

INFRAESTRUTURAS PORTUÁRIAS SOB AMEAÇA

Adaptação à elevação do nível do mar e resiliência climática

*PORT INFRASTRUCTURES UNDER THREAT
Adaptation to Sea Level Rise and Climate Resilience*

**Rafael Ferraz dos Santos¹,
Victor Hugo Souza de Abreu² e Andréa Souza Santos³**

Resumo

A elevação do nível do mar, impulsionada pela crise climática, ameaça infraestruturas portuárias essenciais ao transporte marítimo global, responsável por 80% do frete. A intensificação de eventos climáticos extremos pode gerar danos irreversíveis, e o *Intergovernmental Panel on Climate Change* estima que as adaptações custem até quatro milhões de euros por metro de elevação do mar. Este estudo, baseado em análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura, investiga o impacto da elevação do nível do mar nas infraestruturas portuárias globais, avaliando medidas de adaptação. Os resultados mostram que soluções como a construção de diques, elevação de plataformas, reforço das fundações e uso de tecnologias de monitoramento podem reduzir significativamente os custos de adaptação. Essas medidas ajudam a mitigar riscos operacionais, garantindo maior segurança, sustentabilidade e eficiência no transporte marítimo, além de aumentar a resiliência das infraestruturas portuárias frente aos impactos da elevação do nível do mar.

Palavras-chave: elevação do nível do mar, infraestruturas portuárias, adaptação, mudança do clima, Resiliência Climática, revisão bibliográfica, análise de risco climático.

Abstract

Rising sea levels, driven by the climate crisis, threaten port infrastructures crucial to global maritime transport, which accounts for 80% of freight. The intensification of extreme weather events may cause irreversible damage, and the Intergovernmental Panel on Climate Change estimates that adaptations could cost up to four million euros per meter of sea level rise. This study, based on bibliometric analysis and systematic literature review, investigates the impact of rising sea levels on global port infrastructures, evaluating adaptation measures. The results show that solutions such as constructing dikes, elevating platforms, reinforcing foundations, and using monitoring technologies can significantly reduce adaptation costs. These measures help mitigate operational risks, ensuring greater safety, sustainability, and efficiency in maritime transport, while also increasing the resilience of port infrastructures against the impacts of rising sea levels.

Keywords: sea level rise, port infrastructures, adaptation, climate change, climate resilience, bibliographic review, climate risk assessment.

¹ Mestrando em Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ) e Engenheiro de Produção (Universo/2014).

² Doutor em Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ/2023), Mestre em Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ/2018) e Engenheiro Civil da Escola Politécnica (POLI/UFRJ/2016).

³ Doutora em Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ/2014), Mestre em Desenvolvimento Sustentável (UnB/2018) e Bióloga (UCSAL/2001).

Introdução

A elevação do nível do mar e as marés de tempestade podem causar alagamentos temporários e permanentes, com impactos já observáveis. Em virtude de sua localização, os portos marítimos estão particularmente vulneráveis a esses fenômenos (Christodoulou *et al.*, 2019). Projeções indicam que 64% de todos os portos marítimos poderão ser inundados, considerando os níveis médios globais previstos (IPCC, 2012) e os efeitos combinados das marés, ondas locais e tempestades.

Embora haja um esforço global para se preparar para essa nova realidade, as infraestruturas atualmente protegidas ainda são poucas e, em termos percentuais, insuficientes para garantir o comércio mundial de maneira satisfatória, evitando problemas que podem ser catastróficos, como a escassez de alimentos e outros itens essenciais (Santos; Ribeiro; De Abreu, 2020; De Abreu; Turini; Santos, 2021; Santos *et al.*, 2021; De Assis *et al.*, 2022). Exemplos de portos bem protegidos incluem o Porto de Rotterdam, que possui algumas das barreiras contra tempestades mais avançadas do mundo, incluindo duas das maiores globalmente. A barreira contra inundações de Londres também está entre as maiores e mais eficazes. No entanto, mesmo nesses casos, será provavelmente necessário aprimorar as defesas existentes para responder ao aumento projetado do nível do mar (Christodoulou *et al.*, 2019).

Dadas as eficiências inerentes ao transporte marítimo e sua menor pegada de carbono em comparação com outros modos de transporte, além dos aumentos previstos nos volumes de frete global, é provável que as demandas sobre os portos cresçam substancialmente nas próximas décadas (Dos Santos; Lopes, 2023). Para manterem-se eficientes e resilientes, essas estruturas devem antecipar os impactos da mudança do clima e adotar medidas proativas para lidar com a elevação do nível do mar, o aumento das inundações e a maior frequência de eventos extremos. Tanto organizações nacionais quanto internacionais têm identificado os impactos climáticos na infraestrutura marítima como uma área de grande preocupação que, até o momento, tem recebido atenção insuficiente (Becker *et al.*, 2012).

De acordo com o Relatório de Avaliação (*Sixth Assessment Report - AR6*, em inglês) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), é provável que a elevação média do nível do mar aumente entre 0,40 e 0,69 metros durante o século XXI, caso o aquecimento ao final do século alcance 2° C, e entre 0,58 e 0,91 metros com um aquecimento de 4° C (Fox-Kemper *et al.*, 2021). O painel também observa que processos físicos profundamente incertos, como a instabilidade das falésias de gelo marinho, poderiam levar a um aumento global substancialmente maior do nível do mar, potencialmente alcançando 2,0 metros até 2100 em cenários de emissões muito altas.

A vida útil projetada para a infraestrutura portuária varia de 30 a 50 anos, mas, frequentemente, estruturas como estradas, pontes, cais e pátios ferroviários perdem por períodos significativamente mais longos. Dessa forma, grande parte da infraestrutura construída atualmente ainda estará em uso à medida que as condições climáticas se alterarem ao longo do século. Entretanto, como esses projetos competem por recursos com outras necessidades empresariais e comunitárias, as implicações de longo prazo das escolhas tendem a receber menos atenção do que as prioridades imediatas (Becker *et al.*, 2012; Dos Santos; De Abreu; Santos, 2024).

Esse cenário se agrava pelo fato de que os ciclos de planejamento de capital nos portos têm uma duração média de 5 a 10 anos, criando um descompasso entre o planejamento e a vida útil da infraestrutura. Tal descompasso pode ser a raiz de diversas dificuldades organizacionais e estruturais na abordagem dessa questão complexa. Esse fato é suficiente para estimular discussões nas comunidades acadêmicas, de

políticas públicas e entre profissionais sobre a adaptação à mudança do clima, visando a formulação de políticas globais que prescrevam horizontes de planejamento mais longos do que os atualmente praticados (Becker *et al.*, 2012).

O presente artigo tem como objetivo geral analisar a vulnerabilidade dos portos marítimos diante da mudança do clima, com ênfase na necessidade de adaptação à elevação do nível do mar, reconhecida como uma das ameaças mais significativas. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidas as seguintes etapas específicas: (1) avaliar as projeções de elevação do nível do mar e suas implicações para os portos marítimos; (2) identificar e analisar casos de portos que já implementaram medidas eficazes de proteção; (3) investigar os desafios e lacunas existentes no planejamento e na durabilidade das infraestruturas portuárias; e (4) propor ideias de políticas públicas e estratégias de adaptação a longo prazo, que possam ser adotadas por organizações nacionais e internacionais. Ademais, foi realizada uma análise bibliométrica para mapear o estado da arte e consolidar um repositório preliminar de estudos relacionados.

Metodologia

A metodologia adotada neste estudo adota uma revisão sistemática da literatura associada a uma análise bibliométrica (baseados nas metodologias de De Abreu; Santos; Monteiro, 2021; De Abreu *et al.*, 2023), visando mapear os principais estudos sobre os impactos da mudança do clima na infraestrutura e nas operações portuárias. Complementarmente, foi realizada uma revisão bibliográfica adicional, com base nas conexões estabelecidas a partir da leitura dos artigos selecionados. Essa abordagem permite a sistematização do conhecimento existente, reduzindo vieses e incertezas, e contribuindo para a consolidação de uma base teórica robusta e consistente.

A revisão bibliográfica adicional foi conduzida para aprofundar e expandir a compreensão do tema, possibilitando a identificação de estudos complementares que não foram inicialmente recuperados pela estratégia de busca sistemática. Esse procedimento foi essencial para capturar abordagens interdisciplinares, integrar diferentes perspectivas metodológicas e incorporar contribuições relevantes que emergiram a partir das conexões temáticas identificadas nos artigos analisados. Dessa forma, a pesquisa garante um levantamento abrangente e crítico do estado da arte sobre os impactos da mudança do clima na infraestrutura portuária e as estratégias de adaptação disponíveis.

