram o interior da baía de Antonina, o atraso da onda entre as estações A e F é de aproximadamente 1 hora e trinta minutos.

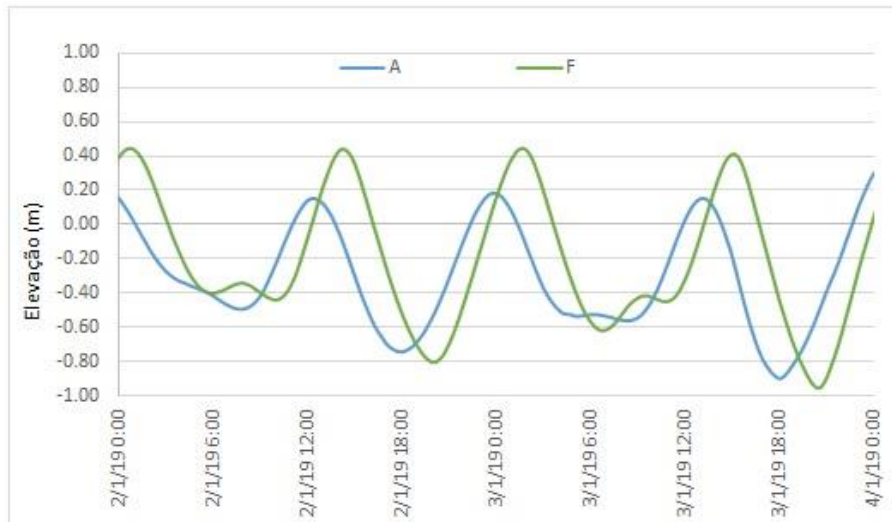
Comparando os resultados da posição da superfície livre (elevação) obtidos pelo SisBaHiA na estação posicionada na região costeira adjacente com os resultados na baía de Antonina (funda do CEP), é possível observar que o atraso da onda entre as estações é de aproximadamente 1 hora e 45 minutos (FIGURA 25). Como os dados de elevação são mensurados a cada 15 minutos, este resultado é condizente com os resultados mostrados por Tamura & Cunha (2016), pois o erro absoluto é de 15 min, isto é apenas um passo de tempo maior. Vale ressaltar que Tamura & Cunha (2016) calibraram o modelo hidrodinâmico para o CEP, comparando séries temporais da posição da superfície livre obtidas pelo SisBaHiA® e os valores medidos no canal da Cotinga, obtendo um erro médio de 4%, para um período de sete dias.

FIGURA 24 — LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES ONDE OS RESULTADOS DOS MODELOS HIDRODINÂMICO E DE TRANSPORTE DE SAL FORAM OBTIDOS.



FONTE: Elaborada pela autora.

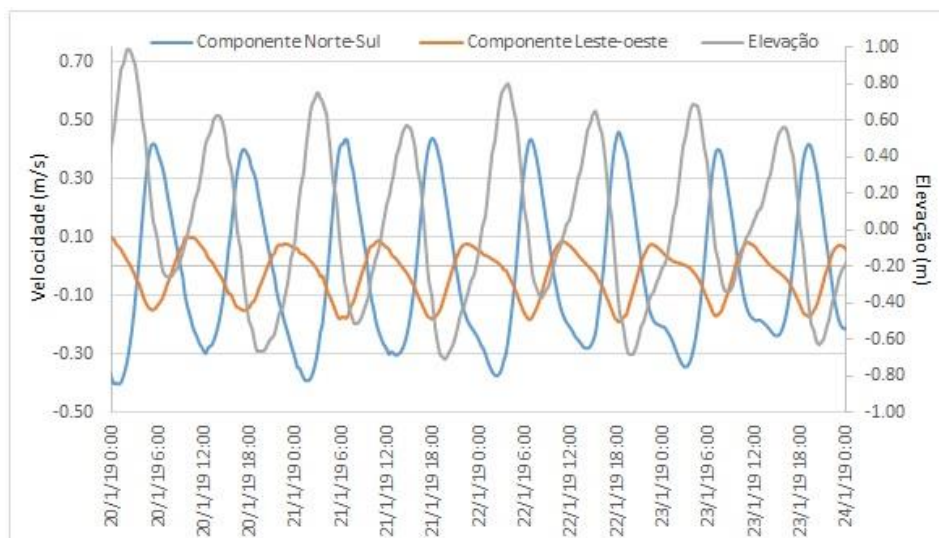
FIGURA 25 — COMPARAÇÃO DA ELEVAÇÃO DA MARÉ NOS PONTOS A E F.



FONTE: Elaborada pela autora.

A partir da FIGURA 26 foi observado que a característica das ondas na região interna da baía é estacionária, já que a elevação e a velocidade não estão em fase. Para Seeliger & Kjerfve (2001) a onda da maré se propaga de uma forma mista, com uma forma progressiva na região externa e uma forma de onda estacionária na parte superior da baía.

FIGURA 26 — ELEVAÇÃO E COMPONENTES LESTE-OESTE E NORTE-SUL DAS VELOCIDADES OBTIDAS PELO SISBAHIA, NO PONTO B, NO PERÍODO ENTRE 20/01/2019 E 24/01/2019.

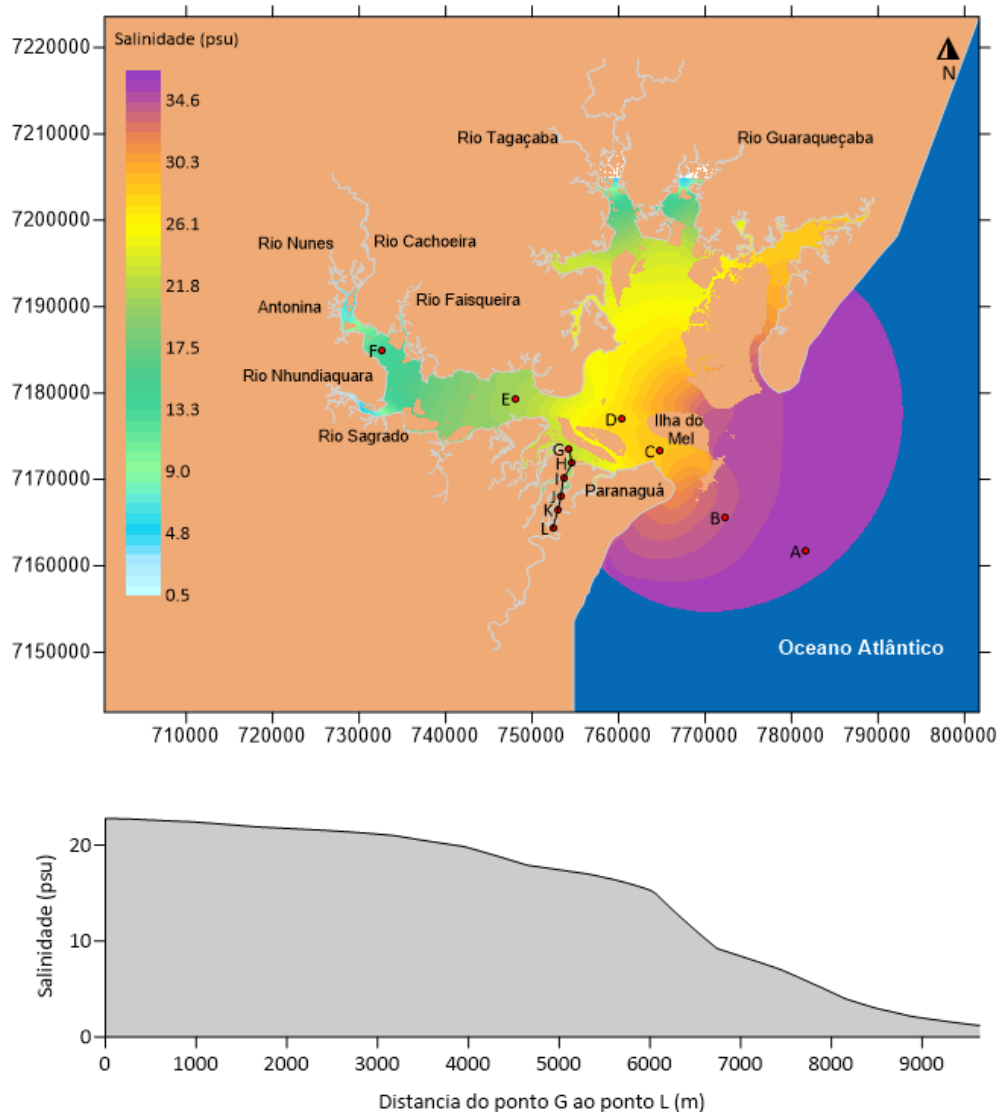


FONTE: Elaborada pela autora.

