

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CTG  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAPHIA – DOCEAN  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAPHIA**

**BÁRBARA STRAUSS GALVÃO**

**SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA COMO ESTRATÉGIAS PARA O  
ENFRENTAMENTO DO AUMENTO DO NÍVEL DO MAR: UM ENSAIO DE  
APLICAÇÃO NO CONTEXTO COSTEIRO DE RECIFE – PE**

**RECIFE  
2025**

BÁRBARA STRAUSS GALVÃO

**SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA COMO ESTRATÉGIAS PARA O  
ENFRENTAMENTO DO AUMENTO DO NÍVEL DO MAR: UM ENSAIO DE  
APLICAÇÃO NO CONTEXTO COSTEIRO DE RECIFE – PE**

Trabalho de Monografia apresentado ao Departamento  
de Oceanografia da Universidade Federal de  
Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do  
curso de Bacharelado em Oceanografia.  
Área de concentração: Oceanografia Física

**Orientador:** Prof. Dr. Marcus André Silva  
**Coorientadora:** Dra. Syumara Queiroz de P. e Silva

RECIFE  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Galvão, Bárbara Strauss.

Soluções baseadas na natureza, como estratégias para o enfrentamento do aumento do nível do mar: um ensaio de aplicação no contexto costeiro de Recife - PE / Bárbara Strauss Galvão. - Recife, 2025.

104p. : il., tab.

Orientador(a): Marcus André Silva

Coorientador(a): Syumara Queiroz

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Oceanografia - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Adaptação costeira. 2. Soluções baseadas na natureza. 3. Infraestrutura híbrida. 4. Mudanças climáticas. 5. Resiliência urbana. I. Silva, Marcus André . (Orientação). II. Queiroz, Syumara. (Coorientação). IV. Título.

550 CDD (22.ed.)

BÁRBARA STRAUSS GALVÃO

**SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA COMO ESTRATÉGIAS PARA O  
ENFRENTAMENTO DO AUMENTO DO NÍVEL DO MAR: UM ENSAIO DE  
APLICAÇÃO NO CONTEXTO COSTEIRO DE RECIFE – PE**

Trabalho de Monografia apresentado ao Departamento  
de Oceanografia da Universidade Federal de  
Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do  
curso de Bacharelado em Oceanografia.  
Área de concentração: Oceanografia Física

Data de aprovação: 08/08/2025

BANCA EXAMINADORA:

---

**Prof. Dr. Marcus André Silva (orientador)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Msc. Eduardo José Araújo Correia Lima (titular)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Prof. Dr. Roberto Lima Barcellos (titular)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**

---

**Dr. Sayonara Raiza Rodrigues de Medeiros Lins (suplente)**  
**Departamento de Oceanografia – UFPE**



Dedico este trabalho a minha mãe, que me amou,  
me apoiou e sempre me admirou e me ensinou a  
lidar com as adversidades da vida.

### **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, eu gostaria de agradecer a minha mãe Herica Strauss, meu pai Alexandre Gustavo Galvão e a meu irmão Alexandre Gustavo Strauss, por sempre terem orgulho e admiração por mim. Obrigada por todo o incentivo desde o momento em que mencionei que queria cursar Oceanografia. Agradeço por celebrarem minhas conquistas e por estarem sempre

presentes mesmo de longe. Amo vocês mais do que tudo. Quero agradecer meus avós, Gleisses Strauss e Marco Strauss, por sempre me apoiarem e sempre respeitarem meus estudos mesmo quando a saudade apertava. Obrigada também a minha dinda Magali Vasques por sempre me defender e me apoiar nos meus sonhos, e obrigada dinda Zelita Rocha por ser a pessoa que eu sempre pude contar em relação ao meu curso, por se interessar e me apoiar tanto que até começou a fazer pesquisa na área. A meu amor, Pedro Zeferino, por sempre revisar tudo que eu escrevia nesse processo de TCC e me incentivar mesmo quando a ansiedade batia. Obrigada meus melhores amigos, Eduarda Marques, Vinícius Dantas e Guilherme Passos, por sempre estarem lá quando eu precisei, nos momentos mais difíceis durante minha graduação e na vida, mesmo distantes, vocês se fazem presentes. Agradeço as minhas pessoas especiais da Oceanografia por me ajudarem nessa jornada conturbada da graduação, Mayara Nunes, Maria Eduarda Ishimaru, Tarsila Lima, Eduardo Araujo, Bruno Chiquito e a tantos outros por serem meus maiores apoiadores aqui em Recife, obrigada por compartilharem todas as dificuldades e por sempre estarem presentes. Obrigada a minha equipe de natação, eu não sei o que seria de mim nessa graduação sem vocês. Ao orientador Marcus André Silva, obrigada por aceitar me acolher no LOFEC, e por ter sido um orientador pai. Agradeço também à Syumara Queiroz, por toda a ajuda durante a graduação e o TCC, por ser a pessoa que falava para não chegar na exaustão e por ser essa maravilhosa co-orientadora e amiga que é. Obrigada por todos os ensinamentos e conselhos que me deu. Espero um dia ser pelo menos 1% da oceanógrafa que você é.

“O mundo não está ameaçado pelas pessoas más,  
e sim por aquelas que permitem a maldade.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

As cidades costeiras enfrentam riscos crescentes em decorrência das mudanças climáticas, como a elevação do nível do mar, intensificação de eventos extremos e processos erosivos. A cidade do Recife, por sua localização geográfica, densidade populacional e ocupação desordenada, figura entre as capitais brasileiras mais vulneráveis a esses impactos. Diante desse cenário, este trabalho busca analisar como as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) podem contribuir para a adaptação climática da zona costeira de Recife, identificando estratégias viáveis e seus desafios de implementação. A metodologia consistiu em uma revisão sistemática de literatura científica internacional, com seleção de 99 artigos publicados entre 2010 e 2025. A análise considerou critérios como região geográfica, tipo de clima, impactos abordados, soluções propostas e barreiras à implementação. Os artigos foram classificados segundo a tipologia das SbN baseada na IUCN: Tipo 1 (proteção de ecossistemas intactos), Tipo 2 (gestão sustentável de ecossistemas), Tipo 3 (restauração de ecossistemas degradados) e Tipo 4 (infraestrutura híbrida ou inspirada na natureza). Os resultados indicaram predominância das estratégias de restauração (Tipo 3) e de infraestrutura híbrida (Tipo 4), com foco em manguezais, recifes artificiais e dunas vegetadas. Recife apresenta potencial para aplicação dessas estratégias, especialmente em áreas como o Parque dos Manguezais Josué de Castro e na Ilha de Deus, onde práticas tradicionais, como a carcinicultura comunitária, evidenciam caminhos possíveis para soluções sustentáveis. No entanto, a aplicação prática dessas soluções em Recife enfrenta desafios significativos, como a falta de áreas livres para implementação em larga escala, conflitos de uso do solo, descontinuidade de políticas públicas e baixa integração entre atores institucionais e comunitários. A escassez de espaço físico limita a implantação de SbN puras, especialmente em áreas densamente urbanizadas, como as bacias do Pina, Tejipió e Capibaribe, além da própria zona costeira. Nesse cenário, soluções híbridas – que combinam infraestrutura verde com elementos da engenharia tradicional – emergem como alternativas mais viáveis, ao permitir ganhos ecológicos e funcionais mesmo em ambientes antropizados. Conclui-se que, embora as SbN representem caminhos sustentáveis para a adaptação costeira, sua adoção efetiva em cidades como Recife exige articulação intersetorial, inclusão social, planejamento urbano integrado e desenho flexível de soluções que se adaptem às restrições espaciais e institucionais existentes. As infraestruturas híbridas, quando bem planejadas e contextualizadas, podem exercer papel estratégico na ampliação da resiliência climática urbana.

**Palavras-chave:** Adaptação costeira; Soluções baseadas na natureza; Infraestrutura híbrida; Mudanças climáticas; Resiliência urbana.

## ABSTRACT

Coastal cities face increasing risks due to climate change, such as sea level rise, intensification of extreme events, and erosive processes. The city of Recife, due to its geographical location, high population density, and unplanned urban expansion, stands out as one of the most vulnerable Brazilian capitals to these impacts. In this context, this study aims to analyze how Nature-Based Solutions (NbS) can contribute to climate adaptation in Recife's coastal zone by identifying feasible strategies and their implementation challenges. The methodology consisted of a systematic review of international scientific literature, selecting 99 articles published between 2010 and 2025. The analysis considered criteria such as geographic region, climate type, addressed impacts, proposed solutions, and implementation barriers. Articles were classified according to the IUCN-based NbS typology: Type 1 (protection of intact ecosystems), Type 2 (sustainable management of ecosystems), Type 3 (restoration of degraded ecosystems), and Type 4 (hybrid or bioinspired infrastructure). The results indicated a predominance of restoration strategies (Type 3) and hybrid infrastructure (Type 4), focusing on mangroves, artificial reefs, and vegetated dunes. Recife shows potential for applying such strategies, especially in areas like the Josué de Castro Mangrove Park and Ilha de Deus, where traditional practices such as community-based shrimp farming reveal viable paths for sustainable solutions. However, the practical application of these strategies in Recife faces significant challenges, including lack of available land for large-scale implementation, land-use conflicts, fragmented public policies, and low institutional-community integration. The scarcity of physical space limits the implementation of purely nature-based interventions, particularly in densely urbanized areas such as the Pina, Tejipió, and Capibaribe basins, as well as the coastal zone itself. In this context, hybrid solutions – combining green infrastructure with traditional engineering elements – emerge as more viable alternatives, enabling ecological and functional gains even in heavily modified environments. It is concluded that although NbS represent sustainable pathways for coastal adaptation, their effective adoption in cities like Recife requires intersectoral coordination, social inclusion, integrated urban planning, and flexible solution design adapted to existing spatial and institutional constraints. When well-planned and contextualized, hybrid infrastructures can play a strategic role in enhancing urban climate resilience.

**Keywords:** Coastal adaptation; Nature-based solutions; Hybrid infrastructure; Climate change; Urban resilience.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Comparação do aumento total do nível do mar entre capitais litorâneas, considerando o nível médio do mar referente a 1986-2005, as marés astronômicas e as marés de tempestade. As séries temporais são relativas aos pontos mais próximos das respectivas cidades..... 17
- Figura 2.** Mapas superiores mostram o cenário atual de maré máxima – 1,56 m (referência IBGE) e os inferiores mostram o cenário futuro – 2,26 m (1,56 m + 0,70 m) (referência IBGE) em (a) áreas de comércio, turismo e lazer, (b) na zona sul da cidade e (c) o destaque para os bairros de Afogados, Jiquiá, Imbiribeira e IPSEP. Áreas em vermelho indicam regiões vulneráveis à inundação. .... 18
- Figura 3.** Vulnerabilidade atual (I) ao longo da costa de Recife e vulnerabilidade futura (II-IV), levando em consideração aumentos na altura significativa das ondas ( $H_s$ ), e aumentos de (II) 0,25m, (III) 0,5m e (IV) 1,0m no nível médio do mar (ARNNM). .... 19
- Figura 4.** Simulação espacial e temporal da inundação em Recife em (a) 24 de maio, (b) 25 de maio, (c) 26 de maio, (d) 27 de maio e (e) 28 de maio de 2022. (e) Inundação ocorrida em 25 de maio de 2022 na Avenida Recife, Ipsep (Fonte: G1). (f) Inundação ocorrida em 28 de maio de 2022 no Estádio Adelmar da Costa Carvalho, Ilha do Retiro. (Fonte: CNN Brazil)..... 21
- Figura 5.** Dias de chuva extrema projetado como o número de dias com precipitação superior a 20 mm ao ano para o ponto mais próximo de Recife. Os dados anuais foram suavizados com uma janela de 10 anos e as regiões sombreadas indicam o desvio padrão móvel para a mesma janela. .... 21
- Figura 6.** Número de artigos por ano identificados dos 99 estudos selecionados. .... 30
- Figura 7.** Frequência de menções aos principais impactos climáticos nos estudos revisados. 32
- Figura 8.** Distribuição dos estudos revisados por tipo de clima (esquerda) e região geográfica (direita)..... 33
- Figura 9.** Classificação dos artigos segundo o tipo de intervenção das Soluções Baseada na Natureza. .... 34
- Figura 10.** Ilustração do trajeto da Via Mangue e das áreas que abrange, Recife-PE..... 42

- Figura 11.** Árvore de mangue branco (*Laguncularia racemosa*) observada na margem do estuário do Rio Tejipió próxima a ponte da Avenida Recife. O rio Tejipió encontra-se com níveis altos contaminação por esgoto e resíduos sólidos (RECIFE CIDADE PARQUE, 2025). A presença de árvores de mangue apesar das condições ruins, demonstra a resiliência desses ecossistemas. ....47
- Figura 12.** Estruturas de restauração de recifes: (A) Módulos de; (B) Blocos de; (C) Colônias de *Acropora cervicornis* cultivadas em viveiros, fixadas nos módulos; (D) Colônias de *A. cervicornis* fixadas em “reef balls”; (E) Colônias de *A. cervicornis* fixadas em EcoReefs. ....51
- Figura 13.** Formação de beachrock na Praia de Boa Viagem, Recife (PE). Beach rocks são formações rochosas cimentadas naturalmente, comuns em zonas costeiras tropicais, e desempenham papel importante na dissipação de energia das ondas e na proteção costeira natural. ....53
- Figura 14.** Comparação entre dois cenários costeiros frente a tempestades extremas: no topo, um sistema dunar degradado e sem vegetação, onde a elevação total do nível do mar (TWL = maré + ressaca + set-up + run-up) ultrapassa a duna, resultando em sobre-lavagem (overwash), recuo (roll over) e escoamento (flow) que ameaçam a infraestrutura urbana. Na parte inferior, uma “solução verde” com dunas reconstruídas e revegetadas, onde a presença de vegetação nativa estabiliza os sedimentos, dissipa a energia das ondas e reduz os impactos hidrodinâmicos, promovendo maior proteção para a área urbana adjacente. A vegetação atua como barreira física e ecológica, aumentando a resiliência costeira de forma sustentável (FERNÁNDEZ-MONTBLANC et al., 2020). ....58
- Figura 15.** Vegetação de restinga característica ao longo da praia do Pina, Recife/PE. ....61
- Figura 16.** Exemplo de estruturas bioinspiradas: Recifes impressos em 3D em formato de D. Unidades de recife feitas de arenito patenteado e atóxico. Imagens cortesia do Dr. Enrico Dini. ....65
- Figura 17.** Tipos de intervenções costeiras para proteção contra erosão e elevação do nível do mar. (a) *Revetments* (estruturas inclinadas de proteção costeira), com uso de concreto ou materiais rígidos dispostos em talude para reduzir o impacto das ondas. (b) Soluções híbridas, como geotubos revestidos com fibras naturais, que combinam

engenharia tradicional com elementos naturais. (c) viveiros de mudas de mangue e barreiras de bambu em T para favorecer a regeneração de manguezais e estabilização costeira. .... 66

**Figura 18.** Estrutura e tipos de pavimentos permeáveis. A imagem superior mostra as camadas típicas de um sistema de pavimento permeável: (1) camada superficial (asfalto poroso, concreto permeável ou blocos intertravados), (2) camada de assentamento, (3) camada de transição, (4a–4b) camadas de base e sub-base com agregados graduados para armazenamento e drenagem, (opcional) geotêxtil separador, e (5) solo de subleito não compactado. Na parte inferior, são ilustrados cinco tipos principais de superfície: ..... 69

**Figura 19.** (a) Esquema representando o telhado de edificações sem telhado verde, e com telhado verde extensivo e intensivo. Telhados extensivos têm camada de solo rasa (até 15 cm), são leves, exigem pouca manutenção e abrigam vegetação simples, como gramíneas e suculentas. Já os intensivos possuem solo mais profundo com maior potencial de retenção de água da chuva, permitem o cultivo de arbustos e até árvores, funcionam como jardins acessíveis, mas requerem mais irrigação, manutenção e estrutura de suporte (ZHANG *et al.* 2019) (b) Camadas típicas de um sistema de telhado verde, compostas por vegetação, substrato de crescimento, tecido filtrante, elementos de drenagem, proteção e barreira de raízes, além de camadas inferiores de isolamento, impermeabilização e estrutura do telhado. Cada componente contribui para o desempenho térmico, drenagem eficiente e durabilidade do sistema. (KHAWAJA *et al.*, 2018) (c) Vista do edifício ACROS Fukuoka, com cobertura telhados verdes (MABUCHI, 2011). ..... 70

**Figura 20.** Esquema de uma biovaleta. A água suja e poluída proveniente de telhados, ruas e estacionamentos entra na valeta, é desacelerada por diversas plantas e rochas. Os poluentes se depositam e a água limpa infiltra-se no solo. A água entra no tubo perfurado e é lentamente absorvida pelo solo. O excedente de água pluvial sai da biovaleta e escoar pelo tubo até o corpo receptor, mais limpa do que quando entrou e em volume significativamente reduzido. .... 70



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Cinco categorias principais de estratégias de adaptação costeira (OPPENHEIMER et al., 2019; IPCC, 2022b). .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 22 |
| <b>Tabela 2.</b> Resumo de critérios e indicadores para as Soluções Baseadas na natureza com base no documento “ <i>IUCN Global Standard for Nature-based Solutions</i> ” (IUCN, 2020b) .....                                                                                                                                                                                                              | 27 |
| <b>Tabela 3.</b> Classificação das soluções baseadas na natureza segundo o tipo de intervenção ecológica. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 29 |
| <b>Tabela 4.</b> Classificação dos artigos analisados segundo as quatro tipologias de SbN: proteção de ecossistemas intactos (Tipo 1), gestão sustentável de ecossistemas (Tipo 2), restauração de ecossistemas degradados (Tipo 3) e infraestrutura híbrida e/ou inspirada na natureza (Tipo 4). A tabela apresenta a citação do artigo e contexto no qual as estratégias são discutidas em cada um. .... | 35 |

## SUMÁRIO

|         |                                                                                     |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                             | 15 |
| 2       | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                              | 24 |
| 2.1     | <b>Objetivos específicos.....</b>                                                   | 24 |
| 3       | <b>METODOLOGIA .....</b>                                                            | 25 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                 | 30 |
| 4.1     | <b>Panorama geral da literatura revisada .....</b>                                  | 30 |
| 4.2     | <b>Tipologias das SbN identificadas .....</b>                                       | 33 |
| 4.2.1   | <i>Proteção de ecossistemas intactos e Gestão sustentável de ecossistemas .....</i> | 38 |
| 4.2.2   | <i>Restauração de ecossistemas degradados .....</i>                                 | 43 |
| 4.2.2.1 | <i>Manguezais .....</i>                                                             | 44 |
| 4.2.2.2 | <i>Recifes de coral e pradarias marinhas .....</i>                                  | 48 |
| 4.2.2.3 | <i>Dunas costeiras e restingas .....</i>                                            | 57 |
| 4.2.3   | <i>Infraestrutura híbrida e/ou inspirada na natureza .....</i>                      | 62 |
| 4.2.4   | <i>Limitações e barreiras à implementação das SbN .....</i>                         | 74 |
| 5       | <b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....</b>                                              | 80 |
| 6       | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                            | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

As cidades costeiras concentram uma parcela significativa da população mundial, dos investimentos em infraestrutura e das atividades econômicas globais. Estima-se que mais de 10% da população global, cerca de 896 milhões de pessoas, viviam em zonas costeiras de baixa altitude até 2020, e essa proporção tende a aumentar nas próximas décadas, especialmente em países em desenvolvimento (IPCC, 2022a). Essa expansão ocorre em um contexto de mudanças climáticas aceleradas, que interagem com processos de urbanização desigual, degradação ambiental, pobreza e vulnerabilidade institucional, ampliando os riscos para esses assentamentos.

Cidades e assentamentos costeiros enfrentam múltiplos riscos associados ao clima, incluindo a elevação do nível do mar, intensificação de tempestades, aumento da temperatura média, acidificação oceânica, alterações nos regimes de precipitação e eventos climáticos extremos. A interação entre esses fatores contribui para agravar impactos diretos e indiretos sobre a infraestrutura urbana, os sistemas de saneamento e drenagem, os serviços ecossistêmicos, a saúde pública e a segurança alimentar e hídrica (IPCC, 2022b). Esses riscos são distribuídos de forma desigual no espaço urbano, afetando mais intensamente comunidades vulneráveis localizadas em áreas sujeitas a alagamentos, encostas instáveis e faixas litorâneas expostas.

O risco climático urbano-costeiro deve ser compreendido como um fenômeno composto e sistêmico, que envolve ameaças físicas, desigualdades sociais e limitações institucionais, exigindo respostas intersetoriais e multiescalares (IPCC, 2022b). Nesse sentido, as cidades têm desempenhado papéis ambíguos: ao mesmo tempo que são centros de emissão de gases de efeito estufa e de consumo intensivo de recursos, também concentram inovação, capacidades técnicas e oportunidades de ação climática transformadora. No entanto, a adoção de estratégias adaptativas nas cidades costeiras ainda é desigual, limitada por restrições financeiras, técnicas, políticas e culturais (IPCC, 2022b).

A elevação do nível médio do mar é uma das manifestações mais visíveis e duradouras das mudanças climáticas, com implicações profundas para centros urbanos costeiros. Segundo o IPCC, é virtualmente certo que o nível médio global do mar (GMSL) aumentou nas últimas décadas, com uma taxa de 3,6 mm por ano entre 2006 e 2015 — valor significativamente superior à média do século XX (IPCC, 2019b). Esse aumento decorre da expansão térmica dos oceanos e da perda de massa de geleiras e mantos de gelo, ambos fenômenos induzidos pelo aquecimento global. Embora o GMSL seja uma variável global, seus impactos são modulados

localmente por fatores como subsidência do solo, extração de águas subterrâneas, dinâmica oceânica e ocupações urbanas em áreas baixas e mal drenadas.

Projeções apontam que eventos extremos do nível do mar, como marés de tempestade e ressacas severas, tornar-se-ão frequentes até meados do século, mesmo sob cenários de baixas emissões (OPPENHEIMER *et al.*, 2019). Nas cidades, os impactos incluem inundações crônicas, salinização de aquíferos, erosão costeira, degradação de ecossistemas de proteção natural e perda de habitabilidade.

Somado a esse cenário de elevação do nível do mar, o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação representa outra pressão crítica sobre as cidades costeiras. O relatório especial do IPCC sobre extremos climáticos e desastres afirma, com alta confiança, que eventos de chuvas intensas têm se tornado mais frequentes em várias regiões tropicais e subtropicais, com tendência de agravamento nas próximas décadas (IPCC, 2012). O aquecimento global intensifica a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água, o que favorece precipitações mais concentradas e severas. Quando essas chuvas ocorrem sobre áreas altamente urbanizadas e impermeabilizadas, os riscos de alagamentos, inundações súbitas e deslizamentos aumentam significativamente, sobretudo em áreas com infraestrutura precária ou deficiências no sistema de drenagem urbana.

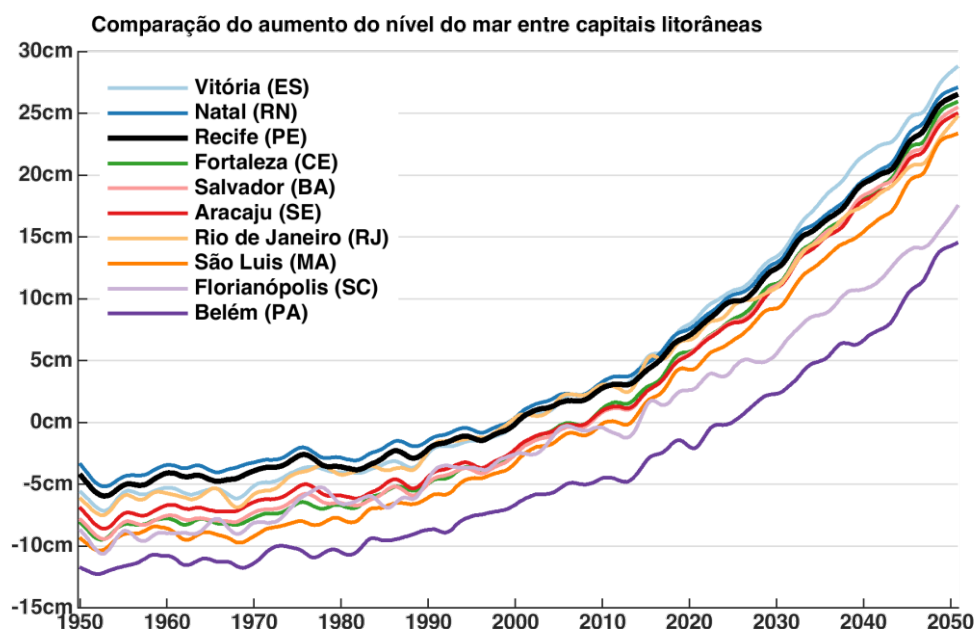
A superposição entre chuvas intensas e marés altas — especialmente em cidades costeiras — amplia o risco de inundações severas, comprometendo a habitabilidade e a funcionalidade urbana. Tais eventos frequentemente resultam em perdas econômicas, interrupções de serviços essenciais e impactos desproporcionais sobre populações de baixa renda (IPCC, 2012). A gestão desses riscos demanda não apenas obras estruturais, mas também políticas de uso e ocupação do solo, sistemas de alerta precoce, programas educacionais e mecanismos de governança colaborativa (IPCC, 2012).

Diante da convergência entre elevação do nível do mar e intensificação de chuvas extremas, as cidades costeiras emergem como fronteiras críticas da adaptação climática. A resposta eficaz a esses desafios exige abordagens integradas, de longo prazo e orientadas por princípios de justiça climática, inclusão social e sustentabilidade territorial. Este é o pano de fundo sobre o qual se insere o caso da cidade do Recife (Pernambuco) — exemplo emblemático de centro urbano costeiro situado em uma zona tropical de alta vulnerabilidade socioambiental.

A cidade do Recife é amplamente reconhecida como um dos centros urbanos brasileiros mais vulneráveis às mudanças climáticas. Sua localização costeira, topografia plana, elevada

densidade populacional e expansão urbana desordenada ampliam de forma significativa a exposição a riscos climáticos. Estudos destacam que a cidade já sofre, e continuará sofrendo, com os impactos da elevação do nível do mar, inundações urbanas, deslizamentos de terra, secas, ondas de calor e proliferação de doenças zoonóticas, exigindo respostas urgentes em termos de planejamento urbano e políticas públicas (WAYCARBON *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2010). De fato, Recife é uma das capitais litorâneas do Brasil com maior aumento do nível do mar projetado segundo os modelos climáticos globais (**Figura 1**)

**Figura 1.** Comparação do aumento total do nível do mar entre capitais litorâneas, considerando o nível médio do mar referente a 1986-2005, as marés astronômicas e as marés de tempestade. As séries temporais são relativas aos pontos mais próximos das respectivas cidades.



Fonte: Recife Cidade Parque (2025a).

A elevação do nível do mar representa um risco direto a bairros inteiramente urbanizados como Boa Viagem, Imbiribeira e Afogados. Projeções indicam que até o fim do século, esse aumento pode ultrapassar 1 metro, tornando permanentes as inundações em áreas hoje habitadas. Mesmo com uma elevação mais moderada de 0,5 m, estima-se que mais de 39 km<sup>2</sup> da Região Metropolitana do Recife seriam alagados, com prejuízos severos à infraestrutura urbana e à habitabilidade (COSTA *et al.*, 2010).

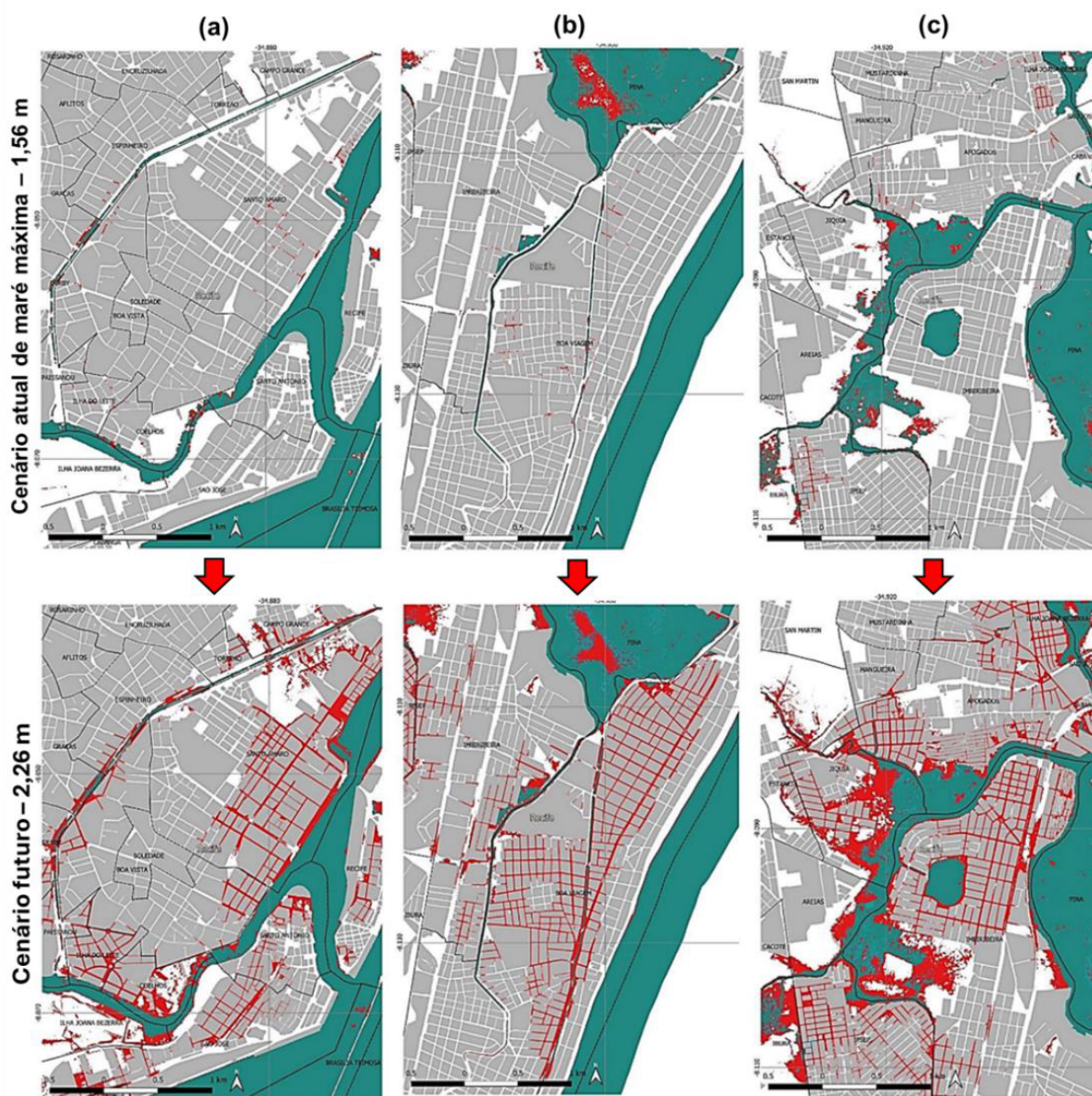
Um trabalho de Fonseca Neto *et al.* (2022) (**Figura 2**) mostra que no cenário atual, os bairros Afogados, Ipsep, Santo Amaro e Boa Viagem já apresentam as maiores extensões de inundações. Enquanto a densidade de alagamentos, destacam-se Ilha do Leite, Ipsep e Afogados, indicando impactos desproporcionais em áreas menores. No cenário futuro, o avanço do nível do mar combinado com a maré ampliará drasticamente a extensão de inundações em

bairros como Boa Viagem, Imbiribeira e Afogados. A densidade de alagamentos atingirá níveis críticos em Ilha do Leite, Ipsep e Afogados, tornando-os os mais vulneráveis da cidade (FONSECA NETO *et al.*, 2022).