Os termos de busca, os critérios de inclusão e qualificação, assim como os procedimentos para recuperação e extração de informações na base de dados, foram rigorosamente definidos para garantir alinhamento com os objetivos da pesquisa, conforme apresentado na Tabela 1.

Aspecto	Descrição
Temas de Busca	<i>TS=((port OR ports OR harbor OR harbors OR harbour OR harbours OR seaport OR seaports) AND ("sea level rise"; OR &"rising sea levels"; OR "sea-level rise") AND (adaptation OR adaptive OR adapt)</i>
Base de Dados	<i>Web of Science</i>
Critérios de Inclusão	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Estudos publicados em periódicos indexados e conferências de relevância internacional. <input type="checkbox"/> Trabalhos que abordem explicitamente os impactos da elevação do nível do mar na infraestrutura portuária e estratégias de adaptação. <input type="checkbox"/> Artigos que apresentem metodologias claras e replicáveis. <input type="checkbox"/> Estudos que contenham evidências empíricas ou modelagens aplicáveis. <input type="checkbox"/> Pesquisas que analisem projeções climáticas, modelagens hidrodinâmicas e impactos socioeconômicos no setor portuário.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Critérios de Qualificação	
	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Clareza na formulação da questão de pesquisa e coerência metodológica. <input type="checkbox"/> Uso de dados robustos e fontes confiáveis para fundamentação teórica e empírica. <input type="checkbox"/> Discussões bem estruturadas sobre medidas de mitigação e resiliência portuária. <input type="checkbox"/> Aplicabilidade dos resultados para o desenvolvimento de políticas e estratégias de adaptação. <input type="checkbox"/> Relevância e atualidade do estudo dentro do contexto da mudança clima e seus impactos no setor portuário.

A seleção terminológica fundamentou-se na relevância e na capacidade dos termos de gerar resultados coerentes com os objetivos da pesquisa. A escolha do inglês como idioma predominante justifica-se pela ampla disseminação de publicações científicas em periódicos de alto impacto e pela prática usual de disponibilizar resumos em inglês, mesmo em estudos publicados em outros idiomas, o que potencializa a abrangência e o acesso global à informação.

A consulta à base de dados *Web of Science* resultou em 168 referências, das quais 162 foram consideradas pertinentes ao escopo da pesquisa e incluídas na análise. Seis referências foram excluídas por não apresentarem relação direta com a adaptação de portos à elevação do nível do mar, conforme apresentado na Tabela 2.

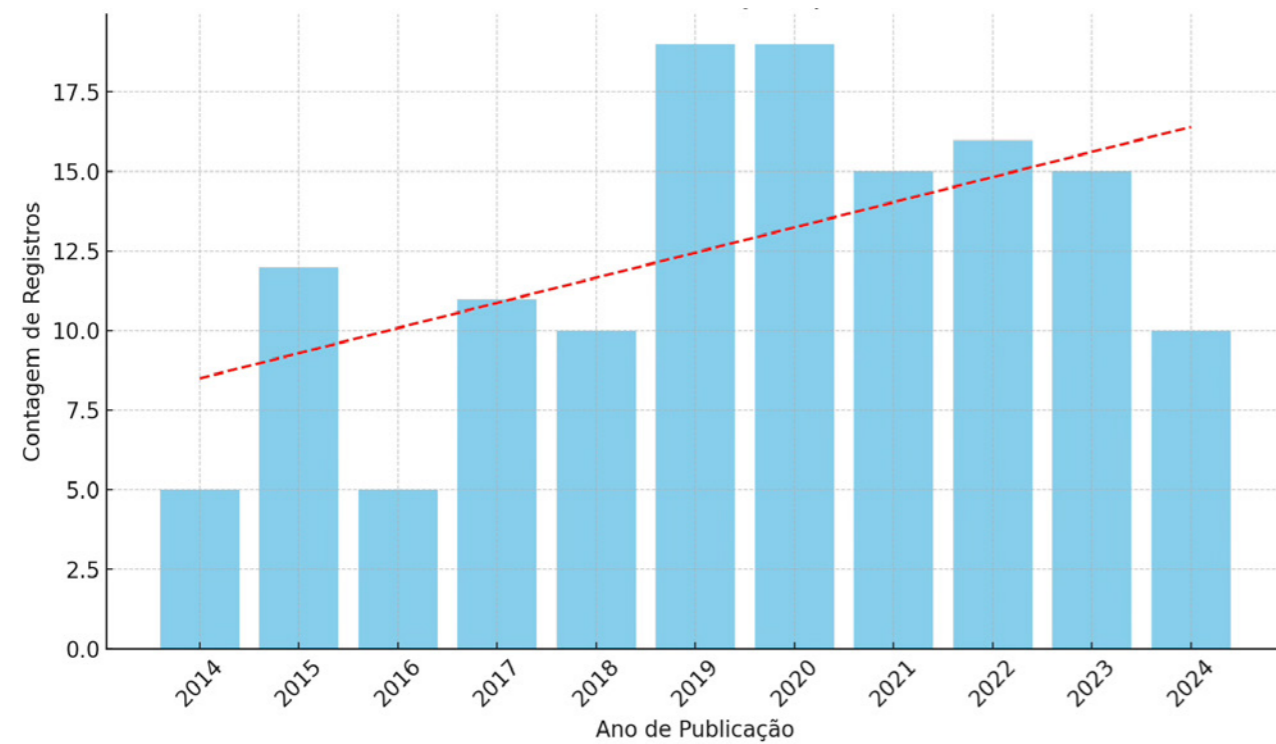
Estudo	Razão da Exclusão
<i>Forcing Adaptation through the Rivers and Harbors Act</i>	Aborda adaptações legislativas sem referência direta a portos ou à elevação do nível do mar
<i>Floating Architecture in the Landscape: Climate Change Adaptation Ideas, Opportunities and Challenges</i>	Discute adaptação climática no contexto de arquitetura flutuante, sem foco em infraestruturas portuárias
<i>Using Public Participation Geographic Information Systems (PPGIS) to Identify Valued Landscapes Vulnerable to Sea Level Rise</i>	Trata da identificação de paisagens vulneráveis à elevação do nível do mar, sem abordar portos.
<i>Informatics and Computational Method for Inundation and Land Use Study in Arctic Sea Eastern Siberia, Russia</i>	Foca em métodos computacionais para estudo de inundação e uso do solo na Sibéria Oriental, sem relação com portos.
<i>On the Drivers, Forecasts, and Uncertainties of Relative Sea Level Rise in The Eastern Arabian Peninsula: A Review</i>	Trata-se de uma revisão sobre previsões de elevação do nível do mar na Península Arábica, sem foco na infraestrutura portuária.
<i>Using Boundary Objects to Stimulate Transformational Thinking: Storm Resilience for the Port of Providence, Rhode Island (USA)</i>	Menciona resiliência a tempestades em um porto específico, mas seu foco é mais amplo do que a elevação do nível do mar propriamente dita.

Tabela 2 - Relação de estudos excluído da Base de Dados. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A metodologia empregada permitiu a identificação e sistematização das principais evidências sobre os impactos da elevação do nível do mar nas infraestruturas portuárias e das estratégias de adaptação empregadas globalmente, contribuindo para o avanço do conhecimento científico na área.

Resultados bibliométricos

Os resultados bibliométricos desta pesquisa oferecem uma visão abrangente das tendências e padrões emergentes na literatura científica sobre a adaptação dos portos marítimos à mudança do clima e à elevação do nível do mar. O banco de dados compilado é composto por uma coleção diversificada de artigos científicos, relatórios técnicos e estudos de caso, refletindo a amplitude e a profundidade da pesquisa contemporânea nesta área.