## 4.2 SALINIDADE

A região próxima ao rio Guaraguaçu foi descrita em detalhes, pelo interesse especial na intrusão salina neste rio, que é um fator limitante para alguns patógenos. A FIGURA 27 mostra a distribuição de salinidade na baía de Paranaguá em um instante de baixa-mar, maré de sizígia, as 00:00h de 05/01/19 e o perfil longitudinal de salinidade ao longo do rio Guaraguaçu no mesmo instante. O perfil se inicia no canal da Cotonga, estação G (0 m), e termina na entrada do rio Guaraguaçu, estação L, após 9,5 Km.

FIGURA 27 — DISTRIBUIÇÃO DE SALINIDADE SIMULADA (00:00H DE 05/01/19), EM SITUAÇÃO DE SIZÍGIA, E O PERFIL DE SALINIDADE AO LONGO DO RIO GUARAGUAÇU NO MESMO INSTANTE.

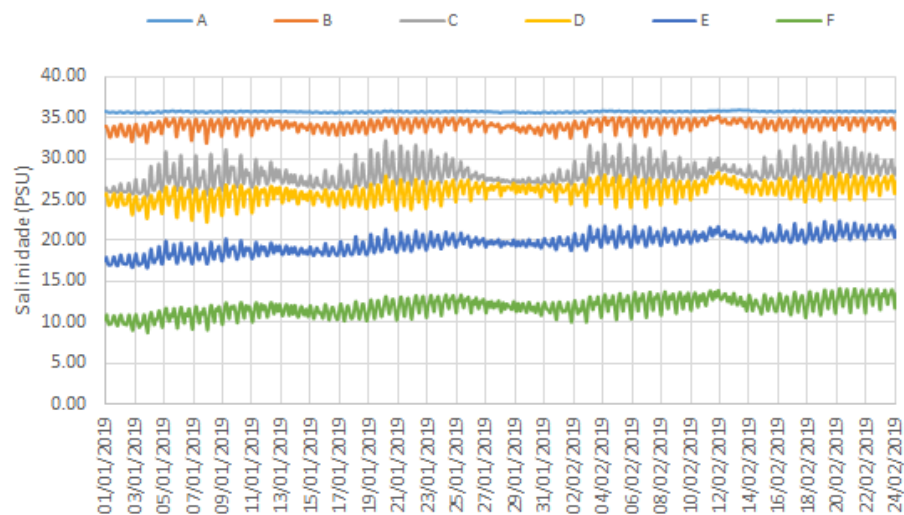


FONTE: Elaborada pela autora.

Os dados de salinidade coletados por Feltrin et al. (2011) foram utilizados como condição inicial para determinar a distribuição de salinidade do rio Guaraguaçu. A salinidade obtida pelo modelo apresenta o mesmo comportamento da salinidade mensurada. Conforme se adentra o rio, ocorre uma intrusão salina a qual pode ser observada na FIGURA 10 e na FIGURA 27.

A salinidade nas estações A até a F, o eixo horizontal do CEP, pode ser observado no gráfico da FIGURA 28. A partir deste gráfico é possível observar a oscilação da salinidade com o tempo, devido as oscilações causadas pela maré. O mesmo ocorre no gráfico da FIGURA 29 , que são as estações presentes no rio Guaraguaçu.

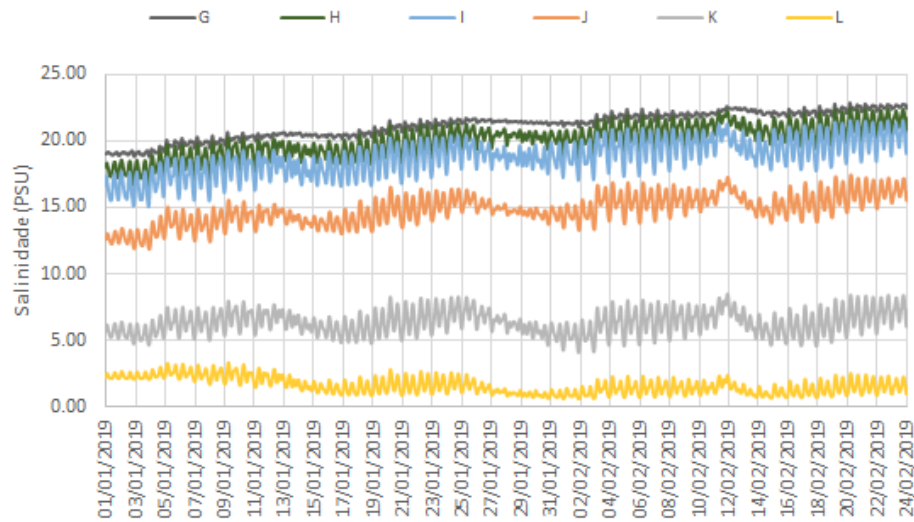
FIGURA 28 — VALORES DE SALINIDADE PARA AS ESTAÇÕES A, B, C, D, E, F NO VERÃO DE 2019.



FONTE: Elaborada pela autora.

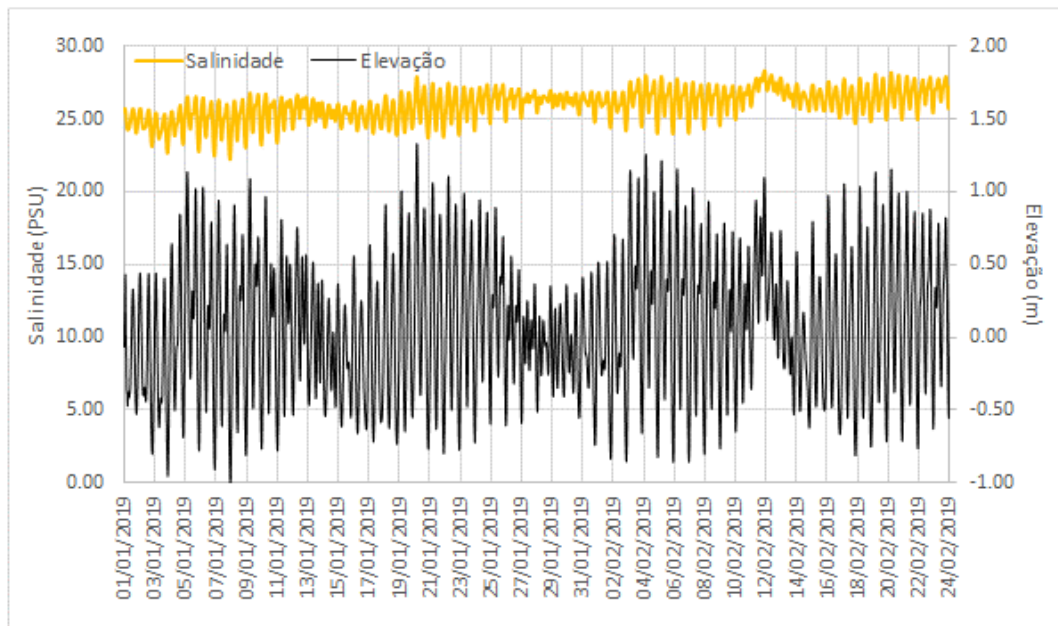
A FIGURA 30 mostra os valores de salinidade e elevação para o ponto D. É possível observar que quando ocorreu um elevação do nível médio do mar (12 de fevereiro), a salinidade também se eleva. Em períodos de quadratura, as oscilações dos valores da salinidade são reduzidas, quando comparadas com os períodos de sizígia.

FIGURA 29 — VALORES DE SALINIDADE PARA AS ESTAÇÕES, CONSIDERANDO O EIXO LONGITUDINAL DO RIO GUARAGUAÇU NO VERÃO DE 2019.



FONTE: Elaborada pela autora.

