

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO DE OCEANOGRAFIA

MIRIÃ FIGUEIRA DE SOUZA GOLLMANN

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PADRÕES CLIMÁTICOS QUE INFLUENCIAM OS
PORTOS DE SÃO FRANCISCO DO SUL (SETOR PÚBLICO) E ITAPOÁ (SETOR
PRIVADO)**

Florianópolis

2022

Miriã Figueira de Souza Gollmann

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PADRÕES CLIMÁTICOS QUE INFLUENCIAM OS
PORTOS DE SÃO FRANCISCO DO SUL (SETOR PÚBLICO) E ITAPOÁ (SETOR
PRIVADO)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Antonio Fernando Harter Fetter Filho, Dr.

Coorientadora: Prof. Marinez Eymael Garcia Scherer, Dra.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gollmann, Miriã Figueira de Souza Gollmann
Análise Estatística dos Padrões Climáticos que
Influenciam os Portos de São Francisco do Sul (Setor
Público) e Itapoá (Setor Privado) / Miriã Figueira de
Souza Gollmann Gollmann ; orientador, Antonio Fernando
Harter Fetter Filho, coorientador, Marinez Eymael Eymael
Garcia Scherer, 2022.
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. portos. 3. preditores climáticos.
4. refinamento estatístico. 5. gestão costeira. I. Harter
Fetter Filho, Antonio Fernando. II. Eymael Garcia Scherer,
Marinez Eymael. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Miriã Figueira de Souza Gollmann

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PADRÕES CLIMÁTICOS QUE INFLUENCIAM OS
PORTOS DE SÃO FRANCISCO DO SUL (SETOR PÚBLICO) E ITAPOÁ (SETOR
PRIVADO)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso Oceanografia

Floranópolis, 11 de março de 2022

Prof^a. Alessandra Larissa Fonseca, Dra.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Antonio Fernando Harter Fetter Filho, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Marinez Eymael Garcia Scherer, Dra.
Coorientadora

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Leandro Farina, Dr.

Avaliador

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Msa. Luana Borato

Avaliadora

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Este trabalho é dedicado à minha família,
amigos, professores, colegas de curso e
todos que de alguma forma contribuíram para
que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e irmã por sempre terem acreditado e sonhado junto comigo, me proporcionando toda a base e estrutura necessária para que eu chegasse até aqui. Eu amo vocês e esse diploma é nosso.

Agradeço também ao Ramna pela parceria de vida, experiências, conselhos e amor. Sua companhia foi essencial nos últimos 03 anos. Eu te amo!

Agradeço às incríveis amigadas que construí ao longo desses anos de graduação. Ao Júlio por estar em todos os momentos, compartilhando a mesa na BU até às 22h, o barco à Ilha do Campeche, a mesa no estágio da Fractal e, por fim, a mesma casa. À Malu pelo jeito único e maravilhoso de ser e por ser quem mais me apoia e vibra com as minhas conquistas. À Giulia por compartilhar os gozinhos estranhos, os cafés com bolo no CCE e por sempre estar disposta a me ouvir e ajudar. À Millenne por compartilhar as maiores reflexões, shows e músicas e por sempre me garantir que ela é alguém que eu posso contar. À Bruna por dividir as confusões de querer ser oceanógrafa mas também programadora, sendo sempre um exemplo de alguém que eu tenho certeza que vai conquistar tudo o que quiser. Em resumo, eu amo muito todos vocês.

Aos demais colegas, agradeço pela parceria de cursar um curso tão fora da curva, que proporciona experiências únicas que levaremos para sempre, independente da jornada que seguirmos. Agradeço também pelos momentos de diversão que tornaram tudo mais fácil.

Também agradeço às amigas de longa data, Manu e Mari, por estarem presente desde sempre. Obrigada pelo apoio, pelas conversas, pela compreensão, pelo amor e principalmente por permanecerem mesmo com a distância que se instaurou quando decidi embarcar nessa jornada da Oceanografia.

E a Júlia, amiga de não tão longa data, também deixo o meu agradecimento. Obrigada por dividir os dias, a casa, as conversas e os desabafos. Eu tenho um carinho enorme por ti!

Ao Prof. Fetter pela orientação, mas principalmente por sempre acreditar e me incentivar a crescer, sendo o ponto de partida que me proporcionou todas as experiências acadêmicas e profissionais ao longo desses 05 anos de graduação. À Prof. Marinez Scherer por ressignificar a oceanografia a partir de conceitos tão

importantes e necessários, além de me instruir como coorientadora nessa jornada de conclusão de curso.

Muito obrigada também aos demais professores da Universidade que de alguma forma fizeram diferença, assim como todo o corpo de funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionarem um espaço tão único de ensino. Foi um privilégio poder estudar em um local tão rico que luta para sobreviver em um país onde a ciência é cada vez mais desvalorizada.

Agradeço ao Laboratório de Biologia Celular Vegetal, ao Instituto Ilha do Campeche, à Fractal Engenharia e Sistemas, ao Laboratório de Estatística Aplicada e à Cosmobots por proporcionarem oportunidades e experiências dentro e fora da graduação, o que contribuiu para o meu crescimento profissional e pessoal.

Por fim, agradeço à banca avaliadora pelo tempo, dedicação e participação nesta etapa tão importante.

Às vezes temos a sorte de saber que nossas vidas foram mudadas, para descartar o velho, abraçar o novo, de cabeça para baixo e executar um curso imutável. Isso aconteceu comigo, num dia de verão, quando os meus olhos se abriram para o mar. (COUSTEAU)

RESUMO

Portos marítimos estão localizados em áreas vulneráveis a fenômenos atmosféricos extremos que podem comprometer suas atividades. Uma possível maneira de compreender a configuração atmosférica durante a passagem desses eventos extremos é por intermédio dos padrões atmosféricos (*weather types*). Dessa forma, o presente trabalho objetiva identificar os padrões atmosféricos associados aos eventos meteorológicos extremos que exercem influência sobre o Complexo Portuário de São Francisco do Sul, assim como buscar em bibliografia existente medidas de mitigação e adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas em portos. Os padrões atmosféricos utilizados no presente trabalho foram retirados do estudo desenvolvido por Paula Gomes da Silva. Além disso, foi realizado um refinamento ou *downscaling* estatístico para estimar o comportamento de variáveis locais a partir das condições atmosféricas globais utilizando dados de ondas dos modelos CSIRO e DAC. Para avaliar os cenários de níveis máximos e mínimos, aplicou-se a técnica de *Total Water Level* (TWL) proposta por RUEDA, 2016 e utilizada por BORATO, 2021. Após, foi realizada uma análise comparativa observando o comportamento dos *weather types* (WTs) com maiores frequências de ocorrência nos cenários obtidos por BORATO, 2021, objetivando compreender o comportamento destes nas projeções futuras. Ainda, foi realizada uma busca bibliográfica na plataforma *Google Scholar* para identificação de metodologias de mitigação utilizadas em portos do mundo que melhor se encaixariam no contexto do presente trabalho. Os resultados indicaram que os WTs mais frequentes foram os WT12, WT11 e WT16. O *downscaling* estatístico para o TWL Máximo indicou que os WT11 e WT16 são responsáveis pelos maiores níveis observados em toda a série. Por outro lado, o *downscaling* estatístico para o TWL Mínimo demonstrou que o WT12 está associado aos menores níveis identificados. As projeções futuras indicam que a frequência de ocorrência do WT12 tende a aumentar, enquanto que os WT11 e WT16 apresentam diminuição. As análises bibliográficas indicam que a área de estudo está mais suscetível aos eventos de elevação do nível do mar, sugerindo que as medidas de gestão atuais devem procurar por ferramentas que enfoquem em mitigar eventos de inundação e ressacas, embora também seja importante que estudos futuros busquem compreender os impactos causados por eventos que minimizam os níveis. Além disso, o estudo aponta que as principais alternativas de gestão são aquelas que incluem projetos governamentais integrativos com a sociedade acadêmica e público geral. Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que o trabalho possui potencial de auxiliar os tomadores de decisão frente aos eventos atmosféricos que influenciam os portos estudados.

Palavras-chave: Portos. Preditores Climáticos. Refinamento Estatístico. Mitigação. Adaptação.

ABSTRACT

Maritime ports are located in vulnerable areas to extreme atmospheric phenomena. A possible way to understand the atmospheric configuration during these extreme events is through weather types. Therefore, the aim of this study is to identify the weather types associated with the extreme meteorological events that have an influence on the Port Complex of South San Francisco and search in general bibliography for existing mitigation and adaptation actions to lead with the climate change impacts on ports. The weather types used in this work were from the Paula Gomes da Silva study. Besides that, a statistical downscaling was used to estimate the local variable behavior using the global atmospheric condition through CSIRO and DAC models. With the purpose of evaluating the maximum and minimum scenarios, the Total Water Level (TWL) technic was applied (RUEDA, 2016; BORATO, 2021). After that, a comparative analysis was made to understand the most frequent weather types behavior on the scenarios used by BORATO, 2021, with the aim to comprehend the behavior of these weather types on future projections. Furthermore, was realized a bibliographic search on the Google Scholar platform to identify mitigation methodologies used on ports around the world, considering those which had the best application in the study area. The results indicated that the most frequent weather types were WT12, WT11, and WT16. The statistical downscaling to the Maximum TWL indicated that the WT11 and WT16 are responsible for the highest levels in all temporal series. In contrast, the statistical downscaling to the Minimum TWL demonstrated that the WT12 is associated with the lowest levels. The future projections show that the occurrence of the WT12 tends to increase, whereas the occurrence of the WT11 and WT16 is decreasing. The bibliography analysis appoint that the study area is more vulnerable to the rise in sea level, which suggest that the coastal management measures should to looking for tools that have a focus on mitigating the flooding events, although is important to develop future studies to understand the impacts caused by events which minimize the sea levels. In addition, the study appoints that the main management alternatives are those which include governmental projects with the opinion of the academic society and general public. The results appoint that the present study has the potential to help decision makers to face the atmospheric events which have an influence on the ports studied.

Key-words: Ports. Weather Types. Statistical Downscaling. Mitigation. Adaptation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Mapa de Localização da Área de Estudo	21
Figura 02 – Área de influência para a área de estudo obtida pelo método ESTELA	24
Figura 03 – Padrões atmosféricos obtidos para o Atlântico Sul, com base nos mapas de campo de pressão ao nível do mar	25
Figura 04 – Localização dos pontos escolhidos para coleta de dados	27
Figura 05 – Comportamento de Hs para os pontos 01 e 02 e respectiva diferença entre as séries	31
Figura 06 – Comportamento de Tp para os pontos 01 e 02 e respectiva diferença entre as séries	32
Figura 07 – Direção de Onda para o Ponto 01	33
Figura 08 – Direção de Onda para o Ponto 02	33
Figura 09 – Frequência Geral de Ocorrência dos <i>Weather Types</i>	34
Figura 10 – Valores de TWL Máximo entre 1992 e 2010	36
Figura 11 – Variação do TWL Máximo para 2002 e 2008	38
Figura 12 – Variação do TWL Mínimo para 1993, 1996 e 1999	40
Figura 13 – Relação entre Frequência vs. Severidade dos eventos extremos	45
Figura 14 – Hierarquia das Ferramentas de Planejamento e Gestão Portuária Nacional	53
Figura 15 – Ciclo de avaliação de adaptação para avaliar mudanças nas condições e riscos da linha de base	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Análise estatística básica de Hs e Tp	30
Tabela 02 – Análise estatística refinada de Hs e Tp	31
Tabela 03 – Valores de <i>Downscaling</i> Estatístico para o WT11 e WT16 em 2002	36
Tabela 04 – Valores de <i>Downscaling</i> Estatístico para o WT12 em 2008	37
Tabela 05 – Valores de <i>Downscaling</i> Estatístico para o WT11 em 1996	38
Tabela 06 – Valores de <i>Downscaling</i> Estatístico para o WT12 em 1993	39
Tabela 07 – Valores de <i>Downscaling</i> Estatístico para o WT16 em 1999	39
Tabela 08 – Sintetize dos resultados de TWL Máximo e Mínimo	40
Tabela 09 – Estudos analisados	43
Tabela 10 – Categorias de Frequências dos eventos extremos	44
Tabela 11 – Categoria de Severidade dos eventos extremos	44
Tabela 12 – Análise Preliminar de Perigos para o Complexo Portuário de São Francisco do Sul	46
Tabela 13 – Projetos gerenciais	47
Tabela 14 – Instrumentos de Gerenciamento Costeiro no Brasil aplicáveis ao setor portuário	49
Tabela 15 – Resultados das entrevistas para compreensão das opiniões sobre os impactos das mudanças climáticas no Porto de Cabedelo, Paraíba	51
Tabela 16 – Eventos resultantes das mudanças climáticas e seus respectivos impactos na zona portuária brasileira	57
Tabela 17 – Exemplos de adaptações frente às mudanças climáticas utilizadas em portos da Inglaterra	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAP	Agenda Ambiental Portuária
APP-2	Análise Preliminar de Perigos
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CMIP	<i>Coupled Models Intercomparison Project</i>
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>
DAC	<i>Dynamic Atmospheric Correction</i>
Dirm	Direção Média de Onda
GEE	Gases de Efeito Estufa
Hs	Altura Significativa de Onda
PAF-ZC	Plano de Ação Federal para a Zona Costeira
PC	<i>Principal Component</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PEM	Planejamento Espacial Marinho
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathway</i>
SS	Storm Surge (Maré Meteorológica)
Tp	Período Médio
TWL	<i>Total Water Level</i>
Unisantos	Universidade Católica de Santos
WT	<i>Weather Type</i>
ZEEC	Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro
RETP	Registro de Emissões e Transferências de Poluentes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	19
2.1 Perguntas de Pesquisa.....	19
2.2 Hipótese.....	19
2.3 Objetivos.....	20
2.3.1 Objetivo geral.....	20
2.3.2 Objetivos específicos.....	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 Área de Estudo.....	20
3.1.1 Características operacionais do Complexo Portuário de São Francisco do Sul.....	21
3.1.2 Características físicas da Ilha de São Francisco do Sul e Baía da Babitonga.....	22
3.2 Preditores Climáticos (<i>Weather Types</i>).....	23
3.3 Refinamento Estatístico (<i>Downscaling</i> Estatístico).....	25
3.4 Projeção dos <i>Weather Types</i> nos cenários de mudanças climáticas.....	28
3.5 Busca bibliográfica de mitigações.....	29
4. RESULTADOS.....	30
4.1 Dados Gerais.....	30
4.2 Frequências de ocorrências dos <i>Weather Types</i>.....	34
4.3 <i>Downscaling</i> Estatístico ou Refinamento Estatístico.....	35
4.3.1 <i>Downscaling</i> ou Refinamento Estatístico para os níveis máximos.....	35
4.3.2 <i>Downscaling</i> ou Refinamento Estatístico para os níveis mínimos.....	38
4.4 Frequências de ocorrências nas projeções de mudanças climáticas.....	40

4.4.1 Cenário de baixa emissão de gases de efeito estufa.....	41
4.4.2 Cenário de média emissão de gases de efeito estufa.....	41
4.4.3 Cenário de alta emissão de gases de efeito estufa.....	42
4.5 Busca bibliográfica de mitigações.....	42
4.5.1 Pesquisas direcionadas à Área de Estudo.....	43
4.5.2 Pesquisas direcionadas a Portos Nacionais.....	50
4.5.3 Pesquisas direcionadas a Portos Internacionais.....	56
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

Portos marítimos estão localizados em áreas extremamente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, estando expostos a fenômenos atmosféricos extremos que podem comprometer significativamente suas atividades (OECD, 2007). Normalmente, esses fenômenos são caracterizados pelo aumento do nível do mar, tempestades, inundações e eventos extremos de ondas (HERRMANN et al., 2009; ALMEIDA; PASCOALINO, 2009; BECKER et al., 2012). Dessa forma, para reduzir as vulnerabilidades naturais e humanas, é essencial que os padrões atmosféricos atuantes sobre essas regiões sejam compreendidos, assim como as possíveis adaptações frente aos impactos causados pela passagem destes eventos (CAMUS et al., 2019; MCEVOY; MULLETT, 2013).

Uma possível maneira de compreender a configuração atmosférica durante a passagem de eventos extremos é por intermédio dos padrões atmosféricos (*weather types*). De maneira geral, padrões atmosféricos ou preditores climáticos são conjuntos de características que atuam como identificadores e indicadores de eventos atmosféricos, descrevendo suas frequências de ocorrência, variações sazonais e intensidades (PIOTROWICZ; CIARANEK, 2020), além de serem úteis para agrupar condições marinhas de acordo com seus processos meteorológicos geradores (CAMUS et al., 2019). Assim, através de análises, é possível identificar qual preditor está relacionado a determinado evento, sendo estes importantes para previsões climáticas e compreensão das características e impactos dos fenômenos atmosféricos.

Considerando que 90% do frete mundial é realizado por navios (IMO, 2008), é notório que os portos desempenham um papel crucial na economia local, regional e global, sendo parte importante no transporte de mercadorias ao redor do mundo por conectarem as cadeias regionais aos mercados globais (CAMUS et al., 2019). Ainda, sabendo que o transporte marítimo apresenta uma alta eficiência e uma menor pegada de carbono quando comparado aos outros modos de transporte (BECKER et al., 2012), é esperado uma tendência de aumento das atividades portuárias nos próximos anos. Dessa forma, interrupções dos serviços portuários causadas por eventos atmosféricos podem gerar perdas econômicas da ordem de bilhões de

dólares, trazendo consequências para a economia regional e para a operação dos mercados globais (BECKER et al., 2013).