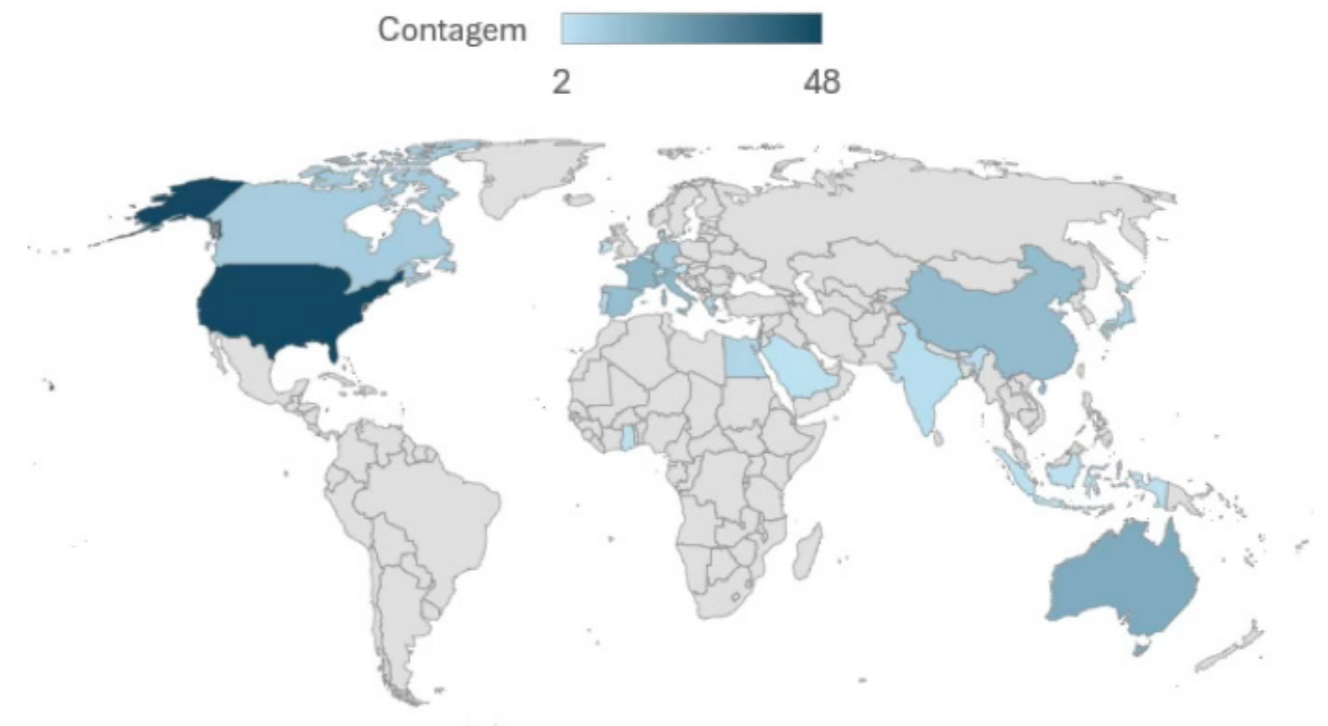


A Figura 1 ilustra a evolução temporal das publicações científicas relacionadas ao tema nos últimos dez anos. Nota-se uma tendência ascendente na produção acadêmica, conforme evidenciado pela linha em vermelho, indicando um aumento na atenção dada a este tema. Os anos de 2019 e 2020 destacam-se com um pico de publicações, representando cada um 11,3%, sugerindo um período de intensa atividade de pesquisa e possivelmente refletindo um reconhecimento crescente da urgência em abordar os desafios impostos pela elevação do nível do mar aos portos.

A redução observada em 2024, com 6,0% do total de publicações até o momento, pode ser atribuída a variações anuais na produção de pesquisas ou a uma possível demora na indexação de novos trabalhos. De maneira geral, o aumento na quantidade de publicações ao longo da última década, refletido em percentuais crescentes de anos como 2022 (9,5%) e 2023 (8,9%), reflete a ampliação do interesse acadêmico e a urgência em desenvolver estratégias de adaptação para mitigar os impactos da elevação do nível do mar sobre a infraestrutura portuária.

A Figura 2 ilustra a distribuição das publicações científicas sobre o tema “portos e elevação do nível do mar” por países e regiões, evidenciando uma concentração notável de pesquisas em determinadas nações. Os Estados Unidos lideram as publicações, com 48 estudos (28,6%), refletindo não apenas a ampla rede portuária do país, mas também o investimento substancial em pesquisas voltadas à adaptação das infraestruturas costeiras. A Inglaterra segue com 21 publicações (12,5%), destacando-se pela presença de instituições acadêmicas e centros de pesquisa voltados para estudos climáticos e de infraestrutura marítima.

A Austrália (19; 11,3%) também se sobressai, possivelmente devido à sua exposição a eventos climáticos extremos e às iniciativas de pesquisa financiadas pelo governo. A França (16; 9,5%) e a Itália (15; 8,9%) apresentam contribuições relevantes, refletindo a preocupação com a preservação de seus portos históricos e a necessidade de adaptação das infraestruturas existentes ao aumento do nível do mar.



Outros países europeus, como Alemanha (6,5%), Países Baixos (6,0%) e Espanha (7,7%), também se destacam, especialmente pelo papel crítico que desempenham na movimentação de cargas e passageiros. Os Países Baixos, em particular, possuem uma histórica liderança na engenharia costeira e gestão de águas, o que justifica o interesse na pesquisa sobre adaptação portuária.

O Canadá (5,4%) contribui de forma expressiva, especialmente em estudos voltados para os impactos do derretimento das geleiras no ártico e sua influência nas rotas marítimas. A China (8,3%) e o Japão (4,8%) também possuem participação significativa, reflexo da importância dos portos em suas economias e de sua vulnerabilidade à mudança do clima. Ambos os países investem ativamente em soluções de engenharia para mitigar os impactos do aumento do nível do mar em suas infraestruturas costeiras. Países como Áustria, Bélgica, Gana, Indonésia, Irlanda, Israel, Arábia Saudita, Escócia e Suíça registram apenas 1,8% cada, indicando uma menor expressão na literatura acadêmica sobre o tema. Isso pode estar relacionado à menor vulnerabilidade direta desses países ou à menor disponibilidade de financiamento para pesquisas específicas sobre adaptação portuária.

A concentração das publicações em determinados países reflete tanto a relevância econômica e estratégica de seus portos quanto o grau de preocupação e investimento em pesquisas sobre mudança do clima e infraestrutura costeira. No entanto, a distribuição desigual das pesquisas também evidencia a necessidade de ampliar os estudos em regiões sub-representadas, onde os impactos do aumento do nível do mar podem ser igualmente críticos, mas ainda pouco documentados.

A Figura 3 apresenta o mapa de rede de co-ocorrência de palavras-chave, desenvolvido por meio do *software VosViewer*, gerado a partir de dados da *Web of Science*, evidenciando as interconexões entre os principais conceitos na pesquisa sobre mudança climática e elevação do nível do mar. O termo “*climate change*” se destaca como um eixo central da rede, refletindo sua relevância como tema transversal que permeia diferentes dimensões do conhecimento científico. Ele aparece fortemente associado a “*vulnerability*” e “*resilience*”, indicando a preocupação acadêmica com os

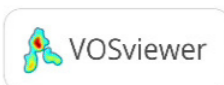
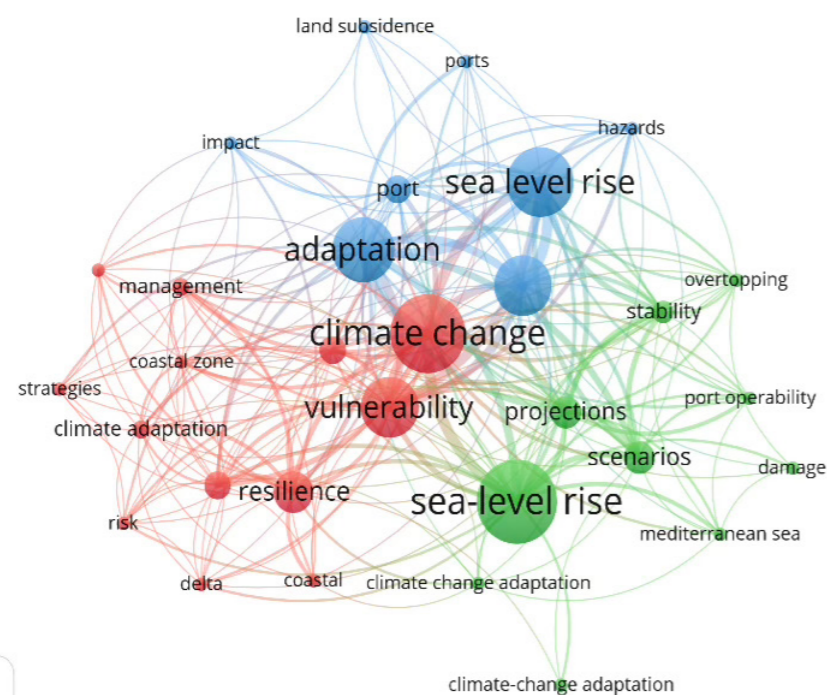


Figura 3 - Mapa de interconexão de palavras-chave dos estudos incluídos na base de dados. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

impactos da elevação do nível do mar sobre ecossistemas costeiros, infraestruturas urbanas e populações vulneráveis.

Além disso, termos como “*sea level rise*” e “*adaptation*” apresentam uma interligação estratégica, evidenciando a necessidade de medidas eficazes para mitigar os efeitos da elevação dos oceanos. A presença de palavras-chave relacionadas à modelagem climática, como “*projection*” e “*scenario analysis*”, ressalta a importância da previsão de tendências futuras, enquanto conceitos como “*coastal management*”, “*policy*” e “*sustainability*” indicam um enfoque crescente nas estratégias de adaptação e planejamento de longo prazo.