Figura 30 — VALORES DA SALINIDADE E A ELEVAÇÃO NO PONTO D



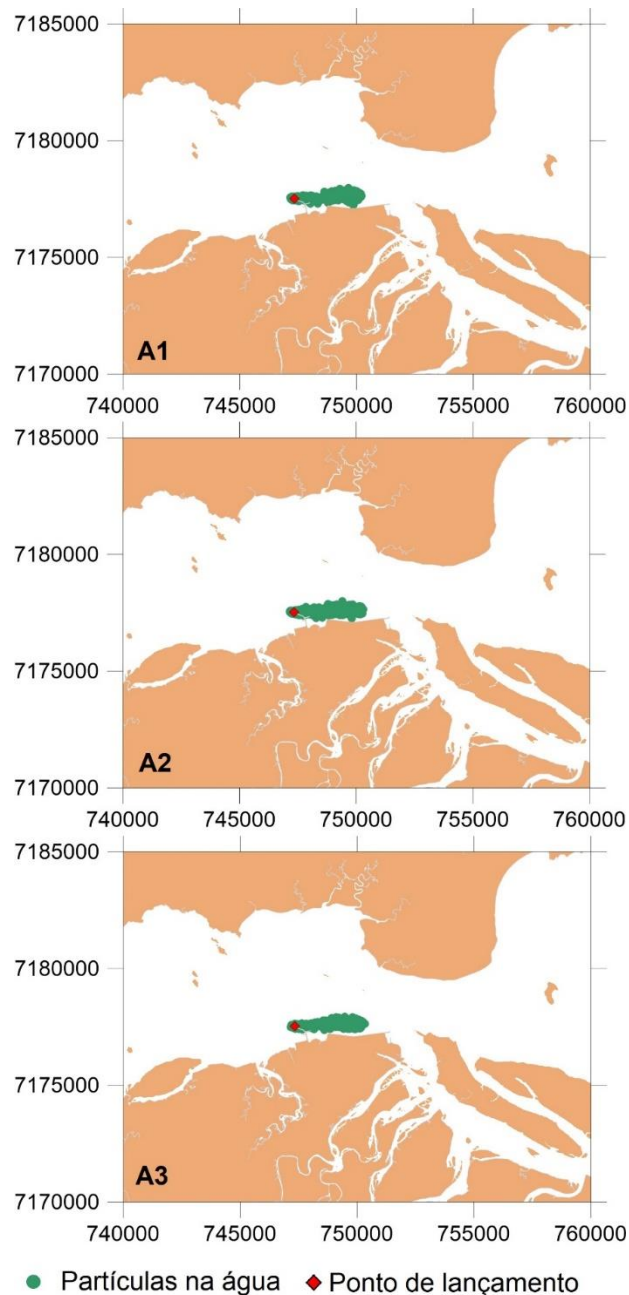
FONTE: Elaborada pela autora.

### 4.3 DISPERSÃO DA ÁGUA DE LASTRO

#### 4.3.1 GRUPO A – VARIAÇÃO NO T90

A FIGURA 31 mostra a posição das partículas que simulam o lançamento da água de lastro no porto de Paranaguá, uma hora após o seu lançamento. Neste momento, a localização das partículas é praticamente a mesma para os 3 cenários (A1, A2 e A3), pois não houve tempo suficiente para consumir a massa associada a cada partícula e também a pluma não atingiu as margens (não há partículas absorvidas).

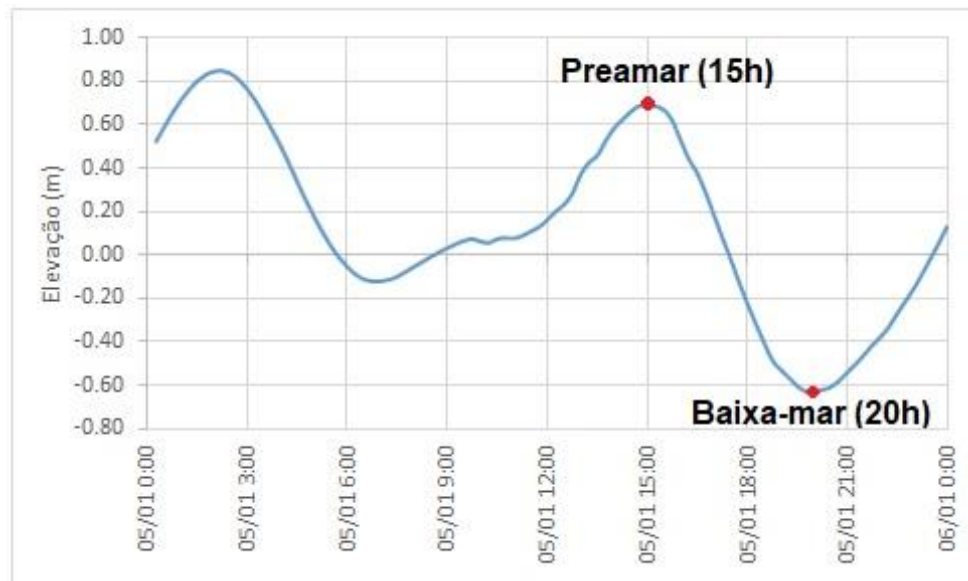
FIGURA 31 — POSIÇÃO DAS PARTICULAS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ 1 HORA APÓS O LANÇAMENTO – CENÁRIOS A1, A2 E A3.



FONTE: Elaborada pela autora.

Para observar o efeito de enchente e vazante na dispersão da água de lastro, dois momentos foram observados: preamar e baixa-mar, ambas em período de sizígia. A FIGURA 32 mostra a elevação para o dia 05 de janeiro de 2019, no ponto C, sendo considerado o instante de preamar às 15h e o de baixa-mar, às 20h.

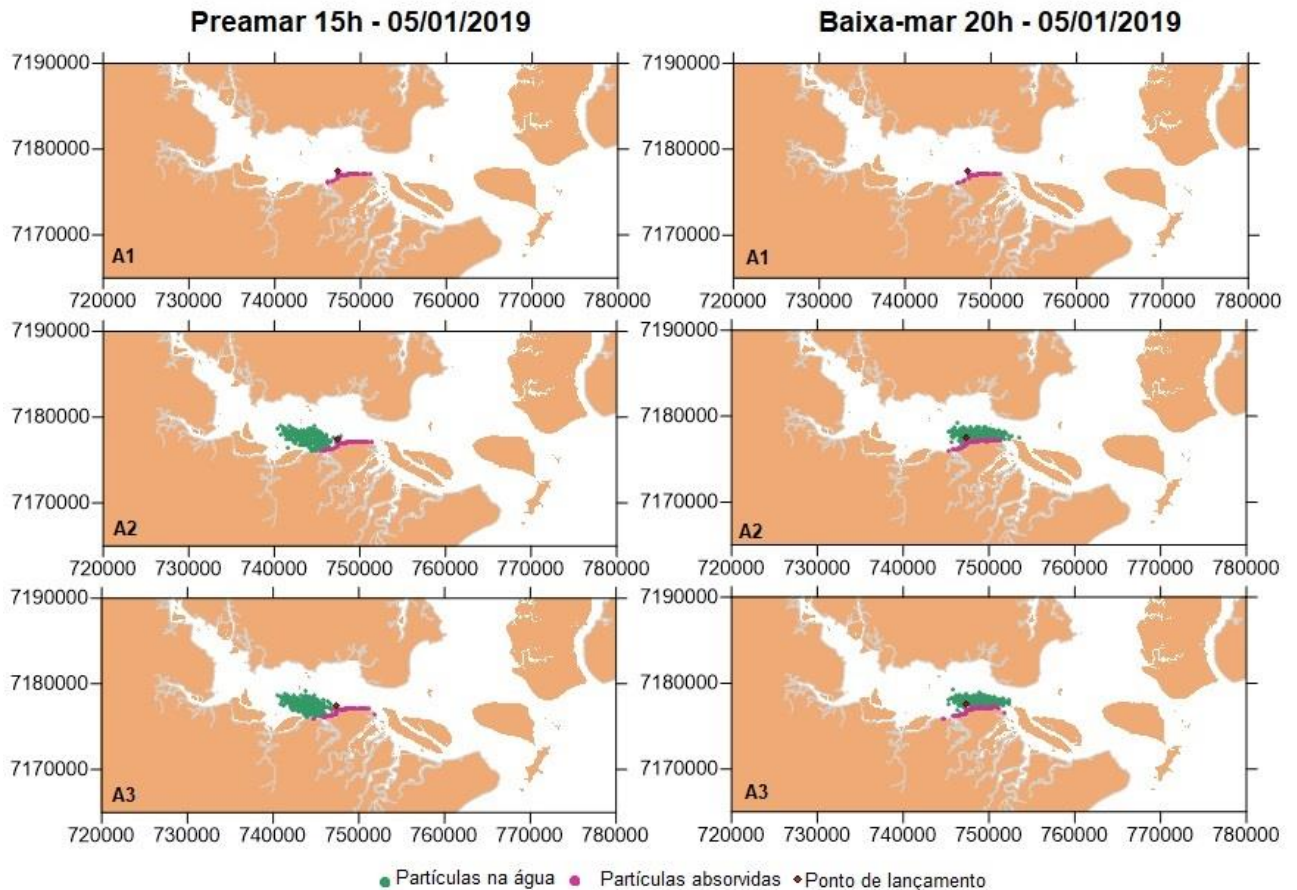
FIGURA 32 – ELEVAÇÃO NA ESTAÇÃO C, NO DIA 05/01/2019, MOSTRANDO INSTANTES DE PREAMAR E BAIXA-MAR, NO PERÍODO DE SIZÍGIA.