Contudo, a atenção aos impactos de eventos extremos nos portos é relativamente recente (MCEVOY; MULLETT, 2014), sendo necessário que mais estudos sejam desenvolvidos para compreender e sugerir tipos de gerenciamento adaptativos que reduzam as vulnerabilidades, já que pesquisas apontam que a adaptação proativa é mais econômica que a mitigação ou ações reativas (PIELKE, 2007; STERN, 2006). Além disso, é necessário que os estudos desenvolvidos busquem propor estratégias que façam com que os tomadores de decisão antecipem os impactos das mudanças climáticas e eventos extremos (HALLEGATTE et al., 2009; PIELKE, 2007), fornecendo novas informações e maneiras de pensar (NRC, 2009).

O Complexo Portuário de São Francisco do Sul, localizado no litoral Sul catarinense, comporta o maior porto em termos de movimentação de contêineres do Estado (ANTAQ, 2021). Em 2016, o complexo movimentou 17,1 milhões de toneladas, sendo que as prospecções apontam um aumento anual de 2%, sugerindo uma movimentação de 34,1 milhões de toneladas até 2045 (EMBRAPA, 2021). Dessa forma, é notória a importância econômica da atividade portuária deste complexo para a região.

Sendo assim, é importante considerar que a costa Sul e Sudeste do Brasil é constantemente exposta a intensos ciclones extratropicais relacionados a frentes frias (POSSAMAI et al., 2010), sendo afetada principalmente por fenômenos de escalas sinóticas e subsinótica influenciadas pela circulação de grande escala e local (MACHADO, 2014). Dessa forma, o clima do Atlântico Sul é fortemente influenciado por um sistema de alta pressão subtropical semi permanente: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (PETERSON; STRAMMA, 1991).

Por suas características comportamentais, o ASAS resulta na diminuição dos índices de precipitação nas regiões sul e sudeste durante os meses de inverno (REBOITA et al., 2019). No verão, por outro lado, ocorre o processo inverso, resultando no transporte de umidade para a região sul e sudeste do Brasil, o que resulta no aumento dos índices de precipitação. Além disso, o ASAS promove a intensificação dos ventos alísios na região nordeste brasileira, gerando um aumento de temperatura resultado da intensificação dos ventos de nordeste na região sul e sudeste (DEGOLA, 2013; REBOITA et al., 2019). Por esta razão, o Estado de Santa

Catarina é frequentemente atingido por significativas variações de mudanças do tempo (LIMA, 2009) que podem estar associadas a eventos atmosféricos extremos.

Portanto, o presente trabalho objetiva identificar os padrões atmosféricos associados aos eventos meteorológicos extremos que podem influenciar o Complexo Portuário de São Francisco do Sul, composto pelos portos de São Francisco do Sul (setor público) e Itapoá (setor privado). Além disso, a pesquisa busca sugerir medidas de mitigação e adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas com base em estudos desenvolvidos para portos em geral.

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 PERGUNTAS DE PESQUISA

- a. Quais padrões atmosféricos estão associados aos eventos extremos que exercem influência nos portos de São Francisco do Sul e Itapoá?
- b. Quais cenários de ondas estão associados aos eventos extremos que ocorreram nos portos de São Francisco do Sul e Itapoá?
- c. Quais medidas de mitigação e adaptação podem ser aplicadas aos portos de São Francisco do Sul e Itapoá para reduzir os impactos das mudanças climáticas?

2.2 HIPÓTESE

Há padrões atmosféricos associados aos eventos meteorológicos que exercem influência nos portos de São Francisco do Sul e Itapoá, sendo que existem medidas de mitigação e adaptação que podem amenizar os impactos das mudanças climáticas na área de estudo.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 Objetivo Geral

Identificar os padrões atmosféricos que exercem influência sobre os portos de São Francisco do Sul (setor público) e Itapoá (setor privado) e as possíveis alternativas para prevenir, amenizar e mitigar as vulnerabilidades físicas geradas pelas mudanças climáticas.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os cenários de ondas que geraram eventos extremos na região dos portos de São Francisco do Sul e Itapoá nos últimos anos;
- Determinar quais padrões atmosféricos estão associados aos eventos citados;
- Sugerir metodologias de ação frente aos impactos das mudanças climáticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho abrange o Complexo Portuário de São Francisco do Sul, que é composto pelo Porto Organizado de São Francisco do Sul e pelo Terminal de Uso Privado (TUP) Porto Itapoá. Este complexo foi inaugurado em 1955 e gerenciado pela Administração dos Portos de São Francisco do Sul (APSFs). Está localizado na Baía da Babitonga, no litoral norte do Estado de Santa Catarina, ao Sul do Brasil, sendo que o Porto de São Francisco do Sul encontra-se na Ilha de São Francisco do Sul (SC), enquanto que o TUP Porto Itapoá encontra-se no município de Itapoá (SC), pertencendo à margem esquerda da Baía da Babitonga (EMBRAPA, 2021).

Figura 01 – Mapa de Localização da Área de Estudo



Fonte: a autora (2021).

3.1.1 Características operacionais do Complexo Portuário de São Francisco do Sul

Atualmente, o complexo portuário possui um cais acostável de aproximadamente 1500 metros distribuídos em 7 berços de atracação. O Porto Organizado de São Francisco do Sul, por sua vez, possui um canal de acesso de 9,3 milhas náuticas de extensão, 150 metros de largura e 13 metros de calado máximo operacional. Possui 5 áreas de fundeadouros oficiais, apresentando amplitude de maré de 2 metros. Sua infraestrutura instalada é composta por um cais acostável de 780 metros de comprimento e 43 pés de profundidade máxima. Por outro lado, o TUP Porto Itapoá possui um cais acostável de 225 metros de comprimento, apresentando

um calado máximo operacional inferior, com 11 metros. Ainda, possui um sistema de sinalização eletrônica que abrange as 9,3 milhas náuticas do canal de acesso, sendo o segundo porto brasileiro a possuir esta tecnologia (EMBRAPA, 2021; SÃO FRANCISCO DO SUL, 2021).

3.1.2 Características físicas da Ilha de São Francisco do Sul e Baía da Babitonga

Compreendendo uma área de 265km² e uma linha de costa de 190km², a Ilha de São Francisco do Sul pode ser dividida em dois grandes sistemas geológicos: o Sistema Cristalino, formado pelo embasamento cristalino associado à material intemperizado, e o Sistema Depositional Costeiro, relacionado aos eventos transgressivos e regressivos do Pleistoceno Superior e do Holoceno. Além disso, a Ilha de São Francisco do Sul é reconhecida por suas inúmeras feições geológico-geomorfológicas, que indicam o acontecimento de processos costeiros ao longo do Quaternário. Ainda, a Ilha possui feições que sugerem a elevação do nível do mar com altitude de 8 ± 2 m durante o Pleistoceno e de $3,5 \pm 1$ m durante o Holoceno (5.100 anos AP). A área de estudo apresenta depósitos eólicos de interesse geológico, visto que estes representam os mais expressivos depósitos do litoral Nordeste de Santa Catarina (POSSAMAI et al., 2010).

A Baía da Babitonga é amplamente reconhecida por suas características ecossistêmicas já que abriga cerca de 3/4 de toda a área de manguezal do Estado de Santa Catarina (LIMA, 2018). Além disso, é caracterizada por 5 topologias de feições: as planícies de maré, bancos sub litorâneos, terraços submarinos, lajes rochosas e canais. Assim, é considerada um estuário de vale afogado, ressaltando a importância do retrabalhamento fluvial e marinho durante o quaternário superior, além de sua morfodinâmica recente estar associada à gênese de áreas rasas (MAZZER; GONÇALVES, 2012).

O regime de maré na Ilha de São Francisco e Baía da Babitonga é do tipo misto, sendo predominantemente semi-diurno, com diferenças entre as alturas de preamares e baixa-mares. A amplitude média da maré para o Porto de São Francisco e Baía da Babitonga é de 85cm e 70cm, respectivamente, com valores máximo de 128cm e 106cm (TRUCCOLO; SCHETTINI, 2010). Ainda, a Baía da Babitonga apresenta uma dominância de enchente de maré, com assimetria da onda de maré dependente do balanço entre os efeitos de fricção e estreitamento do canal, sendo que os efeitos de

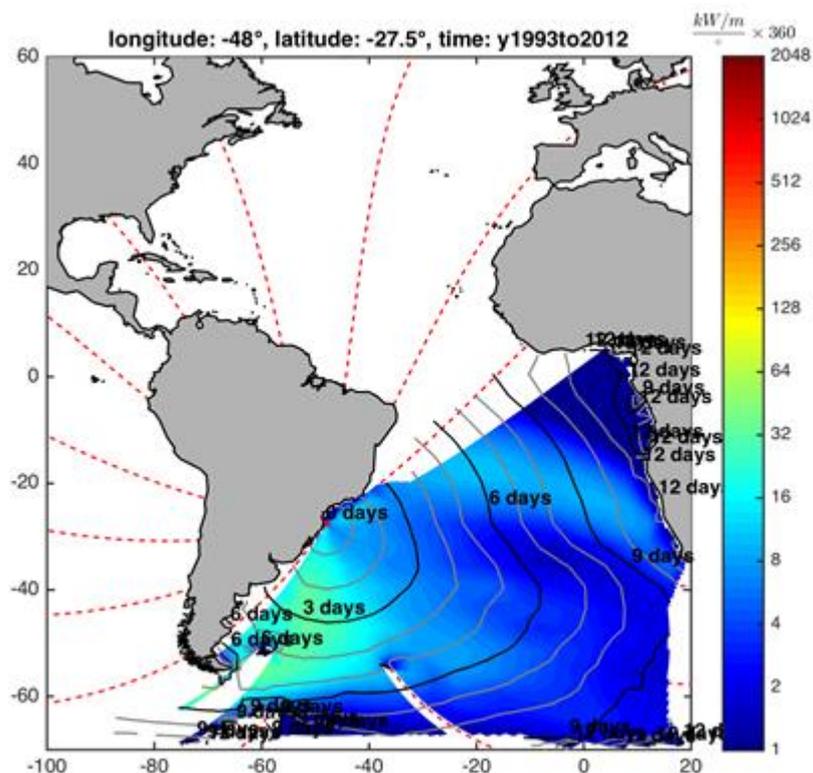
construção do canal são dominantes sobre os efeitos friccionais, caracterizando um estuário do tipo hipersíncrono. Este último fato é corroborado pela amplificação da altura de maré astronômica no Porto de São Francisco do Sul em relação à Praia da Enseada (SCHETTINI; CARVALHO, 2010). A baía possui um período ressonante de oscilação natural de 3,6 horas, com as constantes de espécie quartidiurnas (TRUCCOLO; SCHETTINI, 2010).

3.2 Preditores Climáticos (*Weather Types*)

Os padrões atmosféricos (*Weather Types*) utilizados no presente trabalho foram retirados do estudo desenvolvido por Paula Gomes da Silva, seguindo a metodologia descrita por Camus *et al.* (2014). Foram utilizados dados de pressão ao nível do mar retirados do modelo de reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), entre o período de 1979 a 2010, objetivando pontos que compreendessem o Oceano Atlântico Sul.

O domínio de interesse foi determinado com base nos processos costeiros que influenciam a costa de Santa Catarina. Assim, os processos determinísticos escolhidos foram as ondas e as marés meteorológicas, sendo que, a partir do método ESTELA (Perez *et al.*, 2016), gerou-se um mapa indicativo das zonas de geração de ondas que possuem influência sobre a área de estudo, conforme a Figura 02.

Figura 02 - Área de influência para a área de estudo obtida pelo método ESTELA

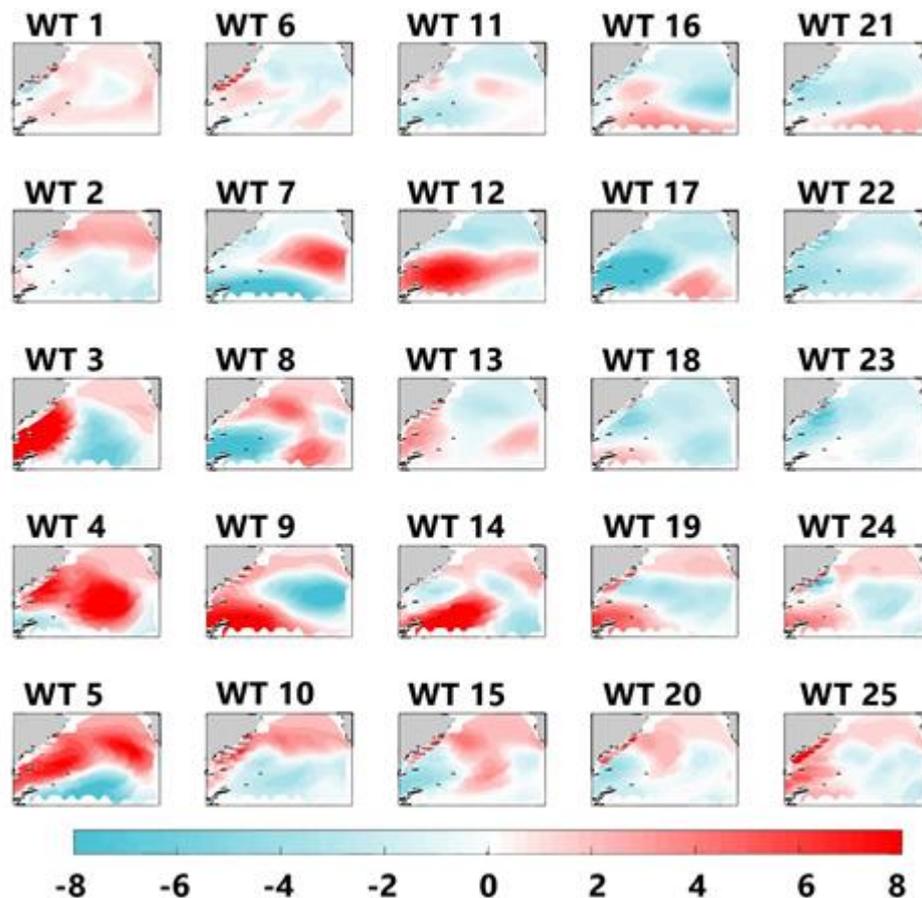


Fonte: Fernando Javier Mendez Incera, por comunicação pessoal.

Além disso, utilizou-se uma Análise de Componentes Principais (ACP) para reduzir a dimensionalidade dos dados de pressão e gerar simplificações. De maneira geral, a ACP é uma técnica de modelagem multivariada para estruturas de covariância, descrita inicialmente por PEARSON, 1901. Assim, este método consiste em transformar linearmente um conjunto original de variáveis correlacionadas para um conjunto substancialmente menor de variáveis não mais correlacionadas, mas que são representativas com relação ao conjunto original (HONGYU et al., 2016). Dessa forma, obteve-se as Componentes Principais (PCs) que explicam 99% da variância dos dados, que foram unidas em uma matriz para análises posteriores de agrupamento.

Por fim, utilizou-se o algoritmo *k-means* sobre as PCs que explicam 99% da variância a fim de gerar o agrupamento em classes dos estados atmosféricos semelhantes, obtendo-se 25WT que explicam a variabilidade dos eventos atmosféricos da região de análise, conforme a Figura 3.

Figura 03 - Padrões atmosféricos obtidos para o Atlântico Sul, com base nos mapas de campo de pressão ao nível do mar



Fonte: Luana Borato, por comunicação pessoal.

Dessa forma, com o objetivo de compreender quais padrões atmosféricos estavam ocorrendo durante o período de dados analisados (1992-2010), foi realizada uma análise das datas de ocorrência dos 25 WTs gerados e as datas obtidas nas séries temporais dos modelos numéricos utilizados, que serão descritos posteriormente. Todas as análises desta etapa foram obtidas através de *scripts* desenvolvido em *Matlab*.

3.3 Refinamento Estatístico (*Downscaling* Estatístico)

O presente trabalho seguiu a técnica de refinamento estatístico (ou *downscaling* estatístico) proposta por Camus et al., 2014. O objetivo principal deste método é estimar estaticamente o comportamento de variáveis locais - chamadas de

preditando - a partir das condições atmosféricas globais - chamadas de preditor -. Assim, o refinamento estatístico se torna uma ferramenta útil graças ao seu baixo custo computacional e à possibilidade de caracterizar o clima de ondas locais a partir da correlação com o comportamento das constantes atmosféricas.

O estudo desenvolvido por Camus et al., 2014 analisou o clima de ondas na região do Atlântico Nordeste a partir de padrões atmosféricos ou *weather types* (WT). Dessa forma, para obtenção destes padrões, gerou-se mapas de pressão e gradiente de pressão ao nível do mar para a área de estudo. Assim, os mapas gerados foram correlacionados com parâmetros de descrição do clima de ondas locais, como altura significativa, período e direção das ondas para a costa Oeste da Irlanda e Noroeste da Espanha, obtendo-se uma caracterização do clima de ondas para ambas as regiões escolhidas.

De maneira geral, o método divide-se em cinco passos distintos: 1. coleta de dados históricos dos dados de ondas locais e dados atmosféricos; 2. definição do preditor de escala diária; 3. agrupamento dos preditores para formação dos WTs; 4. estabelecimento da relação entre dados de ondas locais e dados atmosféricos globais; 5. validação do modelo estatístico.