O mapeamento das interconexões entre diferentes frentes de pesquisa evidencia a complexidade das ameaças às infraestruturas portuárias diante da elevação do nível do mar. Aspectos físicos e geodinâmicos, como a fusão acelerada das geleiras (“*ice melt*”), a subsidência costeira e a intensificação de eventos climáticos extremos, estão intrinsecamente ligadas a desafios sociais, econômicos e políticos. Além dos impactos diretos sobre a operação portuária, esses fenômenos afetam cadeias logísticas, populações costeiras e ecossistemas, tornando a adaptação uma questão multidimensional.

A inclusão crescente de conceitos como justiça climática (“*climate justice*”) e governança ambiental ressalta a necessidade de estratégias de adaptação que levem em consideração a equidade social. Infraestruturas portuárias não operam de maneira isolada, mas estão inseridas em territórios que abrigam comunidades vulneráveis, muitas vezes expostas a riscos ambientais e socioeconômicos. A elevação do nível do mar pode intensificar desigualdades preexistentes, deslocando populações de baixa renda, restringindo o acesso a recursos costeiros e afetando atividades econômicas tradicionais, como a pesca artesanal. Dessa forma, a adaptação portuária deve ser acompanhada por políticas públicas que garantam participação social, distribuição justa de custos e benefícios e mitigação dos impactos sobre populações vulneráveis.

A governança ambiental emerge como um componente fundamental para garantir que as respostas aos desafios climáticos sejam eficazes, integradas e socialmente justas. Modelos de governança que envolvem múltiplos atores – incluindo governos, empresas,

comunidades locais, organizações não governamentais e instituições científicas – são essenciais para viabilizar soluções colaborativas e sustentáveis. A formulação e implementação de políticas devem considerar não apenas a infraestrutura portuária em si, mas também sua interação com o entorno, garantindo que medidas de adaptação contribuam para a resiliência do território como um todo.

Nesse sentido, estratégias baseadas na natureza, como a adaptação ecossistêmica (“*ecosystem-based adaptation*”) e as soluções baseadas na natureza (“*nature-based solutions*”), desempenham um papel crucial na mitigação dos impactos climáticos sobre infraestruturas portuárias. A restauração e conservação de ecossistemas costeiros – incluindo manguezais, recifes de coral e pântanos salinos – podem reduzir a erosão, minimizar a intrusão salina e atuar como barreiras naturais contra inundações, promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos de longo prazo.

Além disso, a adaptação eficaz das infraestruturas portuárias depende de fatores como inovação tecnológica, planejamento estratégico e mecanismos de financiamento sustentável. Investimentos em elevação de cais, barreiras contra inundações e sistemas de drenagem avançados devem ser acompanhados por iniciativas que promovam a transição para operações portuárias de baixo carbono, reduzindo sua pegada ambiental e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

A sinergia entre ciência, engenharia e políticas públicas torna-se, portanto, um fator crítico para a resiliência climática das infraestruturas portuárias. A adaptação ao aumento do nível do mar deve ir além de soluções estruturais, incorporando abordagens inclusivas e participativas que garantam que os benefícios sejam compartilhados de maneira equitativa e que as populações mais vulneráveis não sejam marginalizadas no processo de transformação do ambiente costeiro.

Outro ponto relevante é a conexão com estudos sobre eventos extremos, evidenciada pela associação com termos como “*flooding*” e “*storm surge*”, que reforçam a necessidade de infraestrutura resiliente e mecanismos de resposta rápida. A interação entre pesquisa científica e formulação de políticas também se manifesta na proximidade entre palavras como “*decision-making*”, “*risk assessment*” e “*policy frameworks*”, indicando a crescente incorporação de dados científicos na definição de estratégias governamentais.

Dessa forma, a análise do mapa de co-ocorrência permite visualizar um panorama abrangente das preocupações acadêmicas e suas inter-relações, destacando a complexidade dos desafios impostos pela elevação do nível do mar e a urgência de soluções integradas. A estruturação da rede evidencia a necessidade de abordagens multidisciplinares e intersetoriais, que combinem inovação científica, governança eficaz e participação social para enfrentar os impactos da mudança do clima de maneira sustentável e equitativa.

Resultados Sistemáticos

A elevação do nível do mar é considerada uma das mais evidentes e potencialmente destrutivas consequências da mudança do clima, impactando significativamente as infraestruturas costeiras em nível global. Os portos, que atuam como nós críticos nas cadeias globais de suprimentos e centros de atividade econômica, são particularmente vulneráveis a esses impactos. Esta seção aborda as projeções atualizadas sobre a elevação do nível do mar e seus efeitos, conforme apresentados nos relatórios mais recentes do IPCC, além de discutir as estratégias de adaptação que estão sendo implementadas para mitigar esses riscos. A análise concentra-se na transição

das abordagens tradicionais de gestão portuária para estratégias mais dinâmicas e flexíveis, que abrangem desde infraestruturas híbridas até políticas públicas. Dessa forma, busca-se oferecer uma visão ampla dos desafios enfrentados pelos portos no contexto da mudança do clima, bem como das oportunidades de adaptação que emergem nesse cenário em transformação.

Projeções atualizadas do nível do mar e seus efeitos: insights dos relatórios AR5 e AR6

Tradicionalmente, as pesquisas sobre o nível do mar se concentravam nas variações médias globais, tanto em termos de reconstrução histórica (Church; White, 2006) quanto de projeções futuras, utilizando modelos que consideram processos físicos (Meehl *et al.*, 2007) ou abordagens semi-empíricas (Rahmstorf, 2007). A estimativa da futura elevação do nível do mar é uma questão urgente na pesquisa climática, devido aos impactos socioeconômicos diretos e indiretos (Nicholls; Cazenave, 2010). Contudo, nesse contexto cabem algumas considerações a atualizações pertinentes.

Os relatórios de avaliação do IPCC são fundamentais para a compreensão da mudança do clima global e suas implicações. Os dois relatórios mais recentes, AR5 (Quinto Relatório de Avaliação, 2013-2014) e o AR6 (Sexto Relatório de Avaliação, 2021-2022), oferecem análises detalhadas sobre a elevação do nível do mar. Entre os dois relatórios, há diferenças importantes que refletem avanços na ciência climática e uma compreensão mais profunda dos processos envolvidos.

No AR5, as projeções para a elevação do nível do mar até 2100, sob o cenário de altas emissões (RCP8.5), variaram de 0,52 a 0,98 metros. Essas projeções foram baseadas em modelos climáticos disponíveis até 2007 e consideraram principalmente a expansão térmica dos oceanos, o derretimento de geleiras e a perda de massa das camadas de gelo da Antártica e da Groenlândia (Church *et al.*, 2013). No entanto, o AR5 destacou a incerteza associada às contribuições potenciais das camadas de gelo, especialmente da Antártica Ocidental, devido à compreensão limitada da dinâmica dessas camadas e seu impacto na elevação do nível do mar (IPCC, 2013).

O AR6, por sua vez, apresentou projeções atualizadas, indicando que, sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), a elevação do nível do mar até 2100 pode variar de 0,63 a 1,01 metros. Esta revisão para cima das projeções anteriores é reflexo de novos dados e modelos aprimorados que incorporam uma melhor compreensão dos processos de derretimento das camadas de gelo (Fox-Kemper *et al.*, 2021). O AR6 melhorou a compreensão das incertezas associadas às contribuições das camadas de gelo, especialmente da Antártica. O relatório inclui uma análise mais detalhada de cenários extremos de elevação do nível do mar, considerando eventos de baixa probabilidade, mas de alto impacto, como o colapso das geleiras antárticas. Isso resulta em uma faixa de projeções mais abrangente e precisa (IPCC, 2021). O AR6 também coloca maior ênfase nos impactos regionais e locais da elevação do nível do mar e nas estratégias de adaptação. Este enfoque reflete uma abordagem mais integrada para a gestão do risco climático, considerando não apenas as projeções globais, mas também as variações e vulnerabilidades específicas de diferentes regiões (IPCC, 2021).

Diante desse quadro, um estudo ilustrativo conduzido por Nicholls *et al.* (2007), analisa 136 cidades portuárias ao redor do mundo para avaliar a exposição atual e futura a eventos de inundação com probabilidade de ocorrência de 1 em 100 anos. Os resultados indicaram que muitas dessas áreas já possuem porcentagens significativas de seu PIB em regiões de alto risco, e que a mudança do clima irá aumentar consideravelmente esse risco. Projeta-se que, até 2070, o efeito combinado da mudança do clima, urbanização,

aumento populacional e subsidência do solo poderá colocar 150 milhões de pessoas e US\$ 35 trilhões (equivalente a 9% do PIB global projetado) de ativos em risco direto. Embora o estudo tenha focado nas “cidades portuárias” em vez dos próprios portos, os resultados destacam claramente a urgência da adaptação à mudança do clima para os portos, que são motores econômicos essenciais dessas regiões (Nicholls *et al.*, 2007).