Além disso, o aumento do nível do mar em conjunto com alterações na dinâmica dos ventos também ocasiona a intensificação da erosão costeira (IPCC, 2007; 2019a,b). A erosão costeira na Região Metropolitana do Recife representa um processo intensificado por múltiplos fatores, entre eles a elevação do nível do mar, a urbanização desordenada e a degradação dos ecossistemas naturais. Estudos indicam que, embora 48% das praias avaliadas no litoral pernambucano não apresentem sinais de erosão, cerca de 28% sofrem erosão severa, muitas vezes associada a obras estruturais e ocupação intensa da faixa litorânea (MARTINS *et al.*, 2016; SILVA; GONÇALVES, 2018). A instalação de estruturas rígidas como enrocamentos e espigões, somada à perda de áreas de restinga e pós-praia, tem reduzido a resiliência natural do sistema costeiro, agravando o recuo da linha de costa e a vulnerabilidade a inundações (SILVA; LIRA, 2019).

Projeções realizadas por Martins (2015) e Pereira *et al.* (2015) mostram que, com o aumento do nível médio do mar e da altura significativa das ondas, haverá uma ampliação substancial das áreas classificadas como altamente vulneráveis, sobretudo nas praias de Boa Viagem e Piedade (**Figura 3**). Os resultados do modelo MIKE 21, aplicados no âmbito do projeto Recife Cidade Parque, revelam um alto potencial erosivo justamente nesses trechos, especialmente onde a proteção recifal é menor e a vegetação costeira está ausente.

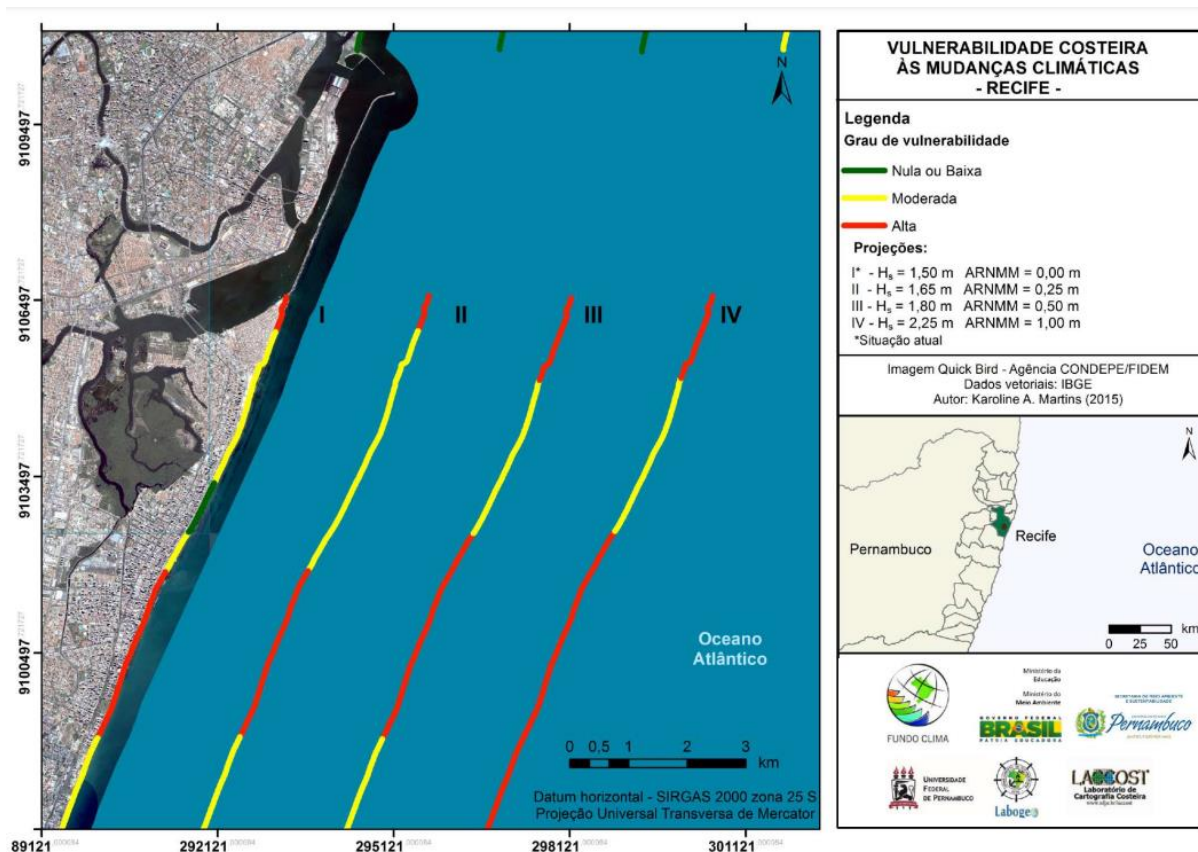
**Figura 2.** Mapas superiores mostram o cenário atual de maré máxima – 1,56 m (referência IBGE) e os inferiores mostram o cenário futuro – 2,26 m (1,56 m + 0,70 m) (referência IBGE) em (a) áreas de comércio, turismo e lazer, (b) na zona sul da cidade e (c) o destaque para os bairros de Afogados, Jiquiá, Imbiribeira e IPSEP. Áreas em vermelho indicam regiões vulneráveis à inundação.



Fonte: Adaptado de Fonseca Neto *et al.* (2022)

**Figura 3.** Vulnerabilidade atual (I) ao longo da costa de Recife e vulnerabilidade futura (II-IV), levando em consideração aumentos na altura significativa das ondas ( $H_s$ ), e aumentos de (II) 0,25m, (III) 0,5m e (IV) 1,0m no nível médio do mar (ARNNM).





Fonte: Pereira *et al.* (2015)

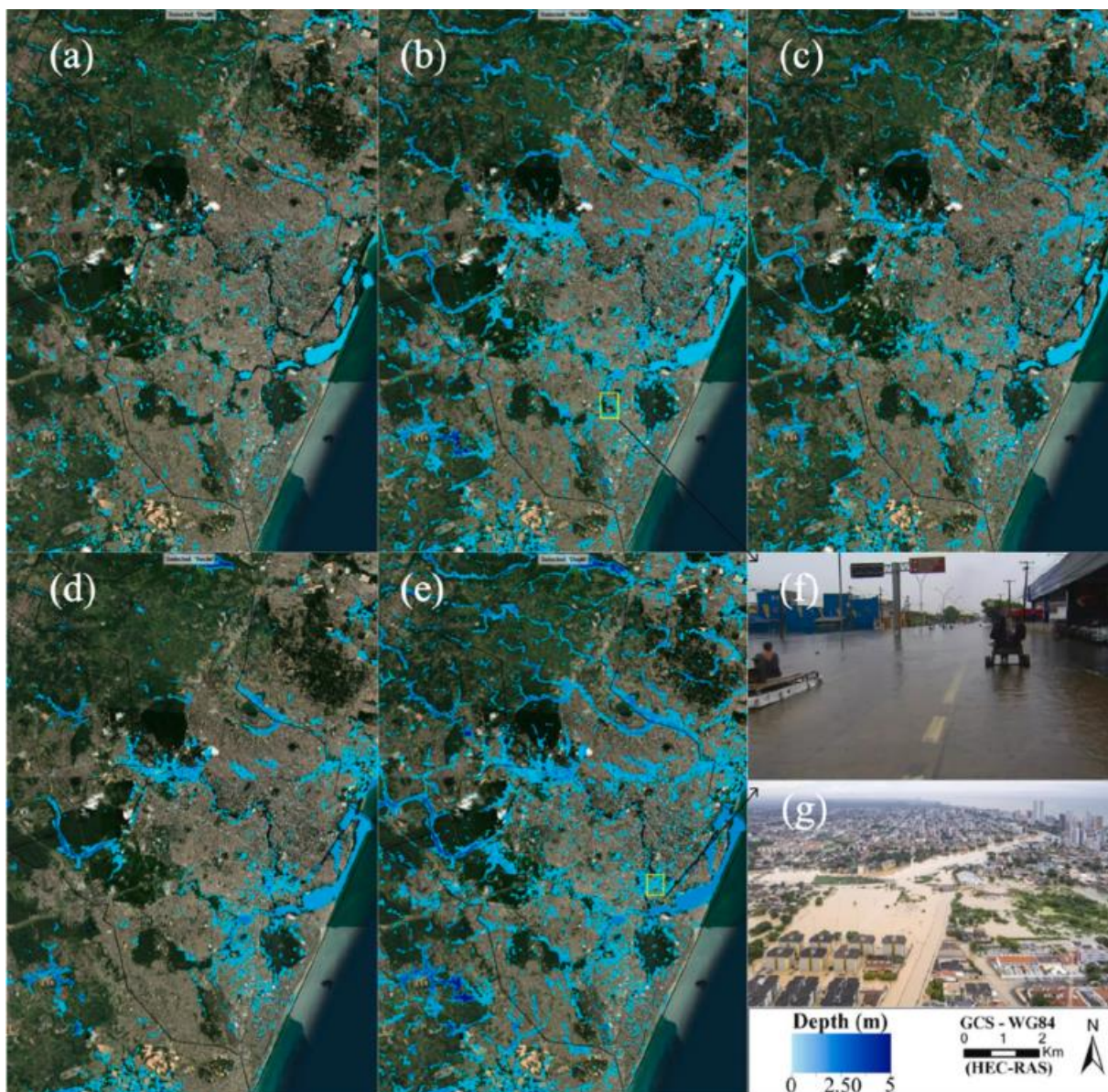
Concomitantemente, a ameaça à zona costeira de Recife é potencializada pelas chuvas extremas, que têm ocorrido de forma mais concentrada e mais frequente (MARENGO *et al.*, 2023). O episódio de maio de 2022 é ilustrativo: chuvas intensas causaram inundações repentinas e deslizamentos que resultaram em 133 mortes e milhares de desabrigados (**Figura 4**). A urbanização sobre áreas de encosta, mangue e margens de rios, combinada com infraestrutura precária de drenagem, contribui para o agravamento desses eventos (MARENGO *et al.*, 2023). De fato, as projeções apontam para o aumento da frequência e intensidade dos eventos de chuva extrema (**Figura 5**) o que pode sobrecarregar ainda mais o sistema de drenagem atualmente insuficiente da cidade. Modelagens indicam que eventos de inundação que antes eram considerados raros — com recorrência de 100 anos — poderão ocorrer anualmente até o final do século, mesmo sob cenários intermediários de emissões (RECIFE CIDADE PARQUE, 2025).

Essa multiplicidade de ameaças interage com uma estrutura urbana altamente vulnerável e socialmente desigual. A análise integrada dos fatores de risco mostra que o Recife enfrenta uma situação de risco climático composto, em que a combinação de ameaças naturais e vulnerabilidade socioeconômica amplia drasticamente a exposição da população. Em bairros como Ilha do Leite, Ipsep e Afogados, já se observa uma das maiores densidades de alagamento



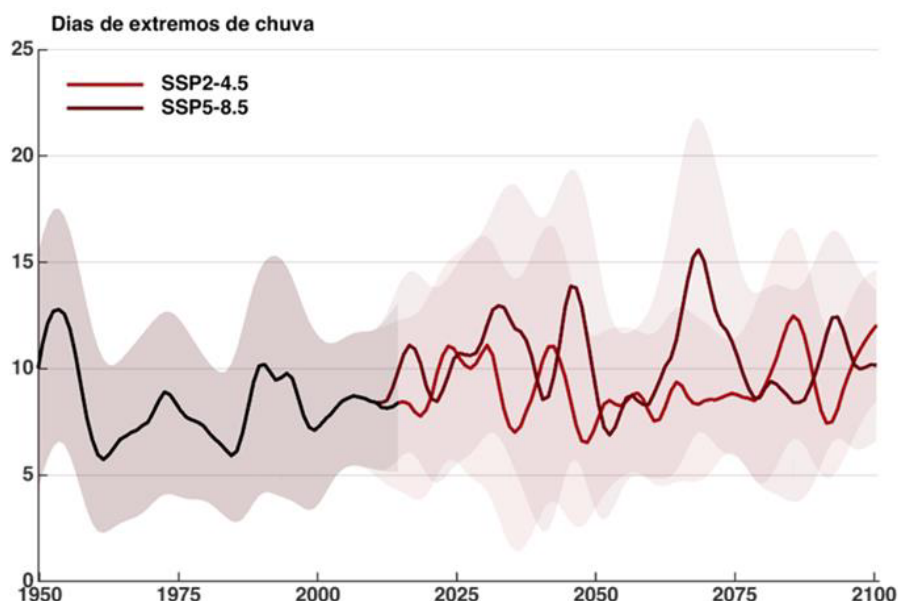
da cidade. Projeções indicam que esses bairros poderão atingir mais de 170 metros de alagamento por hectare, comprometendo infraestrutura crítica, como hospitais e vias de acesso (FONSECA NETO *et al.*, 2022).

**Figura 4.** Simulação espacial e temporal da inundação em Recife em (a) 24 de maio, (b) 25 de maio, (c) 26 de maio, (d) 27 de maio e (e) 28 de maio de 2022. (e) Inundação ocorrida em 25 de maio de 2022 na Avenida Recife, Ipsep (Fonte: G1). (f) Inundação ocorrida em 28 de maio de 2022 no Estádio Adelmar da Costa Carvalho, Ilha do Retiro. (Fonte: CNN Brazil).



Fonte: Marengo *et al.* (2023).

**Figura 5.** Dias de chuva extrema projetado como o número de dias com precipitação superior a 20 mm ao ano para o ponto mais próximo de Recife. Os dados anuais foram suavizados com uma janela de 10 anos e as regiões sombreadas indicam o desvio padrão móvel para a mesma janela.



Fonte: Recife Cidade Parque (2025a).

Para enfrentar esses riscos, o IPCC identifica cinco categorias principais de resposta, apresentadas resumidamente na **Tabela 1**. Essas medidas não são mutuamente exclusivas e, frequentemente, são combinadas em intervenções híbridas ou sequenciais, conforme o contexto socioambiental e as capacidades locais.

A proteção representa a abordagem mais tradicional, voltada à contenção física dos impactos, por meio de infraestruturas rígidas ou barreiras naturais restauradas. Já a acomodação parte do princípio de convivência com o risco, promovendo ajustes no uso e na ocupação das áreas expostas. Em situações em que os riscos se tornam inaceitáveis ou economicamente insustentáveis, a estratégia de retirada planejada passa a ser considerada, embora sua aplicação envolva barreiras sociais, culturais e políticas significativas. Por outro lado, a estratégia de avanço — como aterros costeiros ou expansão de áreas urbanas sobre o mar — tem sido usada em contextos específicos, como grandes centros urbanos com recursos tecnológicos elevados, mas é limitada por altos custos e impactos ecológicos. Finalmente, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) vêm ganhando destaque por aliar proteção costeira à conservação ambiental, promovendo co-benefícios como a restauração de habitats, o sequestro de carbono e o fortalecimento da resiliência socioecológica.

**Tabela 1.** Cinco categorias principais de estratégias de adaptação costeira (OPPENHEIMER *et al.*, 2019; IPCC, 2022b).

| Categoria       | Descrição                                                                              | Exemplos                                                             |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Proteção</b> | Medidas que reduzem os impactos físicos por meio de barreiras artificiais ou naturais. | Diques, muros costeiros, recifes artificiais, manguezais restaurados |

|                                      |                                                                                           |                                                                         |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Acomodação</b>                    | Adaptações que aceitam certo nível de risco, ajustando o uso do espaço ou infraestrutura. | Edificações elevadas, sistemas de alerta, uso sazonal de áreas de risco |
| <b>Retirada</b>                      | Recuo planejado e estratégico de pessoas, bens ou infraestrutura de áreas de risco.       | Realocação de moradias, zonas de exclusão, desocupação gradual          |
| <b>Avanço</b>                        | Ações que estendem a linha costeira para o mar, conquistando território.                  | Aterros costeiros, criação de novas ilhas ou áreas portuárias           |
| <b>Soluções baseadas na natureza</b> | Ações que usam ecossistemas naturais ou restaurados para proteger e adaptar a costa.      | Restauração de dunas, manguezais, recifes de coral, marismas            |

---

Fonte: A autora (2025).

As SbN são intervenções que protegem, restauram ou manejam ecossistemas naturais ou modificados de forma a enfrentar desafios sociais ao mesmo tempo em que promovem o bem-estar humano e a biodiversidade (COHEN-SHACHAM *et al.*, 2019; WORLD BANK, 2022). Adicionalmente, a implementação de SbN também está alinhada com diretrizes internacionais, como o padrão global da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), que estabelece oito critérios para garantir a efetividade, equidade e sustentabilidade dessas soluções. Entre eles, destaca-se a necessidade de adaptação ao contexto local, consideração de aspectos culturais, promoção da biodiversidade e integração com políticas públicas (COHEN-SHACHAM *et al.*, 2019).

Dessa forma, o presente estudo visa revisar as estratégias de SbN desenvolvidas no contexto de adaptação climática para a zona costeiras. Particularmente, o estudo busca avaliar as estratégias mais abordadas no mundo e a viabilidade, limitações e desafios para a implementação na zona costeira da cidade do Recife.

## **2 OBJETIVOS**

Diante desse cenário, esta pesquisa busca responder à seguinte questão-problema: Como as Soluções Baseadas na Natureza podem contribuir para o enfrentamento dos impactos da elevação do nível do mar em Recife, e quais estratégias são potencialmente viáveis para o contexto socioambiental da cidade?

### **2.1 Objetivos específicos**

- Realizar um levantamento das principais SbN aplicadas internacionalmente em zonas costeiras considerando os efeitos costeiros das mudanças climáticas;
- Identificar, conforme a literatura presente, as características das SbN aplicadas no contexto global;
- Identificar potenciais estratégias de SbN para aplicação no contexto da cidade do Recife.

### 3 METODOLOGIA

As SbN constituem uma abordagem integradora que utiliza processos e estruturas ecológicas para enfrentar desafios sociais de forma eficaz, adaptável e sustentável. Segundo a definição da IUCN, SbN são “ações para proteger, gerir de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam de forma eficaz e adaptável desafios sociais, proporcionando simultaneamente benefícios para o bem-estar humano e a biodiversidade” (COHEN-SHACHAM *et al.*, 2019). Tais desafios incluem não apenas os riscos climáticos, mas também questões como segurança alimentar e hídrica, saúde, conservação, geração de empregos e inclusão social. Essa abrangência conceitual torna as SbN particularmente relevantes para contextos complexos, onde múltiplos fatores socioambientais estão em interação, como ocorre nas áreas urbanas costeiras.

A formulação conceitual das SbN foi consolidada pela IUCN, que definiu um conjunto de princípios norteadores para sua implementação. Entre eles, destacam-se a promoção de benefícios múltiplos e equilibrados, a priorização da biodiversidade e integridade dos ecossistemas, a inclusão de processos participativos e governança equitativa, e a consideração de escalas espaciais e temporais apropriadas. Para que uma intervenção seja reconhecida como uma SbN autêntica, ela deve atender a critérios sociais, ecológicos e econômicos simultaneamente (IUCN, 2020b).

As SbN podem ser organizadas em diferentes categorias de intervenção, conforme a escala de modificação do ecossistema (IUCN, 2016; IUCN, 2020a,b):

- Proteção de ecossistemas intactos – como a conservação de manguezais e restingas, que atuam como barreiras naturais contra a erosão e as inundações costeiras.
- Gestão sustentável de ecossistemas – incluindo práticas como o uso agroecológico do solo e o manejo florestal participativo.
- Restauração de ecossistemas degradados – como a recomposição da vegetação nativa em encostas urbanas para controle de deslizamentos e recuperação da infiltração hídrica.
- Criação de novos ecossistemas urbanos híbridos – como telhados verdes, jardins de chuva e parques alagáveis integrados à infraestrutura da cidade.

Para garantir a integridade e a efetividade das Soluções Baseadas na Natureza, a IUCN elaborou em 2020 o Padrão Global para SbN, estruturado em oito critérios fundamentais. Esses

critérios permitem avaliar se uma intervenção realmente incorpora os princípios das SbN, considerando desde a identificação de desafios sociais até sua integração institucional. Entre os aspectos abordados, destacam-se: a definição clara dos problemas que a solução visa enfrentar; a adequação da escala espacial e temporal; os ganhos concretos para a biodiversidade; a viabilidade econômica; a governança participativa; o equilíbrio de trade-offs e co-benefícios; a gestão adaptativa baseada em evidências; e a inserção em marcos políticos e legais existentes (IUCN, 2020a,b).

Esses critérios são operacionalizados por um conjunto de indicadores práticos e mensuráveis, resumidos na **Tabela 2**, e funcionam como um referencial internacional para o desenho, implementação e monitoramento de iniciativas que se proponham a ser reconhecidas como SbN. Esse conjunto de critérios e indicadores permite, por exemplo, distinguir uma medida de infraestrutura verde bem planejada de uma simples ação pontual com aparência ecológica, mas sem resultados sistêmicos ou duradouros (“greenwashing”). Assim, o padrão contribui para evitar o uso indevido do conceito de SbN e garante sua aplicação com base em evidência, justiça social e sustentabilidade ecológica (IUCN, 2020a,b). Por exemplo, uma restauração de manguezais só pode ser classificada como SbN se for concebida com base em conhecimento técnico e científico, se envolver as comunidades locais, se proporcionar ganhos mensuráveis em biodiversidade e se for socialmente justa e financeiramente viável (IUCN, 2020a,b).

Do ponto de vista econômico, ainda há lacunas importantes na mensuração dos benefícios das SbN, especialmente em relação ao custo-efetividade de longo prazo. Estudos indicam que, apesar das limitações metodológicas, SbN tendem a oferecer vantagens econômicas superiores às soluções convencionais de engenharia, sobretudo pela multiplicidade de co-benefícios que geram, como segurança hídrica, sequestro de carbono, recreação e qualidade do ar (IUCN, 2015).

Portanto, as SbN representam um paradigma promissor para a adaptação climática e a resiliência urbana, especialmente em contextos como o da cidade do Recife, onde os riscos climáticos são múltiplos e interdependentes. Sua implementação, no entanto, exige articulação institucional, planejamento territorial estratégico e engajamento da sociedade civil, além de financiamento adequado e métricas de monitoramento robustas.

**Tabela 2.** Resumo de critérios e indicadores para as Soluções Baseadas na natureza com base no documento “*IUCN Global Standard for Nature-based Solutions*” (IUCN, 2020b)

| <b>Critério</b>                                   | <b>Indicadores</b>                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Critério 1: Aborda desafios sociais               | 1.1 O(s) desafio(s) social(is) estão claramente identificados e descritos.<br>1.2 As metas da SbN estão alinhadas aos desafios identificados.<br>1.3 Justificativa clara para o uso de SbN como a abordagem preferida.                                                                         |
| Critério 2: Projetada em escala apropriada        | 2.1 A escala espacial é adequada ao(s) desafio(s) abordado(s).<br>2.2 A escala temporal é adequada aos impactos esperados.<br>2.3 A SbN pode ser replicada e/ou ampliada quando aplicável.<br>2.4 A SbN considera as interdependências espaciais e temporais de sistemas sociais e ecológicos. |
| Critério 3: Gera benefícios para a biodiversidade | 3.1 A SbN evita a degradação de ecossistemas e perda de biodiversidade.<br>3.2 A SbN resulta em ganhos líquidos para a biodiversidade.<br>3.3 A SbN melhora a integridade ecológica e o funcionamento dos ecossistemas.<br>3.4 A SbN evita impactos adversos indiretos sobre a biodiversidade. |
| Critério 4: Viável economicamente                 | 4.1 A análise de custo-benefício é realizada para a SbN.<br>4.2 A SbN é financeiramente sustentável ao longo do tempo.<br>4.3 Há mecanismos para mobilizar recursos financeiros.                                                                                                               |
| Critério 5: Governança inclusiva                  | 5.1 Os grupos de interesse relevantes são identificados e engajados.<br>5.2 O processo de tomada de decisão é participativo.<br>5.3 As decisões de governança são transparentes e equitativas.<br>5.4 A SbN integra saberes locais, tradicionais e científicos.                                |
| Critério 6: Benefícios equitativos e trade-offs   | 6.1 Os trade-offs foram identificados e tratados de forma justa.<br>6.2 Os benefícios da SbN são distribuídos equitativamente.<br>6.3 Os impactos adversos são minimizados e gerenciados.<br>6.4 A SbN não transfere riscos ou impactos negativos para outros.                                 |
| Critério 7: Gestão adaptativa                     | 7.1 A SbN incorpora monitoramento com indicadores relevantes.<br>7.2 A SbN possui mecanismos para aprender e ajustar práticas.<br>7.3 A gestão da SbN é responsiva às mudanças e incertezas.                                                                                                   |
| Critério 8: Sustentável institucionalmente        | 8.1 A SbN está integrada em políticas públicas e estratégias.<br>8.2 A SbN é apoiada por marcos legais e regulatórios.<br>8.3 A SbN é institucionalizada e tem viabilidade de longo prazo.                                                                                                     |

Fonte: A autora (2025)

Para identificar as SbN mais difundidas foi realizado um levantamento da literatura científica com o objetivo de identificar estratégias de adaptação às mudanças climáticas implementadas em zonas costeiras ao redor do mundo. O levantamento bibliográfico foi conduzido principalmente por meio do Google Scholar, em virtude de sua ampla cobertura de publicações científicas oriundas de diversas bases internacionais, incluindo Scopus, Web of Science, ScienceDirect e repositórios institucionais.



O Google Scholar classifica documentos ponderando o texto completo de cada documento, onde foi publicado, por quem foi escrito, bem como com que frequência e há quanto tempo foi citado em outra literatura acadêmica. O número de citações, o índice h, a recência da publicação, a qualidade da fonte e a relevância das palavras-chave são os fatores que mais influenciam a ordem de apresentação dos resultados (GOOGLE, 2025).

Utilizaram-se os seguintes descritores (em inglês), combinados com operadores booleanos: “climate change” AND “coastal zone” AND “adaptation” AND “nature-based solutions”. A busca priorizou publicações dos últimos 15 anos (entre 2010 e 2025), a fim de refletir avanços recentes na temática.

Inicialmente, foram considerados os primeiros 270 resultados exibidos no Google Scholar. Desses 270, foram considerados apenas aqueles publicados em periódicos científicos revisados por pares, sendo verificada manualmente a natureza e qualidade de cada fonte, totalizando em 99 artigos. Para garantir a consistência do material analisado, utilizou-se um gerenciador de referências Mendeley para organização e eliminação de duplicatas.

A seleção dos artigos foi realizada com base na leitura dos resumos, sendo incluídos os estudos que atendiam a pelo menos um dos seguintes critérios: apresentavam estratégias ou ações de adaptação aplicadas em zonas costeiras; discutiam soluções baseadas na natureza ou estratégias híbridas; ou incluíam informações sobre o contexto climático, viabilidade ou custo-benefício das ações propostas.

Após essa etapa, os artigos selecionados foram organizados em uma planilha e classificados de acordo com os seguintes critérios: país ou região analisada; tipo de clima; tipo de estratégia de adaptação (baseada na natureza, engenharia cinza, híbrida ou social/institucional); objetivos do trabalho; problemas climáticos abordados; metodologia utilizada; soluções propostas; estimativas de custo-benefício ou problemas associados às técnicas; e barreiras à implementação.

Uma outra classificação levou em conta o tipo de intervenção ecológica predominante das SbN identificadas nos artigos, como apresentada na **Tabela 3**, adaptada da classificação da IUCN (IUCN, 2016; IUCN, 2020a,b). Os três primeiros tipos são reconhecidos pela IUCN enquanto o último foi incluído para contemplar soluções alternativas de adaptação não restritas as soluções puramente baseadas na Natureza.



**Tabela 3.** Classificação das soluções baseadas na natureza segundo o tipo de intervenção ecológica.

| <b>Tipo de intervenção</b>                                 | <b>Descrição</b>                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo 1 – Proteção de ecossistemas intactos                 | Conservação e uso sustentável de ecossistemas pouco alterados, com mínima intervenção humana.                                                           |
| Tipo 2 – Gestão sustentável de ecossistemas                | Manejo de ecossistemas já degradados ou modificados.                                                                                                    |
| Tipo 3 – Restauração de ecossistemas degradados            | Restauração, reabilitação e de ecossistemas já degradados ou modificados.                                                                               |
| Tipo 4 – Infraestrutura híbrida e/ou inspirada na natureza | Combinam soluções de infraestrutura cinza (tradicionais) com SbN/ soluções que imitam processos naturais, com forte componente de engenharia ecológica. |

Fonte: A autora (2025).

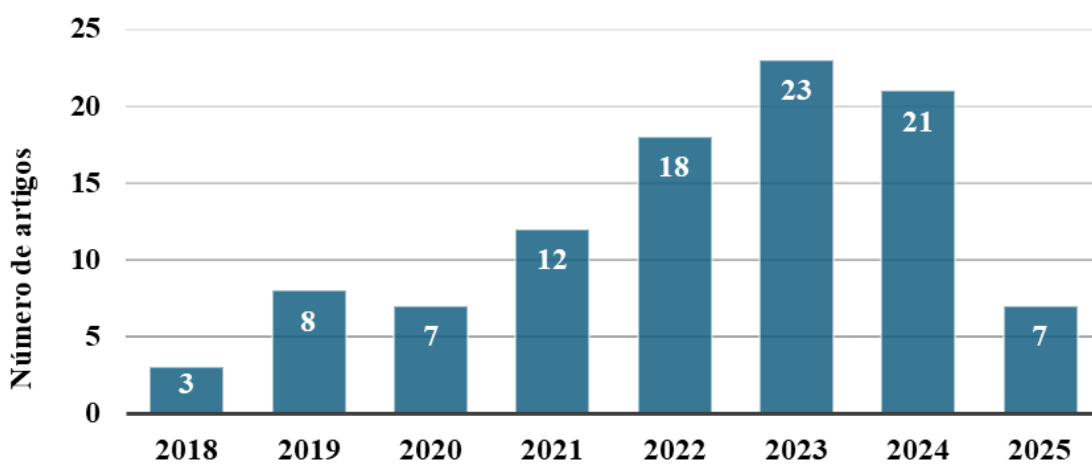
Essa classificação abrangente permite a identificação de padrões, lacunas e experiências bem-sucedidas em diferentes contextos geográficos. Com base nessa análise, foi conduzida uma avaliação crítica da aplicabilidade das estratégias ao contexto da Região Metropolitana do Recife, considerando suas características socioambientais, climáticas e institucionais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Panorama geral da literatura revisada

A tabela resultante das análises dos 99 artigos encontra-se sumariada no Anexo I. O número de artigos por ano se encontra representado na **Figura 6**, que mostrou um aumento de 2018 até 2023. No entanto isso pode ser um reflexo do aumento da relevância do tema com o passar dos anos uma vez que consideramos publicações com maior relevância.