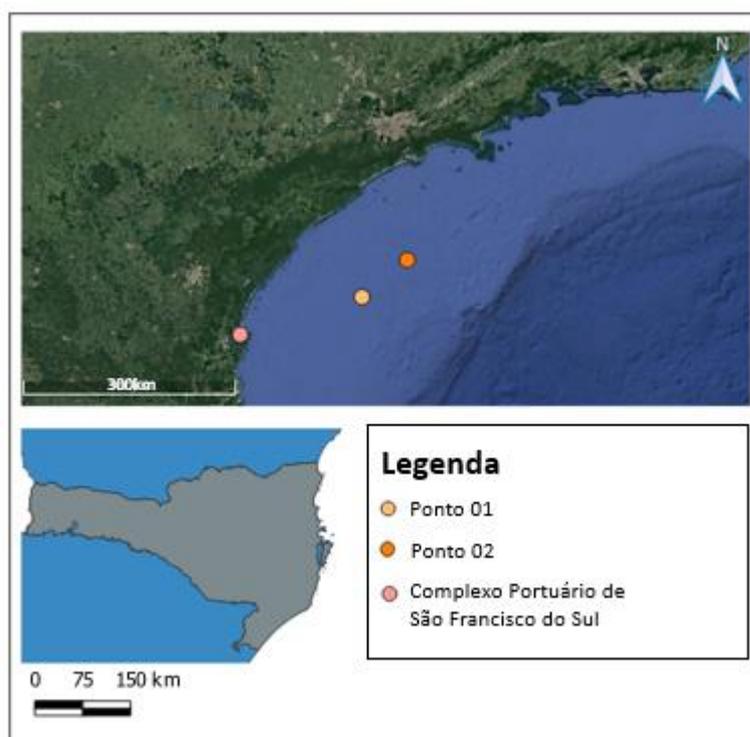
Para o presente trabalho, os resultados dos passos 1, 2 e 3 foram obtidos anteriormente dentro do Projeto ROAD BESM por Paula Gomes da Silva e Luana Borato, que gerou os 25 padrões atmosféricos utilizados para as análises deste estudo. Com relação ao passo 4, foram utilizados dados de altura significativa de onda (H_s), período médio (T_p), direção média de onda (Dir_m) e maré meteorológica (SS). Os dados de H_s , T_p e Dir_m foram obtidos a partir do modelo CSIRO Mark 3.6 (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) e os dados de maré meteorológica foram retirados do conjunto de dados DAC (*Dynamic Atmospheric Correction*).

O modelo CSIRO foi descrito por Gordon et al. (2002), considerando a interação oceano-atmosfera adicionada aos efeitos dinâmicos do gelo marinho e propriedades de vegetação, em alguns casos (JEFFREY, 2013). Por outro lado, o conjunto de dados DAC é produzido pela CLS *Space Oceanography Division*, que utiliza o modelo MOG2D (*2-Dimensions Gravity Waves*), sendo distribuído pela AVISO, *Satellite Altimetry Data*, com apoio do *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES). O MOG2D é um modelo hidrodinâmico bidimensional de água rasa, sendo forçado pela pressão

atmosférica e velocidades de vento na altitude de 10m, possuindo uma resolução temporal de 6 horas e uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (JI et. al, 2019).

Dado que o Porto de Itapoá possui uma localização mais exposta quando comparado ao Porto de São Francisco do Sul, dois pontos foram escolhidos sobre a isóbata de 80m com base na proximidade e influência ao Porto de Itapoá. Assim, dados de altura significativa de onda (H_s), período médio (T_p), direção média de onda (Dir_m) e maré meteorológica foram obtidos a partir dos modelos acima citados.

Figura 04 – Localização dos pontos escolhidos para coleta de dados



Fonte: a autora (2021).

Considerando que os dados fornecidos pelo CSIRO possuem escala temporal horária de 6h em 6h e que os dados do DAC possuem escala temporal de 4h em 4h, foi realizada uma análise para definição de qual valor seria o representativo diário desses modelos. Essa análise foi adaptada da metodologia desenvolvida por RUEDA et al., 2016 e utilizada por BORATO, 2022 que aplicou o método *Total Water Level* (TWL) para definir qual dos dados diários maximizaria os níveis, gerando o cenário mais extremo de elevação do nível do mar. Contudo, dado que portos estão vulneráveis a cenários extremos tanto de níveis máximos como de níveis mínimos de elevação, o presente trabalho objetivou analisar quais dos dados diários maximizou e

minimizou o nível médio do mar para o ponto da costa escolhido. Dessa forma, foram escolhidos os dados que maximizaram e minimizaram os níveis para reproduzir os valores de TWL Máximo e Mínimo, respectivamente.

Sendo assim, a partir do TWL obteve-se os valores de Hs, Tp e maré meteorológica que maximizaram e minimizaram o nível médio do mar. A equação matemática utilizada para obtenção dos valores de *Total Water Level* está exposta abaixo.

$$TWL = SS + 0.043 \cdot \left(\sqrt{Hs \cdot \left(\frac{9.8}{2} \cdot \pi \right) \cdot Tp^2} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Então, foi realizado um refinamento estatístico para os dados de onda próximos ao porto de Itapoá, utilizando os valores de maré meteorológica e Hs identificados pelo TWL e seus valores de Tp e Dirm correspondentes, projetando os dados locais nos *weather types* identificados na etapa 3.3 desta metodologia.

Análises estatísticas de média e desvio padrão foram aplicadas aos dados obtidos para compreensão dos possíveis significados físicos adicionais ao refinamento estatístico, além de gráficos de direção das ondas para os dois pontos escolhidos. Ainda, aplicou-se análises de dispersão entre os dois pontos obtidos para observar a correlação entre os dados, identificando se estes variavam significativamente entre si.

Dessa forma, foi possível observar a distribuição estatística de ondas e marés meteorológicas frente aos padrões atmosféricos de maior frequência de ocorrência no período analisado (1992-2010), o que forneceu uma caracterização multivariada do clima de ondas com uma correlação fisicamente interpretável. As análises desta etapa foram realizadas em *scripts* no *Matlab*.

3.4 Projeção dos *Weather Types* nos cenários de mudanças climáticas

BORATO, 2021 projetou os WTs utilizados em cenários de mudanças climáticas. Assim, foi realizada uma análise comparativa observando o comportamento dos WTs com maiores frequências de ocorrência no período completo de dados obtidos nos cenários obtidos por BORATO, 2021, objetivando compreender se estes WTs iriam aumentar ou diminuir nas projeções futuras.

Considerando que WTs indicam características atmosféricas que irão influenciar intimamente no comportamento dos parâmetros físicos do mar, conhecer a variação de frequência dos WTs que mais ocorreram agrega com informações das possíveis variações de cenários que impactam os portos aqui estudados. Sendo assim, essa etapa se torna importante dado que as informações resultantes poderão auxiliar em possíveis tomadas de decisão frente aos impactos das mudanças climáticas.

De maneira geral, os cenários de mudanças climáticas analisados por BORATO, 2021 consistiram em 27 modelos do CMIP5 e 21 modelos do CMIP6. A escolha dos modelos foi obtida com base na literatura, objetivando utilizar os modelos que apresentassem melhor desempenho para o Atlântico Sul. Assim, 122 projeções futuras dos cenários *Representative Concentration Pathway* (RCP) e *Shared Socioeconomic Pathway* (SSP) foram observadas.

Com relação ao modelo CMIP5, BORATO, 2021 utilizou os cenários RCP 2.6, RCP 4.5 E RCP 8.5. Com relação ao modelo CMIP6, por outro lado, os cenários utilizados foram SSP 1, SSP 2, SSP 3 e SSP 5.

Além disso, para uma melhor compreensão do comportamento dos WTs nos cenários analisados, houve uma divisão dos cenários de baixa emissão (RCP 2.6 e SSP 1), cenários intermediários de emissão (RCP 4.5, SSP 2 e SSP 3) e cenários de alta emissão (RCP 8.5 e SSP 5). Ainda, as projeções foram divididas em curto (2015-2039), médio (2040-2069) e longo prazo (2070-2100).

Dessa forma, foi analisado o comportamento dos WTs mais frequentes frente aos cenários de curto, médio e longo prazo, observando as variações e implicações de suas ocorrências nos parâmetros de estado do mar da região estudada.

3.5 Busca bibliográfica de mitigações

Considerando a importância de gerar uma utilidade social dos estudos desenvolvidos no presente trabalho, foi realizada uma busca bibliográfica para identificação de metodologias de mitigação e adaptação utilizadas em portos nacionais e do mundo. Com base nos estudos encontrados ao longo da pesquisa, foi proposta as metodologias que melhor se enquadram no cenário do Complexo Portuário de São Francisco do Sul.

A presente busca foi realizada na base de dados *Google Scholar*, objetivando artigos, teses e dissertações tanto em português, para identificar possíveis metodologias já implantadas no Brasil; como em inglês, para observar as metodologias aplicadas ao redor do mundo. Dessa forma, as palavras-chave em português foram: portos, prevenção, mitigação, eventos extremos e mudanças climáticas. Para as buscas em inglês, as palavras-chave serão: *ports, warning, mitigation, extreme events e climate change*.

Para que as análises fossem realizadas com base em informações atualizadas, foram escolhidos pesquisadas publicadas de 2010 a 2021. Além disso, foram preferencialmente selecionados apenas os trabalhos que atenderam o maior número de palavras-chave, assim como aqueles que apresentaram o maior número de medidas de mitigação e/ou adaptação que melhor se adequam ao contexto do Complexo Portuário de São Francisco do Sul.

4. RESULTADOS

4.1 Dados gerais

As análises estatísticas aplicadas aos dois pontos escolhidos ao longo da costa apresentaram algumas informações úteis para a compreensão do comportamento dos dados. Na Tabela 01 é possível observar os valores de média e desvio padrão para os parâmetros de Altura Significativa de Onda (Hs) e Período Médio de Onda (Tp).

Tabela 01 – Análise estatística básica de Hs e Tp

Variável	Média	Média	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo
	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 01	Ponto 02
Hs	1,68m±0,55m	1,68m±0,54m	6,05m	6,06m	0m	0m
Tp	9,55s±2,13s	9,55s±2,12s	22,19s	22,19s	2,63s	2,64s

Fonte: a autora (2021).

Além disso, análises estatísticas mais refinadas foram aplicadas também aos dois pontos escolhidos com o intuito de compreender possíveis outros significados associados ao comportamento das séries, conforme a Tabela 02.

Tabela 02 – Análise estatística refinada de Hs e Tp

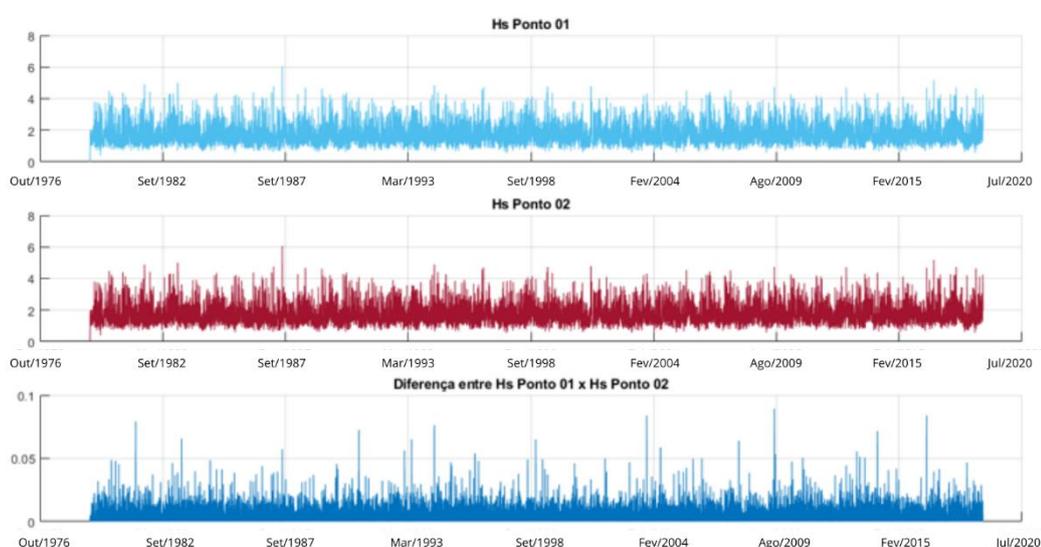
Variável	RMSE	BIAS	SI	Pearson
Hs	0,0052	0,0036	0,0031	1,00
Tp	3,11E-14	0,0030	3,26E-15	0,99

Fonte: a autora (2021).

Dessa forma, conforme os valores obtidos nas tabelas acima, notou-se que os dados dos dois pontos escolhidos variam minimamente entre si, podendo ser estatisticamente considerados iguais. Apresentam uma média extremamente semelhante e um desvio padrão consideravelmente baixo, com valores de RMSE muito próximos de zero, indicando uma baixa diferença entre as séries. Além disso, os valores de BIAS também são próximos de zero, o que demonstra uma baixa diferença entre a média dos resultados e o valor verdadeiro das séries, além de indicar um baixo erro sistemático dos valores. Por fim, o coeficiente de correlação de *Pearson* demonstra uma forte correlação entre os dados.

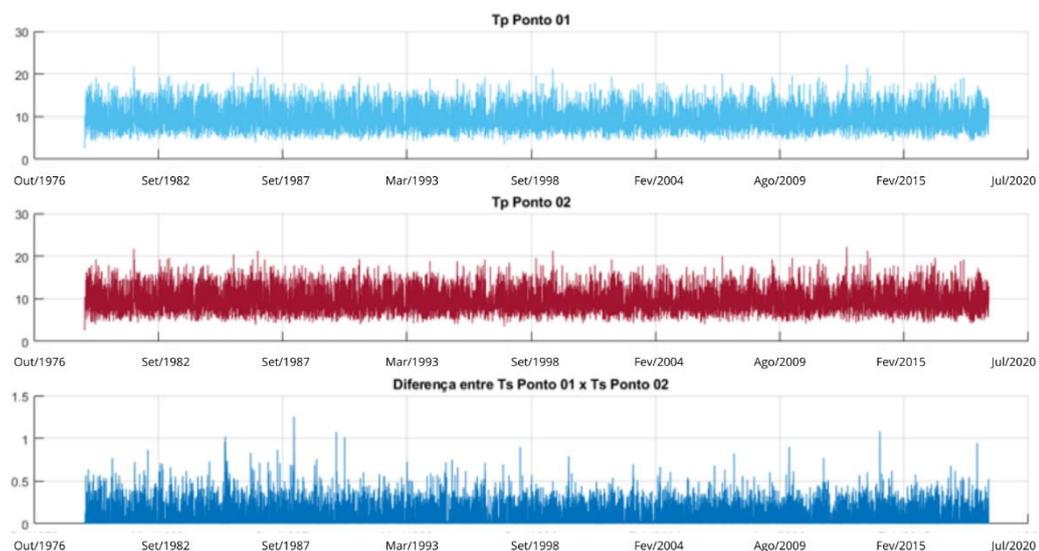
As Figuras 05 e 06 indicam o comportamento das séries para os valores de Hs e Tp, além de apontarem a diferença em módulo entre os pontos analisados, que variam entre 0m e 0,08m para Hs e 0s e 1,25s para Tp.

Figura 05 – Comportamento de Hs para os pontos 01 e 02 e respectiva diferença entre as séries



Fonte: a autora (2021).

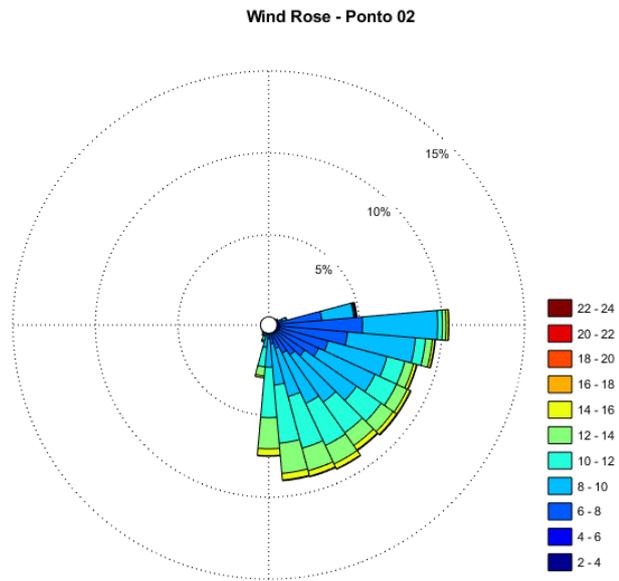
Figura 06 – Comportamento de Tp para os pontos 01 e 02 e respectiva diferença entre as séries



Fonte: a autora (2021).

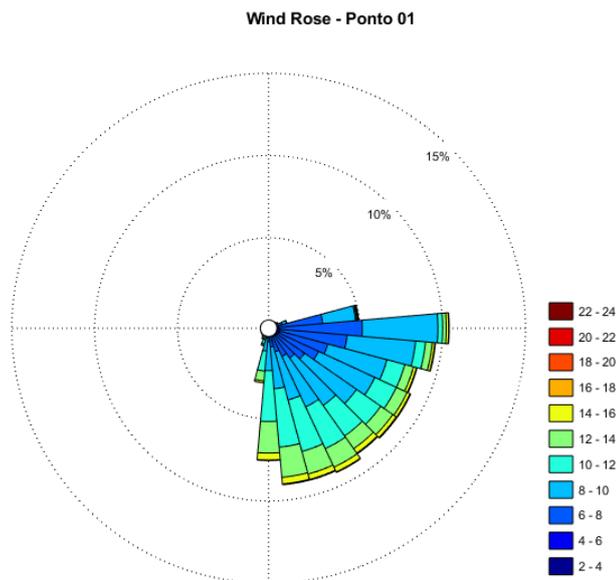
As direções de ondas para os dois pontos escolhidos são demonstradas nos gráficos abaixo.