Embora o estudo seja antigo, sua conclusão dialoga diretamente com o mais recente relatório do IPCC (AR6) mais recente, que destaca que a população habitante de cidades e assentamentos costeiros está significativamente exposta aos impactos causados pela elevação do nível do mar e outros efeitos climáticos. Estudos indicam que essa exposição é notável sob qualquer medida. Em 2020, cerca de 11% da população global, equivalente a 896 milhões de pessoas, residiam em áreas costeiras de baixa elevação, definidas como regiões situadas a menos de 10 metros acima do nível do mar e conectadas hidrológicamente ao oceano. Estima-se que esse número pode ultrapassar 1 bilhão de pessoas até 2050 (Oppenheimer *et al.*, 2019). Ativos de infraestrutura e econômicos, incluindo portos, avaliados entre 6.500 e 11.000 bilhões de dólares, estão expostos em áreas sujeitas a inundações que ocorrem uma vez a cada 100 anos, abrangendo cidades e assentamentos costeiros de todos os tamanhos (Muis *et al.*, 2016; Brown *et al.*, 2018; Kulp; Strauss, 2019; Kirezci *et al.*, 2020).

Abordagens híbridas de adaptação para a gestão de riscos em portos

Medidas de adaptação estruturais são amplamente utilizadas para mitigar inundações costeiras e gerenciar o excesso de água decorrente de precipitações intensas. Cidades costeiras densamente povoadas e com recursos elevados, como Nova Iorque (Jacob *et al.*, 2011), Xangai (Huang *et al.*, 2018) e Amsterdã (Van Koningsveld *et al.*, 2008), que possuem estruturas portuárias de extrema importância, têm desenvolvido diferentes estratégias desse tipo. Essas estratégias incluem a construção de infraestruturas como quebra-mares (Figura 4), muros marítimos e diques, que podem ser elevados ou complementados com grandes barreiras ou ‘super-levees’ – diques reforçados e ampliados que suportam a construção de edificações sobre eles (Esteban *et al.*, 2020b).

A Figura 4 ilustra o quebra-mar do Porto Engenheiro Zephyrino Lavenère Machado Filho, localizado em Macaé, Rio de Janeiro, Brasil, que exemplifica uma das medidas estruturais adotadas para mitigar os efeitos das inundações costeiras. O quebra-mar, ao funcionar como uma barreira física, reduz a força das ondas e protege as áreas portuárias e urbanas adjacentes, que são essenciais para a economia local e global.

As proteções estruturais são eficazes no curto e médio prazo e podem ser economicamente viáveis no século XXI, apesar do risco residual devido à possibilidade de falhas. Essas medidas geram uma dependência de longo prazo, durando décadas e atraindo novos desenvolvimentos, perpetuando o impacto e a exposição à medida que cidades e assentamentos crescem com a expectativa de proteção contínua (Gibbs, 2016; Griggs; Patsch, 2019; Siders, 2019a). No entanto, com a elevação progressiva do nível do mar, essas medidas podem se tornar inviáveis e impraticáveis (Strauss *et al.*, 2021). A combinação de medidas estruturais com soluções baseadas na natureza (ou não estruturais) pode ajudar a mitigar o risco residual (Du *et al.*, 2020; IPCC, 2021).

A integração de medidas baseadas na natureza com adaptações estruturais tem se mostrado eficaz na redução da probabilidade de falhas em diques e no prolongamento da vida útil dos projetos (Oanh *et al.*, 2020; Vuik *et al.*, 2019). Infraestruturas portuárias, em particular, podem tirar proveito dessas abordagens híbridas, mitigando a vulnerabilidade a inundações e à erosão costeira, exacerbadas pela elevação do



Figura 4 - Quebra-Mar do Porto Engenheiro Zephyrino Lavenère Machado Filho, Macaé – Rio de Janeiro. Fonte: Petrobras (2024).

nível do mar (Waryszak *et al.*, 2021). No entanto, a implementação dessas estratégias em portos localizados em solos macios ou permeáveis, ou expostos a monções intensas e grandes descargas fluviais, apresenta desafios técnicos significativos (Du *et al.*, 2020; IPCC, 2021). Portos como os de Chittagong, em Bangladesh, Mumbai, na Índia (Sharma *et al.*, 2019), Bangkok, na Tailândia, Manila, nas Filipinas (Perez *et al.*, 2011) e Jakarta, na Indonésia (Abidin *et al.*, 2011) são exemplos que ilustram essas dificuldades. Esses portos, situados em regiões tropicais e subtropicais, exigem adaptações específicas que levem em conta suas características operacionais e estruturais únicas para assegurar a eficácia das estratégias híbridas de mitigação.

A estratégia de avanço, caracterizada como uma medida adaptativa estrutural e que pode ser uma defesa eficaz contra a elevação do nível do mar, envolve a construção física e a modificação do ambiente costeiro para criar defesas contra riscos climáticos, expandindo o território em direção ao mar. Essa abordagem pode mitigar os riscos, seja por meio da recuperação de terras através de aterro – que consiste na adição de grandes quantidades de terra, areia ou rochas para elevar o nível do solo – ou polders – áreas de terra recuperadas cercadas por diques e mantidas secas por meio de sistemas de bombeamento (Sengupta *et al.*, 2018).

O avanço tem sido observado em diversos modelos, incluindo costas abertas, como Singapura, onde o Porto de Singapura exemplifica esta prática com uma longa história de recuperação de terras para expansão urbana e portuária (Chou, 2006). Esta estratégia também se aplica a cidades em estuários, como Roterdã, onde se localiza o porto mais importante da Europa, cuja extensão Maasvlakte foi criada através de aterro marítimo para aumentar a capacidade portuária (Brooks *et al.*, 2016; Molenaar, 2014). Também a exemplo em deltas, como Xangai, cujo Porto de Xangai utilizou a recuperação de terras para expansão portuária e proteção contra riscos climáticos (Ng, 2013; Sengupta *et al.*, 2020), bem como a costas montanhosas, exemplificadas por Hong Kong, onde o Porto de Hong Kong tem uma história de recuperação de terras para expansão urbana e portuária (Ng, Cook; Chui, 2015).

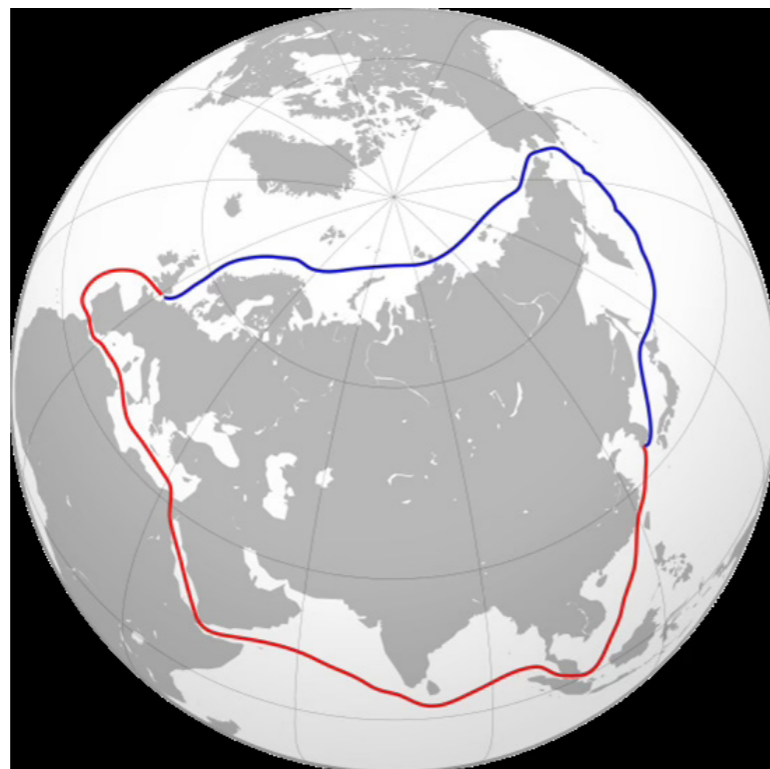


Figura 5 - Visão aérea do Maasvlakte 2. Expansão do Porto de Roterdã. Fonte: Port Economics Management (s.d.).