**Figura 6.** Número de artigos por ano identificados dos 99 estudos selecionados.



Fonte: A autora (2025).

Adicionalmente, a análise aprofundou-se na abordagem metodológica empregada nos 99 artigos, revelando um perfil de pesquisa bem definido. A principal constatação é a predominância expressiva de artigos de revisão da literatura, que somam 60 dos trabalhos analisados, correspondendo a 60,6% do total. Este dado sugere que o campo de estudo das Soluções Baseadas na Natureza para resiliência costeira se encontra em uma fase de intensa consolidação teórica, na qual a comunidade científica tem se dedicado a sintetizar o conhecimento acumulado, harmonizar conceitos e identificar lacunas para futuras investigações.

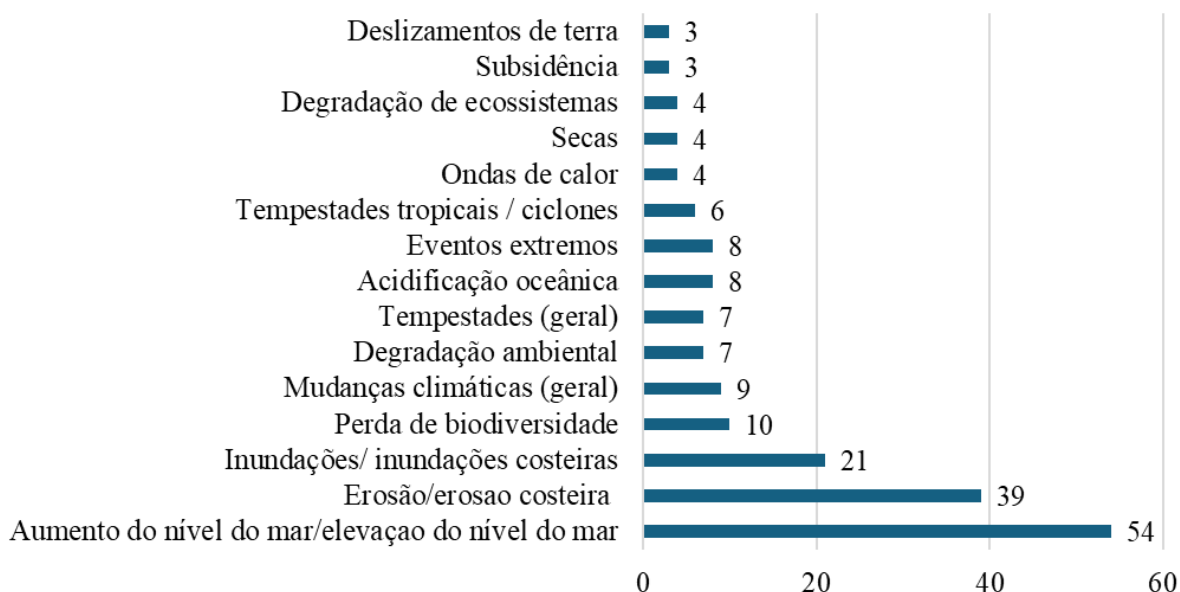
Em contrapartida, os 39 artigos restantes (39,4%) são caracterizados por metodologias de pesquisa primária e aplicada, demonstrando como a teoria é colocada em prática. Estes trabalhos, que não se baseiam exclusivamente em revisão, abrangem uma diversidade de abordagens, como estudos de modelagem hidrodinâmica para simular a eficácia de ecossistemas costeiros, análises de políticas públicas, estudos de caso focados em projetos-piloto e na percepção de *stakeholders*, e análises geoespaciais para mapear a vulnerabilidade. Para o caso específico de Recife, esta dualidade encontrada na literatura é de grande valor, pois

indica que já existe um corpo robusto de conhecimento teórico e experiências práticas que podem guiar a proposição de um portfólio de estratégias de adaptação eficazes e contextualizadas para a sua costa.

A análise dos dados fornecidos evidenciou os principais focos de preocupação climática, com a elevação do nível do mar, a erosão e as inundações sendo os mais recorrentes (**Figura 7**). O fenômeno da mudança no nível do mar foi o mais citado, totalizando 54 menções. Destas, 37 se referem diretamente à "elevação do nível do mar" e 17 à expressão "aumento do nível do mar". A erosão foi o segundo impacto mais destacado, com um total de 39 citações. A maior parte, 30 menções, foi para "erosão costeira", enquanto o termo "erosão" de forma mais ampla foi identificado 9 vezes. As inundações também figuraram de forma proeminente, somando 21 menções, divididas entre "inundações costeiras" (10 menções) e "inundações" em geral (11 menções). Outros problemas relevantes identificados incluem a "perda de biodiversidade" (10 menções), as "mudanças climáticas" em um contexto geral (9 menções), além de "degradação ambiental" e "tempestades", ambas com 7 menções cada.

Outros impactos relevantes identificados na análise incluíram a acidificação oceânica (8 menções no total), a ocorrência de eventos extremos (8 menções para o termo geral), tempestades tropicais e ciclones (6 menções), além de ondas de calor (4) e secas (4). A análise também apontou para a degradação de ecossistemas (4 menções), enquanto subsidência, deslizamentos de terra e insegurança alimentar foram citados 3 vezes cada. Muitos desses problemas estão interligados e refletem tanto processos físicos de transformação da zona costeira quanto consequências ecológicas e sociais agravadas pelas mudanças climáticas.

**Figura 7.** Frequência de menções aos principais impactos climáticos nos estudos revisados.



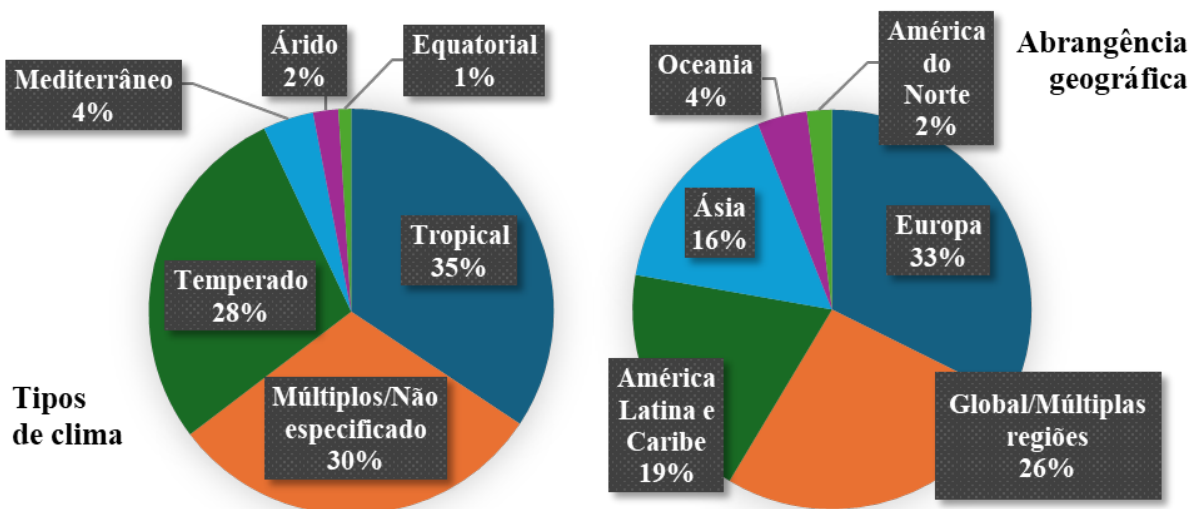
Fonte: A autora (2025).

A diversidade climática é um fator determinante para a avaliação das estratégias de adaptação costeira, uma vez que os impactos associados às mudanças climáticas variam significativamente conforme a latitude, os padrões atmosféricos e a exposição a eventos extremos (IPCC, 2021). A análise dos estudos incluídos nesta revisão mostra que 35% abordam regiões de clima tropical, 28% tratam de contextos temperados e 30% referem-se a múltiplos tipos de clima ou não especificam claramente essa variável (**Figura 8**). Climas mediterrâneos, áridos e equatoriais aparecem com menor frequência. Ao cruzar os dados de clima com a distribuição geográfica dos estudos, observa-se que os casos de clima tropical se concentram principalmente em países da Ásia (16%), América Latina e Caribe (19%) e Oceania (4%), revelando uma atenção crescente da literatura para os desafios enfrentados por países do Sul Global. Esse padrão representa um avanço importante, considerando a vulnerabilidade acumulada dessas regiões a eventos hidrometeorológicos extremos e mudanças no nível do mar.

Apesar disso, a Europa continua sendo a região mais representada nos estudos (33%), seguida por trabalhos com escopo global ou em múltiplas regiões (26%). Isso reflete uma concentração histórica da produção acadêmica e institucional voltada às Soluções Baseadas na Natureza em contextos de clima temperado, geralmente associados a marcos normativos mais consolidados e maior financiamento internacional. De fato, União Europeia tem se posicionado firmemente como líder global na promoção e implementação de soluções baseadas na natureza (CALLIARI *et al.*, 2022). Já a participação mais restrita de regiões como América Latina, Ásia e Oceania revela uma assimetria geográfica persistente na produção e disseminação de

conhecimento, o que pode limitar a representatividade das soluções propostas para contextos tropicais e subtropicais.

**Figura 8.** Distribuição dos estudos revisados por tipo de clima (esquerda) e região geográfica (direita).



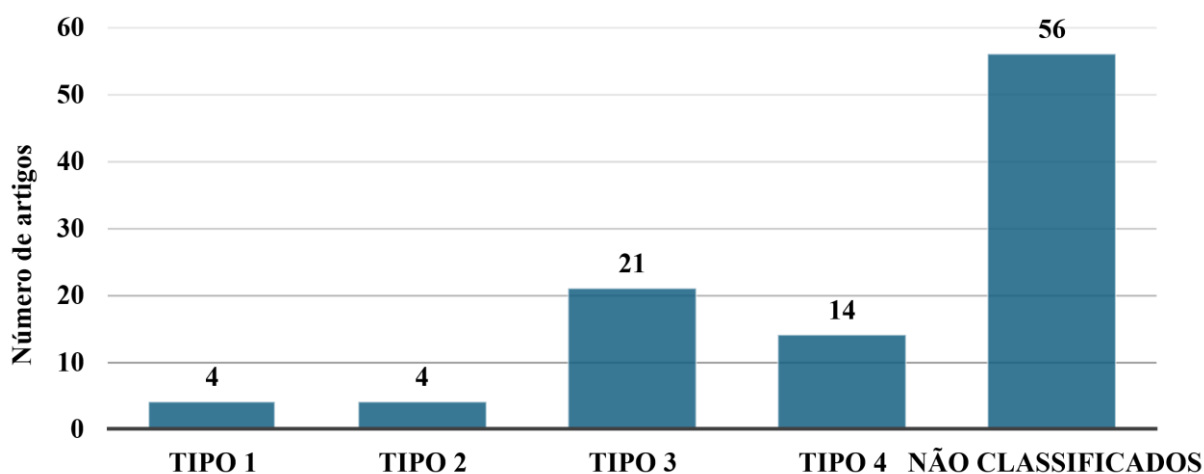
Fonte: A autora (2025).

## 4.2 Tipologias das SbN identificadas

A **Figura 9** apresenta a distribuição dos 99 artigos analisados de acordo com a tipologia das estratégias de SbN (Tipo 1 – proteção de ecossistemas intactos; Tipo 2 – gestão sustentável; Tipo 3 – restauração de ecossistemas degradados; Tipo 4 – infraestrutura híbrida/inspirada na natureza).

Entre os artigos classificados, predominam as estratégias do Tipo 3 com 21 estudos, seguidas pelas intervenções Tipo 4, com 14 artigos. As intervenções do Tipo 2 e Tipo 1 foram menos representadas, com apenas 4 artigos cada. Essa distribuição sugere uma ênfase maior nas abordagens mais interventivas e tecnológicas, enquanto estratégias de conservação e gestão permanecem menos exploradas na literatura recente sobre adaptação costeira. As estratégias abordadas dentro nos artigos classificados encontram-se sumarizadas na **Tabela 4**.

**Figura 9.** Classificação dos artigos segundo o tipo de intervenção das Soluções Baseada na Natureza.



Fonte: A autora (2025).

Por último, apesar do foco central deste trabalho estar voltado à identificação e classificação de SbN segundo uma tipologia funcional, grande parte dos trabalhos (58 estudos) não descreviam diretamente ações físicas ou ecológicas que permitissem sua alocação clara em uma das categorias. Esses trabalhos abordavam majoritariamente perspectivas conceituais, institucionais, normativas, metodológicas ou de planejamento e foram, portanto, classificados como "não categorizados". No entanto, a ausência de uma intervenção territorial específica não implica menor relevância. Grande parte desses artigos consistiram em revisões sistemáticas, ensaios teóricos ou propostas de modelos de implementação, que discutem temas como governança, financiamento, participação social, barreiras à escala e lacunas de definição e monitoramento.

Outros estudos exploram a aplicação de SbN no nível das políticas públicas, enfatizando o papel de arranjos institucionais, articulação entre escalas e inclusão social. Essa característica os aproxima mais das dimensões estratégicas e processuais das SbN do que das dimensões operacionais do território. Assim, embora não tenham sido classificados dentro da tipologia das intervenções, esses estudos oferecem insumos fundamentais para compreender os fatores que viabilizam ou limitam a efetiva implementação das SbN, especialmente em contextos urbanos costeiros como o da Região Metropolitana do Recife. Por esse motivo, parte desses artigos será mobilizada na discussão qualitativa dos resultados, contribuindo com subsídios conceituais e operacionais para o aprofundamento do estudo de caso.

**Tabela 4.** Classificação dos artigos analisados segundo as quatro tipologias de SbN: proteção de ecossistemas intactos (Tipo 1), gestão sustentável de ecossistemas (Tipo 2), restauração de ecossistemas degradados (Tipo 3) e infraestrutura híbrida e/ou inspirada na natureza (Tipo 4). A tabela apresenta a citação do artigo e contexto no qual as estratégias são discutidas em cada um.

| Tipologia | Citação                        | Contexto das SbN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo 1    | Coppenolle; Temmerman (2020)   | Conservação dos ecossistemas naturais existentes como estratégia de mitigação de riscos.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           | Hoppit <i>et al.</i> (2022)    | Áreas de Proteção Marinha são discutidas como instrumentos de proteção de ecossistemas existentes, reduzindo estressores e promovendo resiliência sem intervenções físicas ou restauração direta                                                                                                                                                                                   |
|           | Hülsen <i>et al.</i> (2023)    | O estudo foca nos serviços atuais prestados por ecossistemas naturais bem preservados, sem abordar intervenções de restauração ou manejo ativo                                                                                                                                                                                                                                     |
|           | Manes <i>et al.</i> (2023)     | Manutenção dos habitats naturais existentes e demonstração de como sua perda aumenta os riscos costeiros.                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|           | Qin <i>et al.</i> (2024)       | Manutenção e uso sustentável de áreas florestais, agrícolas e úmidas existentes, sem envolver restauração ativa de ecossistemas degradados.                                                                                                                                                                                                                                        |
| Tipo 2    | Rendón <i>et al.</i> (2022)    | Ampliação e manutenção de marismas salinas como parte da gestão de riscos, sem detalhar ações de restauração ativa.                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Riegel <i>et al.</i> (2023)    | O estudo centra-se em preferências sociais para manutenção ou aprimoramento dos serviços prestados por marismas, sem detalhar projetos de restauração.                                                                                                                                                                                                                             |
|           | Sunkur <i>et al.</i> (2023)    | Concentra no papel dos mangues existentes na redução do risco de desastres e na adaptação às mudanças climáticas, o que implica uma gestão e manutenção desses ecossistemas para alavancar seus serviços ecossistêmicos. Embora os mangues possam ser restaurados, o foco do artigo é em sua função atual e capacidade de suporte, indicando uma estratégia de gestão sustentável. |
|           | Cai <i>et al.</i> (2021)       | O artigo menciona explicitamente a degradação e recuperação de habitats costeiros como manguezais, indicando ações de restauração em resposta à elevação do nível do mar.                                                                                                                                                                                                          |
|           | Chee <i>et al.</i> (2021)      | Apesar de conter outros tipos, o foco é predominantemente em práticas de restauração de ecossistemas como manguezais e recifes.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Tipo 3    | Cheng; Li (2024)               | O artigo é centrado na restauração ecológica em múltiplos ecossistemas como principal estratégia de SbN.                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           | Çinar <i>et al.</i> (2024)     | O texto prioriza a recuperação de ecossistemas costeiros como estratégia para reconstruir estoques de carbono azul.                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Gallina <i>et al.</i> (2020)   | Apresenta intervenções práticas como restauração de ecossistemas costeiros e fluviais degradados, com detalhamento de técnicas e objetivos de adaptação.                                                                                                                                                                                                                           |
|           | Henud <i>et al.</i> (2024)     | O foco está na recuperação ativa de recifes degradados, com objetivos explícitos de adaptação costeira, proteção e resiliência.                                                                                                                                                                                                                                                    |
|           | Hernández-Delgado (2024)       | O artigo centra-se em ações práticas de restauração de múltiplos habitats costeiros como parte de estratégias de adaptação em ilhas vulneráveis                                                                                                                                                                                                                                    |
|           | Kindeberg <i>et al.</i> (2023) | O artigo discute explicitamente a "restauração ecológica" de ecossistemas degradados, como a restauração de ervas marinhas e gramíneas de dunas, e o aterro de praias, que é uma medida comum para restaurar praias erodidas.                                                                                                                                                      |

Tabela 4. (cont.)

| Tipologia | Citações Indiretas                   | Estratégias abordadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo 3    | Lee <i>et al.</i> (2022)             | O documento descreve diretamente ações de "restauração de manguezais" e "restauração de corais", que são intervenções físicas e ecológicas em ecossistemas degradados. A gestão de áreas protegidas também pode envolver a manutenção e melhoria desses ecossistemas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Liu <i>et al.</i> (2025)             | Embora o documento mencione e aplique "soluções baseadas na natureza híbridas", o objetivo principal e a aplicação dessas soluções são explicitamente para a restauração ecológica de um ecossistema costeiro degradado pela urbanização, erosão e inundação. As soluções híbridas (como a transformação ecológica de quebra-mares de gabião e a restauração de vegetação) são os meios pelos quais a restauração é alcançada, não sendo o foco principal a criação de infraestrutura híbrida por si só, mas sim a recuperação funcional do ecossistema já impactado |
|           | Lovelock <i>et al.</i> (2024)        | A ênfase está na restauração ecológica de manguezais, com recomendações técnicas para evitar falhas em projetos mal planejados. O artigo discute cenários concretos e práticas restaurativas necessárias .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           | Lucatello; Alcántara-Ayala (2024)    | O texto descreve intervenções físicas de restauração ecológica (manguezais, recifes), com ênfase em sua aplicabilidade prática para redução de riscos, o que enquadra a abordagem na Tipologia 3.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|           | Madramootoo; Virgil (2024)           | A proposta de reabilitação ativa de manguezais e pradarias marinhas para proteção costeira caracteriza ações práticas de restauração ecológica, encaixando-se claramente no Tipo 3.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|           | Orchard; Schiel(2021)                | O estudo avalia oportunidades de restaurar habitats degradados (ex.: marismas) como estratégia de adaptação.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|           | Pricope; Shivers (2022)              | Propõe restaurar zonas úmidas vulneráveis como medida de mitigação baseada na natureza.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|           | Reguero <i>et al.</i> (2018)         | Foco principal é na restauração ativa de recifes de ostras e pântanos costeiros para mitigação de riscos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|           | Reid <i>et al.</i> (2025)            | O foco é a regeneração ecológica em escala de paisagem, incluindo restauração de mahinga kai (áreas de coleta de alimento selvagem).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|           | Saddaf <i>et al.</i> (2024)          | O estudo descreve ações de restauração funcional em agroecossistemas degradados, com impactos positivos na resiliência local.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Tipo 4    | Sánchez-Arcilla <i>et al.</i> (2022) | O tema central do artigo é a "ampliação da restauração costeira", o que se alinha diretamente com a restauração de ecossistemas degradados.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|           | Wang <i>et al.</i> (2023)            | O artigo explicitamente descreve o "A proteção e restauração de ecossistemas costeiros, como manguezais, pântanos salgados, planícies de maré e prados de ervas marinhas", o que abrange tanto a proteção de ecossistemas existentes quanto a restauração de ecossistemas degradados.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|           | Schuerch <i>et al.</i> (2022)        | artigo define explicitamente o Recuo Gerido (MR) como uma estratégia para "restaurar habitats costeiros (muitas vezes pântanos salgados)", alinhando-se diretamente com a categoria de "restauração de ecossistemas degradados".                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|           | Angus; Hansom (2021)                 | O estudo detalha ações integradas que combinam natureza e engenharia para adaptação, como manejo comunitário de zonas costeiras e recuperação de dunas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|           | Chiu <i>et al.</i> (2021)            | O foco está na substituição ou complementação de infraestruturas cinzas por soluções híbridas baseadas na natureza.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |



Tabela 4. (cont.)

| Tipologia | Citações Indiretas              | Estratégias abordadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo 4    | Cohn <i>et al.</i> (2021)       | Enfatiza intervenções físicas que combinam soluções ecológicas e engenharia leve (soft engineering).                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|           | Dal Barco <i>et al.</i> (2024)  | A SbN é implementada como medida de engenharia ecológica para estabilizar a linha de costa, com uso de biomassa marinha residual.                                                                                                                                                                                                                                              |
|           | Gomes <i>et al.</i> (2025)      | Descreve projetos que combinam engenharia com elementos naturais (e.g., quebra-mares ecológicos, reabilitação de manguezais urbanos), caracterizando-se como soluções híbridas.                                                                                                                                                                                                |
|           | Knight (2024)                   | O documento discute a utilização de formas de terra costeiras naturais (dunas e praias) como "infraestrutura verde" para proteção. Essa abordagem, que integra elementos naturais em um design para funções de proteção, é um exemplo de infraestrutura inspirada na natureza ou híbrida.                                                                                      |
|           | Losada <i>et al.</i> (2019)     | O artigo descreve combinações de estruturas físicas com intervenções baseadas na natureza para mitigação de risco costeiro. O uso de soluções mistas é detalhado como elemento central das propostas .                                                                                                                                                                         |
|           | Moraes <i>et al.</i> (2022)     | O artigo descreve predominantemente soluções híbridas (combinação de infraestrutura natural e construída), com destaque para zonas úmidas artificiais e intervenções restaurativas associadas à proteção costeira.                                                                                                                                                             |
|           | Morris <i>et al.</i> (2018)     | O foco é em “eco-engenharia” e “soft engineering” como alternativas ou complementos a estruturas rígidas, caracterizando claramente a abordagem como infraestrutura inspirada na natureza.                                                                                                                                                                                     |
|           | Perricone <i>et al.</i> (2023)  | Foco em soluções que combinam engenharia com inspiração na natureza para proteção costeira.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|           | Quagliolo <i>et al.</i> (2023)  | As intervenções analisadas (telhados verdes e bioswales) são exemplos clássicos de infraestrutura inspirada na natureza, implementadas em ambiente urbano.                                                                                                                                                                                                                     |
|           | Siegersma <i>et al.</i> (2023)  | O artigo explora a integração de pântanos salgados com estruturas de proteção costeira tradicionais (como represas de arbustos), o que claramente se alinha com a descrição de "infraestrutura híbrida" que combina elementos naturais e construídos para mitigação de riscos costeiros.                                                                                       |
|           | Unguendoli <i>et al.</i> (2023) | O estudo avalia diretamente a eficácia de "dunas artificiais" e "ervas marinhas" como SbN eco-sustentáveis integradas para proteção costeira e mitigação de inundações. As dunas artificiais são uma forma de infraestrutura inspirada na natureza, e sua integração com prados de ervas marinhas representa uma abordagem híbrida para proteger a linha costeira.             |
|           | Xuan <i>et al.</i> (2022)       | O artigo discute "estratégias de proteção costeira" e "múltiplas linhas de defesa", que incluem "revestimentos, geotubos, cercas de bambu em forma de T", além de mencionar "soluções baseadas na natureza". Isso indica um foco em estruturas construídas ou engenheiradas que podem ser consideradas infraestrutura híbrida ou inspirada na natureza para proteção costeira. |

#### 4.2.1 *Proteção de ecossistemas intactos e Gestão sustentável de ecossistemas*

Os estudos avaliados no contexto do Tipo 1 e Tipo 2 revelaram informações abrangentes sobre a proteção (COPPENOLLE; TEMMERMAN, 2020; HOPPIT *et al.*, 2022; HÜLSEN *et al.*, 2023; MANES *et al.*, 2023) e gestão (QIN *et al.*, 2024; RENDÓN *et al.*, 2022; RIEGEL *et al.*, 2023; SUNKUR *et al.*, 2023) de ecossistemas costeiros.

No presente tópico, os dois tipos são considerados juntos pela percepção de que sem uma gestão efetiva e sustentável dos ecossistemas costeiros, existe uma limitação da proteção dos mesmos. Os estudos focaram principalmente em soluções baseadas na natureza para mitigar riscos de inundações e erosão, além de adaptação às mudanças climáticas. Todos os estudos evidenciaram a importância dos ecossistemas costeiros na proteção contra eventos climáticos extremos e na oferta de diversos serviços ecossistêmicos. Além disso, destacaram que a conservação de ecossistemas costeiros existentes é crucial para contribuir com a mitigação de riscos baseada na natureza.

Os tipos de ecossistemas mencionados incluem zonas úmidas florestas de mangue, pântanos salgados, prados de ervas marinhas e recifes de coral (QIN *et al.*, 2024; COPPENOLLE; TEMMERMAN, 2020; HÜLSEN *et al.*, 2023; HOPPIT *et al.*, 2022; RIEGEL *et al.*, 2023). Estes são identificados como ecossistemas costeiros naturais que oferecem uma barreira contra a propagação de ondas e marés de tempestade, reduzindo os riscos de erosão costeira e inundações (COPPENOLLE; TEMMERMAN, 2020; SUNKUR *et al.*, 2023), além de desempenharem um papel crucial na proteção contra eventos extremos (HÜLSEN *et al.*, 2023).

Além disso, contribuem para a mitigação de riscos de inundações em áreas costeiras urbanas e fornecem serviços ecossistêmicos adicionais, como sequestro de carbono, contribuição para a produção pesqueira e regulação da qualidade da água (COPPENOLLE; TEMMERMAN, 2020). Por exemplo, prados de ervas marinhas saudáveis podem aumentar o pH do ambiente circundante através da fotossíntese, aliviando parcialmente o impacto da acidificação dos oceanos em organismos calcificadores (HOPPIT *et al.*, 2022, *apud* UNSWORTH *ET AL.*, 2012).

A zona costeira do Recife está integrada ao complexo estuarino formado pelos rios Capibaribe, Beberibe, Tejipló, Pina e Jordão (OLIVEIRA *et al.*, 2014) com suas margens originalmente ocupadas por extensos manguezais (DA SILVA MELO; SILVA, 2018). Com e

à elevada urbanização da cidade, apesar de ainda abrigar remanescentes de manguezais, esses ecossistemas vêm sofrendo redução significativa, mesmo sendo legalmente reconhecidos como Áreas de Preservação Permanente. A perda está ligada à expansão urbana, ao aterramento e da deterioração pelo depósito do lixo, e à poluição e pelo descumprimento da legislação (SILVA *et al.*, 2018). Essa degradação compromete funções vitais dos manguezais, como a proteção contra eventos extremos e a captura de carbono. Nesse sentido, algumas estratégias de gestão podem ser aplicadas no intuito de proteger a vegetação de mangue remanescente.

Para lidar com as mudanças climáticas, duas ferramentas de gestão foram citadas nos estudos avaliados, a Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) e as Abordagens baseadas em Ecossistemas. A primeira envolve a identificação e avaliação de riscos e o fornecimento de conselhos para ajustar estruturas industriais, controlar emissões de gases do efeito estufa de atividades não energéticas, mitigar riscos e melhorar o alerta precoce de desastres climáticos. A ideia central é incorporar os impactos climáticos nas fases iniciais do desenvolvimento de políticas, planos e programas para medidas robustas de mitigação e adaptação. Um exemplo é a reserva de áreas de conservação da natureza em zonas costeiras e marinhas, o que pode aumentar significativamente a adaptação à salinização futura causada pela elevação do nível do mar (QIN *et al.*, 2024).

Nos oceanos, as Áreas Marinhas Protegidas (AMPs) são ferramentas eficazes de gestão para conservar habitats, espécies e ecossistemas marinhos, aumentando sua resiliência às mudanças ambientais ao reduzir pressões como pesca e infraestrutura (HOPPIT *et al.*, 2022; apud LEVY; BAN, 2013; SALA *et al.*, 2021; BATES *et al.* 2019). Elas aceleram a recuperação após distúrbios e promovem benefícios como maior biodiversidade, biomassa e proteção de áreas de desova (HOPPIT *et al.*, 2022; apud MELLIN. *et al.*, 2016; LESTER, S. *et al.*, 2009). Além disso, a proteção de ecossistemas oceânicos e os serviços que eles fornecem é o foco da "Década da Ciência Oceânica e Restauração de Ecossistemas" das Nações Unidas, em apoio ao objetivo de desenvolvimento sustentável 14 (HOPPIT *et al.*, 2022).

No entanto, ao longo da costa de Pernambuco, foi estabelecida mais de uma AMP, como a APA Marinha Recifes de Serrambi e a APA Costa dos Corais, que abrange o litoral sul do estado (NUNES *et al.*, 2021). Além disso, embora as AMPs tenham alto potencial para mitigar impactos como o aumento da temperatura e acidificação dos oceanos, sua efetividade está diretamente ligada ao grau de proteção (ex: proibição de pesca), à governança participativa e ao reconhecimento legal (HOPPIT *et al.*, 2022). Em áreas costeiras como Recife, onde os ecossistemas marinhos sofrem pressão intensa de atividades urbanas e industriais, o

estabelecimento de AMPs exige articulação entre órgãos ambientais, sociedade civil e usuários tradicionais, além de mecanismos de fiscalização e financiamento estáveis. A experiência internacional revela que a gestão sustentável e adaptativa desses espaços é essencial para gerar benefícios de longo prazo em termos de resiliência costeira.