Figura 07 – Direção de Onda para o Ponto 01



Fonte: a autora (2021).

Figura 08 – Direção de Onda para o Ponto 02



Fonte: a autora (2021).

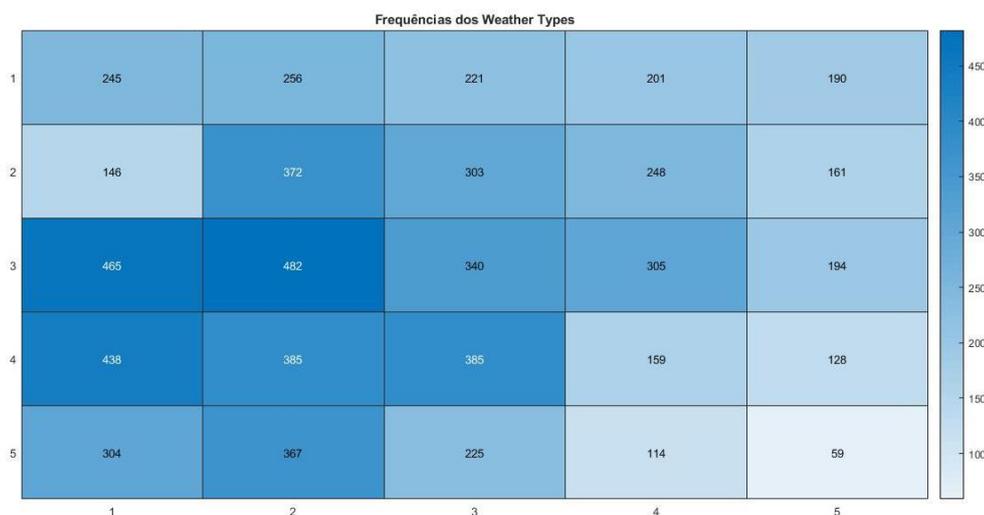
A partir dos gráficos expostos é possível observar que a direção de ondas também varia minimamente entre os pontos. Ainda, o espectro de direção

predominante dos pontos é de sudeste, com pequenas influências de nordeste e sudoeste e nenhuma influência de noroeste.

4.2 Frequências de ocorrências dos *Weather Types*

A partir das análises aplicadas, observou-se que os WTs com maiores frequências entre setembro de 1992 e dezembro de 2010 foram os WT12, que ocorreu em 482 datas, WT11, que ocorreu em 465 datas, e o WT16, que ocorreu em 438 datas. Por outro lado, os WTs que apresentaram menor frequência de ocorrência foram os WT25, que ocorreu em 59 datas, WT24, que ocorreu em 114 datas, e WT20, que ocorreu em 128 datas (Fig. 09).

Figura 09 – Frequência Geral de Ocorrência dos *Weather Types*



Fonte: a autora (2021).

Segundo BORATO, 2021, o WT16 é caracterizado por um sistema de baixa pressão que se intensifica próximo à costa oeste africana e um centro de alta pressão menos intenso entre a costa leste brasileira e o sul da África.

Por outro lado, o WT11 apresenta um sistema de alta pressão sobre a região sul do Brasil, Uruguai e Argentina e sobre a região central do Atlântico Sul, fazendo com que a região do Complexo Portuário de São Francisco do Sul seja influenciada por um centro de alta pressão na passagem deste WT. Na região sudoeste e nordeste do Atlântico Sul há a presença de baixas pressões.

O WT12 possui um sistema de alta pressão presente em toda a região sul da América do Sul, sendo que a região superior do Atlântico Sul é caracterizada por baixas pressões. Ou seja, esse WT também é responsável por centros de alta pressão na região dos portos de análise.

Além disso, os padrões atmosféricos 11 e 12 também apresentam maiores frequências de ocorrência nos meses de dezembro à maio, sendo que os padrões atmosféricos com maior ocorrência nos meses de junho à novembro foram os WT7, WT8 e WT9, segundo BORATO, 2021, que não apresentaram frequência significativa para o presente estudo.

4.3 Downscaling Estatístico ou Refinamento Estatístico

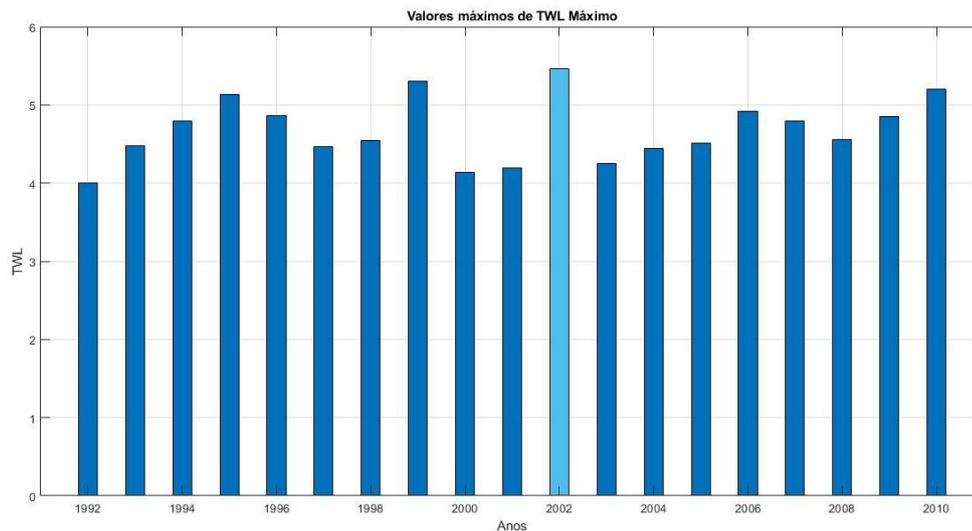
Um *Downscaling* ou Refinamento Estatístico foi realizado para compreender os cenários de ondas associados aos três WTs mais frequentes identificados anteriormente. Dessa forma, analisou-se os valores máximos e mínimos de elevação a partir dos resultados de *Total Water Level*, com o intuito de compreender se estes valores podem ser considerados valores de risco às operações dos portos em análise.

4.3.1 Downscaling ou Refinamento Estatístico para os níveis máximos

Considerando os valores de TWL máximo, o WT11 – que ocorreu em 465 datas, sendo o segundo mais frequente – esteve associado aos maiores níveis observados entre os três WTs que mais ocorreram, estando responsável por uma significativa elevação total de 5,47m em 21 de março de 2002. Nessa data, os valores de Hs e SS foram de 3,7m e -0,03m, respectivamente, com um Tp de 17,01s. Por outro lado, o valor máximo de Hs para 2002 foi de 4,05m, ocorrendo em 16 de janeiro. Nessa data, o valor de SS foi de 0,03m com Tp de 9,92s. Assim, embora este último valor de altura significativa de onda ser maior que o observado em 21 de março, o TWL máximo de 16 de janeiro de 2002 foi menor.

Além disso, é importante ressaltar que o WT11 está associado ao maior valor de TWL máximo para todo o período de análise (1992-2010), conforme a Figura 10, o que sugere que um dos WTs mais frequentes está relacionado à geração dos níveis mais elevados na região de estudo.

Figura 10 – Valores de TWL Máximo entre 1992 e 2010



Fonte: a autora (2021).

O WT16 – que ocorreu em 438 datas – possuiu seu maior nível de TWL Máximo também em 2002. Assim, o valor observado foi de 4,50m no dia 22 de março de 2002, ocorrendo um dia após ao máximo observado no WT11, sendo ligeiramente menor que o nível máximo observado deste último WT. Para o dia 22 de março, os valores de Hs e SS foram 3,58m e -0,07m, respectivamente. O Tp foi de 14,33s.

Os demais valores associados ao ano de 2002 estão representados na Tabela 03, assim como os valores citados anteriormente.

Tabela 03 – Valores de *Downscaling* Estatístico para o WT11 e WT16 em 2002

Variável	Máximo	Data
TWL Máximo WT11	5,47m	21/03
TWL Máximo WT16	4,50m	22/03
Hs	4,05m	16/02
SS	0,08m	23/02

Fonte: a autora (2021).

Segundo SILVEIRA, 2007, o ano de 2002 foi marcado por expressivas inundações na região de Joinville, cidade que abriga os portos do presente estudo. Essas inundações estavam associadas a níveis pluviométricos elevados que causaram perdas sociais e econômicas significativas. Conforme o estudo citado, ao

menos 20.000 pessoas foram afetadas, sendo que 4.990 edificações residenciais populares, 1 edificação pública de ensino e 10km de estradas foram danificadas, assim como 156.000m³ de rios e canais sofreram desassoreamento, o que resultou em mais de R\$10.500.000,00 de prejuízo econômico para o município.

Para o WT12 – que ocorreu em 482 datas – o maior nível observado foi de 3,97m em 05 de dezembro de 2008, sendo que os valores de Hs e SS para a data foram 3,31m e -0,03m, respectivamente. O Tp observado foi de 12,99s. É importante observar que o menor TWL máximo observado em 2008 também ocorreu no mês de dezembro, possuindo um valor de 1,15m no dia 21. Por outro lado, o Hs máximo para 2008 foi observado no dia 30 de abril de 2008, apresentando um valor de 3,81m. Para essa data, o SS e Tp foram -0,04m e 9,90s, respectivamente. Além disso, assim como no caso do TWL Máximo, os valores máximos e mínimos de Hs também ocorreram no mesmo mês, sendo que o mínimo observado foi de 0,87m no dia 13 de abril de 2008.

Os demais valores associados ao ano de 2008 estão evidenciados na Tabela 04, assim como os valores citados acima.

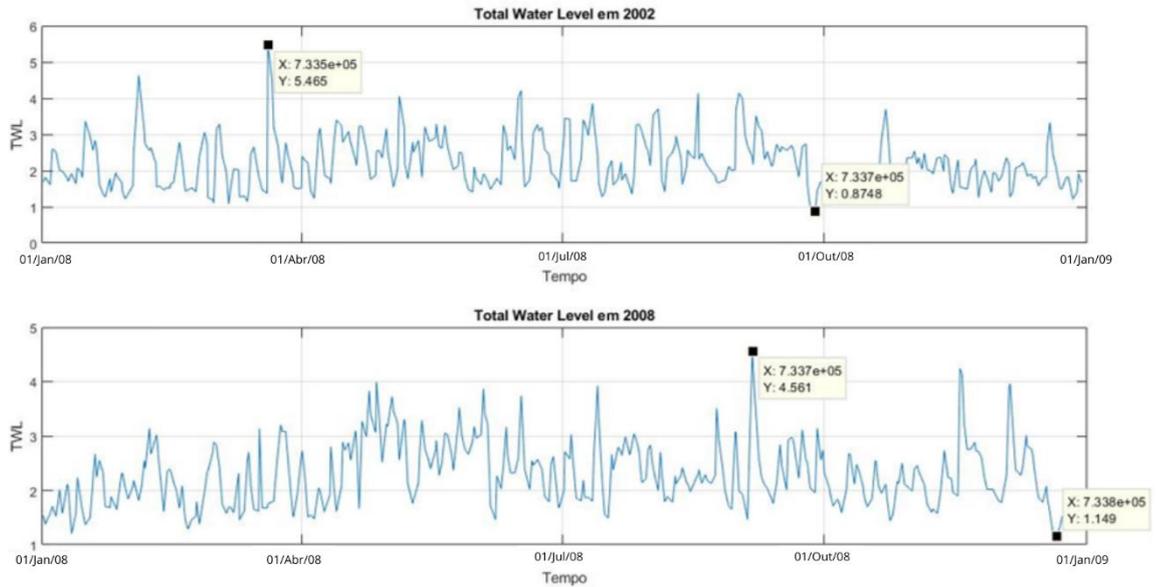
Tabela 04 – Valores de *Downscaling* Estatístico para o WT12 em 2008

Variável	Máximo	Data
TWL Máximo	3,97m	05/12
Hs	3,81m	30/04
SS	-0,0014	25/04

Fonte: a autora (2021).

A Figura 11 demonstra a variação do TWL Máximo para 2002 e 2008, anos de ocorrência dos WTs mais frequentes. A partir desta é possível analisar uma espécie de “variação oposta” entre as séries, considerando que os maiores valores de TWL Máximo em 2002 ocorreram nos meses de verão e início do outono (entre janeiro e abril), enquanto que os maiores valores observados em 2008 ocorreram nos meses de inverno e início do verão (entre julho e dezembro).

Figura 11 – Variação do TWL Máximo para 2002 e 2008



Fonte: a autora (2021).

4.3.2 Downscaling ou Refinamento Estatístico para os níveis mínimos

Para os valores de TWL mínimo, o WT11 esteve responsável por um TWL mínimo de 2,35m em 02 de março de 1996, sendo que os valores de Hs e SS para a data foram de 2,60m e -0,02m, respectivamente, com um valor de Tp de 8,72s. Contudo, o menor valor de Hs observado em 1996 foi de 0,80m, ocorrendo no dia 11 de janeiro, estando associado a um SS de 0,008m e um Tp de 7,62s.

A síntese dos valores relacionados ao WT11 está evidenciada na Tabela 05.

Tabela 05 – Valores de *Downscaling* Estatístico para o WT11 em 1996

Variável	Mínimo	Data
TWL Mínimo	2,35m	02/03
Hs	0,80m	11/01
SS	-0,18m	23/07

Fonte: a autora (2021).

O WT12 foi responsável pelo menor nível entre os WTs mais frequentes, apresentando um valor de 1,72m no dia 02 de abril 1993. Nessa data, os valores de Hs e SS foram de 1,29m e -0,04m, respectivamente, com um Tp de 9,23s. Os demais

valores associados ao WT12 estão demonstrados na Tabela 06, assim como os valores citados anteriormente.

Tabela 06 – Valores de *Downscaling* Estatístico para o WT12 em 1993

Variável	Mínimo	Data
TWL Mínimo	1,72m	02/04
Hs	0,72m	28/08
SS	-0,18m	02/06

Fonte: a autora (2021).

Por fim, o WT16 possuiu seu TWL mínimo em 11 de dezembro de 1999, apresentando um valor de 2,00m associado a um Hs de 2,22m. Os SS e Tp para a data foram de -0,08m e 8,25s, respectivamente. Os demais valores associados ao período estão apresentados na Tabela 07.

Tabela 07 – Valores de *Downscaling* Estatístico para o WT16 em 1999

Variável	Mínimo	Data
TWL Mínimo	2,00m	11/12
Hs	0,67m	25/04
SS	-0,21m	17/08

Fonte: a autora (2021).

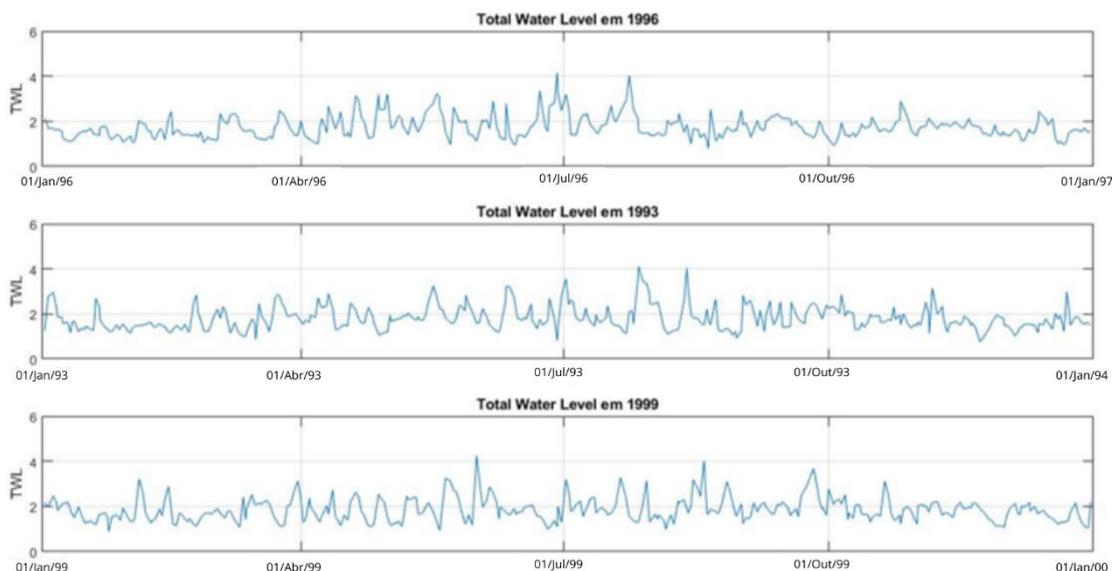
É interessante observar que o WT12 esteve associado ao menor nível de TWL Máximo e Mínimo, o que pode sugerir que a ocorrência deste padrão estaria mais relacionada à geração de níveis menores. Por outro lado, os WT11 e WT16 apresentaram os maiores valores de TWL Máximo e Mínimo, podendo indicar uma tendência de elevações maiores na ocorrência desses padrões.