A Figura 5 ilustra a abordagem adotada no projeto Maasvlakte. Trata-se de uma visão aérea da construção, onde na parte inferior da imagem é possível identificar uma longa estrutura curva que se estende para dentro do mar, representando o quebra-mar principal, que protege a entrada do porto contra ondas e tempestades. Os diques, por sua vez, circundam a nova área aterrada, formando um perímetro contínuo que protege contra inundações e erosões. Na parte superior direita da imagem, as linhas longas e contínuas de terra que se estendem para o mar indicam a presença de diques adicionais. Ao longo das margens internas do porto, especialmente nas proximidades das instalações e cais, podem ser observadas linhas de rochas e estruturas reforçadas, projetadas para estabilizar e proteger as margens.

A expansão em direção ao mar por meio de grandes estruturas flutuantes pode se tornar uma alternativa viável no futuro para enfrentar os desafios impostos pela elevação do nível do mar e a escassez de espaço em áreas costeiras. Embora atualmente esse conceito esteja em estágio experimental, já foram realizadas algumas implementações iniciais em águas calmas, como parte de uma estratégia de acomodação à mudança do clima (Hjerpe, 2021). Essas estruturas flutuantes podem não apenas ajudar a proteger as infraestruturas portuárias, mas também oferecer novas possibilidades para o desenvolvimento urbano e industrial em regiões costeiras ameaçadas pelo aumento do nível do mar. Com o avanço da tecnologia e a superação de desafios técnicos, essas soluções podem se expandir para condições mais desafiadoras, proporcionando uma resposta inovadora e sustentável à crise climática. A viabilidade e eficácia dessas estruturas dependerão de estudos adicionais e testes em larga escala, considerando as complexidades ambientais e econômicas associadas.

Já o recuo, uma medida adaptativa não estrutural, visa reduzir a exposição e mitigar os riscos enfrentados por populações, bens e atividades ao mover essas entidades para fora das zonas de risco costeiro. Essa abordagem tem sido destacada por diversos estudos como uma estratégia eficaz para a adaptação à mudança do clima e a gestão de riscos costeiros (Oppenheimer *et al.*, 2019). Após o furacão Sandy em 2012, cujos principais danos ao porto de Nova York ocorreram devido à inundação que afetou severamente a continuidade das operações portuárias, mantendo-o fora de operação por uma semana após a tempestade (University Transportation Research



Center, 2013; US Department Of Transportation, 2016), a cidade implementou várias medidas de adaptação, incluindo o recuo estratégico em áreas costeiras vulneráveis. Planos como o “*Lower Manhattan Coastal Resiliency Project*” (LMCR) constituem um conjunto de iniciativas de resiliência costeira projetadas para proteger a parte sul de Manhattan contra os impactos da mudança do clima, incluindo a elevação do nível do mar e eventos de tempestades (NYCEDC, 2019).

Planejamento portuário em tempos de mudança: da rigidez à flexibilidade

O planejamento estratégico dinâmico é essencial para enfrentar as incertezas logísticas, tecnológicas e econômicas que atualmente desafiam os portos. Tradicionalmente, o planejamento portuário adotava uma abordagem estática, caracterizada por planos mestres fixos que projetavam o futuro com base em previsões presentes. No entanto, essa rigidez não acomoda adequadamente as mudanças inesperadas que ocorrem em diversas esferas, como clima, mercado, tecnologia e economia, o que pode rapidamente tornar esses planos obsoletos e inadequados para as novas realidades. Para superar essas limitações, é imperativo adotar uma abordagem adaptativa, em que os planos mestres sejam flexíveis e capazes de evoluir ao longo do tempo. Esse tipo de planejamento envolve a incorporação de feedback contínuo e a atualização constante dos planos, permitindo ajustes contínuos com base em novas informações e circunstâncias emergentes. Ademais, a utilização de análises de cenários, que consideram diversas possibilidades futuras, é fundamental para antecipar e planejar para diferentes condições que possam surgir (Taneja *et al.*, 2010).

Em 2013, ainda com a expansão de Maasvlakte 2 em andamento, o navio chinês Yong Sheng chegou ao Porto de Roterdã após cruzar o Estreito de Bering e percorrer a Rota do Mar do Norte, conforme ilustrado na Figura 6. A linha azul na figura representa a Rota do Mar do Norte, uma alternativa mais curta, com aproximadamente 6.498 km, em comparação à rota tradicional pelo Canal de Suez, indicada pela linha vermelha, que possui cerca de 22.647 km. O navio trouxe duas novas gruas para os terminais APMT em Maasvlakte 2, concluindo o trajeto duas semanas antes do que seria necessário

pela rota tradicional. Embora não tenha sido o primeiro navio a realizar esse feito, a conclusão deste trajeto, juntamente com o projeto de expansão, marca um ponto de virada na navegação global (Ravesteijn, Liu; Yan, 2015).

Essa rota vantajosa é, paradoxalmente, possibilitada pelo atual cenário de mudança do clima, criando assim uma nova rota em potencial, mas que também aumenta os desafios enfrentados pelos portos, seja do ponto de vista ambiental ou comercial. O comércio global cresce, especialmente devido ao forte desenvolvimento de novos players como China, Brasil e outras economias emergentes (Ravesteijn, Liu; Yan, 2015). Conseqüentemente, os portos precisam lidar com volumes de carga crescentes e expandir suas capacidades. Concomitantemente, os navios porta-contêineres estão se tornando cada vez maiores, exigindo agora profundidades de 20 metros, parâmetro mais comum em portos de mar aberto, que são justamente os mais vulneráveis à elevação do nível do mar.

Esses desafios devem ser enfrentados em uma situação em que as tendências do comércio global e as regulamentações ambientais são altamente incertas, enquanto as arenas de tomada de decisão e formulação de políticas envolvem cada vez mais stakeholders (Taneja, 2013). O surgimento de novas rotas marítimas devido à mudança do clima, especialmente em relação à elevação do nível do mar e ao aquecimento dos oceanos, constitui um tema em potencial para investigações acadêmicas futuras, mas já se observam impactos positivos e negativos sobre a infraestrutura portuária e a economia marítima em sua totalidade.

A flexibilidade nas infraestruturas é um aspecto essencial da abordagem adaptativa. Incorporar flexibilidade no *design* e nas operações das infraestruturas portuárias assegura que elas possam ser ajustadas conforme as necessidades mudam. Os benefícios dessa abordagem são numerosos: primeiramente, ela aumenta a resiliência do porto, permitindo que ele resista melhor a choques e estresses imprevistos, além de promover eficiência ao possibilitar ajustes contínuos que otimizam as operações e reduzem desperdícios. Finalmente, facilita a integração de práticas sustentáveis de maneira mais eficaz, adaptando-se a mudanças ambientais e regulatórias (Taneja *et al.*, 2010).

Estratégias de adaptação e políticas públicas para infraestruturas portuárias frente à elevação do nível do mar

Diante das crescentes ameaças representadas pela elevação do nível do mar, diversas nações ao redor do mundo têm implementado políticas públicas e estratégias específicas para proteger suas infraestruturas portuárias. Estas políticas são cruciais para garantir a resiliência e a continuidade das operações nos portos, que são componentes essenciais das cadeias globais de suprimentos e da economia mundial. A necessidade dessas ações é amplamente reconhecida, especialmente em áreas costeiras e sistemas de baixa altitude, onde os impactos da mudança do clima, especialmente a ameaça da elevação do nível do mar, são mais pronunciados (Nicholls *et al.*, 2007).

A Tabela 3 resume algumas das principais políticas públicas implementadas em diferentes países, acompanhado de uma breve descrição da abordagem adotada e exemplos concretos de aplicação. Cada política pública é descrita em termos de sua aplicação prática e do contexto específico em que foi implementada, fornecendo uma visão abrangente das diversas formas como diferentes regiões estão respondendo aos desafios impostos pela mudança clima, especialmente no que diz respeito à elevação do nível do mar.