FONTE: Elaborada pela autora.

A FIGURA 33 mostra a posição das partículas na região do porto de Paranaguá, 5 dias após o lançamento, nos instantes de preamar e baixa-mar. O cenário A1 apresenta T90 de 18 horas, que provoca um decaimento rápido. Sendo assim, após 5 dias não há partículas na água, somente partículas absorvidas. As partículas desaparecem completamente no início do quinto dia após o lançamento. Em ambos os instantes, para os cenários A2 e A3, a posição das partículas seguem semelhantes. Nota-se o efeito oscilatórios da maré nos cenários A2 e A3. As partículas tendem a entrar na baía, nas enchentes e tendem a sair, na vazante. No cenário A2, com o decaimento mais lento, T90 de 95 horas, os patógenos só são completamente degradados 12,125 dias após o lançamento. A região da absorção das partículas se concentrou na região do porto de Paranaguá.

FIGURA 33 — POSIÇÃO DAS PARTÍCULAS NA ÁGUA E ABSORVIDAS NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ 05 DIAS APÓS O LANÇAMENTO – CENÁRIOS A1, A2 E A3 PARA DOIS INSTANTES NO DIA 05/01/2019.

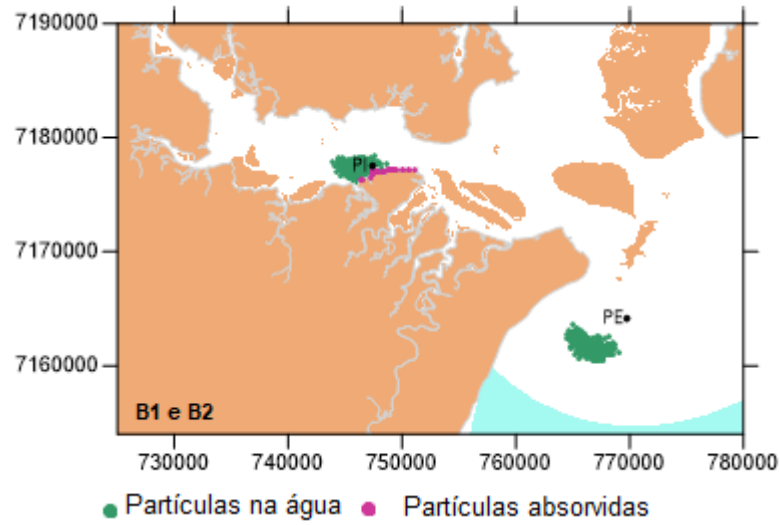


FONTE: Elaborada pela autora.

#### 4.3.2 GRUPO B – VARIAÇÃO DO LOCAL DA FONTE DE LANÇAMENTO

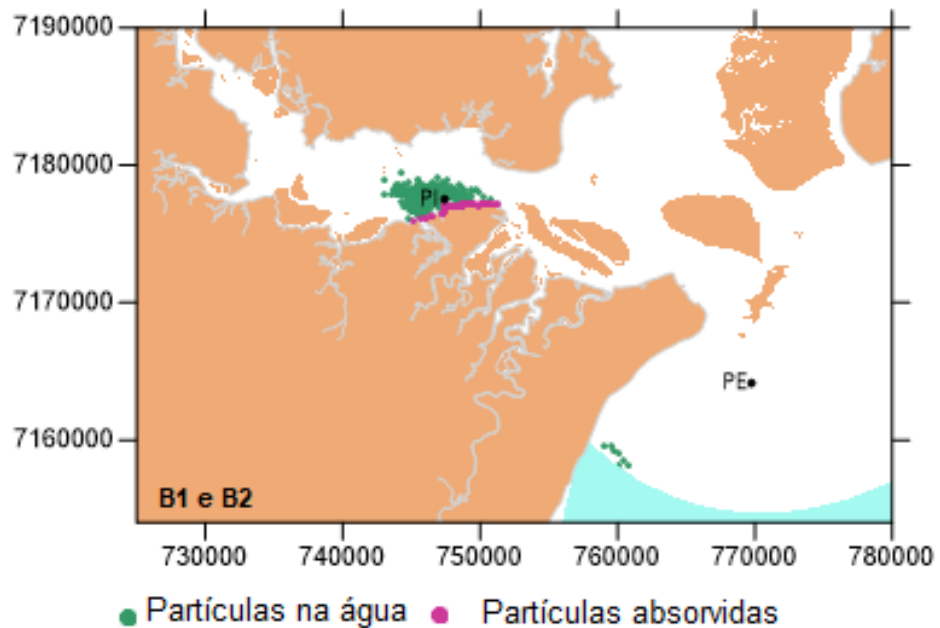
A FIGURA 34 mostra os pontos de lançamento e a dispersão dos patógenos 2 dias após o lançamento, condição de preamar, maré de sizígia. Nota-se que as partículas lançadas na região costeira não foram absorvidas. Já as lançadas no ponto interno, se acumularam na região do porto. A FIGURA 35 mostra a posição das partículas na água e absorvidas 5 dias após o lançamento. Nota-se que as partículas lançadas no ponto externo não foram absorvidas, saindo do domínio modelado 5,125 dias depois do lançamento, o que impossibilita ver a sequência da sua trajetória. Já as lançadas na região do interna, se mantiveram próximas ao porto.

FIGURA 34 — DISTRIBUIÇÃO DE PARTICULAS LANÇADAS NO PONTO INTERNO E EXTERNO NO DIA 02/01/2019 COM A CONFIGURAÇÃO DE MARÉ DE SIZÍGIA.



FONTE: Elaborada pela autora.

FIGURA 35 — DISTRIBUIÇÃO DE PARTICULAS LANÇADAS NO PONTO INTERNO E EXTERNO NO DIA 05/01/2019 COM A CONFIGURAÇÃO DE MARÉ DE SIZÍGIA.



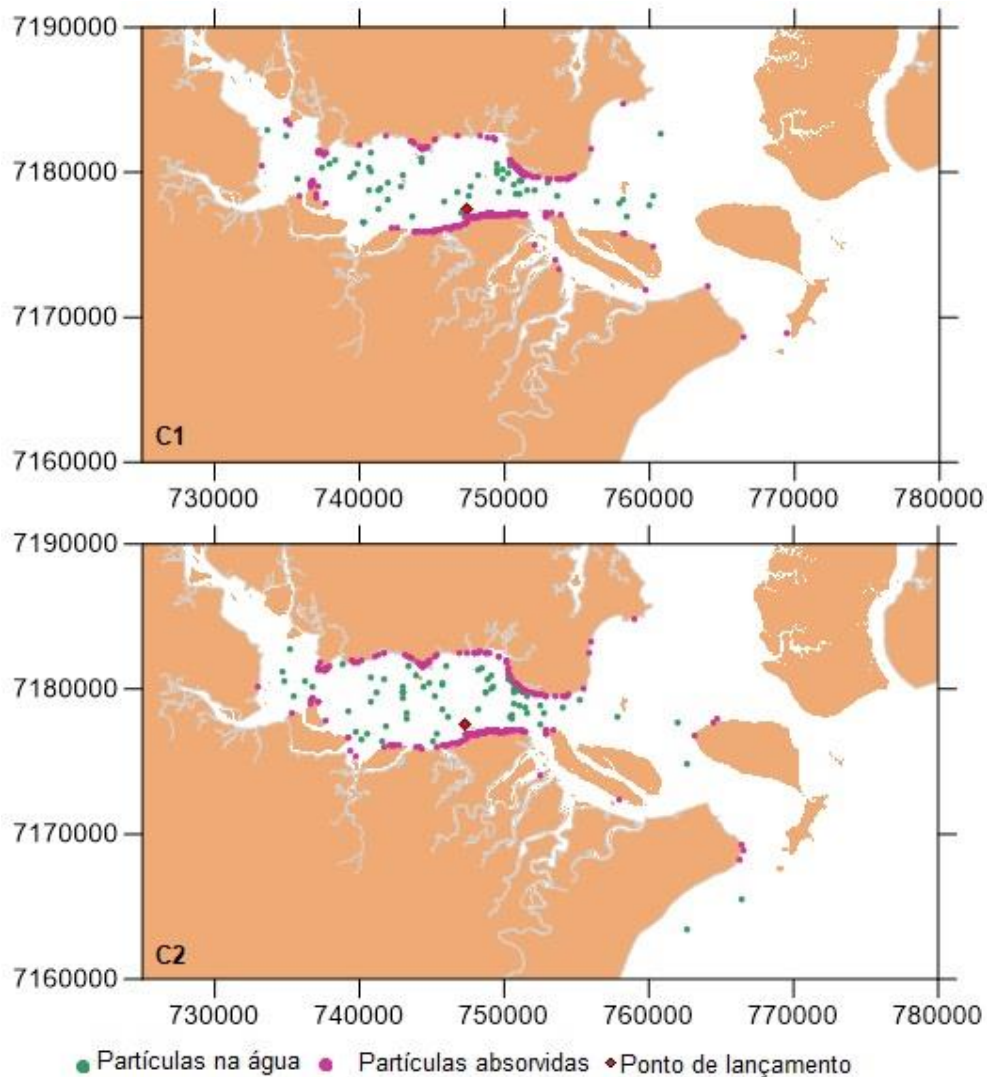
FONTE: Elaborada pela autora.