Além disso, diferentemente do TWL Máximo, o TWL Mínimo de todo o período analisado ocorreu no dia 08 de junho de 1995 com um valor de 0,60m. Ou seja, o menor nível observado não aconteceu na ocorrência dos WTs mais frequentes, estando associado ao WT14, que ocorreu em 305 datas. Durante a ocorrência desse TWL mínimo, os valores de Hs e SS foram de 0,87m e -0,05m, respectivamente, com um Tp de 4,16s.

Na Figura 12 é possível observar as variações do TWL Mínimo para os três anos associados aos WTs mais frequentes, sendo válido ressaltar que as séries

apresentam comportamento similar, possuindo os maiores valores nos meses de final de outono e inverno, com menores valores nos meses de primavera e início de outono.

Figura 12 – Variação do TWL Mínimo para 1993, 1996 e 1999



Fonte: a autora (2021).

Os resultados sintetizados dos TWL's máximos e mínimos podem ser encontrados na tabela 08.

Tabela 08 – Sintetize dos resultados de TWL Máximo e Mínimo

WT	TWL Máximo	Data de ocorrência	TWL Mínimo	Data de ocorrência
WT11	5,47m	21/03/2002	2,35m	02/03/1996
WT12	3,97m	05/12/2008	1,72m	02/04/1993
WT16	4,50m	22/03/2002	2,00m	11/12/1999

Fonte: a autora (2022).

4.4 Frequências de ocorrências nas projeções de mudanças climáticas

Com base nos cenários de projeções de mudanças climáticas utilizados por BORATO, 2021, analisou-se o comportamento dos padrões atmosféricos identificados com maior frequência de ocorrência.

4.4.1 Cenário de baixa emissão de gases de efeito estufa

As projeções de curto e médio prazo para os cenários de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) apontaram que o WT12 apresentou aumento em sua frequência de ocorrência. Por outro lado, o WT16 apresentou uma redução de frequência. Para longo prazo as mudanças foram menos expressivas, contudo, detectou-se as mesmas variações de aumento e diminuição de frequência para os WTs 12 e 16, respectivamente.

Sendo assim, considerando que o WT12 é responsável por níveis mais baixos e que o WT16 é responsável por níveis mais elevados, conforme as análises realizadas na etapa 4.3 desta metodologia, é possível sugerir que o cenário de baixa emissão de GEE para o curto prazo na região de estudo seria composto majoritariamente por níveis menores do que níveis maiores.

4.4.2 Cenário de média emissão de gases de efeito estufa

Para o curto prazo, os cenários de média emissão de gases de efeito estufa apresentaram resultados semelhantes aos observados nos cenários de baixa emissão. Assim, houve o aumento da frequência do WT12. Por outro lado, o WT11 – que não obteve variações significativas no cenário anterior - apresentou diminuição de frequência para todos os cenários.

Também, houve um aumento de frequência de ocorrência do WT12 nas análises de médio e longo prazo, sendo que o cenário SSP 3 apresentou um aumento ainda mais intensificado do WT12. O WT16 apresentou uma diminuição de ocorrência em todos os cenários analisados, como nos cenários de baixa emissão.

Dessa forma, considerando novamente o comportamento identificado para o WT12, os resultados indicam que os cenários de média emissão de GEE para o curto, médio e longo prazo também seriam caracterizados por níveis menores principalmente se houvesse a efetiva diminuição de ocorrência do WT16, que é responsável por níveis mais elevados.

4.4.3 Cenário de alta emissão de gases de efeito estufa

Para os cenários de alta emissão de gases de efeito estufa, as análises de curto prazo indicaram uma redução do WT11, como visto no cenário anterior. Para o médio prazo, observou-se novamente um aumento significativo de frequência do WT12. Ainda, assim como no cenário de baixa e média emissão, o WT16 apresentou diminuição de frequência. No longo prazo as observações de aumento e diminuição de frequência são as mesmas dos cenários anteriores, contudo, apresentam-se de maneira mais intensa.

Sendo assim, o cenário de alta emissão de GEE provavelmente seria composto por níveis menores, como o observado nos demais cenários, dado o comportamento repetitivo de aumento de frequência do WT12 e diminuição de frequência do WT11 e do WT16.

4.5 Busca bibliográfica de mitigações

Com o intuito de propor medidas de mitigação e adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas no Complexo Portuário de São Francisco do Sul, realizou-se uma revisão bibliográfica para compreender possíveis ações que poderiam auxiliar no alcance do presente objetivo.

De maneira geral, as pesquisas objetivaram compreender as possíveis ações de maneira amplificada, buscando encontrar estudos desenvolvidos para:

1. A área de estudo;
2. Portos nacionais;
3. Portos internacionais.

A busca das palavras-chave expostas na presente metodologia resultou em inúmeros trabalhos. Contudo, optou-se somente por aqueles que atendiam o maior número de palavras-chave e que apresentaram medidas de mitigação e/ou adaptação coerentes ao contexto da área de estudo, propondo abordagens que consideravam os impactos das mudanças climáticas nos funcionamentos de portos em geral.

Abaixo, segue a relação dos estudos analisados.

Tabela 09 – Estudos analisados

Título	Autor	Modalidade	Aplicabilidade
Contribuições para elaboração de um plano municipal de adaptação dos efeitos das mudanças climáticas - São Francisco do Sul - SC	Rafael Alexandre de Oliveira	Dissertação de Mestrado	Área de estudo
Portos marítimos e os desafios para a sustentabilidade costeira	Francisco Arenhart Veiga Lima	Artigo	Área de estudo e portos nacionais
Vulnerabilidade socioambiental dos moradores do estuário do rio Paraíba-PB frente às mudanças climáticas e variações do nível do mar	Felipe Wieveski do Carmo	Dissertação de Mestrado	Portos nacionais
Agenda ambiental do porto de Santos: desafios e oportunidades na governança internacional das mudanças climáticas	Maria Fernanda Britto Neves	Dissertação de Mestrado	Portos nacionais
<i>Vulnerabilities and adaptation of ports to climate change</i>	Melissa Nursey-Bray	Artigo	Portos internacionais
<i>UK ports, extreme events and climate change: Legislative and adaptive perspectives</i>	Esmé Frances Flegg	Tese de Doutorado	Portos internacionais

Fonte: a autora (2022).

4.5.1 Pesquisas direcionadas à Área de Estudo

O trabalho desenvolvido por OLIVEIRA, 2020 objetivou apresentar propostas de adaptação da cidade de São Francisco do Sul frente aos cenários de mudanças climáticas, dando enfoque aos impactos dos eventos de erosão e aumento do nível do mar. O desenvolvimento do estudo ocorreu a partir de vistorias *in loco* e geração de uma Análise Preliminar de Perigos (APP-2) calibrada pela técnica da opinião especialista, que consiste em basear as análises conforme as impressões científicas de pesquisadores.

De maneira geral, a Análise Preliminar de Perigos se torna uma ferramenta extremamente útil para o presente estudo dado que analisa e classifica os eventos

extremos conforme suas frequências de ocorrência e intensidade. Além disso, possui o intuito de eliminar, amenizar e/ou controlar os riscos associados.

OLIVEIRA, 2020 utilizou as categorias de frequência, severidade e relação frequência vs. severidade conforme CETESB, 2011. As categorias estão evidenciadas nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Categorias de Frequências dos eventos extremos

Categoria	Denominação	Descrição
A	Muito Improvável	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer, pois dependem de uma combinação de diversos fatores.
B	Improvável	Não esperado ocorrer, pois dependem de dois ou mais fatores.
C	Ocasional	Pouco provável de ocorrer, mas dependem de um único fator.
D	Provável	Esperado ocorrer sem um período específico.
E	Frequente	Esperado ocorrer várias vezes durante um período específico.

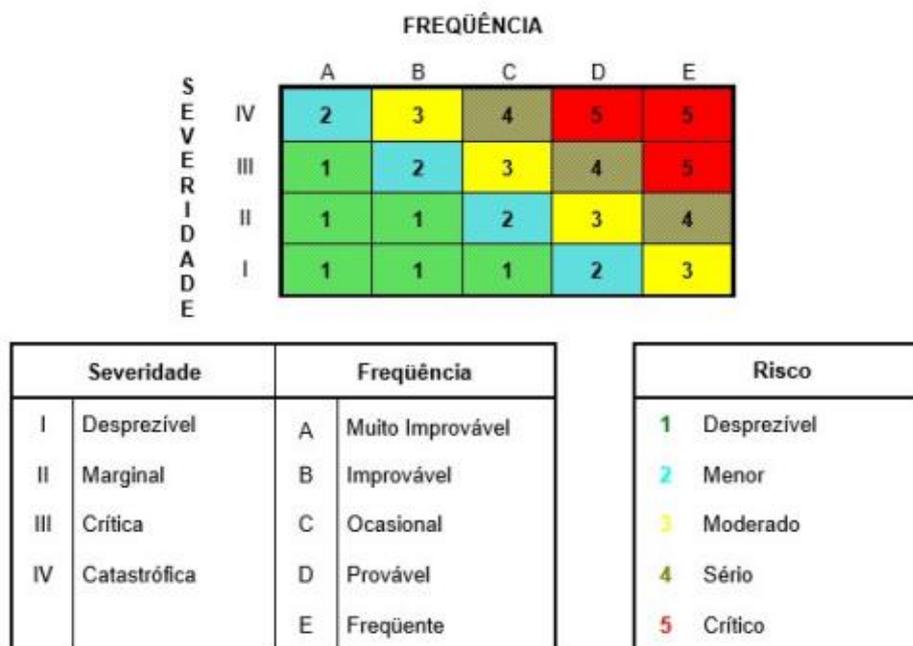
Fonte: OLIVEIRA (2020).

Tabela 11 – Categoria de Severidade dos eventos extremos

Categoria	Denominação	Descrição
I	Desprezível	Eventos associados à ausência de danos ou danos não mensuráveis.
II	Marginal	Ocorrências com potencial de causar danos irrelevantes ao meio ambiente, ao patrimônio, infraestrutura e população.
III	Crítica	Situações com potencial para ocasionar impactos ao meio ambiente, ao patrimônio, infraestrutura e população, com reduzido tempo de recuperação.
IV	Catastrófica	Ocorrências com potencial de gerar impactos ao meio ambiente, ao patrimônio, infraestrutura e população, com tempo de recuperação elevado ou irreversível.

Fonte: OLIVEIRA (2020).

Figura 13 – Relação entre Frequência vs. Severidade dos eventos extremos



Fonte: OLIVEIRA (2020).

Com relação aos impactos das mudanças climáticas, OLIVEIRA, 2020 sugere que a ocorrência de eventos de alta energia – que são frequentes nos meses de outono e inverno – geram ressacas e enchentes, o que pode comprometer a infraestrutura portuária e causar prejuízos econômicos. Este fato é corroborado pela análise realizada na etapa 4.3.1 deste estudo, dado que os níveis mais elevados e consequentemente responsáveis por eventos extremos na costa ocorreram no início do outono.

Mais especificamente, as análises de risco desenvolvidas pelo autor demonstraram que, para os eventos de aumento do nível do mar, as causas de perdas estariam associadas à falta de planejamento, baixas cotas altimétricas, escassez de fonte de sedimento, ocupação desordenada de faixas não edificáveis, dragagem desenfreada e plano de contingência ineficiente, o que poderia causar perda de espaço portuário, danos logísticos por comprometimento da circulação e armazenagem de cargas, inundações, recuo da linha de costa, perda de biodiversidade e consideráveis prejuízos econômicos.

Por outro lado, embora semelhantes aos eventos de elevação do nível do mar, OLIVEIRA (2020) aponta que os eventos erosivos possuem maior chance de recuperação da área dos portos por apresentarem impactos menores, apesar de

estarem associados ao comprometimento da estabilidade geotécnica e possível necessidade de obras de enrocamento, o que poderia intensificar a frequência de ressacas ocasionadas por elevações dos níveis. Segundo o autor, as causas desses eventos estariam associadas à escassez de fonte de sedimento, ocupação desordenada de faixas não edificáveis, descaracterização dos ecossistemas originais e construção e manutenção inadequada de estruturas portuárias.

Dessa forma, a Análise Preliminar de Perigos para os eventos extremos citados acima encontra-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise Preliminar de Perigos para o Complexo Portuário de São Francisco do Sul

Eventos	Severidade	Frequência	Risco
Elevação do Nível do Mar	IV – Catastrófico	D – Provável	Crítico
Processos Erosivos	III – Crítico	D – Provável	Sério

Fonte: a autora, adaptado de OLIVEIRA (2020).

Como formas de adaptação, OLIVEIRA (2020) sugere que a preservação de ecossistemas e a manutenção de serviços ambientais é a chave para diminuir as vulnerabilidades. De maneira integrada, é ideal que exista uma visão da relação entre território e serviços ecossistêmicos, gerando ferramentas de diminuição das vulnerabilidades a partir da regulação de ações (BRAUN et al., 2017), como controle de inundações, secas e degradação do solo.

Além disso, o autor defende a importância de os órgãos responsáveis reconhecerem o grande impacto antrópico causado, que é provavelmente irreversível pelos próximos 30 anos. Assim, a Administração Portuária deve tomar ações de restrição gradual da ocupação das áreas atingidas ou vulneráveis, além de priorizar e incentivar progressivos ajustes no plano diretor do terminal, visando um empreendimento mais resiliente.

Em casos mais críticos, a elaboração de projetos de estruturas fixas – como diques e muros de contenção – pode ser avaliada como forma de alternativa. Contudo, OLIVEIRA (2020) indica o acompanhamento constante dos impactos e de suas demandas emergenciais com o objetivo de aprimorar o conhecimento dos órgãos responsáveis para que disponham de planos de contingências eficazes.

Ainda, o estudo aponta para ações gerenciais locais visando a integração com a escala estadual e federal. Como exemplos de ações dessas escalas maiores, indicam-se os projetos apontados na Tabela 13.

Tabela 13 – Projetos gerenciais

Projeto	Aplicação Local
PROCOSTA - Projeção de Linhas de Costa Futuras e Identificação de Perigos	Permitirá que o município antecipe e possa se preparar para os cenários previstos, tomando ações de contingência mais assertivas.
PROCOSTA – Alt-Bat	Maior precisão dos resultados relacionados às variações do nível do mar pela compatibilização dos níveis de altimetria e batimetria.
PROCOSTA – Monitoramento e Gestão para a Conservação da Linha de Costa	Acompanhamento constante da região, permitindo o conhecimento das possíveis condições futuras dos ecossistemas costeiros.
Projeto Orla	Gestão de conflitos relacionados à instalação de novos empreendimentos portuários e identificação de áreas mais vulneráveis aos eventos extremos

Fonte: a autora (2021).

De maneira geral, as análises de OLIVEIRA (2020) concluíram que o porto de São Francisco do Sul está mais vulnerável aos eventos extremos de aumento do nível do mar quando comparado aos eventos erosivos. Este fato pode sugerir que a ocorrência futura dos WT11 e WT16 deve ser tratada com cautela e atenção a partir de medidas de mitigação e adaptação que visem amenizar os impactos gerados.

Por outro lado, o estudo de VEIGA LIMA, 2018 retrata que o Complexo Portuário de São Francisco do Sul está localizado em um sistema estuarino, abordando a importância ecológica dos estuários já que constituem os verdadeiros “berçários” naturais de diversas espécies. Assim, devido à baixa hidrodinâmica do local, a disposição inadequada de sedimentos dragados pode gerar prejuízos ambientais significativos, como a acumulação de poluentes e metais pesados, sugerindo que eventos extremos que resultem na necessidade de dragagens de manutenção podem ser um dos principais influenciadores de geração de poluição do ecossistema.

Ainda, VEIGA LIMA, 2018 aborda uma ótica reversa de observação, colocando os portos não somente como vítimas, mas também como causadores das mudanças

climáticas dado que estes são responsáveis pela emissão de consideráveis parcelas de gases de efeito estufa através da queima de combustíveis fósseis. Assim, a quantidade de poluentes emitidos pode causar problemas como acidificação dos oceanos, modificação do regime de precipitação e aquecimento das águas marinhas, o que resulta em danos causados por eventos de aumento do nível do mar, sendo que, segundo OLIVEIRA, 2020, este é o fenômeno de maior impacto atual ao complexo portuário em análise.

Dessa forma, é possível observar que é instaurada uma cascata de causa e efeito, já que a contribuição dos portos ao aumento da emissão de gases de efeito estufa também contribui para o aumento da frequência dos WTs que geram eventos extremos, fazendo com que os portos se tornem causadores, mas também alvos das mudanças climáticas, estando cada vez mais sujeitos a prejuízos econômicos graças a perdas de infraestrutura e de frota naval.

Conforme um estudo realizado pela Conferência do Oceano das Nações Unidas (UN, 2017), o aumento do nível do mar resultará em danos às estruturas portuárias que estão estimados em US\$111,6 bilhões até 2050 e US\$367,2 bilhões até o final do século. Ainda, é importante ressaltar que os principais prejuízos originados pelas mudanças climáticas são os processos erosivos e de assoreamento das rotas aquaviárias, além das inundações de infraestruturas marítimas.

Assim, para amenizar os impactos e as interações entre os portos e meio ambiente, é fundamental que sejam considerados fatores como a tipologia de carga operada, infraestrutura, localização geográfica, fragilidades físicas do ambiente e emissão de gases de efeito estufa, analisando as diferentes fases de implementação, operação e, em alguns casos, expansão do empreendimento (ESPO, 2012), buscando promover medidas de gestão que contemplem o respeito ao meio ambiente e às atividades portuárias.

Ainda segundo VEIGA LIMA, 2018, considerando os contextos e problemas associados à causa portuária, existem ao menos dez instrumentos para o gerenciamento costeiro no Brasil. Contudo, é possível inferir que apenas três destes são aplicáveis a portos.