Política Pública	Descrição	Exemplo de Boa Prática
Integração de Infraestruturas Híbridas	Combina estruturas naturais e artificiais, como a criação de pântanos de maré e manguezais em conjunto com barreiras físicas, para absorver o impacto das ondas e reduzir a erosão costeira.	Holanda - O Projeto Delta Works é um dos maiores sistemas de barragens, diques, eclusas e comportas móveis do mundo. Projetado para proteger as regiões costeiras, incluindo áreas portuárias como Rotterdam, contra inundações e a elevação do nível do mar (Hill, 2015).
Política de Planejamento e Gestão de Riscos Costeiros	Envolve a construção de barreiras físicas, como diques e quebra-mares, além de ações de retirada planejada de infraestruturas localizadas em áreas de alto risco devido à elevação do nível do mar.	Austrália - Nos portos de Sydney e Melbourne, foram implementadas estratégias de adaptação que incluem a elevação das estruturas portuárias, o reforço das defesas costeiras e a adoção de práticas de gestão adaptativa para mitigar os impactos da mudança do clima (Ng <i>et al.</i> , 2013).
Revisão de Códigos de Construção e Normas	Inclui a revisão de códigos de construção e normas de planejamento urbano para incorporar requisitos de elevação mínima do solo em áreas costeiras, especialmente em zonas portuárias.	Nova Zelândia - O Plano Unitário de Auckland inclui políticas de adaptação que envolvem a 'retirada planejada' de infraestruturas e residentes de áreas de risco, realocando-os para zonas mais seguras como resposta à elevação do nível do mar (Murphy, 2017).
Políticas de Retirada Planejada (<i>Managed Retreat</i>)	Refere-se à realocação gradual de infraestruturas e comunidades de áreas de alto risco para áreas mais seguras, longe da linha costeira. Esta estratégia é promovida como uma resposta de longo prazo à elevação do nível do mar e aos riscos associados.	Espanha - No Porto de Gijón, foi desenvolvida uma metodologia para avaliar e mitigar os riscos operacionais decorrentes da mudança de clima, como a elevação do nível do mar e a alteração dos padrões de tempestades, adaptando assim as infraestruturas portuárias (Campos <i>et al.</i> , 2019).
Adaptação Baseada em Ecossistemas (<i>Ecosystem-based Adaptation - EbA</i>)	A adaptação baseada em ecossistemas (EbA) envolve o uso de serviços ecossistêmicos para reduzir a vulnerabilidade de infraestruturas portuárias à elevação do nível do mar. Isso inclui a restauração de manguezais, recifes de coral e dunas de areia, que atuam como barreiras naturais contra inundações e erosão costeira. A EbA é uma abordagem sustentável que não só protege as infraestruturas, mas também conserva a biodiversidade e melhora a resiliência dos ecossistemas costeiros.	Filipinas - As Filipinas, um arquipélago extremamente vulnerável à mudança do clima, implementaram projetos de restauração de manguezais como parte de sua estratégia de adaptação costeira. Esses projetos ajudam a proteger as comunidades costeiras e infraestruturas portuárias contra a elevação do nível do mar, além de oferecer benefícios adicionais, como a conservação da biodiversidade e o suporte à pesca local (Saleemul <i>et al.</i> , 2018).
Implementação de Zonas de Planejamento Costeiro (<i>Coastal Zone Management</i>)	Estas políticas incluem a identificação de zonas de risco, onde a construção de novas infraestruturas é restringida ou proibida, e o incentivo ao uso sustentável da terra, priorizando a conservação dos ecossistemas costeiros que servem como barreiras naturais contra a erosão e inundações. Esta abordagem visa proteger tanto as infraestruturas portuárias quanto as comunidades costeiras, promovendo um desenvolvimento resiliente à mudança do clima.	Estados Unidos - A Lei de Gerenciamento da Zona Costeira (<i>Coastal Zone Management Act - CZMA</i>), inicialmente estabelecida em 1972, tem sido continuamente atualizada para abordar desafios modernos, como a elevação do nível do mar. Esta legislação, administrada pela <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (NOAA), fornece diretrizes e apoio financeiro para estados que desenvolvem planos de gestão costeira adaptados às novas realidades ambientais (NOAA, 1972).

As estratégias de adaptação e as políticas públicas implementadas ao redor do mundo demonstram a urgência e a complexidade de proteger infraestruturas portuárias frente à elevação do nível do mar (Dos Santos, De Abreu; Santos, 2024). A combinação de abordagens estruturais e não estruturais, aliada ao planejamento flexível e à integração de práticas sustentáveis, é essencial para garantir a resiliência desses pontos críticos da economia global. À medida que novas ameaças emergem, a colaboração entre governos, setor privado e sociedade civil torna-se cada vez mais crucial para o desenvolvimento de soluções eficazes e duradouras (Beck; Lam, 2019).

Cabe ainda destacar a necessidade de realização de uma robusta Análise de Risco Climático que é fundamental para aumentar a resiliência das infraestruturas portuárias diante dos impactos da mudança do clima, especialmente em relação à elevação do nível do mar. A análise de risco climático permite identificar os potenciais cenários futuros e os impactos adversos mais prováveis, permitindo que os gestores de portos adotem medidas preventivas, como reforço estrutural, adaptação das operações e implementação de tecnologias de monitoramento para minimizar os danos (De Abreu, Santos; Monteiro, 2022).

Além disso, a Análise de Risco Climático deve ser considerada parte de uma estratégia de adaptação mais ampla, incluindo o planejamento de longo prazo e a integração de práticas resilientes no design e operação dos portos (De Abreu *et al.*, 2024). Através dessa análise, é possível priorizar investimentos em infraestruturas críticas e adotar soluções como a construção de diques, quebra-mares e sistemas de drenagem aprimorados (De Abreu, Oda; Santos, 2024). Esses investimentos não só ajudam a proteger as infraestruturas contra a elevação do nível do mar, mas também contribuem para a sustentabilidade do setor portuário em um cenário de mudanças climáticas. Ao incorporar a Análise de Risco Climático em suas estratégias de gestão, os portos podem fortalecer sua capacidade de resposta a eventos climáticos extremos, garantir a continuidade das operações e minimizar os impactos econômicos e sociais decorrentes dos danos às infraestruturas.

Considerações Finais

O presente artigo foi elaborado com o propósito de oferecer uma análise abrangente das projeções de elevação do nível do mar, além de examinar as estratégias adaptativas já implementadas em diferentes contextos ao redor do mundo, com ênfase particular na infraestrutura portuária global. No entanto, o estudo também identificou lacunas substanciais nas medidas de adaptação, especialmente em regiões mais vulneráveis, destacando a necessidade urgente de maior atenção a essas áreas. Em sua maioria, essas regiões pertencem ao Sul Global, abrangendo países que têm sido historicamente sub-representados no cenário acadêmico contemporâneo.

Os resultados deste estudo indicam que abordagens híbridas de adaptação, que combinam medidas estruturais com soluções baseadas na natureza, são essenciais para fortalecer a resiliência das infraestruturas portuárias frente à mudança do clima. O estudo sublinha, ainda, a importância de um planejamento estratégico dinâmico, capaz de incorporar flexibilidade e adaptar-se a novas informações e condições emergentes, particularmente em um cenário de incertezas climáticas e tecnológicas. A contribuição deste trabalho para a literatura acadêmica é significativa, ao sintetizar as melhores práticas e estratégias adaptativas identificadas, proporcionando um panorama das soluções implementadas globalmente. No entanto, o estudo também revela uma lacuna preocupante na literatura existente: a escassez de pesquisas voltadas para o Sul Global, conforme evidenciado na análise realizada na Seção 3.

Futuras pesquisas devem concentrar-se em preencher essas lacunas, com ênfase na investigação dos impactos locais da mudança do clima em portos de pequena e média escala, os quais desempenham um papel fundamental nas economias regionais, especialmente no contexto do Sul Global. A eficácia a longo prazo das soluções baseadas na natureza, quando integradas às infraestruturas tradicionais, também demanda uma análise mais detalhada. Ademais, um tópico relevante para estudos futuros refere-se ao exame das novas rotas marítimas emergentes, resultantes da elevação do nível do mar, e suas possíveis implicações para a infraestrutura marítima global, considerando aspectos ambientais, de demanda e o contexto geopolítico.

Em suma, este estudo não apenas contribui de maneira significativa para o avanço do conhecimento sobre a adaptação das infraestruturas portuárias à mudança do clima, mas também enfatiza a necessidade urgente de uma investigação mais aprofundada no contexto do Sul Global, onde os desafios se apresentam de forma mais aguda e a literatura existente ainda é limitada.