#### 4.3.3 GRUPO C – VARIAÇÃO SAZONAL

A FIGURA 36 mostra a posição das partículas na água e absorvidas 57 dias após o lançamento, para os períodos de verão e inverno. Nota-se um maior

espalhamento das partículas no inverno; algumas partículas chegam na região costeira. As partículas lançadas na região do porto de Paranaguá atingiram as duas margens da baía, tanto no verão como no inverno. No entanto, não foi capaz de adentrar ao Rio Guaraguaçu.

FIGURA 36 — DISPERSÃO NO PONTO INTERNO 57 DIAS APÓS O LANÇAMENTO COM A CONFIGURAÇÃO DE MARÉ DE SIZÍGIA.



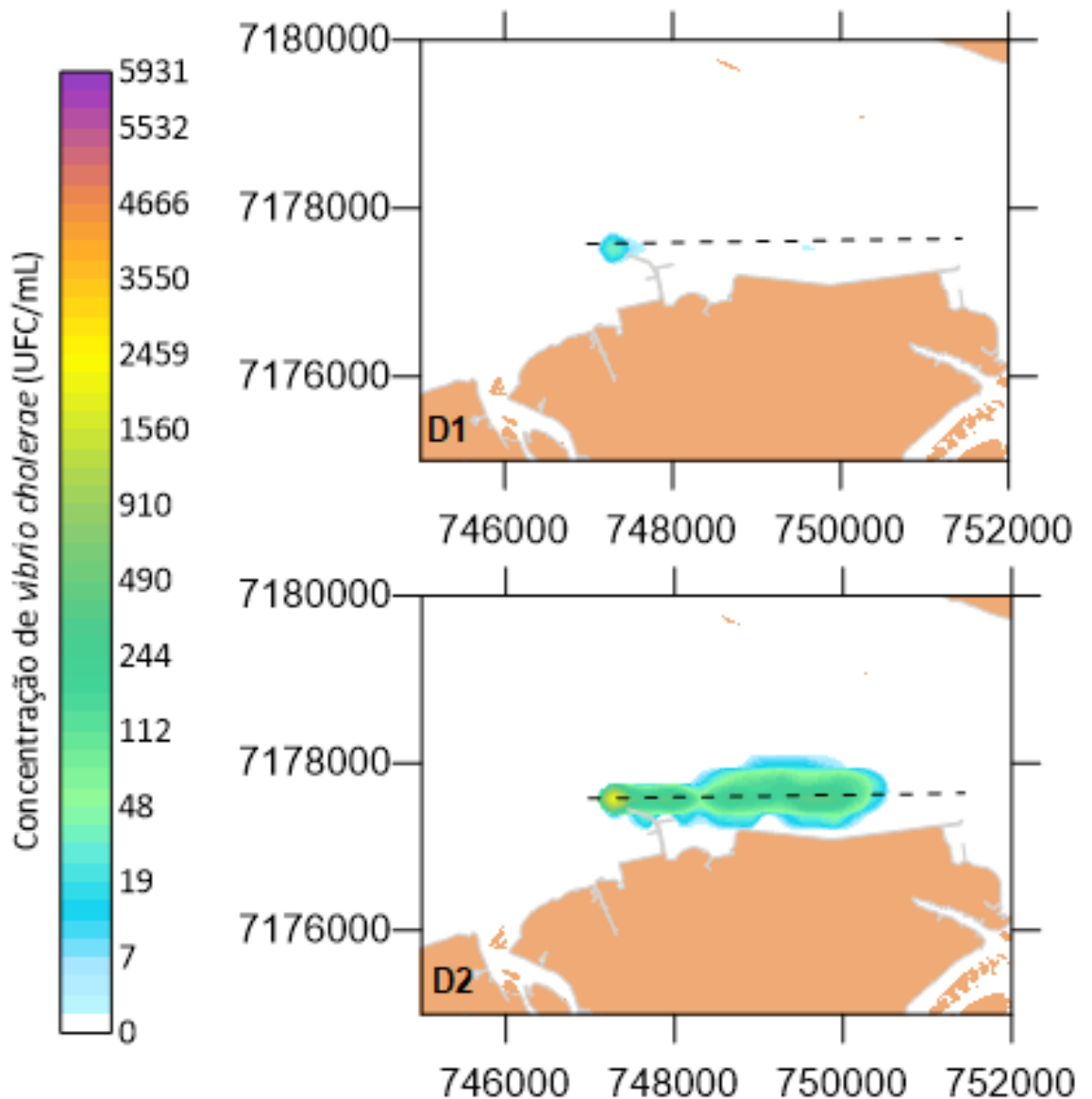
FONTE: Elaborada pela autora.

#### 4.3.4 GRUPO D – VARIAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES

A FIGURA 37 mostra a distribuição de concentrações de *vibrio cholerae* 6 horas após o lançamento, para o cenário D1 e D2. Na FIGURA 38 é possível observar os valores de concentração de *vibrio cholerae* na região da pluma formada

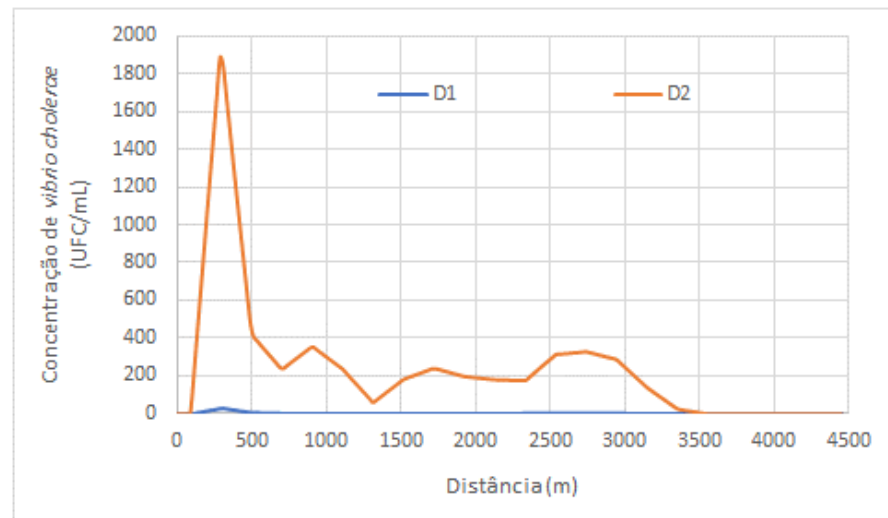
nos dois cenários avaliados D1 e D2. Quando as concentrações mínimas são usadas, cenário D1, a pluma fica restrita e os valores de concentração são próximos de zero. A diluição inicial tem, portanto, um papel importante. No cenário D2, quando as concentrações máximas são usadas, é possível observar a formação de uma pluma, com valores de concentrações elevados. Certamente, o conhecimento das concentrações de *vibrio cholerae*, presente na água de lastro lançadas pelos navios, é uma muito variável importante para a gestão ambiental e controle sanitário para esta região.

FIGURA 37 — DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE *VIBRIO CHOLERAE* 6 HORAS APÓS O LANÇAMENTO NA REGIÃO DO PORTO DE PARANAGUÁ PARA OS CENÁRIOS D1 E D2.



FONTE: Elaborada pela autora.