Tabela 14 – Instrumentos de Gerenciamento Costeiro no Brasil aplicáveis ao setor portuário

Instrumentos	Definições
PAF-ZC	O Plano de Ação Federal para a Zona Costeira constitui documento de orientação das diversas atividades do Governo Federal na Zona Costeira, visando sua melhor integração e adequação a parâmetros de sustentabilidade. Está na quarta versão (2017-19).
ZEEC	O Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro constitui a base técnica para a tomada de decisão e apoio aos processos de licenciamento e controle ambiental. Estabelece critérios para o planejamento e à implementação de atividades costeiras. Propõe 5 tipos de zoneamento de zonas mais conservadas (Z1) as mais degradadas (Z5).
Planejamento Espacial Marinho	O Planejamento Espacial Marinho é um processo que visa alocar harmoniosamente os diversos usos e atividades sociais, econômicas e ambientais no oceano de modo a reduzir conflitos entre os diversos interesse. É importante ressaltar que o PEM ainda é uma ferramenta potencial, não estando institucionalizada no Brasil.
Projeto Orla	Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima (Projeto Orla), sendo constituído por ações de planejamento, orçamento e gestão das áreas litorâneas, além de buscar responder os desafios envolvidos nas fragilidades dos ecossistemas marinhos, do crescimento do uso e ocupação desordenado da orla e do aumento de processos erosivos (PROJETO, s.a.)

Fonte: VEIGA LIMA, 2018 (adaptado).

De maneira geral, o PAF-ZC está mais direcionado às questões intrinsecamente ambientais, como controle de espécies bioinvasoras e correta coleta seletiva. Assim, considerando que OLIVEIRA, 2020 sugere que a preservação de ecossistemas e a manutenção de serviços ambientais é a chave para diminuir as vulnerabilidades causadas pelos eventos extremos, este instrumento se torna uma importante ferramenta de amenização dos impactos, embora seja necessário adaptações que contemplem os impactos gerados pelas mudanças climáticas.

Por outro lado, é possível sugerir que o ZEEC, Projeto Orla e o PEM possuem melhor aplicabilidade à prevenção e mitigação de impactos gerados pelos eventos extremos na zona portuária em questão, embora atualmente também não possuam abordagens específicas para impactos causados pelas mudanças climáticas.

O ZEEC – em parceria com o Plano de Desenvolvimento e Zoneamento Portuário (PDZ) – pode auxiliar na geração de manejo de possíveis conflitos entre o porto e a cidade a partir da elaboração de Planos Diretores. Além disso, o estudo de VEIGA LIMA, 2018 corrobora as análises feitas por OLIVEIRA, 2020 dado que também propõe o Projeto Orla como uma importante ferramenta para detalhar a integração entre a orla municipal e o distrito portuário.

Contudo, é possível observar que, embora não institucionalizado, o instrumento mais adequado ao cenário de eventos extremos causados pelas mudanças climáticas é o PEM (SANTOS, 2022), sendo que a área de estudo do presente trabalho possui um Plano de Governança Marinha Integrada para o Ecossistema Babitonga (Santa Catarina) que pode se tornar um verdadeiro exemplo de uso do instrumento. Assim, considerando que sua atuação pode sobrepor as iniciativas de outros instrumentos, um dos exemplos de atuação do PEM é o suporte aos tomadores de decisão e à resolução de conflitos que envolvem áreas de dragagem e descarte de sedimentos, indicando o potencial de uso do instrumento.

Por fim, é válido ressaltar que as três medidas apresentadas por VEIGA LIMA, 2018 não possuem abordagem específica ao problema dos impactos causados pelas mudanças climáticas em áreas portuárias, sendo necessário que os instrumentos existentes e/ou com potencial de aplicação passem por reformulações que contemplem os verdadeiros problemas enfrentados pela ocorrência de eventos extremos.

4.5.2 Pesquisas direcionadas a Portos Nacionais

Segundo CARMO, 2017 dados globais de altimetria por satélite indicam que o nível do mar apresentou variação de $2,39 \pm 0,48$ milímetros/ano entre 2005 e 2011, sendo que os portos brasileiros apresentam dados que demonstram um aumento na altura relativa de 4mm/ano. Por exemplo, o nível médio do mar do estuário do Rio Paraíba apresentou um aumento expressivo de 16cm entre janeiro de 2002 e março de 2007.

Dessa forma, com o intuito de compreender as vulnerabilidades socioambientais dos moradores do estuário do Rio Paraíba-PB frente às mudanças climáticas e consequentes variações do nível do mar, buscando identificar a percepção de grupos locais, CARMO, 2017 realizou duas entrevistas com as comunidades do Porto do Capim, em João Pessoa, e do Porto de Moinho, em Bayeux, buscando compreender as percepções de três atores: pescadores, especialistas locais e público leigo.

Considerando os impactos das mudanças climáticas na região portuária, 60% dos especialistas entrevistados acreditam que a elevação do nível do mar resultará em impactos positivos a partir do momento que possibilita o aumento de calado e consequente melhoria na capacidade de carga do porto. Contudo, 13% dos especialistas apontam que haverá redução das condições de navegabilidade no canal, sendo que 27% responderam que não possuem opinião ou conhecimento sobre o assunto.

Por outro lado, 50% dos pescadores acreditam que o aumento do nível do mar não resultará em melhoria das qualidades de navegação, sendo que 40% acredita que haverá aumento de calado para o canal e consequente aprimoramento da capacidade de carga do porto, o que aponta uma significativa polarização de opiniões dentro do grupo de pescadores.

Os demais resultados das entrevistas direcionadas aos impactos das mudanças climáticas realizadas por CARMO, 2017 estão evidenciadas na Tabela 15, assim como os números discutidos acima.

Tabela 15 – Resultados das entrevistas para compreensão das opiniões sobre os impactos das mudanças climáticas no Porto de Cabedelo, Paraíba

Público	Opinião	Quantidade das respostas
Especialistas	Haverá melhoria na navegação	60%
	Não haverá melhoria na navegação	13%
	Sem opinião/conhecimento sobre o assunto	27%
Pescadores	Haverá melhoria na navegação	40%
	Não haverá melhoria na navegação	50%
	Sem opinião/conhecimento sobre o assunto	10%

Público Leigo	Haverá melhoria na navegação	16%
	Não haverá melhoria na navegação	39%
	Sem opinião/conhecimento sobre o assunto	44%

Fonte: a autora (2022).

Além disso, o trabalho aponta que os pescadores da praia da Costinha passaram por prejuízos econômicos significativos por conta de enchentes e ressacas ocasionadas pelas intervenções para estabilização do canal do Porto de Cabeledo. Assim, é interessante observar que os impactos das mudanças climáticas nos portos até podem ser contornados, contudo, geram prejuízos diretos à população adjacente ao empreendimento.

Como evidenciado por OLIVEIRA, 2020, as obras de manutenção e instalação de estruturas fixas até podem ser consideradas alternativas viáveis frente aos impactos de eventos extremos. Contudo, é importante que estudos sejam realizados para compreender os reais impactos das construções, prevendo possíveis danos à comunidade local e evitando casos como do canal do Porto de Cabeledo.

Dessa forma, CARMO, 2017 sugere que, considerando a importância econômica dos portos analisados para a região, é urgente que dados meteo-oceanográficos sejam coletados de maneira assertiva para que seja viável compreender os padrões de variação do nível do mar e elaborar os planejamentos adequados aos problemas consequentes, incluindo a participação integrativa dos atores responsáveis. Para que isso seja possível, as seguintes medidas foram propostas:

1. Refinamento do conhecimento dos tomadores de decisão e moradores para incentivar ações de prevenção de longo prazo e reduzir aplicações de políticas paliativas que não geram resultados eficientes na redução das vulnerabilidades;
2. Implementação de equipamentos para a obtenção de dados necessários à geração de modelos hidrológicos, medições meteorológicas e comparação com séries históricas;
3. Formação de grupos de estudo de gestão com incentivo do governo estadual e prefeituras municipais, visando a coleta de dados biológicos,

físicos e sociais para geração de modelos específicos e adequados às regiões de análise.

Por outro lado, o estudo desenvolvido por NEVES, 2015 propôs que as ferramentas de gestão portuária devem seguir uma ordem hierárquica decrescente, partindo inicialmente da Política Nacional do Meio Ambiente, da Política Nacional para Recursos do Mar e da Política Nacional de Recursos Hídricos, sendo acompanhada por etapas de observação e compatibilização.

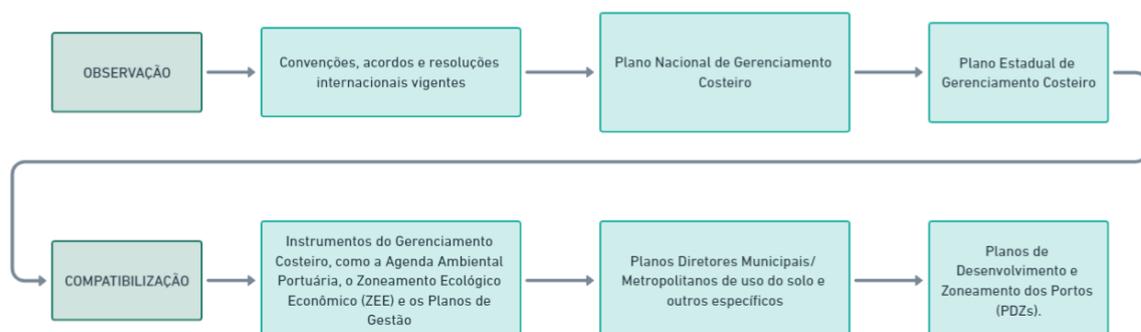
As etapas de observação gerariam análises das convenções, acordos e resoluções internacionais vigentes, assim como análises dos princípios do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro a partir da Resolução da Comissão Interministerial de Recursos do Mar, além da observação dos princípios do Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro.

Ainda, as etapas de compatibilização seriam voltadas para compreender as conexões entre os instrumentos de Gerenciamento Costeiro, como o ZEEC, a Agenda Ambiental Portuária (AAP) e os Planos de Gestão, focando principalmente nas atividades de aumento das áreas do porto.

Além disso, o estudo indica a importância de analisar a compatibilidade dos Planos Diretores Municipais para uso do solo, estabelecimento de unidades de conservação, entre outros. Por fim, a última etapa de compatibilização também deve ser voltada à análise dos PDZs dos portos.

A Figura 14 representa, na forma de um fluxograma, as etapas hierárquicas de gestão descritas anteriormente.

Figura 14 – Hierarquia das Ferramentas de Planejamento e Gestão Portuária Nacional



Fonte: a autora (2022).

É importante ressaltar que NEVES, 2015 direcionou suas análises para o Porto de Santos. Assim, a autora aborda a relevância deste porto como modelo para os demais portos nacionais dado que este foi o pioneiro na criação de uma Agenda Ambiental Portuária (AAP).

De maneira geral, a AAP do Porto de Santos foi desenvolvida de forma integrativa, buscando compreender os atores regionais, estaduais e nacionais envolvidos nas atividades do porto, sendo que os grupos participantes dos debates foram a Universidade Católica de Santos (Unisantos), a Agência Estadual de Controle da Poluição, a Superintendência de Meio Ambiente da Autoridade Portuária, a Organização da Sociedade Civil de Interesse Público e a Agência Brasileira de Gerenciamento Costeiro.

Considerando que o Porto de Santos precisa constantemente dragar o seu canal de navegação devido às altas taxas de assoreamento ocasionados pela chegada de volumes significativos de sedimentos oriundos do estuário (DRAGAGEM, [s.d.]), o debate entre os diversos atores se tornou importante pois existia um conflito direcionado à atividade de dragagem já que o material dragado era, inicialmente, despejado em um único ponto de descarte, em frente à praia do Guarujá.

Dessa forma, com a intenção de compreender as demandas de todas as partes envolvidas, a Unisantos elaborou uma pesquisa em cooperação com os atores de maior importância no processo para gerar ferramentas de negociação entre as partes.

É válido estabelecer uma conexão destes últimos pontos com as análises de OLIVEIRA, 2020 considerando que o autor aponta que dragagens desenfreadas estão associadas às principais atividades de risco ao Complexo Portuário de São Francisco do Sul. Dessa maneira, é possível sugerir que a proposta de debate trazida por NEVES, 2015 se torna aplicável ao contexto da área de estudo do presente trabalho, podendo ser utilizada para a redução de conflitos entre os atores em casos de necessidade de dragagens, por exemplo.

Por mais que as taxas de assoreamento do Porto de Santos não sejam especificamente originadas por eventos extremos, é válido ressaltar que chuvas intensas e eventos erosivos podem intensificar o fenômeno, sendo importante estabelecer a relação do assoreamento com as mudanças climáticas para que verdadeiras medidas preventivas possam ser definidas.

Dentre as diversas iniciativas de gestão propostas por NEVES, 2015, as que melhor se aplicam ao contexto do trabalho no âmbito de medidas preventivas, são:

1. Gerenciamento de riscos ambientais, considerando planos de contingência e emergência;
2. Controle das taxas de assoreamento e de erosão, considerando o destino final do material dragado;
3. Conservação dos recursos naturais.

É válido observar que as ações citadas acima são interligadas e codependentes, sendo fundamental que todas sejam amplamente aplicadas para gerar uma efetiva prevenção dos impactos das atividades portuárias. Contudo, assim como em VEIGA LIMA, 2018, novamente é observado que os gerenciamentos de riscos ambientais normalmente não consideram os impactos das mudanças climáticas e conseqüentemente não possuem uma linha de correlação entre a ocorrência de eventos extremos e a conservação dos recursos naturais, controle de taxas de assoreamento e de erosão.

Ademais, considerando a abordagem do presente trabalho aos cenários de mudanças climáticas frente às emissões de gases de efeito estufa, se torna importante compreender que as medidas de mitigação também devem analisar as atividades portuárias no contexto das emissões atmosféricas, corroborando a análise feita pelos documentos de análise local (item 4.5.1). Assim, além de propor medidas de mitigação, prevenção ou contenção para os eventos extremos como aumento do nível do mar, inundações, ressacas, erosão e etc., é extremamente importante que medidas sejam propostas para amenização das emissões de GEE.

Conforme está lógica, NEVES, 2015 retrata que existem diversas fontes de poluição atmosférica no Porto de Santos, como a queima de combustível fóssil, transporte de voláteis, pintura do casco de embarcações, suspensão de poeiras, entre outros.

Dessa forma, NEVES, 2015 indica que, para o controle da poluição atmosférica resultante das atividades portuárias, é importante que seja realizado um investimento em equipamentos de controle de poluição do ar, assim com manutenção dos veículos e maquinário de apoio. Ainda, esforços constantes para adoção de procedimentos de minimização das emissões se fazem necessários, principalmente nas atividades que envolvem granéis sólidos.

Contudo, embora exista uma Política Nacional de Mudanças Climáticas que visa estabelecer uma meta para que o Brasil reduza suas emissões, considerando o setor portuário como parte contribuinte das emissões e conseqüente responsável pela

redução destas, essa política não aborda um objetivo específico para a amenização do impacto nas mudanças climáticas por parte dos portos. Ou seja, não existe um fornecimento adequado das informações necessárias para o desenvolvimento de ações conforme as necessidades locais. Este último fato é amplamente observado nos documentos e instrumentos de gestão atuais propostos por VEIGA LIMA, 2018, por exemplo, pois apesar de possuírem abordagens voltadas a portos, não consideram os impactos das mudanças climáticas.

Sendo assim, NEVES, 2015 sugere algumas alternativas para incorporar a pauta climática na agenda de ações portuárias, sendo possível citar a utilização da tecnologia *cold iron* que, resumidamente, busca proporcionar a redução das emissões de embarcações, utilizando a matriz energética em terra ao invés de óleo diesel ou bunker em embarcações atracadas.

Além disso, a autora propõe a adaptação da regulação da política de Registro de Emissões e Transferências de Poluentes (RETP). De maneira geral, essa política visa coletar e tratar dados de emissões e transferências de poluentes oriundos de processos produtivos, visando a divulgação pública dos dados. Assim, uma maneira de utilizar essa ferramenta seria incluir a obrigatoriedade de registros dos GEE, já que atualmente a RETP se restringe aos poluentes químicos que emitem gases deletérios à saúde humana.

Por fim, outra sugestão interessante proposta por NEVES, 2015 é a parceria entre o Porto de Santos e portos internacionais na tentativa de trocar experiências e informações sobre tecnologias sustentáveis que podem ser aliadas na redução dos GEE.

4.5.3 Pesquisas direcionadas a Portos Internacionais

O estudo de NURSEY-BRAY, 2013 visou compreender os principais impactos portuários resultantes das mudanças climáticas a partir de análises voltadas para os portos australianos, buscando responder a dimensão realística desses impactos e possíveis maneiras de mitigação.

Dessa forma, a autora traça uma relação entre “eventos causados pelas mudanças climáticas” e “impactos diretos aos portos”, com o objetivo de compreender o comportamento desses eventos no passado e futuro a partir de análises globais.

Dentro os listados por NURSEY-BRAY, 2013, a Tabela 16 reúne os eventos e impactos que melhor se adequam ao contexto do presente trabalho.