Por sua vez, as AbE são cada vez mais defendidas para aproveitar a robusta capacidade adaptativa da natureza e proteger as pessoas contra suas consequências negativas. As AbE são definidas como o uso da biodiversidade e seus serviços ecossistêmicos adicionais dentro de um quadro mais amplo de adaptação para ajudar as nações a se ajustarem às mudanças climáticas (SUNKUR *et al.*, 2023). Ao reconhecer os múltiplos serviços ecossistêmicos fornecidos pela natureza, essa abordagem contribui para aumentar a resiliência urbana, a segurança alimentar e a justiça socioambiental nas regiões costeiras (CBD, 2019; NORDIC COUNCIL OF MINISTERS, 2024). Por isso, tem sido amplamente recomendada por organizações internacionais como a ONU e a IUCN como um caminho eficaz e sustentável frente aos desafios da mudança climática e da degradação ambiental (NAÇÕES UNIDAS, 2021; IUCN, 2020a,b).

Dentro da AbE, a Gestão Baseada em Ecossistemas (GBE) é uma estratégia de avaliação e ação que, ao lidar com o desafio de suprir demandas globais e considerar impactos locais, possui o potencial de qualificar as interações socioecológicas (CORRÊA *et al.*, 2021; LONG *et al.*, 2015). Em contraste com a gestão tradicional e insuficiente que foca em um único setor, a GBE é uma estratégia para a gestão integrada dos recursos que valoriza o envolvimento das partes interessadas em um processo em que as decisões refletem a escolha da sociedade (LONG *et al.*, 2015). Além disso, adota uma perspectiva de longo prazo e adaptativa, capaz de responder às mudanças ambientais e sociais com base em evidências científicas e saberes locais (IUCN, 2020a,b; UNFCCC, 2012).

Uma outra estratégia importante no manejo de habitat e políticas de mitigação climática é a valoração dos serviços ecossistêmicos (RIEGEL *et al.*, 2023). A valoração dos serviços ecossistêmicos é o processo de identificar, quantificar e captar o valor dos benefícios diretos e indiretos que os ecossistemas fornecem à sociedade. Tais serviços são fundamentais para o bem-estar humano e se organizam em quatro categorias, conforme a Avaliação do Milênio: provisão (como alimentos, água e madeira), regulação (como regulação climática e purificação da água), culturais (como recreação, turismo e valores espirituais) e de suporte (como ciclagem de nutrientes e formação do solo) (ANDRADE; ROMEIRO, 2009). A valoração dos serviços ecossistêmicos permite que suas múltiplas dimensões de valor sejam incorporadas em processos de tomada de decisão, contribuindo para orientar políticas públicas, estratégias de conservação

e ações de planejamento (ANDRADE; ROMEIRO, 2009). A valoração dos serviços ecossistêmicos permite tornar visíveis e compreensíveis os múltiplos benefícios que a natureza oferece à sociedade. Por meio desse processo, é possível estimar, por exemplo, quanto uma floresta pode economizar em custos de tratamento de água ao exercer funções naturais de filtragem, ou ainda calcular o valor do carbono estocado em manguezais, o que contribui para sua conservação e recuperação. Também podem ser mensurados os ganhos econômicos gerados pelo turismo ecológico em áreas naturais preservadas, destacando sua importância socioeconômica. Ao traduzir esses benefícios em termos econômicos, sociais e ambientais, a valoração amplia a percepção pública e subsidia decisões mais informadas sobre o uso e a gestão dos ecossistemas, envolvendo diferentes setores da sociedade em sua proteção. (ANDRADE; ROMEIRO, 2009; DE SANTANA *et al.*, 2018; BRAGA *et al.*, 2024).

### ***Os manguezais de Recife***

No contexto recifense, a gestão sustentável dos ecossistemas costeiros exige uma análise mais aprofundada de situações concretas em curso, como o caso do Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro (PNMMJC) e da carcinicultura tradicional na Ilha de Deus. Esses dois elementos ilustram, de maneira eloquente, os potenciais e os desafios da aplicação prática das SbN em uma metrópole costeira densamente ocupada.

O PNMMJC, criado formalmente em 2010, corresponde a um dos maiores manguezais urbanos do mundo, abrangendo cerca de 320 hectares entre os rios Jordão, Pina, Tejipió e Capibaribe (**Figura 10**). Trata-se de uma área reconhecida como Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPA) e Área de Preservação Permanente (APP), cujas funções ecológicas são amplamente destacadas: retenção de sedimentos, proteção contra marés, habitat de reprodução e alimentação de fauna aquática, e regulação climática (ANDRADE; PEREIRA, 2014). No entanto, a realidade do parque está longe de refletir seu status legal. A construção da Via Mangue, projeto viário de grande porte instalado entre 2011 e 2014, gerou a supressão de áreas significativas de vegetação de mangue, promovendo alterações na hidrodinâmica local, fragmentação ecológica e realocação de comunidades tradicionais sem plena compensação ambiental (ANDRADE; PEREIRA, 2014).

Além disso, o parque convive com uma tensão permanente entre diferentes modelos de uso: de um lado, a valorização de seus atributos ecológicos como área protegida; de outro, sua ocupação histórica por populações ribeirinhas e práticas produtivas tradicionais, como a carcinicultura desenvolvida na Ilha de Deus. Essa atividade, praticada desde os anos 1980 por famílias locais, constitui uma forma de adaptação socioeconômica diante do declínio da pesca

artesanal, combinando saberes empíricos acumulados ao longo de décadas com técnicas acessíveis de cultivo de camarões em viveiros escavados no próprio mangue (BENTO, 2012).

**Figura 10.** Ilustração do trajeto da Via Manguê e das áreas que abrange, Recife-PE



Fonte: Andrade e Pereira (2014).

A carcinicultura local, embora informal, representa uma importante fonte de renda e segurança alimentar para a comunidade, estando diretamente relacionada à manutenção do vínculo cultural com o território. Ainda assim, sua permanência vem sendo questionada por setores ambientais e pelo poder público, que frequentemente associam a prática à degradação do ecossistema. Tais conflitos refletem disputas entre abordagens preservacionistas e conservacionistas com viés socioambiental, nas quais o reconhecimento da legitimidade dos saberes tradicionais é frequentemente ignorado em nome de uma concepção puramente ecológica de conservação (BENTO, 2012).

A ausência de diálogo efetivo com as comunidades envolvidas agrava esse cenário. A criação do parque foi realizada sem consulta pública ampla, gerando desconfiança e resistência por parte dos moradores da Ilha de Deus e de outros núcleos ribeirinhos que ocupam historicamente a área (BENTO, 2012). Esse quadro se agrava quando se observa que o parque tem sido utilizado também como instrumento de compensação ambiental de obras urbanas, como a própria Via Manguê, esvaziando ainda mais o protagonismo local na gestão do território (BENTO, 2012).

Contudo, iniciativas como o projeto “Maravilhas da Ilha de Deus”, coordenado pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), demonstram que é possível integrar conhecimento técnico-científico com práticas tradicionais, promovendo a sustentabilidade da carcinicultura de base comunitária. O projeto propôs a manutenção dos viveiros existentes com controle social, capacitação técnica e regularização fundiária, buscando a compatibilização entre conservação ambiental e uso sustentável (BENTO, 2012).

A importância ecológica e simbólica dos manguezais de Recife também se reflete em manifestações culturais como o movimento Mangubeat, que reivindica uma visão integrada entre biodiversidade e diversidade cultural (MELO NETO, 2011). Essa perspectiva reforça o entendimento de que a proteção dos ecossistemas costeiros em Recife não pode prescindir do reconhecimento de seus valores culturais, identitários e históricos.

Por fim, estudos recentes reforçam que a carcinicultura industrial no Nordeste brasileiro tem sido uma das maiores causas da degradação de manguezais, ao promover desmatamento, lançamento de efluentes e conflitos com comunidades tradicionais. Isso inclui o uso de substâncias tóxicas, ocupação irregular de áreas protegidas e desequilíbrios tróficos nos ecossistemas (JÚNIOR *et al.*, 2020). No entanto, esses impactos não devem ser generalizados a todas as formas de carcinicultura, especialmente aquelas de base comunitária e conduzidas com respeito aos ciclos ecológicos locais.

Dessa forma, o caso do Parque dos Manguezais e da carcinicultura na Ilha de Deus evidencia que a gestão sustentável de ecossistemas urbanos deve reconhecer a centralidade dos sujeitos que historicamente habitam e manejam esses espaços. Estratégias de SbN não devem ser impostas como modelos prontos, mas construídas em diálogo com os saberes locais, respeitando a diversidade socioecológica e promovendo formas participativas e inclusivas de governança.

Para Recife, isso significa valorizar os manguezais não apenas como infraestrutura ecológica urbana, mas também como territórios culturais e produtivos, cuja gestão exige a articulação entre políticas ambientais, sociais, habitacionais e urbanísticas. O reconhecimento da carcinicultura tradicional como prática compatível com o uso sustentável do mangue pode ser uma chave para reverter processos de exclusão territorial e consolidar uma abordagem verdadeiramente integrada e equitativa de adaptação baseada na natureza.

#### **4.2.2 Restauração de ecossistemas degradados**

Os artigos classificados na restauração de ecossistemas degradados como estratégias de adaptação às mudanças climáticas para proteção da zona costeira, tiveram citaram ações como reabilitação de manguezais (CHEE *et al.*, 2021; HERNÁNDEZ-DELGADO, 2024; LOVELOCK *et al.*, 2024; CAI *et al.*, 2021; HÜLSEN *et al.*, 2023), pradarias marinhas (CHEE *et al.*, 2021; MADRAMOOTOO; VIRGIL, 2024), recifes de coral e de ostras (e.g., CHEE *et al.*, 2021; CAI *et al.*, 2021; LEE *et al.*, 2022; REGUERO *et al.*, 2018), pântanos salgados e florestas de kelp (ÇINAR *et al.*, 2024), dunas costeiras (e.g., KINDEBERG *et al.*, 2023) e zonas úmidas costeiras (GALLINA *et al.*, 2020; PRICOPE; SHIVERS, 2022; REGUERO *et al.*, 2018).

Especificamente, os artigos ressaltam a relevância das estratégias para a diminuição do impacto do aumento do nível do mar e da erosão costeira, com uma ênfase clara em recuperar funções ecossistêmicas já comprometidas. Além disso, os planos de adaptação costeira baseados na restauração dos ecossistemas costeiros úmidos e marinhos contribuem com a mitigação climática por meio do carbono azul costeiro, já que são importantes sumidouros de carbono (WANG *et al.*, 2023; SÁNCHEZ-ARCILLA *et al.*, 2022, apud WANG *et al.*, 2021; NAGELKERKEN *et al.*, 2015). Nos próximos tópicos serão discutidos a restauração dos ecossistemas costeiros de transição e marinhos tropicais, i.e., manguezais, recifes de corais e gramas marinhas, dunas costeiras e restingas.

#### 4.2.2.1 *Manguezais*

O reflorestamento de manguezais, tem se destacado como uma solução eficaz para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, além de restaurar serviços ecossistêmicos essenciais. Estudos demonstram que esses ecossistemas são sumidouros de carbono azul altamente eficientes, armazenando grandes quantidades de CO<sub>2</sub> nos sedimentos e na biomassa, o que contribui significativamente para a redução das emissões globais (SONG *et al.*, 2023; ARIFANTI *et al.*, 2022). Além disso, os manguezais protegem áreas urbanas contra inundações, erosão costeira e tempestades tropicais, sendo especialmente relevantes para Recife, que enfrenta desafios crescentes devido ao aumento do nível do mar e à ocupação desordenada do litoral (RAO, 2009; BUELOW *et al.*, 2022).

Estudos indicam que, quando bem estabelecidos, os manguezais podem reduzir em até 99% da energia das ondas, além de estabilizar a linha de costa e atuar como barreiras contra tempestades. Para alcançar esse nível de proteção, é necessária uma largura mínima superior a 500 metros de vegetação contínua (SUNKUR *et al.*, 2023), o que representa um desafio para áreas urbanizadas, como Recife, onde os manguezais remanescentes costumam ser estreitos e fragmentados. Estima-se que 100 m de largura de manguezal pode reduzir a altura e a energia



das ondas em até 50 %, enquanto reduções nas marés de tempestade de 5 a 50 cm por quilômetro linear de manguezal (LEWIS; BROWN, 2024). Para oferecer proteção efetiva contra o avanço do nível do mar, é recomendada a restauração de faixas contínuas de manguezal entre os níveis médios das marés e a maré alta média, com estruturas vegetativas densas que promovam sedimentação e dissipação da energia das ondas (BEESTON *et al.*, 2023).

Além disso, a efetividade dos manguezais restaurados depende do seu estágio de maturação. Em estratégias de restauração passiva, em que a hidrologia é reestabelecida sem replantio direto, o tempo necessário para que o ecossistema atinja um grau funcional de maturidade varia entre 5 e 15 anos, dependendo da disponibilidade de propágulos e das condições ambientais locais (LOVELOCK *et al.*, 2024). Por isso, o planejamento deve ser de longo prazo e incluir monitoramento contínuo.

Além dos benefícios ecológicos, o reflorestamento de manguezais pode gerar impactos socioeconômicos positivos, incluindo o fortalecimento da economia local por meio da pesca, do turismo sustentável e da criação de empregos (WALTON *et al.*, 2006; BASYUNI *et al.*, 2018). Iniciativas bem-sucedidas na Indonésia demonstraram que a participação comunitária na restauração pode aumentar a aceitação social e garantir a sustentabilidade dos projetos (BASUKI *et al.*, 2022). No entanto, como evidenciado no tópico anterior, desafios como conflitos de uso da terra e questões de regularização fundiária podem dificultar a implementação dessas iniciativas em áreas urbanizadas como Recife (CORMIER-SALEM; PANFILI, 2016; AJONINA *et al.*, 2017).

Do ponto de vista prático, o sucesso do reflorestamento também depende da escolha criteriosa das espécies – pois algumas possuem maior capacidade de estabilizar sedimentos e sequestrar carbono a longo prazo (WU *et al.*, 2020; LOCATELLI *et al.*, 2015) – que devem ser espécies nativas adaptadas às variações de salinidade e aos regimes de marés da região (OXMANN *et al.*, 2010; LE MINOR *et al.*, 2019). Isso garante a resiliência dos ecossistemas restaurados (LE MINOR *et al.*, 2019). De fato, projetos de reflorestamento com a escolha inadequada das espécies do local pode levar à erosão das mudas e ao insucesso da restauração (BARNUEVO *et al.*, 2017). Ainda existem outras recomendações que devem ser consideradas, como plantar diversas espécies, manter espaço suficiente entre as árvores para o crescimento, incluir as espécies naturalmente dominantes e criar riachos de maré, a fim de reproduzir nas áreas reabilitadas algumas das principais características ecossistêmicas das florestas de mangue naturais (ASAEDA *et al.*, 2012; BARNUEVO *et al.*, 2017).

Adicionalmente, a capacidade de regeneração natural dos manguezais também é um fator chave para a restauração bem-sucedida, desde que haja condições ambientais adequadas (HARUN-OR-RASHID *et al.*, 2009; JIA *et al.*, 2018). A qualidade ambiental da área a ser

restaurada é um fator determinante para o sucesso dos projetos. Os manguezais podem atuar como filtros naturais para metais pesados e outros poluentes, mas também podem acumular contaminantes nos sedimentos, o que pode impactar negativamente a fauna local (ZHOU *et al.*, 2010; ZHAO *et al.*, 2012; UDDIN *et al.*, 2024). Em Recife, onde há um histórico de poluição industrial e despejo inadequado de resíduos (SILVA *et al.*, 2011; ZANARDI-LAMARDO *et al.*, 2016; ALVES, 2014), inclusive no PNMMJC (GUEDES *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2024), os processos de remediação ambiental antes da implementação do reflorestamento são importantes para evitar impactos secundários na biodiversidade.

O sucesso do reflorestamento de manguezais, também depende intrinsecamente do planejamento integrado, conhecimento científico, políticas públicas e da participação comunitária (SONG *et al.*, 2023; BASUKI *et al.*, 2022). A falta de engajamento social compromete iniciativas, enquanto casos bem-sucedidos demonstram que políticas estruturadas e investimentos contínuos garantem a efetividade da restauração (ELSTER, 2000; IFTEKHAR, 2008; JIA *et al.*, 2018; ARIFANTI *et al.*, 2022). Projetos na China e no Senegal mostram que planejamento de longo prazo e envolvimento comunitário são essenciais (JIA *et al.*, 2018; AJONINA *et al.*, 2017).

No contexto brasileiro, as principais barreiras à restauração de manguezais envolvem a ausência de dados sobre a dinâmica sedimentar e hidrológica, a sobreposição de competências institucionais e a falta de financiamento estável para manter os projetos ao longo do tempo (GOMES *et al.*, 2025). Ainda assim, experiências positivas foram registradas em estuários do Nordeste, incluindo a cidade do Recife, onde viveiros comunitários e práticas tradicionais de manejo têm sido incorporados como estratégias de engajamento e eficácia ecológica (GOMES *et al.*, 2025).

Um exemplo emblemático vem da Ilha de Deus, onde estudos apontaram um crescimento de 108,5% na cobertura vegetal de mangue entre 2013 e 2017, evidenciando a resiliência do ecossistema em áreas com menor interferência antrópica direta. Em contraste, outras áreas da cidade sofreram perdas de até 24,7% da cobertura de manguezal em apenas dois anos, associadas ao acúmulo de resíduos e à expansão de viveiros sem controle ambiental, destacando a vulnerabilidade desses ambientes frente à pressão urbana (SILVA, 2024).

De modo geral, os estudos analisados reforçam que a restauração de manguezais possui elevado potencial de aplicação prática em áreas costeiras urbanizadas, desde que as intervenções considerem aspectos ecológicos, físicos e sociais de forma integrada. Os estudos recomendam que os projetos de restauração ecológica considerem: (i) Faixa mínima restaurada entre 100 e 300 m, a partir da margem fluvial ou costeira; (ii) Extensão transversal cobrindo toda a zona entremarés, ou seja, entre o nível médio do mar e a maré alta média (LEWIS;

BROWN, 2024); (iii) Composição vegetal densa e diversificada, com espécies nativas como *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* (PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE, 2020, e.g. **Figura 11**), e *Avicennia schaueriana* (MOURA, 2021), adaptadas a solos alagadiços e capazes de promover estabilização de sedimentos.

Em Recife, o reflorestamento pode fortalecer a resiliência costeira e mitigar impactos climáticos, mas deve ser integrado a outras medidas, como sistemas de drenagem eficientes e conservação de ecossistemas naturais (RAO, 2009; LE MINOR *et al.*, 2019). No entanto a falta de espaço devido à elevada ocupação das margens dos rios pode representar um desafio significativo que pode inviabilizar a estratégia. Além disso, devem ser realizados estudos que contemplem a identificação das espécies e a técnica de plantio sejam adaptadas às condições locais para maximizar os benefícios ambientais e evitar falhas comuns observadas em outros projetos globais. O monitoramento contínuo das propriedades do solo e da hidrodinâmica costeira e estuarina deve integrar a estratégia de reflorestamento, aliada à melhoria da infraestrutura e proteção dos ecossistemas costeiros. Por último, é fundamental que os projetos implementem práticas de modelagem hidrodinâmica local, taxas de sedimentação e variações do nível do mar, a fim de ajustar a largura e a densidade da vegetação restaurada ao contexto ambiental específico da bacia urbana do Recife (BEESTON *et al.*, 2023; LEWIS; BROWN, 2024).

**Figura 11.** Árvore de mangue branco (*Laguncularia racemosa*) observada na margem do estuário do Rio Tejió próximo a ponte da Avenida Recife. O rio Tejió encontra-se com níveis altos contaminação

por esgoto e resíduos sólidos (RECIFE CIDADE PARQUE, 2025b). A presença de árvores de mangue apesar das condições ruins, demonstra a resiliência desses ecossistemas.



Fonte: Cortesia de Pedro Melo (2025).

#### 4.2.2.2 *Recifes de coral e pradarias marinhas*

As soluções baseadas na natureza voltadas à restauração de recifes de coral e habitats marinhos associados, recifes de ostras e pradarias de gramas marinhas, têm sido amplamente discutidas como alternativas promissoras para o enfrentamento de riscos costeiros crescentes (CHEE *et al.*, 2021; MADRAMOOTOO; VIRGIL, 2024; CAI *et al.*, 2021; LEE *et al.*, 2022).

Esses ecossistemas atuam como a primeira linha de defesa contra ondas e tempestades, promovendo significativa redução de energia hidrodinâmica antes que alcance a costa.

No entanto, embora recifes de ostras sejam reconhecidos por oferecerem múltiplos serviços ecossistêmicos, incluindo melhoria da qualidade da água e suporte à biodiversidade, sua aplicação direta como barreira física eficaz contra o aumento do nível do mar e erosão costeira é limitada em alguns contextos. Isso se deve, principalmente, à baixa altura e à fragilidade estrutural dessas formações em comparação com outros habitats como manguezais e recifes de coral. Estudos apontam que os efeitos de estabilização costeira fornecidos pelos recifes de ostras restaurados são geralmente localizados e pouco expressivos, sendo mais relevantes durante eventos de vento intenso e em áreas protegidas (LA PEYRE *et al.*, 2014). Além disso, sua implantação em ambientes marinhos abertos requer condições bastante específicas e estruturas de engenharia mais robustas para resistirem à energia das ondas (HOWIE; BISHOP, 2021), o que pode não ser viável em trechos urbanizados e expostos como os da orla de Recife. Portanto a seguir, serão abordados apenas a recuperação de recifes de coral e pradarias marinhas como estratégias para proteção costeira.

### ***Recifes de coral***

A restauração de recifes de corais tem sido proposta como uma resposta estratégica à degradação acelerada desses ecossistemas, especialmente em contextos em que a recuperação natural é limitada por fatores como baixa recrutamento larval, poluição costeira e eventos de branqueamento em larga escala (HEIN *et al.*, 2021; PEIXOTO *et al.*, 2024). Essa abordagem busca reabilitar funções ecológicas essenciais, como a formação de habitat, proteção costeira, suporte à biodiversidade e provisão de serviços ecossistêmicos culturais e econômicos (AMMAR, 2009; LIRMAN; SCHOPMEYER, 2016).

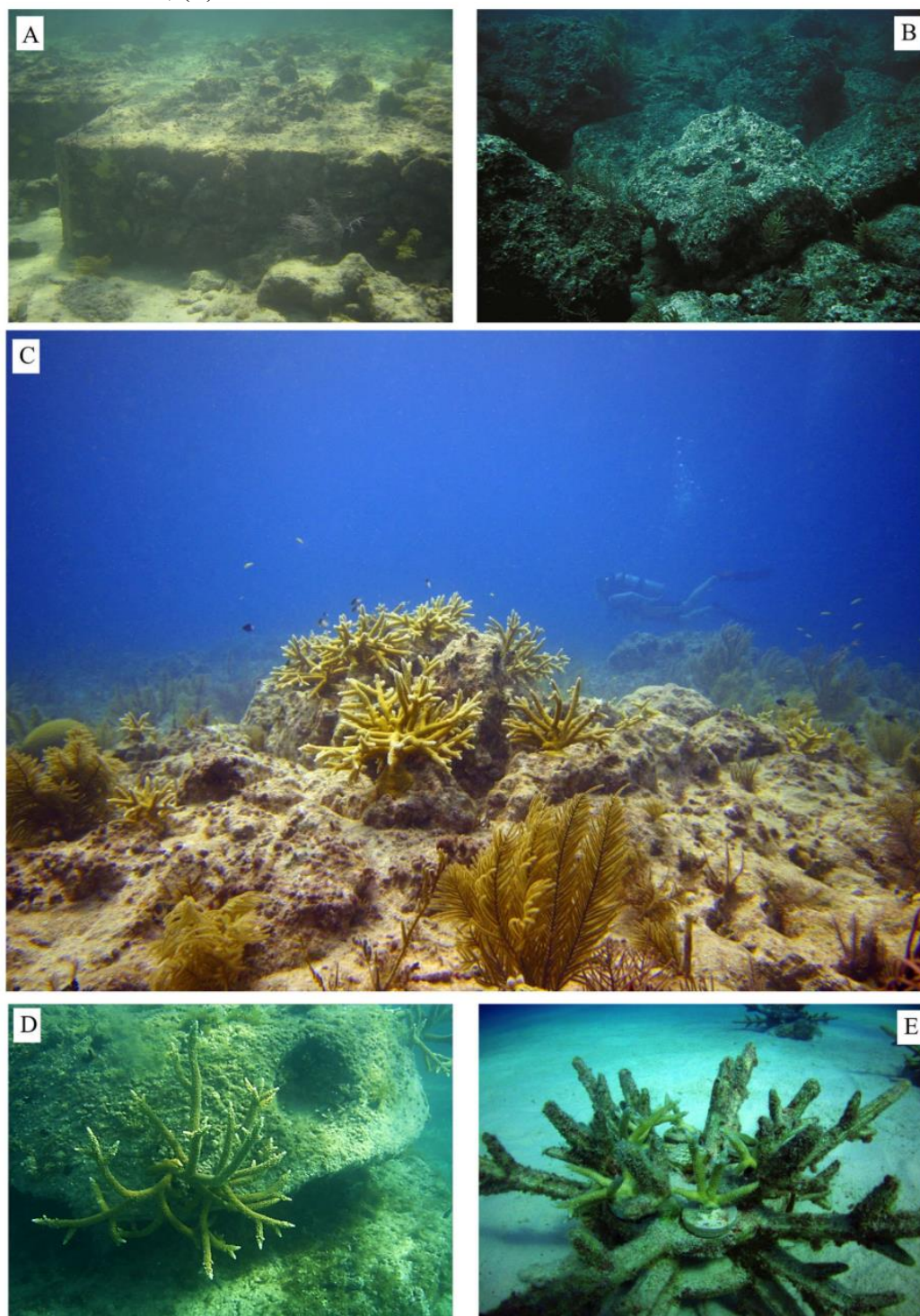
Dentre as técnicas mais difundidas destaca-se o “coral gardening”, que consiste na maricultura de fragmentos de corais em viveiros (in situ ou ex situ), seguida do transplante para áreas degradadas (LIRMAN; SCHOPMEYER, 2016; EPSTEIN; BAK, 2016). Essa técnica tem sido amplamente utilizada em contextos como o Caribe, o Sudeste Asiático e a Austrália, sendo também referida como “jardinagem de corais” em iniciativas comunitárias e turísticas (VARDI *et al.*, 2021; SUGGETT *et al.*, 2023). Outras estratégias incluem a reposição larval via propagação sexual assistida, o uso de estruturas artificiais como moldes de cimento, “reef balls”, “EcoReefs” (**Figura 12**) feitas com materiais ambientalmente seguros e projetadas para imitar a complexidade estrutural dos recifes naturais, facilitando a fixação de corais e o retorno da biodiversidade marinha (LIRMAN; SCHOPMEYER, 2016). Além de abordagens emergentes como a evolução assistida, que envolve o uso de genótipos selecionados para tolerância térmica (HUGHES *et al.*, 2023; PEIXOTO *et al.*, 2024; RAZAK *et al.*, 2022).

Na Indonésia, por exemplo, foram plantados mais de 965.000 fragmentos de corais entre 1990 e 2020, utilizando mais de 120.000 unidades de recifes artificiais, principalmente em concreto e aço. No entanto, apenas 16% dos projetos incluíram planos de monitoramento após a instalação (RAZAK *et al.*, 2022). Essa falta de padronização e acompanhamento de longo prazo também foi apontada como uma das principais lacunas na literatura (HEIN *et al.*, 2021; VARDI *et al.*, 2021).

O sucesso das intervenções depende de fatores ambientais e operacionais. Projetos realizados em locais com boa qualidade da água, substrato estável (como a ausência de campos de entulho instáveis), e baixos níveis de estresse antrópico tendem a apresentar maiores taxas de sobrevivência e crescimento dos corais transplantados (BAYRAKTAROV *et al.*, 2019; RAZAK *et al.*, 2022). Estudos indicam que campos de entulho impedem a regeneração natural mesmo quando há suprimento de larvas e boa qualidade da água, exigindo soluções de estabilização antes da restauração (RAZAK *et al.*, 2022). Além disso, abordagens de engenharia ecológica vêm ganhando destaque por incorporarem espécies engenheiras (autogênicas e alogênicas) que favorecem o desenvolvimento de comunidades complexas e resilientes, adaptadas às novas condições ambientais (RINKEVICH, 2021). Esforços com duração mínima de três anos e com engajamento comunitário e científico apresentam resultados melhores em termos ecológicos e de gestão (PEIXOTO *et al.*, 2024; YEEMIN *et al.*, 2006). De fato, a experiência na Tailândia demonstrou que o envolvimento de comunidades locais em todas as etapas do projeto é chave para o sucesso, especialmente em áreas impactadas por turismo e sobrepesca (YEEMIN *et al.*, 2006).



**Figura 12.** Estruturas de restauração de recifes: (A) Módulos de; (B) Blocos de; (C) Colônias de *Acropora cervicornis* cultivadas em viveiros, fixadas nos módulos; (D) Colônias de *A. cervicornis* fixadas em “reef balls”; (E) Colônias de *A. cervicornis* fixadas em EcoReefs.



Fonte: Lirman e Schopmeyer (2016)

No entanto, há limitações importantes quanto à viabilidade e à escalabilidade. A maioria dos projetos ocorre em escalas muito reduzidas: aproximadamente 96% abrangem menos de 1 hectare, sendo a área mediana restaurada de apenas 71 m<sup>2</sup> (HUGHES *et al.*, 2023; SUGGETT

*et al.*, 2023). Na prática, iniciativas como a da Grande Barreira de Corais, apesar do aporte superior a US\$ 250 milhões em projetos de restauração, ainda enfrentam o desafio de sustentação financeira e de estruturação de objetivos de longo prazo (SUGGETT *et al.*, 2023). Os custos variam amplamente entre as técnicas utilizadas, com valores que vão de US\$ 50.000 a mais de US\$ 1.000.000 por hectare, superando em até 90 vezes os custos de restauração de ecossistemas como manguezais ou pradarias marinhas (BAYRAKTAROV *et al.*, 2019; HUGHES *et al.*, 2023).

Em termos de eficácia, a taxa média de sobrevivência de corais transplantados é de aproximadamente 60%, sendo afetada por condições ambientais locais e pelo estágio ontogenético dos fragmentos utilizados (EPSTEIN; BAK, 2016; RINKEVICH, 2021). Além disso, muitos projetos carecem de métricas padronizadas e relatórios comparativos, dificultando a avaliação de impactos sobre processos ecológicos mais amplos (HEIN *et al.*, 2021; VARDI *et al.*, 2021).

Há, no entanto, evidências de casos bem-sucedidos. No arquipélago de Spermonde (Indonésia), a restauração transformou orçamentos de carbono negativos em positivos após quatro anos. Nas Filipinas, a inoculação de larvas de *Acropora tenuis* resultou em recuperação estrutural e aumento da abundância de peixes em áreas anteriormente sem recrutamento natural. Na Flórida, após o encalhe de navios como o Columbus Iselin, técnicas de remoção de detritos e transplante de corais permitiram a reestruturação tridimensional do substrato, com monitoramento contínuo (JAAP, 2000; PEIXOTO *et al.*, 2024).