Referências

- ABIDIN, Hasanuddin Z.; *et al.* Jakarta land subsidence and flooding: impacts and root causes. *Environmental Geology*, v. 54, n. 5, p. 1122-1131, 2011.
- BAMBER, Jonathan *et al.* Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 23, p. 11195-11200, 2019.
- BECKER, Austin. Using boundary objects to stimulate transformational thinking: storm resilience for the Port of Providence, Rhode Island (USA). *Sustainability Science*, v. 12, p. 477-501, 2017.
- BECKER, Austin; *et al.* Climate Change Impacts on International Seaports: Knowledge, Perceptions, and Planning Efforts among Port Administrators. *Climate Change*, v. 110, n. 1-2, p. 5-29, 2012.
- BROWN, Sally; *et al.* Sea-level rise impacts and responses: A global perspective. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 10, p. 776-779, 2018.
- CAMPOS, Álvaro; *et al.* Addressing Long-Term Operational Risk Management in Port Docks under Climate Change Scenarios—A Spanish Case Study. *Water*, 2019.
- CHRISTODOULOU, Aris; CHRISTIDIS, Panayotis; DEMIREL, Hande. Sea-level rise in ports: a wider focus on impacts. *Maritime Economics & Logistics*, v. 21, p. 482-496, 2019.
- CHURCH, John; *et al.* Sea level change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 1137-1216.
- CHURCH, John A.; WHITE, Neil. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 1, 2006.
- COUTINHO, Sonia Maria Viggiani; *et al.* Adaptação às mudanças climáticas no Brasil: complexidade, incertezas e estratégias existentes. *Revista ClimaCom, Coexistências e Cocriações*, v. 8, n. 20, p. 1-22, 2021.
- DE ABREU, Victor Hugo Souza; *et al.* Climate change adaptation strategies for road transportation infrastructure: A systematic review on flooding events. *Transportation Systems Technology and Integrated Management*, p. 5-30, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-1517-0_2
- DE ABREU, Victor Hugo Souza; SANTOS, Andrea Souza; MONTEIRO, Thaís Guedes Máximo. Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 8864, 2022. DOI: 10.3390/su14148864
- DE ABREU, Victor Hugo Souza; *et al.* Análise de riscos climáticos em infraestruturas de transportes: uma exploração metodológica. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 18, n. 1, p. 28-44, 2024. DOI: 10.19180/2177-4560.v18n12024p28-44
- DE ABREU, Victor Hugo Souza; ODA, Sandra; SANTOS, Andrea Souza. Explorando Metodologias de Análise de Risco Climático para a Infraestrutura de Transporte. Conferência: ENSUS 2024 - XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto. DOI: 10.29183/2596-237x.ensus2024.v12.n1.p. 527-539.
- DE ABREU, Victor Hugo Souza; TURINI, Larissa Rodrigues; SANTOS, Andrea Souza. Mapeamento De Publicações Científicas Sobre Cidades Resilientes. *PIXO-Revista de Arquitetura, Cidade e Contemporaneidade*, v. 5, n. 16, 2021.
- DE ASSIS, Tássia Faria; *et al.* Enabling the green bonds market for sustainable transport projects based on the measure/monitoring, reporting and verification method. In: *Carbon Footprints of Manufacturing and Transportation Industries*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 1-24.
- DOS SANTOS, Rafael Ferraz; DE ABREU, Victor Hugo Souza; SANTOS, Andrea Souza. Adaptação e Vulnerabilidade das Infraestruturas Portuárias Frente à Mudança do Clima: Uma Revisão Bibliográfica com Abordagem Bibliométrica. Congresso Rio de Transportes 2024At: Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DOS SANTOS, Edson Mesquita; LOPEZ, Sofia de Sá. Mudanças Climáticas E Portos: um plano de adaptação para o Porto de Santos. *Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy-International Law and Business Review*, v. 3, n. 2, p. 69-103, 2023.
- ESTEBAN, Miguel; *et al.* Adaptation to sea-level rise: Learning from present examples of planned relocation and adaptation strategies. *Ocean & Coastal Management*, v. 189, 104852, 2020b.
- FOX-KEMPER, Baylo; *et al.* Ocean, Cryosphere, and Sea Level Change. In: MASSON-DELMOTTE, V.; *et al.* (Eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- GIBBS, Mark. Why is coastal retreat so hard to implement? Understanding the political risk of coastal adaptation pathways. *Ocean & Coastal Management*, v. 130, p. 107-114, 2016.
- GRIGGS, Gary; PATSCH, Kiki. The protection/armoring of California's coast: Past, present, and future. *Journal of Coastal Research*, v. 25, n. 2, p. 242-252, 2019.
- HILL, Kristina. Coastal infrastructure: a typology for the next century of adaptation to sea-level rise. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 13, p. 468-476, 2015.

HUANG, C.; *et al.*. Flood risk assessment of coastal cities based on land use changes: A case study of Shanghai. *Sustainability*, v. 10, n. 1, 125, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JACOB, Klaus H.; GORNITZ, Vivien; ROSENZWEIG, Cynthia. Vulnerability of the New York City metropolitan area to coastal hazards, including sea-level rise: Inferences for urban coastal risk management and adaptation policies. *Environmental Hazards*, v. 6, n. 1, p. 129-153, 2011.

KAY, Robert; ALDER, Jaqueline. *Coastal Planning and Management*. 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 2017.

KIREZCI, Ebru; *et al.* Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020.

KULP, Scott A.; STRAUSS, Benjamin. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2019.

MEEHL, Meehl; *et al.* Global climate projections. In: SOLOMON, S.; *et al.* (Ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 747-845.

MUIS, Sanne; *et al.* A comparison of two global datasets of extreme sea levels and resulting flood exposure. *Frontiers in Marine Science*, v. 3, p. 52, 2016.

MURPHY, C. Natural Hazards, Sea Level Rise and the New Auckland Unitary Plan: Implications for Low Lying Coastal Communities. *Journal of Architectural Engineering Technology*, v. 6, p. 1-7, 2017.

NG, Adolf; *et al.* Climate change and the adaptation strategies of ports: The Australian experiences. *Research in Transportation Business and Management*, v. 8, p. 186-194, 2013.

NG, M.K. Planning cultures in two Chinese cities: Hong Kong and Shanghai. *Habitat International*, v. 37, p. 69-78, 2013.

NG, M.K.; COOK, A.; CHUI, E. Planning and development of Hong Kong's port and airport. *Cities*, v. 42, p. 123-134, 2015.

NICHOLLS, Robert; CAZENAVE, Anny. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, v. 328, n. 5985, p. 1517-1520, 2010.

NICHOLLS, Robert; *et al.* Coastal Systems and Low-Lying Areas. In: PARRY, M.L.; *et al.* (Eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 315-356.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Coastal Zone Management Act*. U.S. Department of Commerce, 1972.

NYCEDC. *Lower Manhattan Coastal Resiliency Project*. . Acessado em: 5 ago. 2024. Online. Disponível em: <https://www.nycedc.com/project/lower-manhattan-coastal-resiliency>

OPPENHEIMER, Micheal; *et al.* Sea-level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 321-445.

PERRETTE, Mahé; *et al.* A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties. *Earth System Dynamics*, v. 4, n. 1, p. 11-29, 2013.

PEREZ, Rosa T.; AMADORE, Leoncio A.; FEIR, Renato B. Climate change impacts and responses in the Philippines: water resources. *Climate Research*, v. 19, n. 2, p. 179-191, 2011.

PORT ECONOMICS MANAGEMENT. *Construction of Maasvlakte 2 Rotterdam*. Acessado em: 06 ago. 2024. Online. Disponível em: <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part3/port-terminal-construction/construction-maasvlakte-2-rotterdam/>.

RAHMSTORF, Stefan. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, v. 315, n. 5810, p. 368-370, 2007.

RAVESTIEN, Wim; LIU, Yi; YAN, Ping. Responsible innovation in port development: the Rotterdam Maasvlakte 2 and the Dalian Dayao Bay extension projects. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, v. 72, n. 5, p. 665-677, 2015.

SALEEMUL, H.; *et al.* Adapting to climate change: The resilience of the Philippine mangrove. *Environment, Development and Sustainability*, v. 20, p. 129-148, 2018.

SANTOS, Andrea Souza et al. An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide. *Carbon Footprint Case Studies*. 2021.

SENGUPTA, A.; CHAKRABORTY, S.; BASU, S. Assessing the sustainability of land reclamation in Shanghai. *Land Use Policy*, v. 91, p. 104369, 2020.

SENGUPTA, A.; DATTA GUPTA, S.; BASU, A. Polder management in Bangladesh: Implications for the coastal environment. *Ocean & Coastal Management*, v. 167, p. 155-167, 2018.

SHARMA, S.K.; *et al.* Enhanced structural resilience of Mumbai's coastal areas using a hybrid approach. *Marine Technology Society Journal*, v. 53, n. 2, p. 35-49, 2019.

TANEJA, Poonam; LIGTERINGEN, Han; WALKER, Warren. Flexibility in Port Planning and Design. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2010.

TANEJA, Poonam; *et al.* Implications of an uncertain future for port planning. *Maritime Policy & Management*, v. 37, n. 3, p. 221-245, 2010.

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Lessons Learned from Super Storm Sandy*. 2016. Acessado em: 5 ago. 2024. Online. Disponível em: <https://www.transportation.gov>.

University Transportation Research Center. *Lessons from Hurricane Sandy for Port Resilience*. 2013. Acessado em: 5 ago. 2024. Online. Disponível em: <https://utrc2.org>.

VAN KONINGSVELD, Mark; *et al.* Living with sea-level rise and climate change: A case study of the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, v. 24, n. 2, p. 367-379, 2008.