Tabela 16 – Eventos resultantes das mudanças climáticas e seus respectivos impactos na zona portuária

Eventos Climáticos	Impactos nos portos
Aumento do nível do mar	Marés meteorológicas, inundações e danos à estrutura portuária
Aumento da temperatura atmosférica	Intensificação da biodeterioração resultando em aumento de custos de manutenção
Aumento/Diminuição de Precipitação	Alteração dos padrões de escoamento e assoreamento, aumentando a necessidade de dragagens
Aumento da temperatura da superfície do mar	Aumento da introdução de espécies exóticas
Alteração dos padrões de velocidade de vento	Problemas de navegação e aumento de dificuldade para manobras de navios
Alteração das correntes oceânicas	Alteração de rotas de navegação
Acidificação dos oceanos	Aumento da corrosão e biodeterioração, resultando em aumento de custos de manutenção
Aumento da ocorrência e intensidade de eventos meteorológicos extremos	Aumento no tempo de espera para navios entrarem nos portos, interrupção do transporte adjacente (rodoviário e ferroviário) e realocação de portos devido a mudanças das rotas de navegação
Aumento da ocorrência e intensidade de tempestades tropicais	Danos à estrutura portuária
Ondas de calor	Interrupção de atividades gerais, de transporte adjacente (rodoviário e ferroviário) e aumento do uso de energia
Aumento da intensidade de secas	Diminuição de calado

Fonte: a autora, adaptado de NURSEY-BRAY (2013).

Além disso, assim como OLIVEIRA, 2020, a autora também aborda que o impacto de maior relevância para a zona portuária é o aumento do nível do mar, embora alterações da precipitação, temperatura atmosférica e da superfície do mar, circulação oceânica, acidificação dos oceanos, eventos extremos atmosféricos e

tempestades tropicais também exercem papel fundamental na criação de danos aos portos.

Ainda, NURSEY-BRAY, 2013 retrata a cascata de ações que pode ser gerada a partir da ocorrência de um impacto, exemplificando como os eventos estão fortemente correlacionados e interdependentes. Como exemplo, é possível citar a geração de marés meteorológicas e inundações que geram a necessidade de dragagens de manutenção. Por consequência, essas dragagens resultarão em um aumento de emissão de gases de efeito estufa, o que contribui para a intensificação do cenário das mudanças climáticas e aumento dos impactos na zona portuária. Novamente, essa é a lógica trazida por VEIGA LIMA, 2018, que coloca os portos não somente como vítimas, mas também como causadores das mudanças climáticas.

Como medidas de mitigação e prevenção, os portos da Austrália estão desenvolvendo uma Avaliação de Riscos das Mudanças Climáticas, considerando implementar a ferramenta a partir de aplicativos de uso geral.

Além disso, NURSEY-BRAY, 2013 retrata que os portos australianos procuram seguir a agenda de adaptação conforme outros portos do mundo, embora a preocupação em tornar o debate integrativo esteja partindo majoritariamente da comunidade, que aborda a importância de tornar acessível a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos portos, além de evidenciar as ações de mitigação que podem ser realizadas.

Por outro lado, NURSEY-BRAY, 2013 aborda as respostas governamentais realizadas em portos do mundo frente aos impactos das mudanças climáticas neste setor. De maneira geral, as dez ações elencadas são gerenciadas por grupos que visam a redução das emissões de gases de efeito estufa, redução de danos à engenharia portuária e integração da sociedade ao debate. Abaixo, cada uma delas é apresentada:

1. Declaração Climática Mundial dos Portos (*World Ports Climate Declaration*): declaração que visa fornecer orientações para portos que desejam reduzir suas emissões de GEE, sendo assinada por 55 portos do mundo;
2. Associação Internacional dos Portos (*International Association of Ports and Harbours*): visa incentivar ações colaborativas a partir de projetos que objetivem gerenciar pegadas de carbono, eficiência energética, integração de pautas ambientais, entre outros;

3. Porto de Mississipi: projeto que propõe a elevação das estruturas portuárias até três metros acima do nível do mar com o intuito de proteger estas de possíveis eventos extremos futuros;
4. Autoridade Portuária de Gijón: organização de grupos para estudo dos impactos das ondas nas estruturas portuárias;
5. Porto de Gênova: proposta de renovação da orla urbana para proteger as estruturas portuárias dos impactos climáticos;
6. Porto de Amsterdam: estabelecimento de diálogo entre os empreendimentos portuários e a população geral para captar ideias de inovação que visem a sustentabilidade e proteção dos portos;
7. Estudo de *Afslotdijk* (Amsterdam): avaliação de medidas de curto prazo que podem ser eficientes no combate aos impactos das mudanças climáticas nos portos, propondo o uso dos *Dutch Closure Dyke* (Diques de Fechamento Holandês) e marismas (naturais ou artificiais) para conter as inundações causadas pelo aumento do nível do mar;
8. Associação Americana das Autoridades Portuárias (*American Association of Port Authorities*): geração de manuais e/ou planos de emergência aos portos;
9. I2S2 – Instituto de Sustentabilidade Portuária: organização que visa fornecer ferramentas para sustentabilidade, informação, geração de dados e práticas de inovação tecnológica para auxiliar os tomadores de decisão nas operações portuárias, buscando auxiliar na prevenção e compreensão de problemas;
10. PIANC – Associação Internacional de Navegação (*Permanent International Association of Navigation Congresses*): levantamento de medidas para compreender a resposta da navegação frente às mudanças climáticas.

Com o intuito de compreender os impactos das mudanças climáticas nos portos da Inglaterra, FLEGG, 2018 também desenvolveu um extenso estudo que elenca atividades de mitigação e adaptação realizadas em portos do mundo, embora aponte que os impactos climáticos aos portos já são irreversíveis, indo de encontro ao proposto por OLIVEIRA, 2020 já que o autor retrata a irreversibilidade dos impactos pelos próximos 30 anos.

Ainda, a autora traz uma abordagem voltada também para os impactos indiretos causados aos portos já que os eventos climáticos podem comprometer a cadeia de suprimentos para o funcionamento completo das operações. Tal fato pode ser exemplificado com os impactos causados pelo “Sismo de Kobe” ou “*Great Hashin*

Earthquake” no Porto de Kobe, Japão. Antes do evento, este era o sexto porto em capacidade de transporte de containers mundial; após a passagem do evento, porém, o porto decaiu para a 45ª posição. Esta situação perdurou por dois anos, gerando perdas de negócios e de capacidade tecnológica para o porto.

Dessa forma, a autora sugere algumas alternativas para minimizar a duração dos impactos na cadeia de produção de portos frente aos danos causados pelas mudanças climáticas. Além disso, é destacado que as alternativas propostas podem ser aplicadas a diversos contextos.

Dentre as propostas sugeridas, é possível citar o uso de recursos armazenados, como reservas de combustível para permanecer com as operações e utilização de estoques de cargas para reduzir a ocorrência de faltas aos fornecedores. Ainda, a utilização de rotas temporárias para os navios se faz necessária, redirecionando os navios para outros portos da companhia ou parceiros, visando a redução no tempo de espera no transporte das cargas. Por fim, a autora propõe a realocação de funcionários para funções alternativas, visando também a redução do tempo de espera dos transportes de cargas.

Ademais, FLEGG, 2018 sugere que, considerando os cenários de mudanças climáticas propostos por modelos numéricos e seus respectivos eventos extremos associados, os períodos de interrupção de atividades dos portos irão aumentar com o passar dos anos. É possível observar que, segundo as projeções analisadas no tópico 4.4 desta metodologia, os cenários de mudanças climáticas apontam para um aumento dos eventos que minimizam os níveis na área dos portos estudados. Assim, em termos de estrutura, os impactos listados pelo estudo de FLEGG, 2018 são a temporária inacessibilidade ao porto causada por inundações, as quedas e/ou interrupções prolongadas de energia, a perda comercial temporária ou de longo prazo, os danos à infraestrutura e, em casos extremos, o fechamento prolongado ou definitivo do porto.

Dessa forma, FLEGG, 2018 realiza uma divisão entre respostas de mitigação e de adaptação frente às mudanças climáticas. Para a autora, enquanto as medidas de mitigação são aquelas que visam a redução ou prevenção das emissões de gases de efeito estufa, as medidas de adaptação são representadas por ações ou decisões direcionadas para a redução de riscos potenciais. Contudo, o estudo busca propor medidas de adaptação dado que considera que as ações de mitigação já são amplamente desenvolvidas.

Sendo assim, a autora demonstra que as ações de adaptação podem ser norteadas pelas decisões específicas para as mudanças climáticas, com foco em aumentar a colaboração entre os portos, desenvolvendo operações de “*backup*”, prevenção de inundações, preparação para temperaturas extremas e seguros recursos de fornecimento de energia. Também, é importante considerar nas ações o aprimoramento de tecnologias, estruturas e planejamento, revisão e atualização de regulamentos.

Além disso, FLEGG, 2018 reúne as medidas adaptativas que estão em andamento para os portos da Inglaterra, dividindo as ações em categorias de melhorias de planejamento, preparação para temperaturas extremas, aprimoramento de visibilidade, melhoria da infraestrutura, segurança do fornecimento de energia, aumento do estoques *in situ*, prevenção contra inundações, novas opções de seguro, revisão das regulamentações, desenvolvimento de *backup* das operações, construções inteligentes, correção de operações e colaboração (Tabela 17).

Tabela 17 – Exemplos de adaptações frente às mudanças climáticas utilizadas em portos da Inglaterra

Tipo de adaptação	Medida adaptativa
Melhoria de planejamento	Desenvolvimento de planos para manejo de riscos de inundação
	Melhorias de planos de orientação
	Procedimentos de recuperação de guindastes
	Novas estratégias de empilhamento de containers
Preparação para temperaturas extremas	Licitações de obras marítimas devem passar por legislação que avaliem os impactos das mudanças climáticas
	Melhorias nos sistemas de refrigeração
	Rampas de aquecimento
Aprimoramento de visibilidade	Fornecimento de vestuários de trabalhos adaptados
	Iluminação de alta visibilidade
	Melhoria dos sistemas de radar
Melhoria da infraestrutura	Aprimoramento de defesas
	Aumento de infraestrutura resiliente
	Construções considerando impactos de onda
	Substituição ou elevação do nível do cais

Segurança do fornecimento de energia	Melhoria nos geradores Geradores reservas
Aumento dos estoques <i>in situ</i>	Caminhões e containers com maior capacidade de armazenamento para períodos de atraso Suspensão de containers
Prevenção contra inundações	Aumento da capacidade de drenagem Unidades móveis de bombeamento
Novas opções de seguros	Acesso a novas opções de seguro
Revisão das regulamentações	Desenvolvimento de logística voltada para o tratamento de inundações
Desenvolvimento de <i>backup</i> das operações	Acesso remoto das tecnologias
Construções inteligentes	Monitoramento do nível do mar Alteração de cronogramas de manutenção em relação à ocorrência de tempestades
Correção de operações	Mudança do cronograma das dragagens de manutenção
Colaboração	Fóruns de ajuda mútua entre portos

Fonte: a autora, adaptado de FLEGG (2018).

FLEGG, 2018 também aponta que as adaptações frente às mudanças e riscos climáticos precisam ser revisadas constantemente, sendo que as alterações normalmente são acionadas por “pressões”, ou seja, forçantes que podem causar impactos e danos, como aumento do nível do mar ou mudança da frequência de ocorrência de tempestades. Dessa forma, a autora argumenta que o ciclo das adaptações deve seguir a seguinte lógica:

1. Alteração de uma pressão e surgimento de um impacto/problema;
2. Definição do impacto/problema que necessitará de medidas adaptativas;
3. Como será realizada a adaptação, considerando custos associados;
4. O que será utilizado no processo de adaptação;
5. Fatores que encorajam ou limitam a medida adaptativa escolhida;
6. Avaliação da efetividade da medida adotada.

Assim como o exposto na Figura 15, é importante ressaltar que como um verdadeiro ciclo, a lógica apresentada acima segue um caminho de retroalimentação, onde os eventos passados podem e devem ser utilizados como aprendizado para possíveis eventos futuros, enfocando sempre no aprimoramento das adaptações empregadas.

Figura 15 – Ciclo de avaliação de adaptação para avaliar mudanças nas condições e riscos da linha de base



Fonte: a autora, adaptado de FLEGG (2018).

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Neste trabalho, 18 anos de dados de altura significativa de ondas, direção e período de ondas e maré meteorológica foram analisados a fim de compreender os cenários de ondas que ocorreram na passagem de 25 *weather types* (ou preditores climáticos) que possuem influência sobre o Atlântico Sul e, conseqüentemente, no Complexo Portuário de São Francisco do Sul.

Os dados de ondas foram retirados do modelo CSIRO. Por outro lado, os dados de maré meteorológica são produtos do modelo DAC. Os 25 *weather types* utilizados foram descritos por BORATO, 2021. Dessa forma, para equiparar as séries temporais na mesma escala temporal, realizou-se a análise do *Total Water Level* (RUEDA, 2016; BORATO, 2021), com o intuito de utilizar os dados de onda e maré meteorológica diários que geraram níveis críticos, ou seja, aqueles que maximizaram e minimizaram os cenários. Além disso, foram identificados os três WTs mais frequentes dentro do período de análise para compreender a configuração oceanográfica e atmosférica na passagem destes eventos.

Para BORATO, 2021, os três WTs mais frequentes foram, em ordem crescente de ocorrência, os WT16, WT11 e WT12. Contudo, para o presente trabalho, os WTs mais frequentes foram os WT12, WT11 e WT16. Esta discordância na ordem de ocorrência entre os trabalhos pode ser explicada pela diferença entre as séries temporais utilizadas pelas autoras. Contudo, é interessante observar que por mais que a ordem de ocorrência tenha sido distinta, os três WTs mais frequentes são os mesmos em ambos estudos.

Dessa forma, com base na identificação destes WTs foi possível compreender o comportamento dos cenários de ondas a partir da análise de *Downscaling* ou Refinamento Estatístico (CAMUS et. al, 2014), o que demonstrou que o WT12 foi o responsável pelos menores níveis para o TWL Máximo e Mínimo, enquanto que os WT11 e WT16 estiveram associados aos cenários de maiores níveis.

Segundo resultados propostos por OLIVEIRA, 2020, o Complexo Portuário de São Francisco do Sul está mais suscetível aos impactos dos eventos de alta energia que geram maiores elevações do nível do mar, sendo que esses eventos ocorrem principalmente nos meses de outono e inverno. Assim, os resultados de TWL Máximo para os WT11 e WT16 – que são responsáveis pelos maiores níveis – deste estudo

são corroborados pelas análises do autor já que estes eventos ocorreram nos primeiros dias de outono do ano de 2002.

É importante ressaltar que o método de *Downscaling* Estatístico é considerado confiável para reproduzir cenários históricos a partir da geração de estatísticas e tendências de ondas (CAMUS et al., 2014; BERTIN et al., 2013; WANG; SWAIL, 2012), sendo que os resultados obtidos por diversos autores demonstram grande semelhança com o método de *Downscaling* Dinâmico (BERTIN et al., 2013; COX; SWAIL, 2001). Ainda, considerando que o método dinâmico exige grande esforço computacional e a entrada de dados de vento e batimetria, o método estatístico se torna vantajoso para a compreensão de análises históricas de climas de ondas (CAMUS et al., 2014).

Entretanto, estudos apontam que o método estatístico possui limitações para projeções futuras, sugerindo que este tipo de *Downscaling* não é capaz de reproduzir cenários de ondas locais a partir de variáveis meteorológicas que não foram observadas no passado (CAMUS et al., 2014).

Ainda, por mais que os métodos de *Downscaling* possam ser considerados seguros, para que sejam geradas análises refinadas de projeções de alturas extremas de ondas é necessário que os cenários simulados sejam gerados a partir de diversos modelos climáticos, usando também diferentes métodos de *Downscaling*. Dessa forma, é possível reduzir os níveis de incertezas e aumentar a confiabilidade das análises de dados passados e principalmente futuros (WANG; SWAIL; 2006).

Considerando a baixa distância entre os dois pontos escolhidos ao longo da costa, realizou-se análises estatísticas gerais para compreender as possíveis variações entre estes (CAMUS et al., 2014). Assim, os resultados estatísticos de RMSE, BIAS, SI e *Pearson* indicaram uma forte correlação entre as séries de dados, apontando para a não necessidade de aplicação do método de *Downscaling* Estatístico para ambos os pontos já que os resultados seriam semelhantes e sem diferenças estatisticamente relevantes.

Além disso, foi possível compreender o comportamento de ocorrência dos WTs mais frequentes deste trabalho com base nos cenários de mudanças climáticas utilizados por BORATO, 2021. Em todos os cenários analisados (de baixa, média e alta emissão de GEE) foi observado um aumento de frequência do WT12 e uma diminuição de frequência dos WT11 e WT16.

Assim, considerando o comportamento dos WTs, é possível sugerir que os cenários de mudanças climáticas apontam que a área de estudo terá maiores ocorrências futuras de eventos de níveis mínimos quando comparados com eventos de níveis máximos.

Retomando as análises de OLIVEIRA, 2020, atualmente o Complexo Portuário de São Francisco do Sul está mais vulnerável aos impactos causados por elevações do nível do mar. Dessa forma, o comportamento dos WTs observado neste estudo indica a importância da realização de pesquisas que analisem os impactos de níveis mínimos já que, nos cenários de mudanças climáticas, é provável que estes eventos sejam os mais danosos à área de estudo.

Também, sabendo que o WT12 é responsável por um sistema de alta pressão presente em toda a região sul da América do Sul, e sabendo que o principal sistema de alta pressão dessa região é o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (PETERSON; STRAMMA, 1991), pode-se sugerir que todos os cenários de emissão de gases de efeito estufa seriam caracterizados por uma diminuição dos índices de precipitação durante os meses de inverno e por um aumento dos índices durante o verão (REBOITA et al., 2019).