Para cidades como Recife, um dos maiores desafios à restauração de recifes está na turbidez elevada da água costeira, causada pelo aporte de sedimentos, esgoto doméstico e drenagem urbana difusa. Estudos indicam que a turbidez — especialmente quando instável ou abrupta — pode reduzir as taxas de crescimento de corais em até 30% e comprometer sua resiliência a estresses térmicos e luminosos. Embora existam recifes que se desenvolvem naturalmente em águas turvas (os chamados *turbid reefs*), sua viabilidade está associada a condições ambientais específicas, como turbidez contínua e espécies adaptadas à baixa luminosidade. Isso não parece ser o caso do litoral recifense, onde os episódios de turbidez estão ligados a fluxos urbanos e pluviométricos intensos, com grandes variações de carga suspensa ao longo do tempo (ANTHONY; LARCOMBE, 2003; SAMPERIZ *et al.*, 2025; ZWEIFLER *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a restauração de recifes em Recife só será viável se integrada a um conjunto de ações complementares, como: a redução da carga de sedimentos por meio de reflorestamento de margens e contenção de escoamento superficial; a ampliação da cobertura de manguezais e gramas marinhas para promover decantação natural de partículas; e, sobretudo,



o investimento em saneamento básico e controle de poluição difusa. Além disso, será necessário identificar espécies de corais tolerantes à turbidez, com potencial de adaptação a ambientes litorâneos urbanos.

É importante destacar que, embora os estudos analisados sobre restauração de recifes enfatizem a recuperação de ecossistemas de coral tropicais, sua aplicabilidade direta ao contexto de Recife deve ser analisada com cautela, uma vez que o litoral recifense não possui, historicamente, recifes de coral estruturais. Em vez disso, a cidade é marcada por recifes naturais de arenito — formações geológicas conhecidas como *beachrocks*, formadas por cimentação natural de sedimentos arenosos ao longo do tempo (FERREIRA JÚNIOR, 2023).

**Figura 13.** Formação de beachrock na Praia de Boa Viagem, Recife (PE). Beach rocks são formações rochosas cimentadas naturalmente, comuns em zonas costeiras tropicais, e desempenham papel importante na dissipação de energia das ondas e na proteção costeira natural.



Fonte: Wikimedia Commons (2020)

Essas estruturas rochosas, que deram nome à cidade, exercem funções semelhantes às dos recifes de coral no que diz respeito à dissipação de energia de ondas, formação de piscinas naturais e proteção da linha de costa. No entanto, não são recifes biogênicos, ou seja, não são construídos por organismos como corais construtores ou algas calcárias. Assim, propor a introdução de corais para formar barreiras vivas em Recife não se configura como uma ação de

restauração ecológica propriamente dita, mas sim como a criação de um novo tipo de ecossistema, com base em modelos de bioengenharia costeira.

Esse tipo de intervenção precisa ser tratado com rigor técnico e ecológico, pois envolve riscos associados à introdução de espécies exóticas. Embora algumas espécies de corais, como sejam nativas do litoral nordestino, sua ocorrência no litoral recifense é limitada e restrita a condições ambientais muito específicas (BARRADAS *et al.*, 2010). A introdução deliberada de outras espécies de corais — ainda que com o intuito de promover serviços ecossistêmicos — pode configurar um processo de bioinvasão, com potencial para alterar a biodiversidade local, competir com espécies bentônicas nativas e modificar dinâmicas ecológicas já estabelecidas.

Nesse sentido, qualquer iniciativa que vise a “restauração” de recifes de coral em Recife precisa ser tecnicamente caracterizada como criação de habitat ou reabilitação funcional, e não como restauração de um ecossistema historicamente presente. Para que tal proposta seja viável, seria necessário: realizar estudos ambientais aprofundados sobre turbidez, sedimentação, qualidade da água e composição bentônica local; utilizar apenas espécies nativas e adaptadas às condições da plataforma continental rasa da região; estabelecer mecanismos de monitoramento ecológico de longo prazo; desenvolver um arcabouço legal e ético que respalde a intervenção, especialmente no que tange ao risco de introdução de organismos não nativos.

Portanto, no contexto de Recife, a utilização de estruturas recifais vivas como SbN deve como uma estratégia experimental e altamente controlada, voltada à reabilitação de funções ecológicas perdidas e à mitigação de riscos climáticos. Para fins de planejamento, áreas como o Pina, Brasília Teimosa e o entorno do molhe do Porto do Recife poderiam ser priorizadas para estudos de viabilidade e projetos-piloto, desde que respaldadas por dados atualizados sobre qualidade da água, correntes de fundo e pressão antrópica.

A adoção dessa abordagem demanda uma articulação robusta entre ciência, gestão ambiental e políticas públicas de urbanismo e saneamento, com especial atenção aos limites ecológicos do território. A experiência internacional também sugere que projetos bem-sucedidos incluem educação ambiental, monitoramento contínuo e participação comunitária ativa (HERNÁNDEZ-DELGADO, 2024; MADRAMOOTOO; VIRGIL, 2024).

Em síntese, a restauração de recifes não deve ser compreendida como uma solução autônoma para a crise ambiental que afeta esses ecossistemas, mas sim como uma ferramenta complementar que pode gerar benefícios localizados quando integrada a ações de mitigação dos estressores crônicos e a políticas de conservação ambiental (HUGHES *et al.*, 2023; HEIN *et al.*, 2021; PEIXOTO *et al.*, 2024; SUGGETT *et al.*, 2023). Sua eficácia está condicionada a

abordagens interdisciplinares, planejamento de longo prazo, financiamento sustentável e engajamento ativo de comunidades locais e da ciência.

### ***Pradarias marinhas***

A restauração de pradarias marinhas tem se consolidado como uma estratégia eficaz para a recuperação de ecossistemas costeiros e mitigação das mudanças climáticas. Espécies como *Zostera marina*, *Cymodocea nodosa* e *Posidonia oceanica* desempenham funções ecológicas fundamentais, como estabilização de sedimentos, redução da ressuspensão provocada por ondas e correntes, e promoção da acreção sedimentar, contribuindo para a proteção do litoral (GARMENDIA *et al.*, 2023; DUARTE, 2002). Esses ambientes vegetados também são reconhecidos como sumidouros de carbono altamente eficientes.

Um exemplo emblemático é o projeto de restauração de *Zostera marina* nas lagoas costeiras da Virgínia (EUA), iniciado em 1999. Por meio da dispersão de mais de 74 milhões de sementes, foram restaurados 3.612 hectares de pradarias, resultando na remoção anual de 170 toneladas de nitrogênio e no sequestro de 630 toneladas de carbono no sedimento. Sem intervenção ativa, essa recuperação levaria mais de um século, o que evidencia a capacidade da restauração de acelerar significativamente os processos ecológicos (ORTH *et al.*, 2020; GREINER *et al.*, 2013; REYNOLDS *et al.*, 2016).

O sucesso dessas iniciativas depende de planejamento estruturado, que envolve análise de viabilidade, definição de métodos, execução e monitoramento contínuo (GARMENDIA *et al.*, 2023). A escolha adequada do local e da espécie, associada à análise de fatores como qualidade da água, hidrodinâmica e energia das ondas, é essencial (ALAGNA *et al.*, 2019; PALING *et al.*, 2009). Diversas técnicas vêm sendo empregadas, como o transplante manual de plugs, torrões (sod), estacas e a propagação por sementes, sendo que unidades de plantio maiores ( $\geq 11 \text{ m}^2$ ) tendem a apresentar maior resiliência a distúrbios naturais (PAULO *et al.*, 2019). Métodos inovadores incluem gaiolas de retenção, tapetes de sementes e dispositivos mecânicos para transplante submerso (PALING *et al.*, 2009). A remoção prévia de ameaças, como fontes de eutrofização e distúrbios físicos, é um fator determinante para o êxito das ações (KATWIJK *et al.*, 2016).

Apesar dos avanços, a restauração de pradarias marinhas ainda enfrenta desafios significativos. A taxa média global de sucesso gira em torno de 38%, e muitos projetos não alcançam as metas de compensação ambiental (ALAGNA *et al.*, 2019; GANASSIN; GIBBS, 2008). Na Europa, por exemplo, nenhum projeto recente obteve sucesso total, em parte devido ao curto período de monitoramento e à sensibilidade de espécies como *Posidonia oceanica* (CUNHA *et al.*, 2012). Condições adversas como bioturbação, erosão, pastejo por herbívoros e eventos climáticos extremos prejudicam a persistência a longo prazo (PAULO *et al.*, 2019;

PALING *et al.*, 2009). Soma-se a isso o elevado custo operacional, especialmente em áreas abertas e profundas, que demanda pessoal qualificado e logística especializada (GANASSIN; GIBBS, 2008).

Ainda assim, há evidências consistentes de que pradarias restauradas podem retomar rapidamente importantes funções ecossistêmicas, como o sequestro de carbono e nitrogênio, aumento da biodiversidade e suporte à pesca e à estrutura trófica (ORTH *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2023; GREINER *et al.*, 2013). Com o tempo, esses habitats tendem a se tornar auto-sustentáveis, reforçando sua contribuição à resiliência costeira (KATWIJK *et al.*, 2016). No entanto, projetos mal planejados ou implementados em locais inadequados têm maior probabilidade de fracasso e podem gerar impactos indesejados, inclusive servindo como pretexto para compensar indevidamente a destruição de habitats naturais (BOUDOURESQUE *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a criação de pradarias marinhas em Recife surge como uma oportunidade estratégica para fortalecer a resiliência da zona costeira frente aos impactos das mudanças climáticas. Espécies tropicais como *Thalassia hemprichii*, *Halodule wrightii* e *Syringodium filiforme* oferecem os mesmos benefícios ecológicos observados em zonas temperadas, como estabilização de sedimentos, redução da erosão e melhoria da qualidade da água (GARMENDIA *et al.*, 2023; DUARTE, 2002). Além disso, essas pradarias formam habitats para diversas espécies marinhas, inclusive de interesse pesqueiro e ecológico.

Estudos realizados em ambientes tropicais mostram que espécies como *Enhalus acoroides* e *Thalassia hemprichii* podem restabelecer os estoques de carbono no sedimento em apenas dois anos, indicando um retorno rápido dos serviços ecossistêmicos após a implantação (LIU *et al.*, 2023). Em Recife, zonas protegidas por recifes naturais, como o Parque dos Manguezais, os estuários dos rios Capibaribe e Tejiptó e enseadas parcialmente abrigadas, apresentam características físicas compatíveis com a implantação de pradarias.

Entretanto, a qualidade da água em muitos trechos da costa recifense está comprometida por poluição difusa e lançamento de efluentes, o que pode limitar a eficácia dos transplantes. Assim, a restauração deverá ser acompanhada por ações de gestão ambiental, como o controle da eutrofização e a melhoria da transparência da água (ALAGNA *et al.*, 2019; KATWIJK *et al.*, 2016). Também é necessário avaliar cuidadosamente a dinâmica sedimentar, a bioturbação e a energia das ondas, que influenciam a sobrevivência das plantas em fase inicial (PALING *et al.*, 2009; PAULO *et al.*, 2019).

Outro ponto importante é que a região de Recife não possui registros recentes de pradarias extensas, o que implica tratar a proposta como criação de novos habitats vegetados, e não como restauração. Isso exige maior cautela quanto aos objetivos e possíveis impactos

ecológicos, evitando a substituição indevida de ecossistemas naturais remanescentes (BOUDOURESQUE *et al.*, 2021). Por outro lado, técnicas menos invasivas, como a semeadura direta e unidades de plantio pequenas em áreas protegidas, já mostraram bons resultados em outras regiões e podem ser adaptadas ao contexto local (GANASSIN; GIBBS, 2008; GARMENDIA *et al.*, 2023).

Além dos benefícios ecológicos, a implantação de pradarias marinhas em Recife pode gerar ganhos sociais e econômicos, como a proteção de infraestrutura costeira, o fortalecimento da pesca artesanal e a valorização de áreas recreativas e turísticas. Para garantir o êxito e a sustentabilidade dessas ações, é essencial o engajamento de universidades, institutos de pesquisa, ONGs, comunidades locais e gestores públicos. Monitoramento constante, gestão adaptativa e alinhamento com políticas públicas são indispensáveis para o sucesso no longo prazo (CUNHA *et al.*, 2012; ORTH *et al.*, 2020).

#### 4.2.2.3 Dunas costeiras e restingas

A restauração de dunas é reconhecida como uma medida eficaz de Redução de Riscos de Desastres, sendo frequentemente mais custo-efetiva que obras de engenharia convencional (FERNÁNDEZ-MONTBLANC *et al.*, 2020). As dunas funcionam como barreiras naturais contra a erosão e as inundações causadas por tempestades e marés altas, protegendo ecossistemas e infraestruturas costeiras. Elas estabilizam sedimentos, aumentam a elevação do relevo costeiro e reduzem a vulnerabilidade a eventos extremos (DUARTE *et al.*, 2013; JACKSON *et al.*, 2019). Além disso, acumulam carbono e oferecem serviços ecossistêmicos importantes, como a provisão de habitats para espécies nativas (DUARTE *et al.*, 2013).

A recuperação prática das dunas envolve diferentes etapas que incluem a Reconstrução morfológica que consiste na reposição de volumes de areia e a reconfiguração do relevo, adaptadas às dinâmicas sedimentares e costeiras locais (FERNÁNDEZ-MONTBLANC *et al.*, 2020); a Revegetação com plantio de espécies nativas adaptadas às condições de dunas e restingas, com o objetivo de estabilizar os sedimentos e promover a sucessão ecológica (SCHERER-WIDMER, 2001; MARTÍNEZ *et al.*, 2013); e o monitoramento e controle, que incluem ações contínuas de remoção de espécies exóticas e monitoramento da cobertura vegetal e dinâmica sedimentar para garantir a eficácia da restauração (DARKE *et al.*, 2016). A **Figura 14** ilustra a importância da reconstrução de dunas vegetadas no enfrentamento dos eventos extremos de tempestades.

Um outro fator que deve se considerar é a promoção de dinâmicas naturais, como a mobilidade das dunas, ao invés de sua fixação rígida, que favorece a resiliência ecológica e geomorfológica dos sistemas dunares (DARKE *et al.*, 2016; MARTÍNEZ *et al.*, 2013). Isso

porque as dunas são ecossistemas dinâmicos, continuamente moldados por ventos, marés e fluxos de sedimentos (DARKE *et al.*, 2016). Essa mobilidade permite que elas mudem de forma, altura e posição ao longo do tempo, o que é essencial para sua resiliência frente a eventos extremos, como tempestades e marés altas (FERNÁNDEZ-MONTBLANC *et al.*, 2020). Em contraste, a fixação rígida das dunas — por meio de muros, barreiras artificiais, vegetação densamente plantada ou construções muito próximas — interrompe esses processos naturais. Embora essas intervenções possam parecer eficazes a curto prazo, elas comprometem a capacidade do sistema dunar de se recuperar de perturbações, aumentam o risco de colapso em eventos erosivos e prejudicam a conexão entre a praia e a duna (MARTÍNEZ *et al.*, 2013). Ao permitir que as dunas mantenham sua mobilidade, promove-se a resiliência ecológica e geomorfológica, pois o sistema é capaz de absorver impactos, reconstruir-se naturalmente e adaptar-se às mudanças ambientais (DARKE *et al.*, 2016; JACKSON *et al.*, 2019). Dunas que permanecem “vivas” e funcionais, mesmo com sua constante movimentação, são mais eficazes na proteção costeira e na manutenção dos processos ecológicos que sustentam a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (DUARTE *et al.*, 2013).

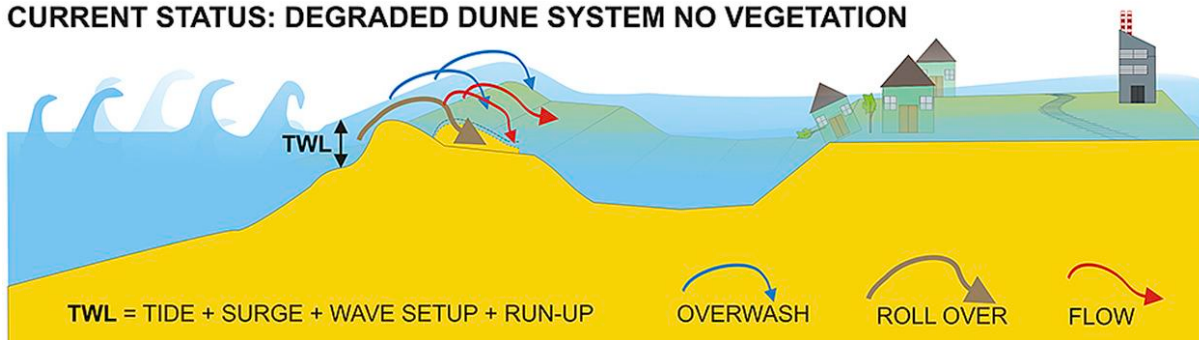
No caso específico da zona costeira recifense, a efetividade da restauração de dunas e da faixa de areia está diretamente condicionada à falta de espaço físico para o desenvolvimento ou migração natural das dunas e à dinâmica sedimentar e disponibilidade de sedimentos. Para o primeiro, zonas com maior potencial precisam ser identificadas e avaliadas quanto ao custo-benefício a longo-prazo. Nesse sentido, ferramentas como o índice ReDune (*Restoration of coastal Dunes Index*) ajudam a identificar áreas prioritárias para restauração, considerando fatores ecológicos, geomorfológicos e socioeconômicos (LITHGOW *et al.*, 2015). Ele foi proposto por Lithgow *et al.*, (2015) com o objetivo de auxiliar tomadores de decisão, gestores costeiros e técnicos não especializados a responder se uma duna precisa ser restaurada e se é viável restaurá-la com sucesso.

**Figura 14.** Comparação entre dois cenários costeiros frente a tempestades extremas: no topo, um sistema dunar degradado e sem vegetação, onde a elevação total do nível do mar (TWL = maré + ressaca + set-up + run-up) ultrapassa a duna, resultando em sobre-lavagem (overwash), recuo (roll over) e escoamento (flow) que ameaçam a infraestrutura urbana. Na parte inferior, uma “solução verde” com dunas reconstruídas e revegetadas, onde a presença de vegetação nativa estabiliza os sedimentos, dissipa a energia das ondas e reduz os impactos hidrodinâmicos, promovendo maior proteção para a área urbana

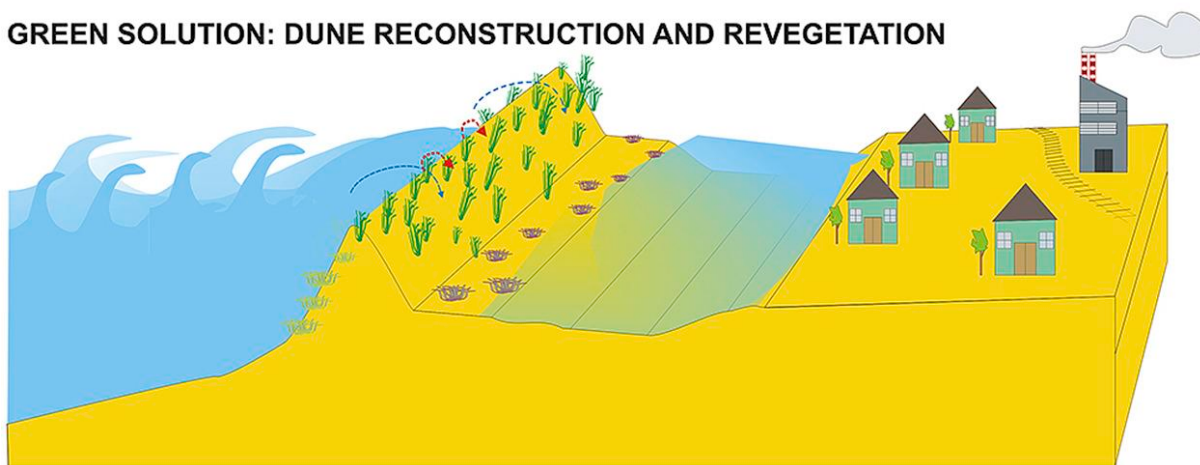


adjacente. A vegetação atua como barreira física e ecológica, aumentando a resiliência costeira de forma sustentável (FERNÁNDEZ-MONTBLANC *et al.*, 2020).

#### CURRENT STATUS: DEGRADED DUNE SYSTEM NO VEGETATION



#### GREEN SOLUTION: DUNE RECONSTRUCTION AND REVEGETATION



Fonte: Fernández-Montblanc *et al.* (2020)

O índice ReDune é uma lista de verificação ponderada composta por quatro seções principais: (1) Grau de perturbação, que avalia o nível de degradação da duna (ex.: perda de vegetação nativa, erosão, construções); (2) Fatores de estresse, que identifica pressões internas e externas como urbanização, turismo, espécies invasoras e alterações hidrodinâmicas; (3) Elementos facilitadores da restauração, que consideram aspectos favoráveis, como a presença de vegetação nativa remanescente, disponibilidade de sedimento e conectividade com ecossistemas; e (4) Interesses de conservação e serviços ecossistêmicos, que englobam valores ecológicos, paisagísticos, culturais e de proteção costeira.

Cada critério recebe uma pontuação, cujo somatório final classifica as áreas conforme a urgência e viabilidade da restauração, permitindo também a comparação entre diferentes locais para fins de priorização. O índice foi aplicado em 31 localidades da costa do Golfo do México, demonstrando eficácia em distinguir áreas com alta, média ou baixa necessidade de intervenção, e pode ser adaptado a outras regiões, desde que respeitadas as especificidades locais (LITHGOW *et al.*, 2015).

Com relação a dinâmica sedimentar e disponibilidade de sedimentos, são necessários estudos sedimentológicos atualizados. O diagnóstico mais recente da dinâmica sedimentar da orla anterior à obra de engorda foi elaborado pelo Plano de Monitoramento Ambiental Integrado – MAI (FINEP/UFPE, 2009) seguido pelo Mapeamento sonográfico e batimétrico da Plataforma Continental Interna adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes – MAPLAC (MCT/UFPE, 2010), que identificou as principais direções de transporte de sedimentos, a dinâmica do perfil praiial e os padrões de erosão em trechos críticos da orla. Esse levantamento ainda permanece como principal referência técnica para orientar o dimensionamento de soluções baseadas na natureza no contexto urbano da cidade. Desde então, as alterações promovidas pela própria engorda da praia podem ter modificado significativamente a morfodinâmica local, reforçando a urgência de novos estudos sedimentares e morfológicos de alta resolução que atualizem o conhecimento técnico e embasem futuras intervenções de restauração costeira.

Com relação a revegetação de dunas, os estudos demonstram que a recuperação desses ecossistemas fortalece a resiliência das praias e dunas, criando uma rede radicular que estabiliza os sedimentos e minimiza a erosão (RACHMAYANI, 2002; LITHGOW *et al.*, 2015). Modelos numéricos indicam que a presença de vegetação e dunas restauradas pode reduzir significativamente o volume de água das inundações durante eventos climáticos extremos, mitigando danos a áreas urbanas (FERNÁNDEZ-MONTBLANC *et al.*, 2020; JACKSON *et al.*, 2019). Em particular, a revegetação de restingas tem impactos significativos na proteção da linha de costa contra a erosão e na absorção de impactos hidrodinâmicos, reduzindo a vulnerabilidade da infraestrutura urbana costeira contra tempestades e o avanço do mar (DARKE *et al.* 2016; DUARTE *et al.*, 2013; SCHERER-WIDMER, 2001; ZIEGLER; GIAMBELLUCA, 1998).

Apesar das restingas em Recife, não serem amplamente desenvolvidas quanto em outras regiões do Brasil, como o Sudeste ou Sul - devido à natureza mais estreita e fortemente urbanizada da faixa litorânea - ainda podem ser encontradas zonas com vegetação de restinga remanescente na zona sul da cidade, como na praia do Pina (**Figura 15**).



**Figura 15.** Vegetação de restinga característica ao longo da praia do Pina, Recife/PE.



Fonte: Souza *et al.* (2019).

Nesse sentido, identificação das espécies locais *in situ* e trabalhos como de Sacramento *et al.* (2007) que investigaram a vegetação de restinga no estado de Pernambuco, podem auxiliar na identificação de espécies com potencial para recuperação em Recife. Isso por que o sucesso dessas intervenções depende da escolha adequada das espécies vegetais e do manejo integrado, considerando fatores como regime de ventos, disponibilidade de sedimentos e padrões de marés (SCHERER-WIDMER, 2001; MARTÍNEZ *et al.*, 2013). Além disso, a revegetação com espécies nativas deve ser cuidadosamente planejada conforme o clima, tipo de solo e histórico de uso da área, como demonstrado em experiências no Brasil (SCHERER-WIDMER, 2001).

No monitoramento e controle dos ecossistemas recuperados, além da remoção de espécies invasoras, assim como para a restauração de manguezais, a recuperação das restingas e dunas também depende do planejamento integrado, conhecimento científico, políticas públicas e da participação comunitária (SCHERER-WIDMER, 2001; MARTINS, 2015; PEREIRA *et al.*, 2015). Em particular, a urbanização, o turismo e a ocupação desordenada causam fragmentação de habitats, compactação do solo e perda da vegetação nativa (LITHGOW *et al.*, 2015). Dessa forma, a proteção de zonas recuperadas requer a limitação de usos recreativos, comerciais e imobiliários, o que pode gerar resistência por parte da população, exigindo forte articulação institucional e social para implementação das ações de restauração (LITHGOW *et al.*, 2015).

O uso de passarelas e estruturas elevadas pode ajudar nesse sentido, permitindo o uso controlado enquanto evita o pisoteio da vegetação recuperada e não comprometem a

regeneração da cobertura vegetal nem a estabilidade da duna (FERREIRA, 2023). Além disso, ações de plantio de restinga, com participação popular, como as realizadas durante a semana do meio ambiente pela prefeitura de Jaboatão em junho de 2025 (DIDIER, 2025), podem contribuir com o engajamento comunitário. Essas ações funcionam como ferramentas de educação ambiental prática, sensibilizando a população para o valor ecológico e protetivo das dunas e fomentando o sentimento de corresponsabilidade pela sua conservação. Ao envolver escolas, associações locais e visitantes, esse tipo de iniciativa contribui para a construção de uma cultura de cuidado com os ecossistemas costeiros, essencial para a sustentabilidade das intervenções restaurativas.

#### **4.2.3 *Infraestrutura híbrida e/ou inspirada na natureza***

As soluções híbridas e bioinspiradas com componentes de engenharia ecológica representam uma abordagem promissora para a proteção costeira e a adaptação às mudanças climáticas, ao combinar a eficiência das estruturas de engenharia com os benefícios ecológicos dos sistemas naturais. Essas soluções podem proporcionar múltiplos benefícios, como proteção contra inundações, melhoria da qualidade da água e conservação da biodiversidade (CHIU *et al.*, 2021), além de representarem uma alternativa mais sustentável às infraestruturas cinzentas tradicionais, muitas vezes economicamente e ecologicamente insustentáveis a longo prazo (MORRIS *et al.*, 2018). O alinhamento entre objetivos ambientais e de resiliência climática é um dos princípios fundamentais dessas abordagens (MORAES *et al.*, 2022). Além disso, podem ser mais eficazes e custo-eficientes do que as medidas convencionais de proteção costeira (SIEGERSMA *et al.*, 2023), especialmente quando se consideram todos os serviços ecossistêmicos que oferecem (MORRIS *et al.*, 2018). A integração de elementos naturais e artificiais também pode aumentar a capacidade de mitigação de inundações e da erosão durante eventos extremos (UNGUENDOLI *et al.*, 2023).

É importante destacar a distinção entre a restauração de ecossistemas, abordada no tópico anterior, e a criação de novos ecossistemas por meio da engenharia ecológica, também referida como infraestrutura verde ou bioengenharia costeira. A engenharia ecológica aplicada à construção de estruturas ecológicas em locais onde ecossistemas naturais não existiam previamente representa uma estratégia de criação de novos habitats, projetados para mimetizar processos naturais e maximizar os serviços ecossistêmicos fornecidos pelos sistemas naturais (SEDDON *et al.*, 2021; VASILIEV; HAZLETT, 2024). Opta-se aqui por não repetir práticas já descritas no contexto da restauração, uma vez que muitas delas também são utilizadas na implementação de infraestruturas verdes. Um exemplo ilustrativo é apresentado por

Unguendoli *et al.* (2023), que descrevem a combinação de dunas artificiais, construídas com materiais naturais, com ervas marinhas, formando um sistema híbrido em que a duna atua como barreira física e as ervas marinhas contribuem para a dissipação da energia das ondas.

De modo mais amplo, os documentos analisados apontam uma evolução nas estratégias de defesa costeira, com a substituição progressiva de sistemas de engenharia rígida por soluções baseadas na natureza, mais sustentáveis e resilientes (CHIU *et al.*, 2021). Dentro desse espectro, surgem abordagens híbridas que integram elementos naturais e artificiais, ampliando a eficácia das intervenções (ANGUS; HANSOM, 2021). Entre os exemplos, destacam-se a integração de ecossistemas aquáticos costeiros com barreiras tradicionais (infraestrutura cinza) como diques para reforçar a proteção costeira (SIEGERSMA *et al.*, 2023; XUAN *et al.*, 2022).

Diversas abordagens de engenharia ecológica têm sido aplicadas para reforçar ecossistemas naturais e mitigar os impactos das mudanças climáticas em zonas costeiras e urbanas, muitas vezes combinando infraestruturas tradicionais com soluções baseadas na natureza. No caso dos manguezais, um estudo conduzido na costa amazônica oriental avaliou a eficácia de florestas de mangue em comparação com um paredão de contenção reconstruído, demonstrando que a combinação de estruturas de engenharia com ecossistemas naturais pode ser mais eficiente na contenção da erosão (GOMES *et al.*, 2025). Em áreas de dunas, o aumento da altura e da largura das cristas tem sido proposto como uma forma de reforçar essas formações naturais contra processos erosivos e o impacto de ondas mais altas, representando uma intervenção de engenharia sobre um sistema já existente (ANGUS; HANSOM, 2021). Ainda dentro da perspectiva de controle hídrico, a instalação de válvulas para evitar o refluxo de água do mar durante marés altas tem sido utilizada como medida para conter a salinização de lagos interiores, funcionando como complemento às defesas naturais (ANGUS; HANSOM, 2021).

Outras intervenções, como o uso de folhas encalhadas para estabilizar a linha costeira, exemplificam soluções bioinspiradas que incorporam práticas circulares e sustentáveis no manejo costeiro. A aplicação desse material orgânico contribuiu significativamente para a redução de processos erosivos e a promoção da acreção, representando uma forma eficaz de engenharia ecológica com base em resíduos naturais (DAL BARCO *et al.*, 2024). Em contextos urbanos, estruturas como telhados verdes (*green roofs*) e valas de biofiltração (*bioswales*), frequentemente classificadas como SbN, também envolvem um componente técnico no seu projeto e instalação, evidenciando o caráter híbrido dessas soluções voltadas à adaptação a inundações pluviais e ao manejo sustentável da água (QUAGLIOLO *et al.*, 2023).