FIGURA 38 — CONCENTRAÇÃO DE *VIBRIO CHOLERAE* NA REGIÃO DA PLUMA MOSTRADA NA FIGURA 36, 6 HORAS APÓS O LANÇAMENTO PARA OS CENÁRIOS D1 E D2.



FONTE: Elaborada pela autora.

Para a Organização Internacional Marítima - IMO, o limite da concentração de *vibrio cholerae* para o lançamento na água, para que não se coloque em risco a saúde humana, é de 1 UFC/100mL (IMO, 2004). Neste trabalho foram lançados valores superiores a 1 UFC/100mL. Certamente os resultados mostrados neste trabalho representam um potencial maior em causar danos à saúde humana, caso essas bactérias passem para o estado infectuoso. Vale lembrar que os valores de concentrações definidos neste trabalho e usados nos lançamentos foram baseados no trabalho de Rivera et al. (2012), que entre de outubro de 2001 a outubro de 2002, mostraram que a concentração de *vibrio cholerae* na água, na região do porto de Paranaguá, variava entre  $1,5 \cdot 10^1$  UFC/ml e  $3,3 \cdot 10^3$  UFC/ml.

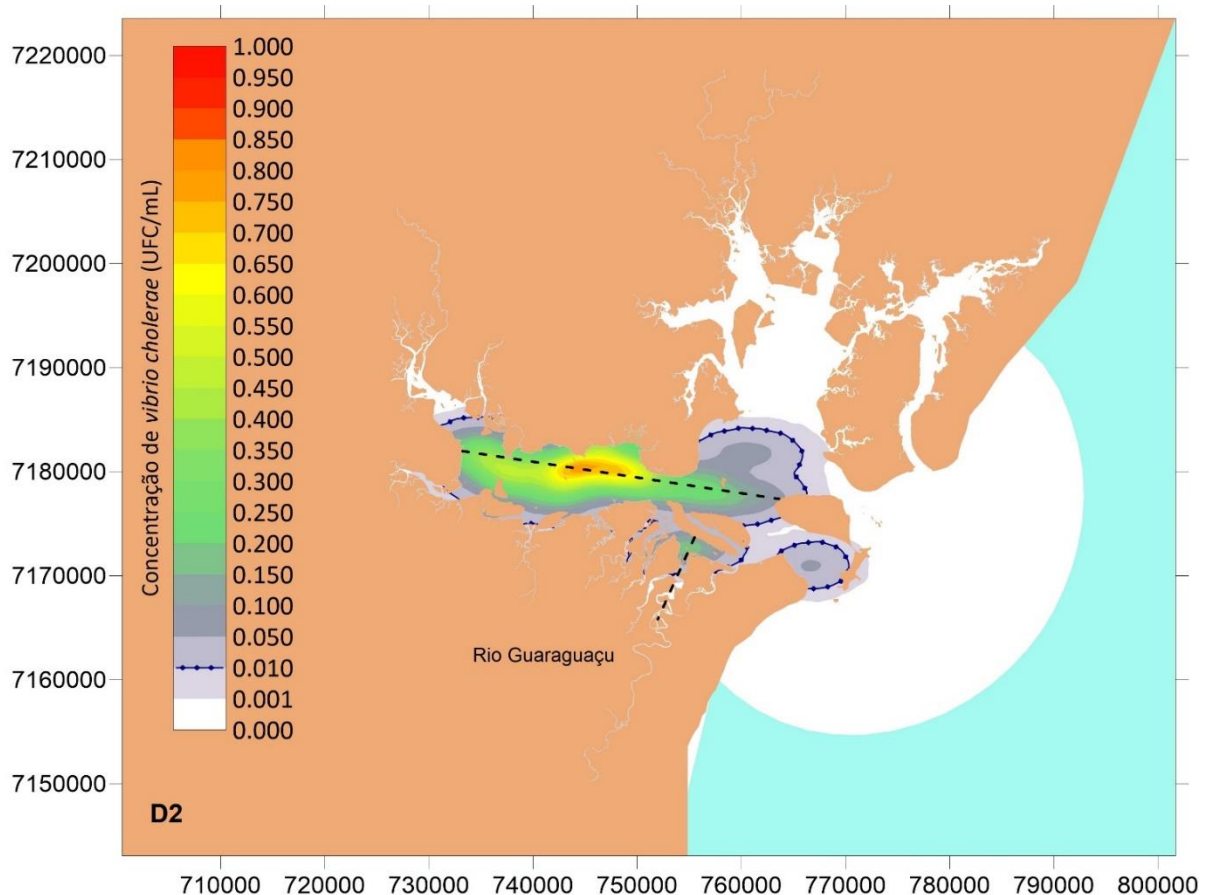
A FIGURA 39 mostra a distribuição de concentrações de *vibrio cholerae* 57 dias após o lançamento para o cenário D2 e a isolinha que define a concentração máxima esperada pela IMO. Após este período, nota-se que a região do CEP apresenta traços do *vibrio cholerae*. Neste instante são observados valores superiores aos recomendados, o que pode representar um potencial perigo para a saúde humana.

Nas FIGURA 40 e FIGURA 41 é possível observar os perfis de concentração para dois eixos mostrados na FIGURA 39. A FIGURA 40 mostra os valores de concentrações no eixo Leste-Oeste da baía. O ponto inicial está localizado próximo ao rio Nhundiaquara e o ponto final próximo a ilha do Mel, com uma extensão de

aproximadamente 30 km. Nota-se valores mais elevados de concentrações na região central da baía, distante do ponto de lançamento.

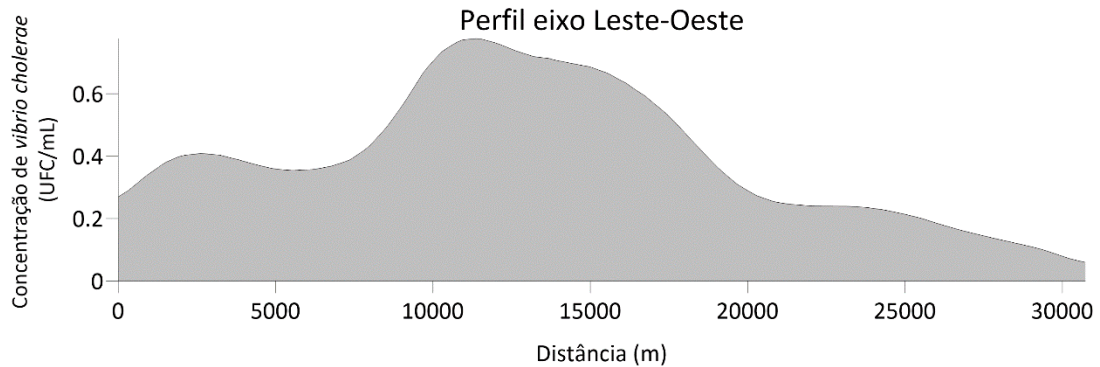
A Figura 41 mostra as concentrações ao longo do Rio Guaraguaçu. O ponto inicial está localizado na entrada do rio Guaraguaçu e segue 8 km para dentro do rio. Nota-se uma redução na concentração conforme se afasta da baía. Há valores de concentrações de *vibrio cholerae* diferente de zero em um trecho de aproximadamente 3 km próximo à baía, o que pode indicar uma vulnerabilidade desta região para os contaminantes lançados nas proximidades do porto de Paranaguá.

FIGURA 39 — CAMPO DE CONCENTRAÇÕES DE *VIBRIO CHOLERA*E 57 DIAS APÓS O LANÇAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO.



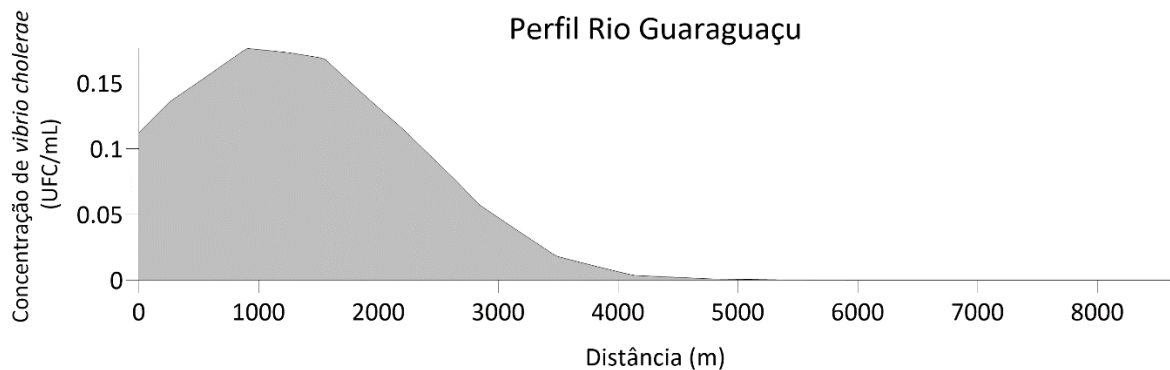
FONTE: Elaborada pela autora.