Dessa forma, embora o *Downscaling* Estatístico tenha apresentado os menores níveis nos meses de abril e dezembro, ou seja, meses de Outono e Verão, os resultados permanecem concordantes já que o WT12 é mais frequente no verão quando comparado ao inverno, o que pode sugerir que por mais que os níveis de precipitação aumentem no verão, a ocorrência deste WT continua sendo responsável por níveis menores. Além disso, é importante considerar que a configuração atmosférica associada ao WT12 inibe as atividades convectivas, gerando redução dos índices de precipitação no sul e sudeste do Brasil (BORATO, 2021) e, por consequência, na área dos portos em análise.

Também, pode-se sugerir que as projeções de baixa e média emissão são similares às projeções de alta emissão, com resultados concordantes. Contudo, as variações são intensificadas com o aumento das emissões entre os cenários. Além disso, sabendo que o WT12 foi o que apresentou maior variação no cenário de alta emissão, pode-se indicar que este cenário estaria apontando para um aumento da ocorrência de eventos de níveis menores para a região dos portos analisados nos cenários de média e principalmente alta emissão, por exemplo.

Considerando a busca por identificação dos WT's associados a eventos extremos, indica-se, como sugestão para trabalhos futuros, a análise adicional dos WT's mais frequentes nos meses de outono e inverno. Dessa forma, sabendo que eventos extremos normalmente ocorrem durante o outono e inverno, será possível compreender de maneira mais assertiva os padrões atmosféricos associados a estes na região estudada já que os WT's analisados são mais frequentes nos meses de verão.

Além disso, como segunda sugestão para trabalhos futuros, se sugere a análise dos TWL's a partir de níveis pré-definidos obtidos pela compreensão dos processos operacionais dos portos estudados. Assim, será possível compreender, por exemplo, quais WT's estiveram associados aos níveis considerados inoperantes para a área de estudo.

Com o objetivo de transformar os resultados físicos em ferramentas úteis à sociedade, foram apresentadas medidas de gestão costeira que podem ser aplicadas aos portos de São Francisco do Sul e Itapoá frente aos impactos causados por eventos extremos e mudanças climáticas. Para isso, analisou-se estudos desenvolvidos para área de estudo, portos nacionais e portos internacionais.

É importante ressaltar que definir ferramentas de gestão para portos é extremamente importante já que existe um aumento da intensificação da degradação dos recursos marinhos costeiros. Assim, o crescimento do setor portuário precisa considerar os impactos costeiros afim de minimizar e mitigar impactos socioambientais (VEIGA LIMA, 2018).

Em primeiro lugar, as análises de gestão forneceram uma compreensão dos principais impactos na área de estudo, indicando que os portos de São Francisco do Sul e Itapoá estão mais vulneráveis aos eventos de elevação do nível do mar quando comparados aos eventos erosivos (OLIVEIRA, 2020; BRAUN; AUMOND, 2017). Dessa forma, é possível concluir que as medidas de gestão atuais devem procurar por ferramentas que enfoquem em mitigar eventos de inundação e ressacas, embora também seja importante que estudos futuros busquem compreender os impactos causados por eventos que minimizam os níveis.

Segundamente, é importante considerar que, embora o crescimento portuário resulte em um conseqüente crescimento econômico, é necessário avaliarmos também o aumento de conflitos e ameaças às populações locais e ecossistemas costeiros, o

que irá influenciar diretamente na qualidade socioambiental das regiões ocupadas por portos (VEIGA LIMA, 2018).

Além disso, por mais que o crescimento do presente setor seja expressivo, a preocupação em aplicar medidas de gestão costeira sempre foram mínimas (NEBOT et al., 2017; CUNHA et al., 2006), o que corroborou para cenários de degradação ambiental e ausência de planejamento frente aos impactos costeiros resultantes dos empreendimentos. Assim como OLIVEIRA, 2020 e FLEGG, 2018 apontam, muitos dos danos causados aos portos já são irreversíveis.

Ainda, um fato amplamente observado é que os planos de gestão existentes aos portos normalmente não compreendem assuntos relacionados às mudanças climáticas, demonstrando uma ausência de medidas de mitigação, prevenção e até mesmo remediação dos impactos gerados.

Inclusive, um dos principais documentos norteadores de gestão dos portos em estudo – o Plano de Zoneamento do Complexo Portuário de São Francisco do Sul (PLANAVE, 2019) – não contempla os impactos das mudanças climáticas, excluindo totalmente qualquer abordagem à pauta. Dessa forma, é extremamente importante que mais estudos sejam desenvolvidos com o objetivo de compreender as ferramentas que realmente são úteis aos portos a partir da ótica das mudanças climáticas.

Também, é importante ressaltar que assim como proposto por FLEGG, 2018, a ausência de medidas adaptativas pode gerar impactos indiretos aos portos vulneráveis às mudanças climáticas, os tornando desfavoráveis em relação aos portos concorrentes que possuem abordagens específicas para lidar com os danos causados por eventos extremos (HANSON; NICHOLSS, 2012; BECKER et al., 2014).

Além disso, autores apontam que ações adaptativas *in situ* são economicamente mais vantajosas quando comparadas com a realocação do porto ou das atividades relacionadas a este (MESSNER et al., 2013; SMITH, 2015), o que corrobora para a importância de compreensão das ferramentas que podem minimizar os impactos causados pelas mudanças climáticas.

A partir das ferramentas de gestão propostas ao longo do presente estudo, é possível concluir que, como medidas de prevenção, as principais alternativas são aquelas que incluem projetos governamentais integrativos com a sociedade acadêmica e público geral, como os propostos por OLIVEIRA, 2020 e VEIGA LIMA, 2018.

Como medidas de adaptação, a construção de estruturas fixas proposta por OLIVEIRA, 2020 é uma alternativa interessante em casos extremos, sendo uma opção difundida em países como Dinamarca e Vietnã, por exemplo (HALLEGATTE et al., 2010; THAO et al., 2014).

Também, é possível concluir que as medidas propostas por FLEGG, 2018 são extremamente práticas e aplicáveis, como o desenvolvimento de planos de manejo para inundações, licitações de obras considerando os impactos das mudanças climáticas, aumento de infraestrutura resiliente, aumento da capacidade de drenagem, entre outros, revelando a importância do estudo para o contexto do presente trabalho.

Portanto, os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que o trabalho possui potencial de auxiliar os tomadores de decisão frente aos eventos atmosféricos que exercem influência sobre os Portos de São Francisco do Sul e Itapoá. Foram fornecidas informações de quais eventos tendem a ocorrer com maior frequência e quais são os parâmetros meteoceanográficos que caracterizam esses eventos, além de sugerir ferramentas de gestão que poderão ser úteis na mitigação e adaptação frente aos impactos físicos associados.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. Q.; PASCOALINO, A. Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no Brasil – um estudo de caso sobre desastres naturais de Santa Catarina. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 13, 2009.

ANTAQ. **Agência Nacional de Transportes Aquaviários** – Ministério dos Transportes Indicadores de Desempenho Portuário – Estatístico Aquaviário, 2021. Disponível em: <http://anuario.antaq.gov.br/QvAjaxZfc/QvsViewClient.aspx?public=only&size=long&host=QVS%40graneleiro&name=Temp/2898d59c8d3f412ebc419b7851939d2d.pdf> Acesso em: 06 abr. 2021

BECKER, A. et al. Climate change impacts on international seaports: Knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. **Climatic Change**, v. 110, n. 1–2, 2012.

BECKER, A. H. et al. A note on climate change adaptation for seaports: A challenge for global ports, a challenge for global society. **Climatic Change**, v. 120, n. 4, 2013.

BECKER A. Towards seaport resilience for climate change adaptation: Stakeholder perceptions of hurricane impacts on Gulfport (MS) and Providence (RI). **Progress in Planning**. v. 99, p. 1-50. 2014.

BERTIN, X., **A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century**, **Global Planet. Change**, v. 106, p. 77–83, 2013.

BORATO, L.; FETTER FILHO, A.F.H.; GOMES DA SILVA, P.; MENDEZ, F. **Caracterização e projeções futuras dos padrões atmosféricos sobre o Oceano Atlântico Sul**. Dissertação em andamento. Não publicado.

BRAUN, S.; AUMOND, J. Simulação de elevação do nível do mar na cidade de Joinville (SC). XVII Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional. p.4-5. 2017

CAMUS, P. et al. A weather-type statistical framework for ocean wave climate. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, 2014.

CAMUS, P. et al. Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. **Coastal Engineering**, v. 147, 2019.

CARMO, F. W. **Vulnerabilidade socioambiental dos moradores do estuário do Rio Paraíba- PB frente as mudanças climáticas e variações do nível do mar**. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Gerenciamento Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. P 4.261 – Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de riscos. São Paulo, 2011.

COX, A. T.; SWAIL, V. R. A global wave hindcast over the period 1958–1997: Validation and climate assessment. **J. Geophys.** v. 106, p. 2313–2329. 2001.

CUNHA, I. A. Gestão ambiental e competitividade dos portos: negociando uma agenda. Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Bauru, SP. 2006.

DEGOLA, T. S. **IMPACTOS E VARIABILIDADE DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL SOBRE O BRASIL NO CLIMA PRESENTE E EM CENÁRIOS FUTUROS**. [s.l.: s.n.].

DRAGAGEM. [s.d.]. Disponível em: <https://www.portodesantos.com.br/informacoes-operacionais/dragagem/>. Acesso em: 04 jan. 2022.

EMPRAPA. **Emprapa Territorial**. Porto de São Francisco do Sul. Disponível em: https://www.embrapa.br/macrologistica/exportacao/porto_sao-francisco-do-sul. Acesso em: 05 abr. 2021.

ESPO (EUROPEAN SEA PORTS ORGANIZATION). Green guide: towards excellence in port environmental management and sustainability. Brussel, Belgium: ESPO, 2012. 38p. Disponível em: https://www.espo.be/media/espopublications/espo_green%20guide_october%202012_final.pdf. Acesso em: dez. 2021

FLEGG, Esmé Frances. **UK ports, extreme events and climate change: Legislative and adaptive perspectives**. 2018. 347 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculty Of Engineering And The Environment, Civil, Maritime And Environmental Engineering And Science, University Of Southampton, Southampton, 2018.

GORDON, H. B. et al. **The CSIRO Mk3.5 Climate Model** CAWCR Technical Report. [s.l.: s.n.].

HANSON, S.; NICHOLLS, R. Extreme Flood Events and Port Cities through the Twenty-First Century: Implications of Climate Change and Other Drivers. **Maritime Transport and the Climate Change Challenge**, p. 243-265. 2012.

HALLEGATTE, S. et al. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 6, n. 33, 2009.

HALLEGATTE, S. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. **Climatic Change**, [s.l.], v. 104, p. 113-137, 07 dez. 2010.

HERRMANN et al. Frequência de desastres naturais no estado de Santa Catarina no período de 1980 a 2007. **XII Encuentro de Geógrafos de América Latina**, 2009.

HONGYU, et al. 2016. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS: RESUMO TEÓRICO, APLICAÇÃO E INTERPRETAÇÃO. 5.

International Maritime Organization (IMO). **International Shipping and World Trade Facts**. 2008. [s.l.].

JEFFREY et. al. **Australia's CMIP5 submission using the CSIRO-Mk3.6 model**. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, v. 63, n. 1, 2013.

JI, T.; LI, G.; LIU, R. Historical Reconstruction of Storm Surge Activity in the

Southeastern Coastal Area of China for the Past 60 Years. **Earth and Space Science**, v. 7, n. 8, 2020.

LIMA et. al. Análise da configuração atmosférica associada a eventos extremos de chuva no litoral do Estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. **III Simpósio Internacional de Climatologia**, 2009.

LIMA, V. F. A. Portos marítimos e os desafios para a sustentabilidade costeira. Gestão Ambiental e sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas: conceitos e práticas. **Instituto Virtual para o Desenvolvimento Sustentável: INVIDES.org**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 198-229, 2020.

MACHADO, A. A. Estudo dos padrões atmosféricos sinópticos geradores de eventos extremos de altura de onda, intensidade de vento, marés meteorológicas e erosão na costa do Rio Grande do Sul. 2014. 100 f. Tese (Doutorado) - Curso de Oceanografia Física, Química e Geológica, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2014.

MAZZER, A. M.; GONÇALVES, M. L. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS DA BAÍA DA BABITONGA, SANTA CATARINA, BRASIL: CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012.

MESSNER S. Climate change and sea level rise impacts at ports and a consistent methodology to evaluate vulnerability and risk. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**. v. 169, p. 141-153. 2013.

MCEVOY, D.; MULLET, J. **Enhancing the Resilience of Seaports to a Changing Climate: Research Synthesis and Implications for Policy and Practice** National Climate Change Adaptation Research Facility (NCCARF), 2013.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Informing Decisions in a Changing Climate**. Washigton, DC: The National Academies Press, 2009.

NEVES, M. F. B. Agenda ambiental do porto de Santos: desafios e oportunidades na governança internacional das mudanças climáticas. 2015. 184 f. Tese (doutorado) - Universidade Católica de Santos, 2015.

NURSEY-BRAY, Melissa. Vulnerabilities and adaptation of ports to climate change. **Journal Of Environmental Planning And Management**. [S.L.], p. 1021-1045. 20 nov. 2012.

NEBOT, N.; Challenges for the future of ports. What can be learnt from the Spanish Mediterranean ports? **Ocean Costal Management**, v. 137, p. 165-174. Mar 2017.

OECD. Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates. **Environment**, v. 1, n. 1, 2007.

OLIVEIRA, R. A. **Contribuições para elaboração de um plano municipal de adaptação dos efeitos das mudanças climáticas - São Francisco do Sul - SC**. 2020. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação Stricto

Sensu em Clima e Ambiente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

PEARSON, Karl, 1901. **On lines and planes of closest fit to systems of points in space**, *Philosophical Magazine*, Series 6, vol. 2, no. 11, pp. 559-572.

PEREZ, J.; et al. **Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region**. *Climate Dynamics*, v. 43, n. 9–10, p. 2663–2680, 2014.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. **Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean***Progress in Oceanography*, 1991.

PIELKE, R. A. Future economic damage from tropical cyclones: Sensitivities to societal and climate changes. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 365, n. 1860, 2007.

PLANAVE S.A. (Brasil). **PDZ - PORTO ORGANIZADO DE SÃO FRANCISCO DO SUL**. Rio de Janeiro, 2019. 216 p. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pdz30-pdf>. Acesso em: 06 fev. 2022.

PIOTROWICZ, K.; CIARANEK, D. A selection of weather type classification systems and examples of their application. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, n. 1–2, 2020.

PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL. **Características Físicas: saiba mais sobre o complexo portuário de são francisco do sul**. Disponível em: <https://portosaofrancisco.com.br/caracteristicas/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

POSSAMAI, T. et al. Geologia Costeira da Ilha de São Francisco do Sul, Santa Catarina. **Revista de Geografia**, v. 8, n. 2, 2010.

PROJETO Orla. [s.a]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/informma/item/941-projeto-orla.html>. Acesso em: 07 fev. 2022.

REBOITA, M. S. et al. The south atlantic subtropical anticyclone: Present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, 2019.

RUEDA, A. et al. A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns. **Ocean Modelling**, v. 104, 2016.

SANTOS, Catarina Frazão. **Combater as alterações climáticas através do planeamento do oceano?** 2022. Disponível em: https://visao.sapo.pt/visao_verde/alteracoes-climaticas/2022-01-19-combater-as-alteracoes-climaticas-atraves-do-planeamento-do-oceano/. Acesso em: 07 fev. 2022.

SCHETTINI, C. A.; CARVALHO, J. L. CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO CUBATÃO, JOINVILLE. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 3, n. 1, 2010.

SILVA, P. G. da; BORATO, L.; FETTER FILHO, A. F. H.; MENDEZ, F. J.; KLEIN, A. H. F. **An atmospheric predictor to characterize average and extreme**

atmospheric induced water level in shallow continental shelves: the example of the southern brazilian coast. Em construção. Não publicado.

SILVEIRA, W. N. **Análise histórica de inundação no município de Joinville - SC, com enfoque na bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Norte.** 2008. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SMITH, R. W. **The Good, the Bad, and the Robust: Climate Change Adaptation Choices for the Port of Rotterdam, Port of San Diego, and Naval Base Kitsap – Bremerton.** 2015. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Urban Design And Planning, Universidade de Washington, Washington, 2015.

STERN, N. STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary. **October**, v. 30, n. 3, 2006.

TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. MARÉS ASTRONÔMICAS NA BAÍA DA BABITONGA, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 3, n. 1, 2010.

THAO, N. D.; TAKAGI, H.; ESTEBAN, M. **Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam.** Tokyo: Elsevier, 2014. 393 p.

UN (UNITED NATIONS). The Ocean Conference. Fact Sheet: People and Oceans. New York: United Nations, 59. Junho, 2017. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf> Acesso em: 03 jan. 2022

WANG, X L.; SWAIL, V. R. Dynamical versus statistical downscaling methods for ocean wave heights. **International Journal Of Climatology**. [S.L.], p. 317-332. jan. 2009.

WANG, X L.; SWAIL, V. R. North Atlantic wave height trends as reconstructed from the 20th century reanalysis. **Climate Dynamics**, [s.l.], v. 26, p. 109-126, 09 nov. 2006.