Três estudos se destacam dentre os avaliados: Xuan *et al.* (2022) que destacam a estratégia de múltiplas linhas de defesa (*Multiple Lines of Defense* – MLoD) como uma infraestrutura híbrida; Perricone *et al.*, (2023) com o uso de estruturas bioinspiradas submersa; e Chiu *et al.* (2021) que menciona o termo “cidade-esponja”. Os dois primeiros são estratégias que podem ser utilizadas para aumentar a resiliência da zona costeira frente ao aumento do nível do mar, enquanto o último contém exemplos práticos de como adaptar as cidades à eventos de chuva extrema.

O artigo de Perricone *et al.* (2023) apresenta diversas aplicações bem-sucedidas de estruturas bioinspiradas em ambientes marinhos (**Figura 1**), destacando seu potencial para ampliar a eficácia das defesas costeiras de forma funcional e ecologicamente integrada. Exemplos incluem o ReefBall, módulo esférico de concreto perfurado que dissipa energia das ondas e abriga espécies marinhas; o EcoReef, feito de cerâmica microporosa com design que favorece o recrutamento de invertebrados; e o sistema MARS, impresso em 3D com geometria projetada para corais. Tecnologias como o ArchiREEF e os recifes artificiais da Reef Arabia e Seaboost replicam a morfologia natural de recifes usando materiais não tóxicos, enquanto iniciativas como o GROW Oyster Reefs aplicam misturas de concreto bioinspiradas em conchas para restaurar populações de ostras e proteger o litoral. Também se destacam módulos biodegradáveis impressos em 3D que imitam raízes e caules, facilitando o crescimento de ervas marinhas e gramíneas halófitas em áreas de alta energia hidrodinâmica. Essas soluções contribuem simultaneamente para a dissipação de ondas, estabilização de sedimentos, restauração de habitats e aumento da resiliência ecológica, promovendo uma engenharia costeira mais adaptativa e sustentável (PERRICONE *et al.*, 2023).

**Figura 16.** Exemplo de estruturas bioinspiradas: Recifes impressos em 3D em formato de D. Unidades de recife feitas de arenito patenteado e atóxico. Imagens cortesia do Dr. Enrico Dini.



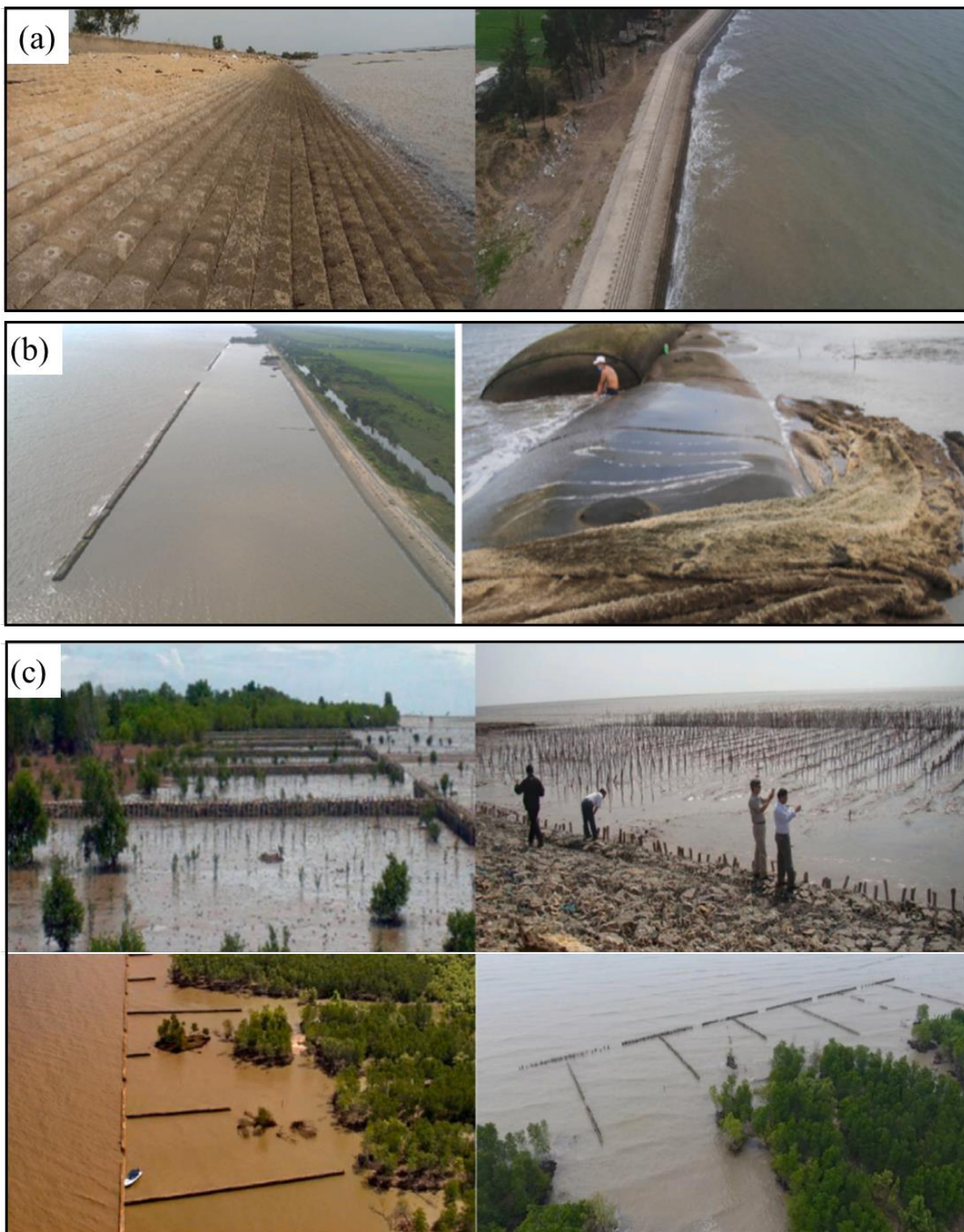
Fonte: Perricone *et al.* (2023).

O artigo de Xuan *et al.* (2022) analisa a aplicação da abordagem das MLoD no delta do Mekong, no Vietnã, destacando soluções híbridas que combinam infraestruturas verdes e cinzas para aumentar a resiliência costeira frente aos impactos das mudanças climáticas. Dentre essas soluções, destaca-se o uso de cercas de bambu em formato de T, instaladas ao longo da linha de costa para reduzir a energia das ondas e promover a deposição de sedimentos. Essas cercas, ao mimetizarem o efeito de raízes de manguezais, representam uma forma simples, eficaz e de baixo custo de engenharia bioassistida, baseada em inspiração ecológica. Além disso, podem ser combinadas com o plantio de vegetação costeira, promovendo condições favoráveis à regeneração natural dos manguezais. Outras estruturas analisadas incluem os revestimentos e geotubos aplicados em trechos vulneráveis, que embora sejam infraestruturas tradicionalmente cinzas, podem integrar vegetação restaurada e atuar como sistemas híbridos.

O estudo também menciona o uso de quebra-mares construídos com bambu e pedras, que funcionam como barreiras físicas, mas utilizam materiais naturais e replicam, em certa medida, os efeitos de sistemas ecológicos como recifes ou florestas costeiras na dissipação da energia hidrodinâmica (**Figura 17**) (XUAN *et al.*, 2022).



**Figura 17.** Tipos de intervenções costeiras para proteção contra erosão e elevação do nível do mar. (a) *Revetments* (estruturas inclinadas de proteção costeira), com uso de concreto ou materiais rígidos dispostos em talude para reduzir o impacto das ondas. (b) Soluções híbridas, como geotubos revestidos com fibras naturais, que combinam engenharia tradicional com elementos naturais. (c) viveiros de mudas de mangue e barreiras de bambu em T para favorecer a regeneração de manguezais e estabilização costeira.



Fonte: Adaptado de Xuan *et al.* (2022).

A funcionalidade dessas soluções não se limita à proteção física da costa, mas inclui a estabilização do sedimento, a redução da erosão e o suporte à regeneração ecológica, promovendo ambientes propícios ao crescimento da vegetação nativa. O artigo reforça ainda a importância da adoção comunitária dessas estratégias, muitas das quais derivam de práticas locais tradicionais, desenvolvidas com base no conhecimento empírico das comunidades costeiras. Embora nem todas essas estruturas sejam formalmente classificadas como bioinspiradas, seu desempenho funcional é claramente orientado por princípios ecológicos, o que as aproxima conceitualmente das soluções baseadas na natureza. Assim, o estudo evidencia que a integração entre conhecimento local, engenharia adaptativa e inspiração nos processos naturais pode resultar em sistemas costeiros mais resilientes, sustentáveis e alinhados às realidades sociais e ambientais das regiões em que são aplicados (XUAN *et al.*, 2022).

A aplicação de estratégias de múltiplas linhas de defesa e de estruturas bioinspiradas para a proteção costeira na cidade do Recife é tecnicamente viável e conceitualmente apropriada, especialmente diante da reconhecida vulnerabilidade da cidade à erosão costeira, à elevação do nível do mar e a inundações associadas a eventos extremos. Como já vimos, Recife apresenta características que favorecem a adoção dessas abordagens, como a presença de ecossistemas costeiros estratégicos – manguezais, estuários e zonas úmidas – que podem funcionar como defesas naturais dentro da lógica MLoD, além de trechos de litoral densamente urbanizados e expostos à ação direta das ondas, como nas praias de Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa, onde soluções híbridas como recifes artificiais bioinspirados ou cercas de contenção permeáveis poderiam ser implantadas para dissipar energia hidrodinâmica e proteger o calçadão. Tais estruturas têm sido desenvolvidas com base em princípios biomiméticos que imitam as funções ecológicas de recifes naturais e raízes de manguezais, promovendo simultaneamente a estabilização do sedimento, o recrutamento de organismos e a regeneração de habitats (PERRICONE *et al.*, 2023; XUAN *et al.*, 2022).

No entanto, a implementação dessas estratégias em Recife requer a consideração de fatores limitantes importantes. A ocupação urbana avança até a linha de maré alta em muitos trechos da cidade (MARTINS, 2015), o que restringe o espaço necessário para a criação de zonas de amortecimento e transição entre as diferentes camadas de defesa (XUAN *et al.*, 2022). Nesses contextos, a implantação de soluções híbridas em ambientes submersos ou a adoção de estratégias de recuo planejado demandaria esforços interinstitucionais e enfrentaria barreiras sociais e políticas. A definição do tipo, escala e posicionamento das estruturas também depende de uma análise cuidadosa das condições hidrodinâmicas locais, como a intensidade das ondas,

o padrão de correntes e a presença de formações naturais (PERRICONE *et al.*, 2023), como os recifes rasos que protegem parte da orla de Boa Viagem (FERREIRA JÚNIOR, 2023). Além disso, muitas estruturas bioinspiradas requerem manutenção adaptativa, tempo para maturação ecológica e monitoramento contínuo para garantir seu desempenho, especialmente em ambientes urbanos com alta pressão antrópica (PERRICONE *et al.*, 2023).

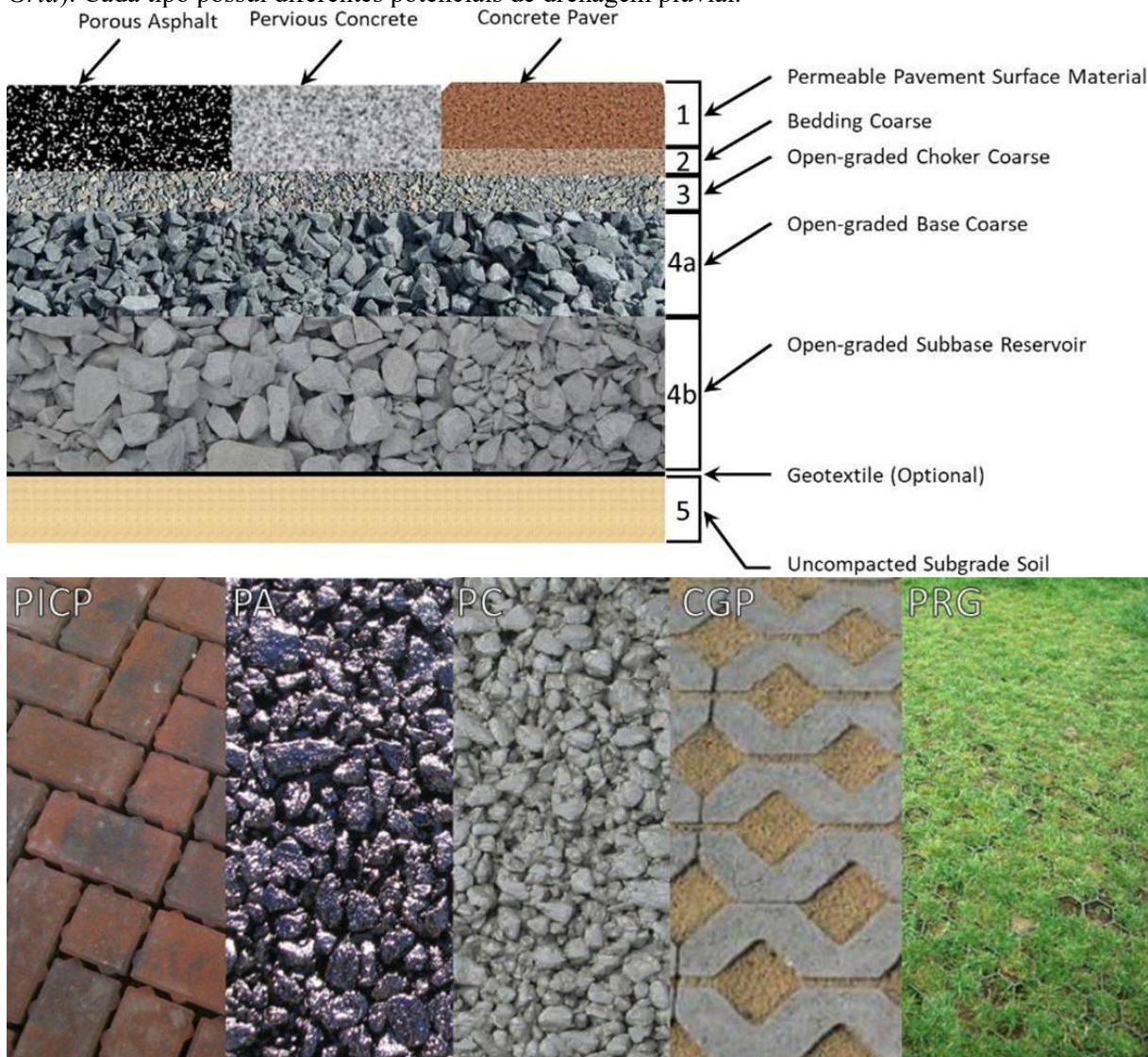
Outro aspecto central é a necessidade de engajamento comunitário e reconhecimento do valor cultural e funcional dessas soluções. Algumas estruturas como cercas de bambu ou recifes artificiais podem ser inspiradas por práticas tradicionais e conhecimento local, como demonstrado no delta do Mekong, onde a aceitação social foi um fator-chave para o sucesso das intervenções (XUAN *et al.*, 2022). No caso de Recife, a adaptação de soluções bioinspiradas e MLoD às realidades físicas e sociais da cidade exigiria uma abordagem integrada, baseada em ciência, participação pública e governança multissetorial. Apesar dos desafios significativos, essas soluções oferecem vantagens expressivas em termos de sustentabilidade, multifuncionalidade e compatibilidade ecológica, podendo ser especialmente relevantes como alternativas ou complementos às infraestruturas convencionais, cuja eficácia tende a ser limitada frente à intensificação das mudanças climáticas (PERRICONE *et al.*, 2023; XUAN *et al.*, 2022).

### ***Recife como uma cidade-esponja***

Quando consideramos a alta vulnerabilidade de Recife à alagamentos em eventos de maré e chuvas extremas como visto na introdução, o conceito de “cidade-esponja” representa uma abordagem inovadora e crucial para a gestão urbana da água e o aumento da resiliência das cidades frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, como inundações, deslizamentos e ilhas de calor (RAU, 2024; ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). Essa iniciativa busca integrar soluções baseadas na natureza, por meio da infraestrutura verde-azul, com as infraestruturas cinzentas tradicionais, a fim de otimizar o ciclo hidrológico natural nas áreas urbanas (RAU, 2024; QIAO *et al.*, 2020). As estratégias das Cidades Esponja focam no manejo abrangente da água da chuva, com ênfase no controle do escoamento superficial, através de instalações de controle na fonte que são projetadas para fornecer serviços ecossistêmicos e gerenciar tanto a quantidade quanto a qualidade da água. Essas instalações envolvem tecnologias como pavimentos permeáveis (**Figura 18**), telhados verdes (**Figura 19**), biovaletas (**Figura 20**), jardins e bacias de retenção (XU *et al.*, 2024; RICHTER *et al.*, 2024).



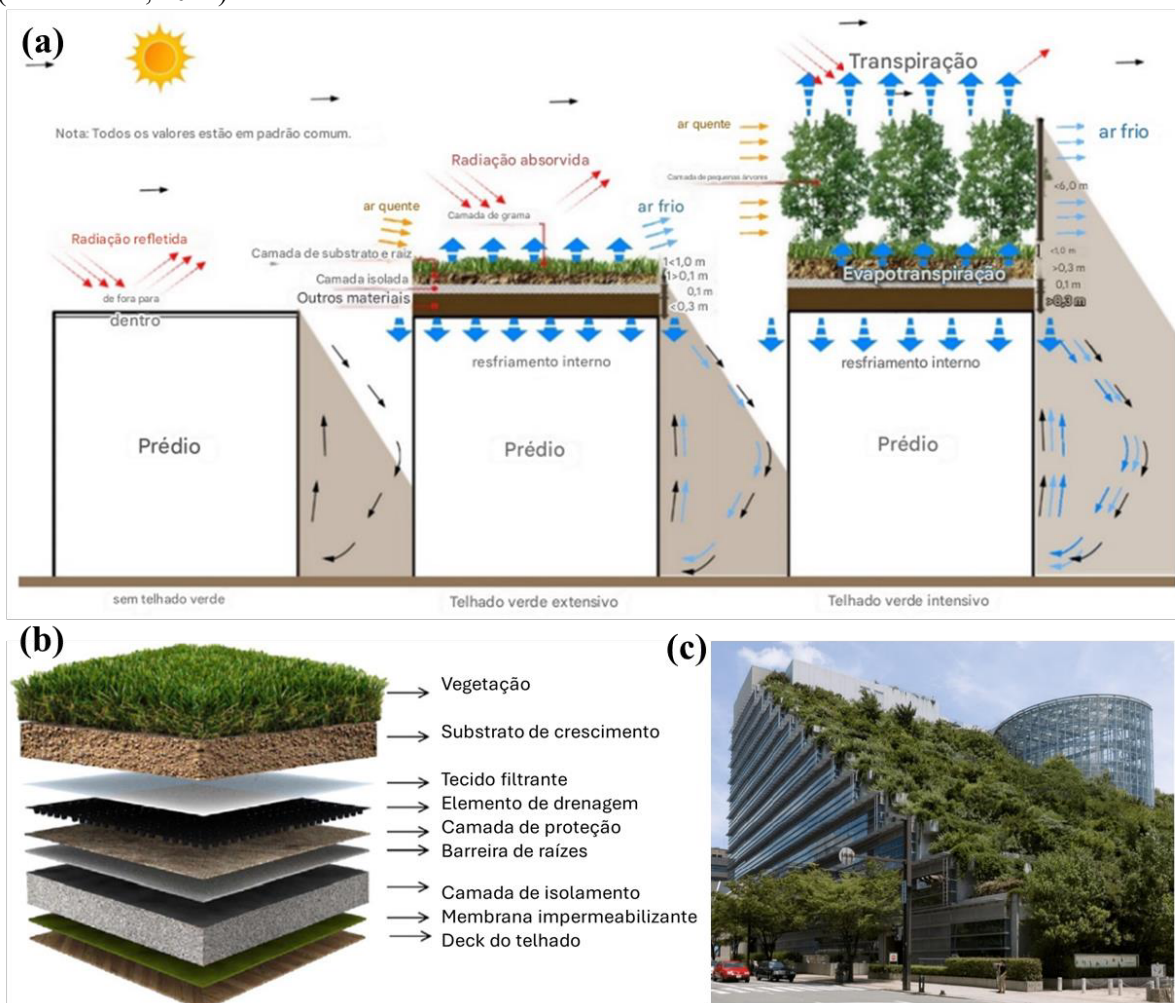
**Figura 18.** Estrutura e tipos de pavimentos permeáveis. A imagem superior mostra as camadas típicas de um sistema de pavimento permeável: (1) camada superficial (asfalto poroso, concreto permeável ou blocos intertravados), (2) camada de assentamento, (3) camada de transição, (4a–4b) camadas de base e sub-base com agregados graduados para armazenamento e drenagem, (opcional) geotêxtil separador, e (5) solo de subleito não compactado. Na parte inferior, são ilustrados cinco tipos principais de superfície: PICP – pavimento intertravado permeável; PA – asfalto poroso; PC – concreto permeável; CGP – grelhas de concreto preenchidas com solo; PRG – grelhas plásticas com grama (*Plastic Reinforced Grid*). Cada tipo possui diferentes potenciais de drenagem pluvial.



Fonte: Adaptado de EDIS (2023).

A combinação de árvores urbanas com medidas de drenagem também é fundamental, com o direcionamento do escoamento para poços de árvores que, ao mesmo tempo, promovem a vitalidade vegetal e reduzem o risco de alagamentos urbanos (RICHTER *et al.*, 2024). Além disso, o conceito incorpora mecanismos de infiltração, retenção, purificação e reuso da água pluvial, contribuindo para a recarga dos lençóis freáticos e o uso racional dos recursos hídricos (WANG *et al.*, 2019; RAU, 2024).

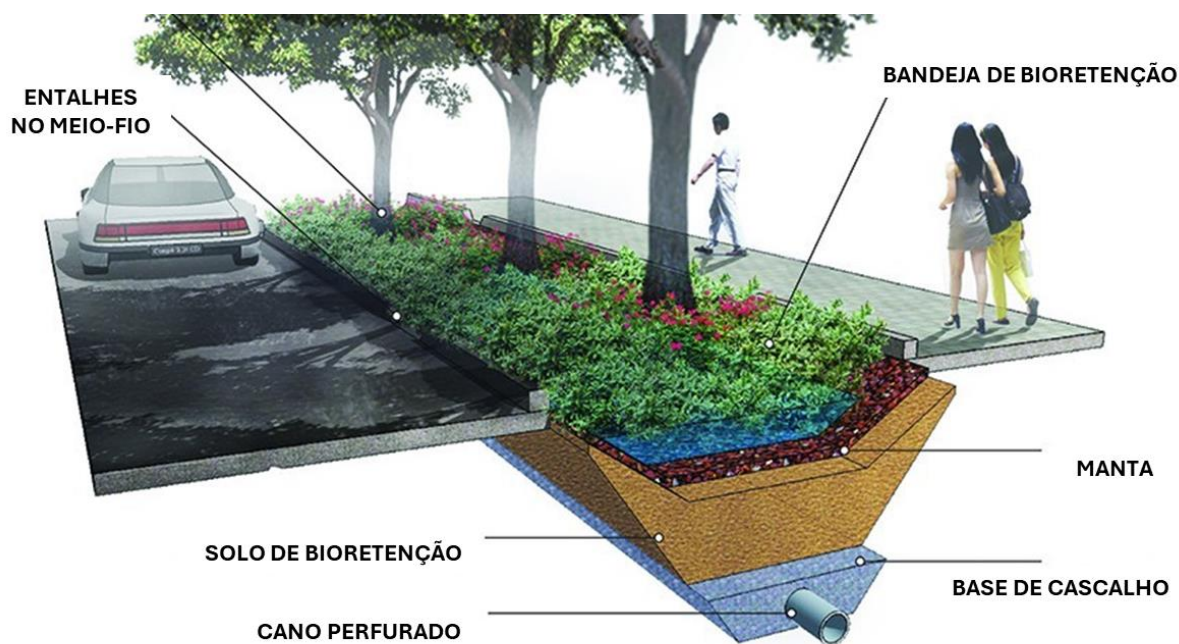
**Figura 19.** (a) Esquema representando o telhado de edificações sem telhado verde, e com telhado verde extensivo e intensivo. Telhados extensivos têm camada de solo rasa (até 15 cm), são leves, exigem pouca manutenção e abrigam vegetação simples, como gramíneas e suculentas. Já os intensivos possuem solo mais profundo com maior potencial de retenção de água da chuva, permitem o cultivo de arbustos e até árvores, funcionam como jardins acessíveis, mas requerem mais irrigação, manutenção e estrutura de suporte (ZHANG *et al.* 2019) (b) Camadas típicas de um sistema de telhado verde, compostas por vegetação, substrato de crescimento, tecido filtrante, elementos de drenagem, proteção e barreira de raízes, além de camadas inferiores de isolamento, impermeabilização e estrutura do telhado. Cada componente contribui para o desempenho térmico, drenagem eficiente e durabilidade do sistema. (KHAWAJA *et al.*, 2018) (c) Vista do edifício ACROS Fukuoka, com cobertura telhados verdes (MABUCHI, 2011).



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2019), Khawaja *et al.* (2018) e Mabuchi (2011).

**Figura 20.** Esquema de uma biovaleta. A água suja e poluída proveniente de telhados, ruas e estacionamentos entra na valeta, é desacelerada por diversas plantas e rochas. Os poluentes se depositam e a água limpa infiltra-se no solo. A água entra no tubo perfurado e é lentamente absorvida pelo solo. O excedente de água pluvial sai da biovaleta e escoar pelo tubo até o corpo receptor, mais limpa do que quando entrou e em volume significativamente reduzido.





Fonte: Traduzido de ANDRESENA (2020).

Para lidar com eventos extremos, a abordagem inclui sistemas de previsão e simulação de inundações integrados a dados hidrológicos, topográficos e geoespaciais (WANG *et al.*, 2019), assim como padrões de segurança hídrica voltados à conservação do solo, da água e da qualidade ambiental, com apoio de sensoriamento remoto e GIS (YANG; YANG, 2024). No entanto, apesar do potencial transformador, a transição para o modelo de Cidade Esponja enfrenta desafios significativos. A experiência chinesa ilustra a ambição dessas metas: o país estabeleceu o objetivo de que 80% das áreas urbanas sejam adaptadas ao conceito até 2030, mas os prazos para planejamento e integração são mais longos do que nas abordagens setoriais convencionais (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). A coexistência e integração entre infraestruturas verdes e cinzas também permanecem como desafio técnico e operacional (QIAO *et al.*, 2020), especialmente em áreas urbanas consolidadas. Além disso, muitos programas-piloto não têm dedicado atenção suficiente aos riscos climáticos de longo prazo, focando mais em soluções para eventos recorrentes (YUAN *et al.*, 2024), e há lacunas relevantes na avaliação de custo-benefício de longo prazo, tanto em termos econômicos quanto ambientais (XU *et al.*, 2024).

Outro entrave importante é a conscientização pública. Estudo conduzido em Wuhan revelou que 34% dos moradores desconheciam completamente o conceito de Cidade Esponja, e 32% apenas haviam ouvido falar do termo sem compreender seu significado. A percepção negativa quanto ao valor de imóveis após inundações, mesmo quando medidas protetoras são adotadas, também se apresenta como barreira, com 25% dos entrevistados acreditando que o

valor não retornaria aos níveis anteriores (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). Apesar desses obstáculos, os benefícios são evidentes: a abordagem reduz significativamente os danos causados por inundações urbanas (WANG *et al.*, 2019), melhora a qualidade da água e contribui para a recarga de aquíferos (RAU, 2024; XU *et al.*, 2024), além de favorecer a vitalidade da vegetação urbana e reduzir o estresse hídrico das árvores (RICHTER *et al.*, 2024). Também há benefícios socioeconômicos, com potencial valorização de propriedades em áreas anteriormente vulneráveis, desde que acompanhadas de medidas eficazes de proteção (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018).

Exemplos práticos reforçam a viabilidade do modelo. A China implantou o programa em larga escala, com 30 cidades piloto selecionadas entre 2015 e 2016, e mais 60 cidades de demonstração em 2021 e 2022 (RAU, 2024). Em Changzhou, foram adotados indicadores locais adaptados às condições geológicas e hidrológicas, com estratégias para regular o escoamento total, reduzir picos de fluxo e melhorar a drenagem (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). Em Kunshan, modelos como o CityDrain3 foram utilizados para gerenciar inundações em áreas de polder (WANG *et al.*, 2019). O plano do Yangchen Lake Resort mostrou que até 55% da área construída pode ser adaptada com soluções verdes integradas ao uso residencial e comercial (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). Fora da China, a cidade de Hoboken, nos EUA, adotou soluções de infraestrutura verde em resposta à competição “Rebuild by Design” após o furacão Sandy (RAU, 2024). Em Singapura, o programa ABC Waters se destaca pelo uso de soluções sustentáveis para controle de escoamento em áreas urbanas densas (ZEVENBERGEN *et al.*, 2018). Assim, embora a transição para Cidades Esponja envolva esforços multissetoriais e enfrentamento de barreiras institucionais, técnicas e sociais, os ganhos em termos de sustentabilidade e resiliência urbana justificam amplamente sua adoção.

Com base no estudo de Brilhante (2020), que analisou os desafios e potencialidades para a transição da cidade de João Pessoa (PB) rumo a um modelo de Cidade Esponja, é possível refletir sobre a aplicabilidade desse conceito em Recife, considerando semelhanças e especificidades. Recife apresenta um conjunto de características que reforçam a urgência de soluções integradas para gestão da água urbana, como a elevada impermeabilização do solo, a topografia plana associada a zonas baixas sujeitas a marés e inundações, e a recorrência de eventos extremos combinando chuvas intensas com marés altas. Esses fatores indicam que o modelo de Cidade Esponja, centrado no controle na fonte, na infiltração e retenção de águas pluviais e na integração entre infraestrutura verde e cinza, é conceitualmente aplicável à capital pernambucana.

Entretanto, a transição esbarra em entraves estruturais, institucionais e sociais semelhantes aos observados em João Pessoa. O estudo de Brilhante (2020) aponta que a gestão da água urbana na capital paraibana é marcada por forte setorialização e baixa articulação entre os órgãos responsáveis por drenagem, saneamento, habitação e planejamento urbano — um panorama que também se observa em Recife. Essa fragmentação dificulta a adoção de soluções integradas e multiescalares, como exigido pelas Cidades Esponja. Além disso, tanto em João Pessoa quanto em Recife, há carência de sistemas eficientes de monitoramento hidrometeorológico, manutenção das redes de drenagem e planejamento estratégico de longo prazo (BRILHANTE, 2020), o que compromete a eficácia das soluções já implantadas e limita o potencial de implantação de novas abordagens baseadas na natureza.