FIGURA 40 — GRÁFICO DO CAMPO DE CONCENTRAÇÕES DE *VIBRIO CHOLERAE* 57 DIAS APÓS O LANÇAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO, PARA O EIXO HORIZONTAL DA BAÍA DE PARANAGUÁ.



FONTE: Elaborada pela autora.

FIGURA 41 — GRÁFICO DO CAMPO DE CONCENTRAÇÕES DE *VIBRIO CHOLERAE* 57 DIAS APÓS O LANÇAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO, PARA A ENTRADA DO RIO GUARAGUAÇU.



FONTE: Elaborada pela autora.

Os resultados obtidos pelo modelo de transporte Lagrangeano em regiões distantes da fonte emissora podem apresentar baixos valores de concentrações, quando comparados com as concentrações de emissão. Como não há a presença de partículas nestas regiões distantes, estes resultados podem estar associados ao erro de truncamento do modelo. Portanto, vale ressaltar que esta aplicação é apenas ilustrativa das potencialidades da modelagem ambiental, sendo, portanto, conclusiva apenas de modo qualitativo. Os resultados aqui apresentados precisam ser calibrados e validados com dados de campo para que possam ser usados de modo quantitativo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a dispersão do patógeno da cólera, proveniente da água de lastro na região da Baía de Paranaguá. Por meio do uso da ferramenta computacional do SisBaHiA foi possível simular a circulação e por fim simular o transporte do vibrião colérico.

O Porto de Paranaguá recebe embarcações de mais de 70 países, o que evidencia o cuidado que se deve ter com a água de lastro aqui e nos outros países, pois este é um problema de escala global.

Os resultados da dispersão são claros quanto os riscos de um descarte no interior da baía, mesmo com um decaimento mais rápido dos patógenos há uma janela de até 5 dias para uma contaminação, como no caso do cenário A1. A sazonalidade não afetou muito o tracking das bactérias, tanto no inverno quanto no verão a distribuição atingiu toda a parte interna da baía.

No cenário D2, após 57 dias, foi observada uma concentração maior do que a concentração máxima permitida pela IMO é de 1 UFC/100mL, tanto na baía de Paranaguá quanto na entrada do Rio Guaraguaçu. Neste cenário, a bactéria se encontrar inativa, no entanto, um aumento repentino de nutrientes ou alterações meteorológicas podem alterar o estado dessas bactérias de inativas para infectuosas.

A bactéria da cólera foi utilizada como traçador, mas essa dispersão poderia ser aplicada a outras espécies, o que explicita a vulnerabilidade do interior da baía de Paranaguá e do Rio Guaraguaçu frente a descartes incorretos água de lastro. Salienta-se que, o organismo analisado é considerado sésil, portanto, invasores com capacidade de locomoção poderiam dispersar ainda mais pela baía.

Vale ressaltar que os resultados aqui apresentados precisam ser calibrados e validados com dados de campo para que possam ser usados de modo quantitativo.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um futuro trabalho, sugere-se um aprofundamento nas características de reprodução do patógeno, a qual não foi contabilizada neste trabalho, apenas o decaimento e a sua forma inativa. Seria apropriado utilizar o modelo hidrodinâmico

tridimensional para observar a cunha salina nos rios afluentes, dada a importância da salinidade na sobrevivência das bactérias. Assim, viabilizaria o uso de um o decaimento variável, com função da distribuição espacial de salinidade. O decaimento variável certamente melhor representa a realidade, por isso seria interessante definir uma formulação que se aplique a bactéria de interesse.

## REFERÊNCIAS

- ABWMR. **Australian Ballast Water Management Requirements**. 2020.
- ÁGUAS PARANÁ. Plano da Bacia Hidrográfica Litorânea. , v. 2, 2018.
- ANVISA. Brasil – Água de Lastro Anvisa (Projetos GGPAF 2002). , 2003. Disponível em: <[www.anvisa.gov.br](http://www.anvisa.gov.br)>. .
- APPA. Portos do Paraná. Disponível em: <<http://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Quem-somos>>. Acesso em: 26/4/2021.
- BIGARELLA, J. J.; KLEIN, R. M. **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional: contribuições à geografia, geologia e ecologia regional**. Governo do Paraná, 1978.
- BURKHOLDER, J. M.; HALLEGRAEFF, G. M.; MELIA, G.; et al. Phytoplankton and bacterial assemblages in ballast water of U . S . military ships as a function of port of origin , voyage time , and ocean exchange practices. , v. 6, p. 486–518, 2007.
- C3S. Copernicus Climate Change Service. , 2021. Disponível em: <<https://climate.copernicus.eu/about-us>>. .
- CARLTON, J. T. Introduced Species in U.S. Coastal Waters: Environmental Impacts and Management Priorities. **Pew Oceans Commission**, 2001. Disponível em: <[https://www.iatp.org/sites/default/files/Introduced\\_Species\\_in\\_US\\_Coastal\\_Waters\\_Enviro.htm](https://www.iatp.org/sites/default/files/Introduced_Species_in_US_Coastal_Waters_Enviro.htm)>. .
- CASTRO, M. C. T.; HALL-SPENCER, J. M.; POGGIAN, C. F.; FILEMAN, T. W. Ten years of Brazilian ballast water management Ten years of Brazilian ballast water management. **Journal of Sea Research**, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2017.02.003>>. .
- CAVALLINI, N. G.; REIS, R. A.; TIEPOLO, L. M. O Silencioso Grito Químico: Riscos E Ameaças No Rio Guaraguaçu Sob a Perspectiva Ecosistêmica / the Quiet Chemical Scream: Risks and Imminent Threats in the Guaraguaçu River Under the Ecosystem System. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 66540–66553, 2020.
- COLWELL, R. R.; GRIMES, D. J.; HUQ, A. Viable but Non-Culturable Vibrio

cholerae and Related Pathogens in the Environment: Implications for Release of Genetically Engineered Microorganisms. , , n. September, 1985.

COLWELL, R. R.; SPIRA, W. M. The Ecology of *Vibrio cholerae*. **Cholera**, p. 107–127, 1992.

COSTA, E.; CUNHA, C. L. C. ESTUDO DA BALNABILIDADE NA BAÍA DE GUARATUBA. , 2018.

DALAZEN, J. P.; CUNHA, C. DE L. DA N.; ALMEIDA, R. C. DE. Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá. , p. 887–899, 2020.

DENES, M. F. **Influência das ondas de gravidade na circulação do Complexo Estuarino de Paranaguá (em publicação)**. 2021.

DRAKE, J. M.; LODGE, D. M.; B, P. R. S. L.; DRAKE, J. M.; LODGE, D. M. Global hot spots of biological invasions: evaluating options for ballast – water management Global hot spots of biological invasions: evaluating options for ballast-water management. , p. 575–580, 2009.

ESCOBAR, L. E.; RYAN, S. J.; STEWART-IBARRA, A. M.; et al. Acta Tropica A global map of suitability for coastal *Vibrio cholerae* under current and future climate conditions. **Acta Tropica**, v. 149, p. 202–211, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.05.028>>. .

ESTADES, N. P. O Litoral do Paraná: entre a riqueza natural e a pobreza social. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 8, 2003.

FARIA, L.; FREHSE, F. DE A.; OCCHI, T. V. T.; et al. Thematic Section: Limnology of Subtropical Occurrence of non-native species in a subtropical coastal River , in Southern Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 33, 2021.

FEITOSA, R. C.; ROSMAN, P. C. C. Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável - aplicações em emissários submarinos. , p. 190, 2007.

FELTRIN, R.; MARINA, C.; STEFANONI, F.; SPACH, H. L. Fish assemblage structure in an estuary of the Atlantic Forest biodiversity hotspot ( southern Brazil ). , p. 38–50, 2011.

FORSHELL, L. P.; WIERUP, M. Salmonella contamination: a significant challenge to the global marketing of animal food products. **Sci Tech**, 2006. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17094696/#affiliation-1>>. .

GAZOLA, F. F. DA S. **Composição E Distribuição Da Ictiofauna Do Rio**

**Guaraguaçu (Paranaguá , Paraná-BR) E Biologia alimentar de três espécies**, 2008. Universidade Federal do Paraná.

GROB, C.; POLLET, B. G. Regrowth in ship ' s ballast water tanks : Think again! **MPB**, p. 2015–2017, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.061>>. .