Outro ponto de convergência é a ocupação desordenada de áreas ambientalmente frágeis, como margens de rios, fundos de vale e zonas de várzea — áreas prioritárias para a implantação de infraestrutura verde-azul. Em João Pessoa, grande parte dessas áreas está densamente ocupada, muitas vezes por assentamentos informais (BRILHANTE, 2020), o que limita o espaço físico necessário para soluções como biorretenções, zonas úmidas construídas ou corredores de infiltração. Recife compartilha essa realidade, especialmente em bairros periféricos e de baixa cota altimétrica. A transição para uma Cidade Esponja, nesse contexto, exigiria não apenas intervenções físicas, mas também ações integradas de regularização fundiária, reassentamento planejado e renaturalização urbana, apoiadas por políticas públicas robustas e participação social.

Apesar dos desafios, há também oportunidades concretas para iniciar esse processo. O estudo de Brilhante (2020) aponta que João Pessoa possui planos setoriais de drenagem e mudanças climáticas que, se integrados sob a lógica da infraestrutura verde-azul, poderiam ancorar a transição. Em Recife, a existência de instrumentos semelhantes — como o Plano de Ação Climática do Recife (MAPLAC, 2021) e projetos locais de revitalização urbana com foco em drenagem sustentável — sinaliza possibilidades para intervenções-piloto. Iniciativas em pequena escala, como jardins de chuva, requalificação de canais e hortas urbanas, já vêm sendo testadas e poderiam ser articuladas em redes de soluções esponja replicáveis e escaláveis. Por exemplo, em Recife, a Lei Nº 18.112/2015 exige que novas edificações construam "Telhados Verdes", que atuam diretamente sobre desafios climáticos urbanos. Essas estruturas vegetadas absorvem uma parte significativa da água da chuva, aliviando a carga sobre o sistema de drenagem da cidade, e contribuem para a redução da temperatura local, combatendo o efeito de ilha de calor.

O MAPLAC representa um importante marco estratégico para a integração de medidas de adaptação baseadas na natureza na gestão urbana. O documento reconhece explicitamente o

papel da infraestrutura verde e azul no enfrentamento de eventos extremos, como inundações, e na promoção de cidades mais resilientes e sustentáveis. Entre suas ações prioritárias, o plano destaca a necessidade de implementar SbN para drenagem urbana, com foco na recuperação de áreas de amortecimento, como manguezais, e na promoção de jardins de chuva, telhados verdes e outras formas de infiltração de águas pluviais nas áreas impermeabilizadas da cidade. Essas diretrizes estão alinhadas com o conceito de Cidade Esponja, sugerindo que Recife já possui uma base institucional e normativa que pode ser mobilizada para transitar nessa direção .

A prefeitura do Recife também tem investido em projetos de requalificação da orla para promover o desenvolvimento sustentável e aumentar a resiliência costeira. O Projeto Orla Parque, desenvolvido pela Prefeitura do Recife, busca transformar os 11 km de praias de Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa em um parque linear acessível e integrado à cidade. O projeto prevê melhorias na infraestrutura da orla, incluindo a requalificação do calçadão, ampliação das ciclovias, melhorias na acessibilidade e na arborização, além da criação de espaços para lazer e atividades culturais (PREFEITURA DO RECIFE, 2024). No entanto, não há menção explícita ao uso de pavimentos permeáveis na reforma, o que representa uma oportunidade para a inclusão de estratégias sustentáveis na gestão das águas pluviais. Nesse sentido, a implementação de pavimentos permeáveis, pode agregar benefícios ambientais significativos ao projeto. Esse tipo de pavimento permite maior infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e contribuindo para a recarga dos aquíferos. Considerando os desafios históricos enfrentados pelo Recife em relação a alagamentos e impermeabilização do solo, a incorporação de pavimentos drenantes na orla representaria um avanço na adaptação climática, integrando a requalificação urbana a uma abordagem sustentável para o manejo das águas pluviais.

Assim, embora o estudo de Brilhante tenha como foco a cidade de João Pessoa, os diagnósticos e reflexões apresentados oferecem um referencial relevante para pensar a transição do Recife para o modelo de Cidade Esponja. Essa transformação exigirá mudanças estruturais em governança, planejamento urbano e cultura institucional, mas pode representar um caminho promissor para enfrentar os impactos das mudanças climáticas e promover cidades mais resilientes, inclusivas e sustentáveis.

#### **4.2.4 Limitações e barreiras à implementação das SbN**

De forma geral, os estudos revelaram que a adoção de abordagens baseadas em ecossistemas ainda não é amplamente difundida devido à distância considerável entre o entendimento teórico e as aplicações práticas (NAGABHATLA *et al.*, 2019). No que diz respeito às barreiras à implementação, a literatura revisada identificou uma série de entraves

recorrentes. Entre os mais citados estão: desafios metodológicos, fragmentação institucional, falta de integração entre políticas públicas, limitações financeiras, e barreiras sociais.

Em termos de metodologia, diversos autores indicam que há dificuldades já na definição das SbN, sendo a ambiguidade conceitual e a ausência de padronização consideradas barreiras centrais (ANDERSON; GOUGH, 2022; KUMAR *et al.*, 2020). Também é mencionada uma terminologia inconsistente (ZHU *et al.*, 2023), bem como a vagueza do termo, que compromete o planejamento de ações efetivas (ALBERT *et al.*, 2019). Essa falta de clareza é especialmente problemática em contextos marinhos (LISE *et al.*, 2025; O'LEARY *et al.*, 2023). Soma-se a isso a ausência de indicadores claros para avaliação da efetividade das SbN, fator limitante reconhecido por vários estudos (RODRÍGUEZ-ROJO *et al.*, 2025; SAYAH *et al.*, 2022; MORRIS *et al.*, 2018; REGUERO *et al.*, 2018). Nesse sentido, a IUCN vem estabelecendo e atualizando as definições (framework) e metodologias das SbN, mas métodos de avaliação específicos precisam ser determinados antes da implementação da SbN, a depender de suas especificidades (e.g., IUCN, 2020a,b).

Também são frequentemente relatadas limitações técnicas e de conhecimento (SÁNCHEZ-ARCILLA *et al.*, 2022). A ausência de dados robustos que subsidiem decisões é apontada como barreira por vários autores (DAL BARCO *et al.*, 2024; JONES *et al.*, 2020; TIWARI *et al.*, 2022). A falta de monitoramento e avaliação da eficácia das SbN é igualmente mencionada (CHENG; LI, 2024; HOPPIT *et al.*, 2022), bem como a carência de conhecimento técnico e capacitação entre os envolvidos (FOTI *et al.*, 2020; NEHREN *et al.*, 2023; SADDAF *et al.*, 2024). Como foi observado ao longo dos tópicos anteriores, a cidade do Recife tem uma deficiência de dados básicos ambientais recentes e monitoramento ambiental que precisam ser supridas antes da implementação da maioria das SbN.

A dimensão financeira é outro ponto crítico abordado com frequência na literatura. A escassez de financiamento é citada como uma limitação direta por diversos estudos (BARNETT *et al.*, 2022; CHEE *et al.*, 2021; HERNÁNDEZ-DELGADO, 2024; MADRAMOOTOO; VIRGIL, 2024; REID *et al.*, 2025; TECHERA, 2023; SÁNCHEZ-ARCILLA *et al.*, 2022). Além disso, os altos custos de implementação (KATO; TAJIMA, 2023; QUAGLIOLO *et al.*, 2023) e a insuficiência de verbas para a manutenção de longo prazo (COHN *et al.*, 2021; SUNKUR *et al.*, 2023) são barreiras recorrentes. Destaca-se ainda a dificuldade em atrair investimentos do setor privado (MORAES *et al.*, 2022).

No campo da governança, a fragmentação institucional é amplamente documentada como um dos principais obstáculos (CAI *et al.*, 2021; ISLAM *et al.*, 2021; LEE *et al.*, 2022;

VEIGA LIMA; SOUZA, 2022). Além disso, a falta de coordenação entre setores (QIN *et al.*, 2024; SCHUERCH *et al.*, 2022; YU; MU, 2023) e entre diferentes níveis de governo (LEMOS *et al.*, 2024; WANNEWITZ *et al.*, 2024) constitui outra dificuldade relevante. Há também forte ênfase na ausência de políticas públicas integradas e de longo prazo (CAI *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2025) e na descontinuidade dessas políticas (YILMAZ, 2023). O sucesso das SbN depende, portanto, da cooperação intersetorial e interdisciplinar (JORDAN; FRÖHLE, 2022; SLINGER *et al.*, 2021).

Felizmente, no Brasil algumas políticas públicas estão evoluindo para incluir as SbN. No mais alto nível estratégico, a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil confere legitimidade nacional ao esforço de utilizar as SbN como uma política oficial. Ao afirmar que a integração de soluções baseadas em natureza é um "aspecto fundamental" para a remoção de gases de efeito estufa nas cidades, o documento sinaliza que o uso de ecossistemas no ambiente urbano é uma das vias oficiais para o país cumprir suas metas climáticas internacionais submetida ao Acordo de Paris. Adicionalmente, o Programa Cidades Verdes Resilientes atua como uma conexão entre a estratégia nacional da NDC e a aplicação municipal. Sua função é criar um modelo para a transformação das cidades, estabelecendo uma definição clara: um município verde e resiliente é aquele que, entre outras coisas, "adota e estimula soluções baseadas na natureza". O programa orienta os municípios a enfrentarem desafios críticos como enchentes, deslizamentos e ilhas de calor por meio da combinação planejada entre a infraestrutura verde (parques, jardins de chuva, etc.) e a infraestrutura cinza tradicional (canaletas, tubulações, etc.).

O município de Recife também dispõe de instrumentos de planejamento que, embora heterogêneos em sua aplicação, oferecem pontos de ancoragem relevantes para a integração das SbN. Documentos como o Plano Diretor, o Plano de Ação Climática do Recife (PCRJ), o Zoneamento Ecológico-Econômico de Pernambuco e o projeto Recife Cidade Parque indicam avanços recentes na incorporação da agenda climática e ambiental nas políticas públicas locais. Embora persistam lacunas em sua operacionalização, esse arcabouço institucional pode ser fortalecido como via de inserção das SbN na governança climática urbana. Adicionalmente, o MAPLAC, mencionado no tópico anterior também reconhece a importância das SbN, e propõe a revisão do Plano Diretor e da legislação urbanística com o objetivo de incorporar diretrizes que incentivem a infraestrutura verde como componente funcional do sistema de drenagem. Ademais, o plano reconhece a necessidade de promover capacitação técnica, engajamento comunitário e monitoramento dos indicadores climáticos como parte da governança adaptativa.



Apesar das oportunidades institucionais, uma das barreiras mais críticas à implementação de SbN em larga escala em cidades como Recife emerge da complexa dinâmica de uso e ocupação do solo urbano. O processo histórico de crescimento desordenado, conforme apontado por, levou à formação de assentamentos irregulares em territórios ecologicamente sensíveis (SANTOS; HOFFMANN-HOROCHOVSKI, 2020). Essas moradias frequentemente se localizam em áreas de alto risco ambiental, como as margens de rios que são ocupadas de forma orgânica e ficam expostas a inundações recorrentes (POSSAMAI; GONÇALVES, 2017). A implementação de SbN essenciais para a resiliência climática, como a renaturalização de rios e a criação de parques lineares, exige, invariavelmente, a desocupação dessas áreas. Contudo, essa necessidade esbarra em uma abordagem do poder público que é frequentemente reativa, agindo apenas após os desastres (POSSAMAI; GONÇALVES, 2017), e em projetos de realocação conduzidos de forma apressada e sem participação comunitária efetiva, onde encontros servem apenas como comunicados unilaterais (ANDRADE; PEREIRA, 2014).

Na prática, essa abordagem de realocação costuma fracassar, o que se revela em uma série de novos problemas. A garantia de uma moradia adequada é comprometida por uma série de fatores: os novos assentamentos são frequentemente construídos em locais remotos, podendo distanciar as famílias em até 14 quilômetros de suas redes de trabalho e suporte (SANTOS; HOFFMANN-HOROCHOVSKI, 2020). Além do isolamento, a qualidade material das habitações é alvo de críticas, com relatos de apartamentos entregues inacabados, sem reboco ou cerâmica (ANDRADE; PEREIRA, 2014), transferindo os custos de finalização aos moradores. Confrontadas com a dificuldade de acesso a empregos, escolas e serviços, muitas famílias retornam às áreas de risco ou optam por vender ou alugar as unidades recebidas para se mudarem para outras localidades (POSSAMAI; GONÇALVES, 2017; ANDRADE; PEREIRA, 2014).

Esse ciclo resulta em um prejuízo duplo para o poder público, que perde o investimento em moradias abandonadas e continua a ter despesas com a prevenção de desastres (POSSAMAI; GONÇALVES, 2017). Na raiz dessas decisões está o fator econômico: a escolha por terrenos periféricos é uma resposta à inviabilidade financeira de adquirir áreas bem localizadas, cujos preços são inflados pela especulação imobiliária (POSSAMAI; GONÇALVES, 2017). Pois o direito à moradia adequada vai além da provisão de um teto, envolvendo a garantia de dignidade e qualidade de vida para a população (SANTOS; HOFFMANN-HOROCHOVSKI, 2020).

Inquestionavelmente, as barreiras de ordem social para implementação e sucesso das SbN também são ressaltadas por diferentes estudos. A falta de envolvimento comunitário é considerada um problema central (ANDERSON; RENAUD, 2021; MALLETT *et al.*, 2021), assim como a baixa conscientização pública quanto aos benefícios das SbN (KATO; TAJIMA, 2023; LOSADA *et al.*, 2019). Em certos contextos, essa lacuna gera resistência por parte das comunidades locais (KIRBY *et al.*, 2021; LEPESANT, 2024). Por vezes, observa-se ainda uma preferência por soluções tradicionais de engenharia “cinza”, consideradas mais tangíveis e reconhecíveis pela população (SEENATH *et al.*, 2025). Assim, os estudos convergem ao indicar que a superação desses obstáculos requer uma abordagem multifacetada.

De fato, além das intervenções físicas, uma parcela relevante dos estudos propõe soluções de caráter institucional ou social, como sistemas de alerta precoce (CAI *et al.*, 2021; LOSADA *et al.*, 2019), planejamento espacial marinho integrado (RIISAGER-SIMONSEN *et al.*, 2022; HERNÁNDEZ-DELGADO, 2024), educação ambiental comunitária e modelos participativos de governança (MADRAMOOTOO; VIRGIL, 2024; NEHREN *et al.*, 2023). Essas abordagens, embora menos tangíveis do ponto de vista físico, são essenciais para a implementação, aceitação e manutenção das intervenções ecológicas. Assim, abordagens combinadas, que integrem ações técnicas, sociais e baseadas na natureza, devem ser priorizadas, especialmente quando orientadas por processos participativos e de governança adaptativa.

De forma geral, apesar das barreiras mencionadas acima, evidências empíricas de diferentes regiões costeiras — incluindo Caribe, Sudeste Asiático e América do Norte — demonstram que as SbN podem ser mais custo-efetivas e resilientes a longo prazo do que as soluções tradicionais. Em muitos casos, essas estratégias reduziram significativamente danos durante furacões e tempestades, protegendo comunidades e economias locais, além de contribuir para uma trajetória de desenvolvimento mais sustentável (DEL VALLE *et al.*, 2020; WORLD BANK, 2022; PATHAK *et al.*, 2022). Adicionalmente, estratégias híbridas, que combinam infraestrutura cinza tradicional com SbN têm se mostrado promissoras, embora sua adoção dependa de capacidade institucional, aceitação social e viabilidade econômica (OPPENHEIMER *et al.*, 2019).

Em síntese, os resultados da revisão apontam que há um conjunto robusto de estratégias testadas em outros contextos tropicais e urbanizados que podem ser adaptadas à realidade da zona costeira de Recife, desde que sejam consideradas as especificidades socioambientais, institucionais e culturais da região. De forma geral, os estudos convergem para a conclusão de que as SbN são promissoras, mas não universalmente aplicáveis. Em cidades como Recife, onde

a linha de costa é densamente ocupada e os ecossistemas naturais foram suprimidos, as SbN precisam ser cuidadosamente planejadas, preferencialmente como componentes de soluções híbridas que combinem vegetação costeira, formas naturais restauradas e estruturas de engenharia adaptadas ao contexto urbano. A integração entre ciência, gestão pública e participação social é fundamental para garantir a viabilidade, a efetividade e a legitimidade dessas estratégias no enfrentamento dos riscos climáticos.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A pesquisa desenvolvida observou as SbN como alternativas para o enfrentamento da elevação do nível do mar em zonas urbanas costeiras, com foco na Região Metropolitana do Recife. A partir de uma revisão sistemática da literatura científica, foram identificadas e classificadas diferentes estratégias de SbN, avaliando-se sua aplicabilidade em contextos vulneráveis como o da capital pernambucana, onde os efeitos das mudanças climáticas se manifestam de forma intensa e desigual.

Os objetivos do estudo foram alcançados, visto que foi possível reunir, analisar e classificar as principais SbN aplicadas internacionalmente à adaptação costeira, identificando seus benefícios, limitações e condições para implementação. A partir dessa análise, foram discutidas as possíveis adaptações dessas estratégias à realidade de Recife, considerando aspectos ecológicos, urbanos, sociais e institucionais.

Com isso, foi possível demonstrar que as SbN representam uma abordagem promissora para a adaptação às mudanças climáticas, ao integrar proteção ambiental e resiliência urbana. Aplicadas ao contexto costeiro, essas soluções incluem estratégias como restauração de manguezais, recifes de coral, dunas e restingas e gramas marinhas, além de intervenções híbridas e bioinspiradas que combinam elementos naturais e estruturas artificiais. Além da eficácia na proteção costeira, essas soluções proporcionam serviços ecossistêmicos fundamentais, como sequestro de carbono, oferta de recursos pesqueiros e espaços de recreação, gerando benefícios econômicos, sociais e ambientais.

No entanto, embora a recuperação de ecossistemas seja amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz de adaptação baseada na natureza, é importante reconhecer suas limitações quando aplicada em contextos urbanos e estuarinos altamente modificados, como o da cidade do Recife. Em especial, a recuperação de manguezais localizados apenas em áreas internas do estuário apresenta uma contribuição mais indireta e complementar no enfrentamento da elevação do nível do mar e da erosão costeira. Os efeitos de proteção dos manguezais são mais evidentes em áreas abertas ou com espaço lateral suficiente para expansão e migração vertical dos ecossistemas frente ao avanço do mar. Em Recife, a faixa litorânea é altamente urbanizada e os canais estuarinos estão, em grande parte, canalizados e cercados por infraestrutura rígida, o que limita o potencial de resposta natural dos manguezais à elevação do nível do mar.

Assim, embora a restauração dos mangues internos contribua para o aumento da resiliência urbana, não constitui uma solução suficiente por si só para conter o avanço das águas sobre as zonas costeiras externas da cidade. Os manguezais recuperados em áreas internas ajudam a reduzir o impacto das marés em áreas adjacentes, a proteger margens fluviais contra erosão e a mitigar inundações pluviais e estuarinas, mas não substituem intervenções voltadas diretamente à linha de costa, como a regeneração de dunas frontais, recifes artificiais ou sistemas híbridos de defesa costeira. Dessa forma, a recuperação dos manguezais deve ser parte de uma abordagem integrada, combinada com outras soluções baseadas na natureza e medidas de adaptação físico-estruturais, considerando a complexidade do sistema urbano-estuarino de Recife e as restrições impostas pelo adensamento urbano e pelas mudanças climáticas.

Nesse sentido, a criação de dunas com vegetação estruturante, e as infraestruturas híbridas e bioinspiradas identificadas nos estudos podem ser mais viáveis para proteção da direta da região costeira. No entanto, ainda que o objetivo da proteção contra o aumento do nível do mar e erosão costeira seja atingido, a elevada impermeabilização da cidade continua sendo um fator preocupante. A impermeabilização junto com a extração de água dos aquíferos costeiros leva a uma salinização costeira e risco de subsidência costeira. Nesse sentido, o uso de estratégias adotadas nos modelos de cidade-esponja, como por exemplo os pavimentos permeáveis podem auxiliar na recarga de aquíferos costeiros e diminuição das enchentes. Outras estratégias como telhados verdes podem contribuir também com a gestão do excesso de água pluvial resultante dos eventos de chuva extremos.

Outra questão relevante é o custo-benefício das SbN. Embora frequentemente apontadas como opções de baixo custo em comparação às infraestruturas cinzas tradicionais, essa percepção varia conforme o contexto, o tipo de solução adotada e a escala temporal de análise. Algumas intervenções requerem investimentos iniciais elevados e manutenção contínua, o que pode representar desafios para cidades com restrições orçamentárias e capacidade institucional limitada. Ainda assim, a inclusão dos benefícios colaterais das SbN, como melhoria da qualidade ambiental, inclusão social e saúde pública, tende a demonstrar sua vantagem em análises de longo prazo.

Deve-se ressaltar também que a predominância de soluções baseadas na natureza neste levantamento, não deve ser interpretada como uma exclusividade ou superioridade automática dessas abordagens, mas como reflexo do foco temático da revisão. Ainda assim, a variedade de estratégias encontradas — incluindo híbridas e institucionais — aponta para a importância de se adotar portfólios combinados de adaptação, ajustados ao contexto socioambiental de cada

local. Além disso, a RMR conta com áreas urbanas densamente ocupadas onde soluções híbridas ou integradas podem ser mais viáveis do que abordagens exclusivamente baseadas na natureza. Exemplos incluem sistemas de drenagem natural com vegetação, parques lineares em margens de rios e estruturas de contenção verdes (blocos vegetados, espigões com função ecológica) que associem segurança física à geração de serviços ecossistêmicos.

Por último, embora o levantamento tenha como foco zonas costeiras, parte considerável das soluções discutidas tem caráter mais terrestre ou transicional do que marinho de fato. Poucas intervenções foram descritas especificamente para ambientes marinhos, como recifes artificiais, cultivos de macroalgas e proteção de prados de gramas marinhas, revelando um campo ainda pouco explorado na literatura. A ênfase em ambientes estuarinos, manguezais e zonas úmidas costeiras reflete não apenas a distribuição dos estudos, mas também os desafios de viabilidade técnica e monitoramento em mar aberto.

De forma geral, o presente estudo contribui para a ampliação do conhecimento sobre SbN em ambientes urbanos costeiros, articulando dados da literatura científica internacional com os desafios locais enfrentados por cidades como Recife. A pesquisa reforça a necessidade de estratégias adaptativas integradas e ajustadas à realidade socioambiental brasileira, com atenção especial às áreas socialmente vulneráveis. Existe uma urgência de implementar medidas de adaptação climática em cidades brasileiras, principalmente naquelas que, como Recife, enfrentam maiores riscos devido à sua localização próxima ao mar, densidade populacional elevada, infraestrutura urbana insuficiente para lidar com enchentes e desigualdade social. Este trabalho oferece informações que podem embasar políticas públicas voltadas à sustentabilidade e ao planejamento urbano consciente, destacando o potencial das SbN para reduzir riscos e melhorar a qualidade de vida urbana.

Do ponto de vista acadêmico e científico, este estudo contribui diretamente para o campo da Oceanografia, principalmente nas conexões com a gestão ambiental e o planejamento urbano sustentável. A investigação sobre a aplicabilidade das SbN em ambientes costeiros amplia o entendimento sobre a dinâmica costeira, os processos associados às mudanças climáticas e suas interações com o espaço urbano. Além disso, o trabalho reforça o papel da Oceanografia como campo capaz de integrar ciência, políticas públicas e sociedade na busca por soluções mais eficazes e sustentáveis.

Diante de tais considerações, recomenda-se que estudos futuros ampliem a base de dados para incluir artigos em língua portuguesa e explorem abordagens híbridas ainda pouco

discutidas no contexto nacional. Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de estudos de caso aplicados que contemplem indicadores qualitativos e quantitativos para mensurar os resultados das SbN a curto, médio e longo prazo, bem como a participação ativa das comunidades locais nos processos de planejamento e implementação.



## 6 REFERÊNCIAS

AJONINA, G. N. *et al.* Overview of experience of mangrove reforestation in West and Central Africa. **38th Annual Conference of Forestry Association of Nigeria (FAN)**, [s. l.], n. March, p. 11–21, 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Gordon-Ajonina/publication/314243276\\_Overview\\_of\\_experience\\_of\\_mangrove\\_reforestation\\_in\\_West\\_and\\_Central\\_Africa/links/58bd754845851591c5e99109/Overview-of-experience-of-mangrove-reforestation-in-West-and-Central-Afric](https://www.researchgate.net/profile/Gordon-Ajonina/publication/314243276_Overview_of_experience_of_mangrove_reforestation_in_West_and_Central_Africa/links/58bd754845851591c5e99109/Overview-of-experience-of-mangrove-reforestation-in-West-and-Central-Afric)>.

ALAGNA, A. *et al.* Taking advantage of seagrass recovery potential to develop novel and effective meadow rehabilitation methods. **Marine Pollution Bulletin**, dez. 2019. v. 149, n. March, p. 110578. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110578>>.

ALBERT, C. *et al.* Addressing societal challenges through nature-based solutions: How can landscape planning and governance research contribute? **Landscape and Urban Planning**, fev. 2019. v. 182, n. September 2017, p. 12–21. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.003>>.

ALVES, Stevam Gabriel. Primeiros levantamentos sobre o mangue urbano do centro do Recife. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 5., 2014, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: IBEAS, 2014. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/biblioteca/xi-033.pdf>.

AMMAR, M. S. A. Coral Reef Restoration and Artificial Reef Management, Future and Economic. **The Open Environmental Engineering Journal**, 1 jan. 2009. v. 2, n. 1, p. 37–49. Disponível em: <<http://benthamopen.com/ABSTRACT/TOENVIEJ-2-37>>.

ANDERSON, C. C.; RENAUD, F. G. A review of public acceptance of nature-based solutions: The ‘why’, ‘when’, and ‘how’ of success for disaster risk reduction measures. **Ambio**, 19 ago. 2021. v. 50, n. 8, p. 1552–1573. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13280-021-01502-4>>.

ANDERSON, V.; GOUGH, W. A. A Typology of Nature-Based Solutions for Sustainable Development: An Analysis of Form, Function, Nomenclature, and Associated Applications. **Land**, 13 jul. 2022. v. 11, n. 7, p. 1072. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-445X/11/7/1072>>.

ANDRADE, Daniel Caixeta; ROMEIRO, Ademar Ribeiro. **Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano**. Texto para discussão. IE/UNICAMP, v. 155, p. 1-43, 2009.

ANDRADE, Lorryne Regis de; PEREIRA, Mônica Cox de Britto. Impactos socioambientais geradas pela Via Mangue (Recife-PE) e análise das desigualdades socioespaciais. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 31, n. 2, 2014.

ANDRESENA, Aan. **What’s a Bioswale?** LinkedIn, 2020. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/whats-bioswale-aan-andresena>>. Acesso em: 30 jul. 2025.

ANGUS, S.; HANSOM, J. D. Enhancing the resilience of high-vulnerability, low-elevation coastal zones. **Ocean & Coastal Management**, fev. 2021. v. 200, n. November 2020, p. 105414. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105414>>.

ANTHONY, K.; LARCOMBE, P. Coral reefs in turbid waters: sediment-induced stresses in corals and likely mechanisms of adaptation. **Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium**, 2000. v. I, n. October, p. 239–244.

ARIFANTI, V. B. *et al.* Contributions of mangrove conservation and restoration to climate change mitigation in Indonesia. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 15, p. 4523–4538, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.16216>.

ASAEDA, T. *et al.* Mangrove plantation over a limestone reef – Good for the ecology? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, maio. 2016. v. 173, p. 57–64. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.02.017>>.

BARNETT, J. *et al.* Nature-based solutions for atoll habitability. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 4 jul. 2022. v. 377, n. 1854. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2021.0124>>.

BARNUEVO, A. *et al.* Drawbacks of mangrove rehabilitation schemes: Lessons learned from the large-scale mangrove plantations. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 198, p. 432–437, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.02.015>.

BARRADAS, J. I. *et al.* Spatial distribution of benthic macroorganisms on reef flats at Porto de Galinhas Beach (northeastern Brazil), with special analysis in corals and calcified hydroids. **Biotemas**, 8 abr. 2011. v. 23, n. 2. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/17796>>.

BASUKI, I. *et al.* Reforestation Opportunities in Indonesia: Mitigating Climate Change and Achieving Sustainable Development Goals. **Forests**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 447, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/3/447>.

BASYUNI, M. *et al.* Evaluation of mangrove reforestation and the impact to socioeconomic-cultural of community in Lubuk Kertang village, North Sumatra. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 126, n. February 2018, p. 012113, 2018. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/140/1/012115/meta>.

BATES, A. E. *et al.* Climate resilience in marine protected areas and the ‘Protection Paradox’. **Biological Conservation**, 2019. v. 236, p. 305–314. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320718308346>>.

BAYRAKTAROV, E. *et al.* Motivations, success, and cost of coral reef restoration. *Restoration Ecology*, 17 set. 2019. v. 27, n. 5, p. 981–991. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12977>>.

BEESTON, M., CAMERON, C., HAGGER, V., HOWARD, J., LOVELOCK, C., SIPPO, J., TONNEIJK, F., VAN BIJSTERVELDT, C. E VAN EIJK, P. (Editores). Diretrizes para melhores práticas de restauração de manguezais., 2023. 53 p. Disponível em: <<https://www.mangrovealliance.org/wp-content/uploads/2024/02/Portuguese-Best-Practice-Mangrove-Restoration-Guidelines.pdf>>.

BENTO, Eloiza da Silva. Aspectos etnoecológicos da carcinicultura no Parque dos Manguezais e Ilha de Deus. 2012

BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* Restoration of Seagrass Meadows in the Mediterranean Sea: A Critical Review of Effectiveness and Ethical Issues. *Water*, 9 abr. 2021. v. 13, n. 8, p. 1034. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/8/1034>>.

BRAGA, Magda Marinho *et al.* Manguezais como estoques de carbono: biomassa acima do solo e o potencial econômico desse estoque na floresta de mangue do Rio Pacoti, Ceará. *Caderno de Geografia*, v. 34, n. 77, p. 450-450, 2024.

BRILHANTE, Anna Kryslene Viana Chianca. *Transição para cidade-esponja: desafios e oportunidades para a cidade de João Pessoa-PB*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

BUELOW, C. A. *et al.* Ambitious global targets for mangrove and seagrass recovery. *Current Biology*, [s. l.], v. 32, n. 7, p. 1641-1649.e3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.02.013>.

CAI, R. *et al.* Climate change and China's coastal zones and seas: Impacts, risks, and adaptation. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, dez. 2021. v. 19, n. 4, p. 304–310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cjpre.2022.01.003>>.

CALLIARI, E. *et al.* Building climate resilience through nature-based solutions in Europe: A review of enabling knowledge, finance and governance frameworks. *Climate Risk Management*, 2022. v. 37, n. July, p. 100450. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100450>>.

CDB - SECRETARIAT OF THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. **Ecosystem-based approaches to climate change adaptation and mitigation**. Montreal: CBD Technical Series No. 85, 2019. Disponível em: <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-85-en.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2025.