HALL-SPENCER, J.; CECILIA, M.; CASTRO, T.; et al. Ten years of Brazilian ballast water management Ten years of Brazilian ballast water management. **Journal of Sea Research**, , n. March 2019, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2017.02.003>>. .

HALLEGRAEFF, G. M. possible ballast water management strategies. , v. 168, p. 297–309, 1998.

IMO. International Maritime Organization. Disponível em: <<http://www.imo.org>>. Acesso em: 15/4/2021.

ISLAM, M. T.; ALAM, M.; BOUCHER, Y. Emergence , ecology and dispersal of the pandemic generating *Vibrio cholerae* lineage. , v. 20, n. 3, p. 106–115, 2017.

JUBAIR, M.; MORRIS, J. G.; ALI, A. Survival of *Vibrio cholerae* in Nutrient-Poor Environments Is Associated with Survival of *Vibrio cholerae* in Nutrient-Poor Environments Is Associated with a Novel ““ Persister ”” Phenotype. , , n. December, 2012.

KNAP, A.; DEWAILLY, É.; FURGAL, C.; et al. Commentary Indicators of Ocean Health and Human Health: Developing a Research and Monitoring Framework. , v. 110, n. 9, p. 839–845, 2002.

KNOPPERS, B. A.; BRANDINI, F. P. Ecological studies in the Bay of Paranaguá. II. Some physical and chemical characteristics. **Nerítica**, 1987.

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. C. MAPAS DE PARÂMETROS TEXTURAIS DE SEDIMENTOS DE FUNDO DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ – PR TEXTURAL PARAMETERS MAPS OF BOTTOM SEDIMENTS ON PARANAGUÁ BAY COMPLEX – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, p. 77–82, 2004.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: U. Seeliger; B. Kjerfve (Orgs.); **Ecological Studies (Analysis and Synthesis)**. 144<sup>o</sup> ed, p.131–145, 2001. Springer, Berlin, Heidelberg.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material**

**particulado em suspensão na baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**, 1999. Universidade Federal do Paraná (UFPR).

MARPOL 73/78. MARPOL 73/78 – ANEXO II REGRAS PARA O CONTROLE DA POLUIÇÃO POR SUBSTÂNCIAS LÍQUIDAS NOCIVAS A GRANEL. , v. Anexo II, 1999.

MARTINS, E. M. O. **Curso de Direito Marítimo, volume I: teoria geral**. 2013.

MCCARTHY, S. A.; KHAMBATY, F. M. International Dissemination of Epidemic *Vibrio cholerae* by Cargo Ship Ballast and Other Nonpotable Waters. , v. 60, n. 7, p. 2597–2601, 1994.

MELLO, Y.; LOPES, F.; ROSEGHINI, W. Características climáticas e análise rítmica aplicada a episódios extremos de precipitação e temperatura no município de Paranaguá, PR. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 313–336, 2017.

MILLER, A. W.; HUBER, T.; MINTON, M. S.; RUIZ, G. M.; ENVIRONMENTAL, S. Contracting Officer Technical Representative. , , n. January 2006, p. 1–28, 2011.

MTPA, M. D. T. P. E. A. PLANO MESTRE COMPLEXO PORTUÁRIO DE PARANAGUÁ E ANTONINA. , 2016.

NCR. **From Monsoons to Microbes**. The Nation ed. Washington, DC, 1999.

NELSON, E. J.; HARRIS, J. B.; MORRIS, J. G.; CALDERWOOD, S. B.; CAMILLI, A. Cholera transmission: The host, pathogen and bacteriophage dynamic. **Nature Reviews Microbiology**, v. 7, n. 10, p. 693–702, 2009. Nature Publishing Group.

NORMAM-04. **NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA OPERAÇÃO DE EMBARCAÇÕES ESTRANGEIRAS EM ÁGUAS JURISDICIONAIS BRASILEIRAS**. 2013.

NORMAM-20. **NORMA DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA O GERENCIAMENTO DA ÁGUA DE LASTRO DE NAVIOS**. 2019.

NOVITSKY, J. A.; MORITA, R. Y. Possible strategy for the survival of marine bacteria under starvation conditions. **Marine Biology**, v. 48, n. 3, p. 289–295, 1978.

PEREIRA, N. N. **Água de lastro**. 2018a.

PEREIRA, N. N. Transporte de microrganismos de risco para saúde pública via tanque de água de lastro e suas implicações. **Água de lastro: Gestão e controle**. 1º ed, p.126, 2018b.

PETRY DALAZEN, J. **MODELAGEM NUMÉRICA DA RENOVAÇÃO DAS**

**ÁGUAS NO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**, 2017. Universidade Federal do Paraná.

PROBIO; UNB. Conservação da Biodiversidade na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim. , 2016.

RIVERA, I. N. G.; SOUZA, K. M. C.; SOUZA, C. P.; LOPES, R. M. Free-living and plankton-associated vibrios: Assessment in ballast water, Harbor areas, and coastal ecosystems in Brazil. **Frontiers in Microbiology**, v. 3, n. JAN, p. 1–8, 2012.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA. , v. 5, p. 1–426, 2021.

RUIZ, G. M.; CARLTON, J. T.; GROSHOLZ, E. D.; HINES, A. H. Global invasions of marine and estuarine habitats by non-indigenous species: mechanisms, extent, and consequences. **American Zoologist**, v. 37, n. 6, 1997.

SECULTUR. Secretaria Municipal de Cultura e Turismo de Paranaguá. Disponível em: <<https://secultur.paranagua.pr.gov.br/item/baia-de-paranagua/>>. Acesso em: 22/5/2021.

SEELIGER, U.; KJERFVE, B. **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**. 2001.

SIDDIQUE, A. K.; BAQUI, A. H.; EUSOF, A.; et al. Survival of classic cholera in Bangladesh. **The Lancet**, v. 337, p. 1125–1127, 1991.

SILVA, R. M.; MOREIRA, E. C. P. a Água De Lastro E a Necessidade De Efetividade Das Normas De Proteção Da Biodiversidade Marinha No Contexto Amazônico. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 35, p. 123–147, 2019.

SOUZA, R. C. C. L. Água de lastro: uma ameaça à biodiversidade. Anais da 62ª Reunião Anual da SBPC. **Anais...** , 2010. Natal. Disponível em: <[http://www.sbpnet.org.br/livro/62ra/mesas\\_redondas/MR Rosa Cristina Corrêa Luz de Souza.pdf](http://www.sbpnet.org.br/livro/62ra/mesas_redondas/MR_Rosa_Cristina_Corrêa_Luz_de_Souza.pdf)>. .

SPERLING, M. VON. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 1º ed. 1996.

STÜKER, E.; SCHUSTER, C. H.; SCHUSTER, J. J.; et al. Comparação Entre Os Dados De Vento Das Reanálises Meteorológicas Era-Interim E Cfsr Com Os Dados Das Estações Automáticas Do Inmet No Rio Grande Do Sul. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 284, 2016.

TABARELLI, M.; PINTO, L. P.; SILVA, J. M. C.; HIROTA, M. M.; BEDÊ, L. C. Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica

brasileira. **MEGADIVERSIDADE**, v. 1, 2005.

TAMURA, M. M.; CUNHA, C. L. N. XXVII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA AIIH Evolução da Sedimentação Nos Canais De Acesso Aos Portos No Complexo Estuarino de Paranaguá. , 2016.

THOMANN, R. V; MULLER, J. A. **Principle of Surface Water Quality Modeling and Control**. Nova York: Harper and Row, 1987.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **MICROBIOLOGIA: Uma introdução**. 12º ed. 2017.

TSOLAKI, E.; DIAMADOPOULOS, E. Technologies for ballast water treatment : a review. , , n. May 2009, p. 19–32, 2010.

WANG, Q.; CHENG, F.; XUE, J.; XIAO, N.; WU, H. Bacterial community composition and diversity in the ballast water of container ships arriving at Yangshan Port , Shanghai , China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 160, n. August, p. 111640, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111640>>. .

WERSCHKUN, B.; BANERJI, S.; BASURKO, O. C.; et al. Chemosphere Emerging risks from ballast water treatment : The run-up to the International Ballast Water Management Convention. **Chemosphere**, v. 112, p. 256–266, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.135>>. .

XU, H.-S.; ROBERTS, N. C.; SINGLETON, F.; et al. Survival and viability of nonculturable *Escherichia coli* and *Vibrio cholerae* in the estuarine and marine environment. , , n. December, 1982.