CHEE, S. Y. *et al.* Enhancing Uptake of Nature-Based Solutions for Informing Coastal Sustainable Development Policy and Planning: A Malaysia Case Study. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 28 set. 2021. v. 9, n. September, p. 1–18. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.708507/full>>.

CHENG, C.; LI, F. Ecosystem restoration and management based on nature-based solutions in China: Research progress and representative practices. *Nature-Based Solutions*, dez. 2024. v. 6, n. August, p. 100176. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100176>>.

CHIU, Y.-Y.; RAINA, N.; CHEN, H.-E. Evolution of Flood Defense Strategies: Toward Nature-Based Solutions. *Environments*, 23 dez. 2021. v. 9, n. 1, p. 2. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3298/9/1/2>>.

ÇINAR, M. *et al.* Blue Carbon as a Nature-Based Mitigation Solution in Temperate Zones. *Sustainability*, 28 ago. 2024. v. 16, n. 17, p. 7446. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7446>>.

COHEN-SHACHAM, E. *et al.* **Core principles for successfully implementing and upscaling nature-based solutions**. Gland: IUCN, 2019.

COHN, J. L. *et al.* Strategies to work towards long-term sustainability and resiliency of nature-based solutions in coastal environments: A review and case studies. **Integrated Environmental Assessment and Management**, 1 jul. 2021. v. 18, n. 1, p. 123–134. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ieam/article/18/1/123/7727006>>.

COPPENOLLE, R. VAN; TEMMERMAN, S. Identifying Ecosystem Surface Areas Available for Nature-Based Flood Risk Mitigation in Coastal Cities Around the World. **Estuaries and Coasts**, 3 set. 2020. v. 43, n. 6, p. 1335–1344. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12237-020-00718-z>>.

CORMIER-SALEM, M.; PANFILI, J. Mangrove reforestation: greening or grabbing coastal zones and deltas? Case studies in Senegal. **African Journal of Aquatic Science**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 89–98, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2989/16085914.2016.1146122>.

CORRÊA, Marina Ribeiro *et al.* Desafios para promoção da abordagem ecossistêmica à gestão de praias na América Latina e Caribe. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 219-236, 2021.

COSTA, S. M. S.; MARTINS, F. M.; SILVA, F. A. Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 1, p. 95–107, 2010.

CUNHA, A. H. *et al.* Changing Paradigms in Seagrass Restoration. *Restoration Ecology*, 7 jul. 2012. v. 20, n. 4, p. 427–430. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1526-100X.2012.00878.x>>.

DA SILVA MELO, José Gustavo; SILVA, Elisabeth Regina Alves Cavalcanti. Avaliação do estuário do Capibaribe (Recife/Pernambuco, Brasil) acerca da degradação ambiental nos manguezais em ambientes urbanos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 1, 2018.

DAL BARCO, M. K. *et al.* Multi-scenario analysis in the Apulia shoreline: A multi-tiers analytical framework for the combined evaluation and management of coastal erosion and water quality risks. **Environmental Science & Policy**, mar. 2024. v. 153, n. December 2023, p. 103665. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103665>>.

DARKE, I. B.; WALKER, I. J.; HESP, P. A. Beach–dune sediment budgets and dune morphodynamics following coastal dune restoration, Wickaninnish Dunes, Canada. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 41, n. 10, p. 1370–1385, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3910>.

DE SANTANA, Antônio Cordeiro *et al.* A importância dos serviços ecossistêmicos para o desenvolvimento econômico e o bem-estar social na percepção da população: o caso da Floresta Nacional de Carajás. **Nativa**, v. 6, 2018.

DEL VALLE, A. *et al.* Mangroves for Coastal Protection: Evidence from Hurricanes in Central America. *PNAS*, 2020, v. 117, n. 1, p. 265–270.

DIDIER, Márcio. **Jaboatão abre Semana do Meio Ambiente com foco na agenda climática.** Márcio Didier. Jaboaão dos Guararapes, 2 jun. 2025. Disponível em: <https://marciodidier.com.br/2025/06/02/jaboatao-meio-ambiente/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

DUARTE, C. M. *et al.* The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 3, n. 11, p. 961–968, 2013. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate1970>.

DUARTE, C. M. The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation*, 21 jun. 2002. v. 29, n. 2, p. 192–206. Disponível em: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892902000127/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892902000127/type/journal_article).

EDIS. **Permeable Pavement for Stormwater Management in Florida.** AE530, University of Florida, 2023. <Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE530>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ELSTER, C. Reasons for reforestation success and failure with three mangrove species in Colombia. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 131, n. 1–3, p. 201–214, 2000. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112799002145>.

EPSTEIN, N.; BAK, R. P. M.; RINKEVICH, B. Strategies for Gardening Denuded Coral Reef Areas: The Applicability of Using Different Types of Coral Material for Reef Restoration. *Restoration Ecology*, 21 dez. 2001. v. 9, n. 4, p. 432–442. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1526-100X.2001.94012.x>.

FERNÁNDEZ-MONTBLANC, T.; DUO, E.; CIAVOLA, P. Dune reconstruction and revegetation as a potential measure to decrease coastal erosion and flooding under extreme storm conditions. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 188, n. February, p. 105075, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0964569119309445>.

FERREIRA JÚNIOR, A. V. *et al.* Beachrocks of the northeast of Brazil: local effects of sea level fluctuations in a far-field during in Holocene. **Ocean and Coastal Research**, 2024. v. 72, p. 1–15. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2675-28242024000100305&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2675-28242024000100305&tlng=en).

FERREIRA, M. E. A. *et al.* Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 11, p. 83–101, 2012.

FERREIRA, Ó. The effectiveness of elevated boardwalks in restoring coastal dunes. **Journal of environmental management**, 1 nov. 2023. v. 345, n. July, p. 118759. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37591096>.

FINEP/UFPE. **Monitoramento Ambiental Integrado - MAI-PE.** Recife-PE, Brasil: Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, 2009. v. 1, 2 e 3. p. 485.

FONSECA NETO, G. C. *et al.* ÁREAS VULNERÁVEIS AO AUMENTO DO NÍVEL DO MAR EM CIDADES COSTEIRAS: UM ESTUDO NA CIDADE DO RECIFE, BRASIL. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, 25 maio. 2022. v. 12, n. 1, p. 20–27. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/jhrs/article/view/252409>.

- FOTI, E.; MUSUMECI, R. E.; STAGNITTI, M. Coastal defence techniques and climate change: a review. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, 20 mar. 2020. v. 31, n. 1, p. 123–138. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12210-020-00877-y>>.
- GALLINA, V. *et al.* A Multi-Risk Methodology for the Assessment of Climate Change Impacts in Coastal Zones. **Sustainability**, 2 maio. 2020. v. 12, n. 9, p. 3697. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3697>>.
- GANASSIN, C.; GIBBS, P. J. A review of seagrass planting as a means of habitat compensation following loss of seagrass meadow. *Australian Studies*, 2008. n. 96, p. 43.
- GARMENDIA, J. M. *et al.* Restoring seagrass meadows in Basque estuaries: nature-based solution for successful management. *Nature-Based Solutions*, dez. 2023. v. 4, n. April, p. 100084. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772411523000368>>.
- GOMES, V. J. C. *et al.* Nature-based solutions implications for the eastern Amazon Coastline: The role of mangrove in coastal protection. **Regional Studies in Marine Science**, jun. 2025. v. 84, n. March, p. 104129. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104129>>.
- GOOGLE. **Google Scholar Metrics**. 2025 Disponível em: <<https://scholar.google.com/intl/pt-BR/scholar/metrics.html>>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- GREINER, J. T. *et al.* Seagrass Restoration Enhances “Blue Carbon” Sequestration in Coastal Waters. *PLoS ONE*, 14 ago. 2013. v. 8, n. 8, p. e72469. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0072469>>.
- GUEDES, Flávio Leôncio; GUSMÃO, Amanda Cristina Santos; SILVA, Rafaela de Sá Oliveira; VASCONCELOS, Hédlla Maria de Santana. Impactos ambientais gerados por resíduos sólidos lançados no Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro, Recife-PE. In: LOPES, Iara; SILVA, Rosilene (org.). **Impacto socioambiental: contribuições interdisciplinares**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2018. cap. 7.5, p. 561–572. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/343224480>.
- HARUN-OR-RASHID, S. *et al.* Mangrove community recovery potential after catastrophic disturbances in Bangladesh. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 257, n. 3, p. 923–930, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112708007986>.
- HEIN, M. Y. *et al.* Perspectives on the Use of Coral Reef Restoration as a Strategy to Support and Improve Reef Ecosystem Services. *Frontiers in Marine Science*, 1 abr. 2021. v. 8, n. April, p. 1–13. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.618303/full>>.
- HENUD, I. R. *et al.* Coastal resilience and adaptation strategies: Natural habitats for coastal protection and Atlantic forest restoration on the coast of the Rio de Janeiro state. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, out. 2024. v. 113, n. June, p. 104861. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104861>>.
- HERNÁNDEZ-DELGADO, E. A. Coastal Restoration Challenges and Strategies for Small Island Developing States in the Face of Sea Level Rise and Climate Change. **Coasts**, 1 abr. 2024. v. 4, n. 2, p. 235–286. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-964X/4/2/14>>.

HOPPIT, G. *et al.* Are marine protected areas an adaptation measure against climate change impacts on coastal ecosystems? A UK case study. **Nature-Based Solutions**, dez. 2022. v. 2, n. July, p. 100030. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100030>>.

HOWIE, A. H.; BISHOP, M. J. Contemporary Oyster Reef Restoration: Responding to a Changing World. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3 ago. 2021. v. 9, n. August, p. 1–15. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.689915/full>>.

HUGHES, T. P. *et al.* Principles for coral reef restoration in the anthropocene. *One Earth*, jun. 2023. v. 6, n. 6, p. 656–665. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.04.008>>.

HÜLSEN, S. *et al.* Global protection from tropical cyclones by coastal ecosystems—past, present, and under climate change. **Environmental Research Letters**, 1 dez. 2023. v. 18, n. 12, p. 124023. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad00cd>>.

IFTEKHAR, M.S. Functions and development of reforested mangrove areas: A review. **International Journal of Biodiversity Science & Management**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–14, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17451590809618179>.

IPCC. *Cities and Settlements by the Sea*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022a. 108 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/srocc/crc/cities-by-the-sea/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 19 fev. 2025.

IPCC. *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. 2391 p.. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 19 fev. 2025.

IPCC. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editado por H.-O. Pörtner *et al.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022b.

IPCC. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation – SREX*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

IPCC. *Mudança do clima e a terra: sumário para formuladores de políticas*. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. Versão traduzida pelo Governo do Brasil. 2019a. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/10/SRCL.Port-WEB.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2025.

IPCC. *Oceano e a criosfera em um clima em mudança: sumário para formuladores de políticas*. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Versão traduzida pelo Governo do Brasil. 2019b. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/11/SROCC\\_SPM\\_Portuguese.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/11/SROCC_SPM_Portuguese.pdf). Acesso em: 15 jan. 2025.

IPCC. *Sumário para os formuladores de políticas*. In: *Mudança do clima 2007: impactos, adaptação e vulnerabilidade*. Contribuição do Grupo de Trabalho II ao Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (eds.)]. Versão traduzida por Anexandra de Ávila Ribeiro; revisão da tradução pelo Serviço de Tradução do Senado Federal; revisão técnica da tradução por José Antônio Marengo Orsini. 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/03/ar4-wg2-spm.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ISLAM, S. *et al.* The Integration of Nature-Based Solutions into Climate Adaptation Policy and Planning in Bangladesh. **Journal of Science Policy & Governance**, 21 jun. 2021. v. 18, n. 02. Disponível em: [https://www.sciencepolicyjournal.org/article\\_1038126\\_jspgl80204.html](https://www.sciencepolicyjournal.org/article_1038126_jspgl80204.html).

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Ecosystem-based adaptation: Knowledge gaps in making an economic case for investing in nature-based solutions for climate change**. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2015.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Global standard for nature-based solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS**. First edition. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2020b. 48 p.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Nature-based solutions to address global societal challenges**. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2016. 24 p.

IUCN - INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. **Soluções baseadas na natureza: padrões globais para garantir sua eficácia e sustentabilidade**. Gland: IUCN, 2020a. Disponível em: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-029-Pt.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2025.

JAAP, W. C. Coral reef restoration. *Ecological Engineering*, 23 jul. 2000. v. 15, n. 3–4, p. 345–364.

JACKSON, D. W. T. *et al.* A global ‘greening’ of coastal dunes: An integrated consequence of climate change? **Global and Planetary Change**, [s. l.], v. 182, n. June, p. 103026, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103026>.

JIA, M. *et al.* Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: The achievements of mangrove conservation in China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 73, n. June, p. 535–545, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.025>.



JONES, H. P. *et al.* Global hotspots for coastal ecosystem-based adaptation. **PLOS ONE**, 29 maio. 2020. v. 15, n. 5, p. e0233005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0233005>>.

JORDAN, P.; FRÖHLE, P. Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation? **Journal of Coastal Conservation**, 23 abr. 2022. v. 26, n. 2, p. 4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11852-021-00848-x>>.

JÚNIOR, João Jorge Silva; NICACIO, Gilberto; RODRIGUES, Gilberto Gonçalves. A carcinicultura nos manguezais do Nordeste brasileiro: problemáticas socioambientais nas comunidades tradicionais. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, v. 9, n. 2, p. 70-84, 2020.

KATO, F.; TAJIMA, Y. Coastal adaptation to climate change in Japan: a review. **Coastal Engineering Journal**, 2 out. 2023. v. 65, n. 4, p. 597–619. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2259187>>.

KATWIJK, M. M. VAN *et al.* Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting. *Journal of Applied Ecology*, 25 abr. 2016. v. 53, n. 2, p. 567–578. Disponível em: <<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.12562>>.

KHAWAJA, M. *et al.* Approaching a nearly zero-energy building in integrated building design by using green roof and double skin façade as major energy saving strategies Integrated Building design View project Building energy modelling and envelope design View project Approac. **Integrated Building Design**, 2018. n. November. Disponível em: <[www.2030palette.org](http://www.2030palette.org)>.

KINDEBERG, T. *et al.* Toward a multifunctional nature-based coastal defense: a review of the interaction between beach nourishment and ecological restoration. **Nordic Journal of Botany**, 13 jan. 2023. v. 2023, n. 1, p. 1–14. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/njb.03751>>.

KIRBY, J. A. *et al.* Coastal adaptation to climate change through zonation: A review of coastal change management areas (CCMAs) in England. **Ocean & Coastal Management**, dez. 2021. v. 215, n. June, p. 105950. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105950>>.

KNIGHT, J. The Green Infrastructure of Sandy Coastlines: A Nature-Based Solution for **Mitigation of Climate Change Risks**. *Sustainability*, 25 jan. 2024. v. 16, n. 3, p. 1056. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/3/1056>>.

KUMAR, P. *et al.* Towards an operationalisation of nature-based solutions for natural hazards. **Science of The Total Environment**, ago. 2020. v. 731, p. 138855. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138855>>.

LA PEYRE, M. K. *et al.* Temporal variation in development of ecosystem services from oyster reef restoration. *Ecological Engineering*, fev. 2014. v. 63, p. 34–44. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.001>>.

LE MINOR, M. *et al.* Numerical modelling of hydraulics and sediment dynamics around mangrove seedlings: Implications for mangrove establishment and reforestation. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 217, n. April 2018, p. 81–95, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.10.019>.

LEE, S.; HALL, G.; TRENCH, C. The role of Nature-based Solutions in disaster resilience in coastal Jamaica: current and potential applications for ‘building back better’. **Disasters**, 13 jul. 2022. v. 46, n. S1, p. S78–S100. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/disa.12539>.

LEMOS, G. L. De *et al.* Nature-based solutions experiences: A systematic literature review for public policies. **Nature-Based Solutions**, jun. 2024. v. 5, n. March, p. 100121. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772411524000120>.

LEPESANT, G. Between hard protection measures, nature-based solutions, and managed retreat: Adapting coastal areas to sea level rise in the Netherlands and France. **Zeitschrift für Vergleichende Politikwissenschaft**, 8 mar. 2024. v. 18, n. 2, p. 141–156. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12286-024-00591-1>.

LESTER, S. *et al.* Biological effects within no-take marine reserves: a global synthesis. **Marine Ecology Progress Series**, 29 maio. 2009. v. 384, p. 33–46. Disponível em: <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v384/p33-46/>.

LEVY, J. S.; BAN, N. C. A method for incorporating climate change modelling into marine conservation planning: An Indo-west Pacific example. **Marine Policy**, 2013. v. 38, p. 16–24. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X12001030>.

LEWIS, R. R. III; BROWN, B. *Reabilitação ecológica de manguezais: um guia prático de campo*. [S.l.]: Raízes da Cooperação, 2024. 39 p. Disponível em: [https://raizesdacooperacao.org.br/wp-content/uploads/2024/12/Reabilitacao-ecologica-de-manguezais-11-12-2024\\_compressed.pdf](https://raizesdacooperacao.org.br/wp-content/uploads/2024/12/Reabilitacao-ecologica-de-manguezais-11-12-2024_compressed.pdf). Acesso em: 26 jul. 2025.

LIRMAN, D.; SCHOPMEYER, S. Ecological solutions to reef degradation: optimizing coral reef restoration in the Caribbean and Western Atlantic. *PeerJ*, 20 out. 2016. v. 4, n. 10, p. e2597. Disponível em: <https://peerj.com/articles/2597>.

LISE, F.; GIANLUCA, F.; PIERRE, F. Blue Nature-Based Solutions in marine and coastal EU policies: Challenges, recommendations and policy opportunities throughout the policy cycle. **Marine Policy**, jul. 2025. v. 177, n. February, p. 106687. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106687>.

LITHGOW, D.; MARTÍNEZ, M. L.; GALLEGU-FERNÁNDEZ, J. B. The “ReDune” index (Restoration of coastal Dunes Index) to assess the need and viability of coastal dune restoration. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 49, p. 178–187, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.017>.

LIU, S. *et al.* Changes in surface sediment carbon compositions in response to tropical seagrass meadow restoration. *Science of The Total Environment*, dez. 2023. v. 903, n. May, p. 166565. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166565>.

LIU, S. *et al.* Nature-based solutions for coastal restoration during urbanization: Implications of a case study along Chaoyang Port Coast, China. **Ocean & Coastal Management**, jul. 2025. v. 266, n. March, p. 107691. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096456912500153X>>.

LOCATELLI, B. *et al.* Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. **Restoration Ecology**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 337–343, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12209>.

LONG, R. D.; CHARLES, A.; STEPHENSON, R. L. Key principles of marine ecosystem-based management. **Marine Policy**, jul. 2015. v. 57, p. 53–60. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2015.01.013>>.

LOSADA, I. J. *et al.* A planning strategy for the adaptation of coastal areas to climate change: The Spanish case. **Ocean & Coastal Management**, dez. 2019. v. 182, n. September, p. 104983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104983>>.

LOVELOCK, C. E. *et al.* Mangrove ecology guiding the use of mangroves as nature-based solutions. **Journal of Ecology**, 7 nov. 2024. v. 112, n. 11, p. 2510–2521. Disponível em: <<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2745.14383>>.

LUCATELLO, S.; ALCÁNTARA-AYALA, I. Sustainable Synergy: Strengthening disaster risk reduction in Latin America and the Caribbean through nature-based solutions. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, out. 2024. v. 113, n. September, p. 104860. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420924006228>>.

MABUCHI, KENTA. **ACROS Fukuoka 2011**. 2011. Fotografia. Disponível em: <[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:ACROS\\_Fukuoka\\_2011.jpg](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:ACROS_Fukuoka_2011.jpg)> Acesso em: 30 jun. 2025.

MADRAMOOTOO, C. A.; VIRGIL, C. Nature-based solutions for coastal protection in the southern Caribbean. **Blue-Green Systems**, 1 dez. 2024. v. 6, n. 2, p. 185–197. Disponível em: <<https://iwaponline.com/bgs/article/6/2/185/103092/Nature-based-solutions-for-coastal-protection-in>>.

MALLETTE, A. *et al.* Understanding Preferences for Coastal Climate Change Adaptation: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, 1 ago. 2021. v. 13, n. 15, p. 8594. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/15/8594>>.

MANES, S. *et al.* Nature as a solution for shoreline protection against coastal risks associated with ongoing sea-level rise. **Ocean & Coastal Management**, mar. 2023. v. 235, n. July 2022, p. 106487. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106487>>.

MARENGO, J. A. *et al.* Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, 100545, 2023.

MARTÍNEZ, M. L.; GALLEGU-FERNÁNDEZ, J. B.; HESP, P. A. **Restoration of Coastal Dunes**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. (Springer Series on Environmental Management). Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33445-0>.

MARTINS, K. A. *et al.* Determinação da erosão costeira no estado de Pernambuco através de geoindicadores. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 3, 2016. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/854>. Acesso em: 08 fev. 2025.

MARTINS, Karoline Angélica. **Vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas através de indicadores em Pernambuco, Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/13925>. Acesso em: fev. 2025.

MCT/UFPE. **Mapeamento sonográfico e batimétrico da Plataforma Continental Interna adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes-PE para a caracterização da dinâmica erosiva da região - MAPLAC**. Recife-PE, Brasil: Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT, 2010. p. 32.

MELLIN, C. *et al.* Marine protected areas increase resilience among coral reef communities. **Ecology Letters**, 1 jun. 2016. v. 19, n. 6, p. 629–637. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ele.12598>.

MELO NETO, Moisés Monteiro de. **Diversidade biológica e cultural nos mangues do Recife**. 2011. Tese (Doutorado em Antropologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MORAES, R. P. L. *et al.* Nature-Based Solutions in Coastal and Estuarine Areas of Europe. **Frontiers in Environmental Science**, 29 jun. 2022. v. 10, n. June, p. 1–12. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.829526/full>.

MORRIS, R. L. *et al.* From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. **Global Change Biology**, 16 maio. 2018. v. 24, n. 5, p. 1827–1842. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.14063>.

MOURA, Célio Henrique Rocha *et al.* Patrimônio natural em contexto urbano: a gestão da conservação do Parque dos Manguezais, Recife-PE. **Paisagem e Ambiente**, v. 32, n. 47, p. e176503-e176503, 2021.

NAÇÕES UNIDAS. **Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas (2021–2030)**. Nova York: ONU, 2021. Disponível em: <https://www.decadeonrestoration.org>. Acesso em: 28 jul. 2025.

NAGABHATLA, N. *et al.* Ecosystem-based approach for planning research and capacity development for integrated coastal zone management in Southeast Asia. **APN Science Bulletin**, 2019. v. 9, n. 1, p. 3–9. Disponível em: <https://www.apn-gcr.org/bulletin/?p=537>.

NAGELKERKEN, I. *et al.* The seascape nursery: a novel spatial approach to identify and manage nurseries for coastal marine fauna. **Fish and Fisheries**, 2 jun. 2015. v. 16, n. 2, p. 362–371. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/faf.12057>.

NEHREN, U. *et al.* Towards a typology of nature-based solutions for disaster risk reduction. **Nature-Based Solutions**, dez. 2023. v. 3, n. March, p. 100057. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100057>.

NORDIC COUNCIL OF MINISTERS. **Nature-based solutions in the Nordic region: Synergies, opportunities and challenges**. Copenhagen: Nord 2024:558, 2024. Disponível em: <https://pub.norden.org/temanord2024-558>. Acesso em: 28 jul. 2025.

NUNES, Ilka Branco *et al.* GESTÃO DE ÁREAS COSTEIRAS E MARINHAS PROTEGIDAS NO NORDESTE DO BRASIL. **Ciências do Mar: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil**, p. 298., 2021. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/353924354\\_GESTAO\\_DE\\_AREAS\\_COSTEIRAS\\_E\\_MARINHAS\\_PROTEGIDAS\\_NO\\_NORDESTE\\_DO\\_BRASIL](https://www.researchgate.net/publication/353924354_GESTAO_DE_AREAS_COSTEIRAS_E_MARINHAS_PROTEGIDAS_NO_NORDESTE_DO_BRASIL)>.

O'LEARY, B. C. *et al.* Embracing Nature-based Solutions to promote resilient marine and coastal ecosystems. **Nature-Based Solutions**, dez. 2023. v. 3, n. December 2022, p. 100044. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772411522000362>>.

OLIVEIRA, T. D. S. *et al.* Processo sedimentar atual e distribuição da matéria orgânica em um complexo estuarino tropical, Recife, PE, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 14, n. 3, p. 399-411, 2014.

OPPENHEIMER, M. *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. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>.

ORCHARD, S.; SCHIEL, D. R. Enabling nature-based solutions for climate change on a peri-urban sandspit in Christchurch, New Zealand. **Regional Environmental Change**, 9 set. 2021. v. 21, n. 3, p. 66. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10113-021-01791-1>>.

ORTH, R. J. *et al.* Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services. *Science Advances*, 9 out. 2020. v. 6, n. 41, p. 1–9. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abc6434>>.

OXMANN, J. F. *et al.* Mangrove reforestation in Vietnam: the effect of sediment physicochemical properties on nutrient cycling. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 326, n. 1–2, p. 225–241, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11104-009-0003-4>.

PALING, E. I. *et al.* Seagrass Restoration. *Coastal Wetlands - An integrated ecosystem approach*, 2009. p. 687–713.

PATHAK, A. *et al.* Incorporating Nature-based Solutions in Community Climate Adaptation Planning. National Wildlife Federation, 2022.

PAULO, D. *et al.* Open Coast Seagrass Restoration. Can We Do It? Large Scale Seagrass Transplants. *Frontiers in Marine Science*, 7 mar. 2019. v. 6, n. MAR, p. 1–15. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00052/full>>.

PEIXOTO, R. S. *et al.* The critical role of coral reef restoration in a changing world. *Nature Climate Change*, 29 dez. 2024. v. 14, n. 12, p. 1219–1222. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41558-024-02202-z>>.

PEREIRA, P. S. *et al.* **Atlas da vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas em Pernambuco**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2015. 98 p. ISBN 978-85-415-0788-2.

Disponível em: <https://semas.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/Atlas-da-Vulnerabilidade.pdf>. Acesso em: dez. 2024.

PERRICONE, V. *et al.* Nature-based and bioinspired solutions for coastal protection: an overview among key ecosystems and a promising pathway for new functional and sustainable designs. **ICES Journal of Marine Science**, 29 jun. 2023. v. 80, n. 5, p. 1218–1239. Disponível em: <<https://academic.oup.com/icesjms/article/80/5/1218/7181089>>.

POSSAMAI, Eduardo Felipe; GONÇALVES, Alice Rauber. Dificuldades de realocação de famílias carentes em áreas inundáveis. In: CONGRESSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (CCTEC), 11., 2017, Lajeado. **Anais... Lajeado**: Univates, 2017.

PREFEITURA DO RECIFE. Prefeitura do Recife republica licitação de requalificação da orla da capital. *Portal da Prefeitura do Recife*, Recife, 25 mar. 2024. Disponível em: <<https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/25/03/2024/prefeitura-do-recife-republica-licitacao-de-requalificacao-da-orla-da-capita0l>>. Acesso em: jul. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DO RECIFE. Decreto nº 34.015, de 30 de setembro de 2020. Regulamenta a unidade de conservação da natureza – ARIE Lagoa do Araçá, nos termos do art. 61 da Lei Municipal nº 18.014/2014, que instituiu o Sistema Municipal de Unidades Protegidas (SMUP); aprova o Plano de Manejo da referida UCN (Anexo I); e revoga o Decreto Municipal nº 18.029/1998. Recife, 30 set. 2020.

PRICOPE, N.; SHIVERS, G. Wetland Vulnerability Metrics as a Rapid Indicator in Identifying Nature-Based Solutions to Mitigate Coastal Flooding. **Hydrology**, 2 dez. 2022. v. 9, n. 12, p. 218. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5338/9/12/218>>.

QIAO, X.-J.; LIAO, K.-H.; RANDRUP, T. B. Sustainable stormwater management: A qualitative case study of the Sponge Cities initiative in China. **Sustainable Cities and Society**, fev. 2020. v. 53, n. July 2019, p. 101963. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101963>>.

QIN, X.; WANG, S.; MENG, M. SEA for better climate adaptation in the face of the flood risk: Multi-scenario, strategic forecasting, nature-based solutions. **Environmental Impact Assessment Review**, maio. 2024. v. 106, n. December 2023, p. 107495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107495>>.

QUAGLIOLO, C. *et al.* Pluvial flood adaptation using nature-based solutions: An integrated biophysical-economic assessment. **Science of The Total Environment**, dez. 2023. v. 902, n. February, p. 166202. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166202>>.

RACHMAYANI, A. N. **Ecological Restoration of Aquatic and Semi-Aquatic Ecosystems in the Netherlands (NW Europe)**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-94-017-1335-1>.

RAO, R. G. Climate change mitigation through reforestation in Godavari mangroves in India. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 340–355, 2009. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/17568690911002870/full/html>.

RAU, Stefan. Climate Resilient Sponge Cities—Concepts and Tools to Integrate Green-Blue and Grey Systems. In: **KEEP ON PLANNING FOR THE REAL WORLD. Climate Change calls for Nature-based Solutions and Smart Technologies. Proceedings of REAL CORP 2024, 29th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society**. CORP—Competence Center of Urban and Regional Planning, 2024. p. 123-135.

RAZAK, T. B. *et al.* Coral reef restoration in Indonesia: A review of policies and projects. *Marine Policy*, mar. 2022. v. 137, p. 104940. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308597X21005510>>.

RECIFE CIDADE PARQUE. Cenários Futuros - Oceanografia Física. Recife: Prefeitura do Recife, 2025a.

RECIFE CIDADE PARQUE. Relatório de Diagnóstico da bacia do Tejió - Oceanografia Recife: Prefeitura do Recife, 2025b.

REGUERO, B. G. *et al.* Comparing the cost effectiveness of nature-based and coastal adaptation: A case study from the Gulf Coast of the United States. **PLOS ONE**, 11 abr. 2018. v. 13, n. 4, p. e0192132. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0192132>>.

REID, J. *et al.* Adapting to climate change through nature-based solutions and indigenous knowledge: the case for landscape-scale ecosystem regeneration in the Rokohouia Delta. **Kōtuitui: New Zealand Journal of Social Sciences Online**, 3 abr. 2025. v. 20, n. 2, p. 249–267. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1177083X.2023.2299364>>.

RENDÓN, O. R.; SANDORF, E. D.; BEAUMONT, N. J. Heterogeneity of values for coastal flood risk management with nature-based solutions. **Journal of Environmental Management**, fev. 2022. v. 304, n. December 2021, p. 114212. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030147972102274X>>.

REYNOLDS, L. K. *et al.* Ecosystem services returned through seagrass restoration. *Restoration Ecology*, 21 set. 2016. v. 24, n. 5, p. 583–588. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12360>>.

RICHTER, M. *et al.* Trees in Sponge Cities—A Systematic Review of Trees as a Component of Blue-Green Infrastructure, Vegetation Engineering Principles, and Stormwater Management. **Water**, 23 fev. 2024. v. 16, n. 5, p. 655. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/16/5/655>>.

RIEGEL, S.; KUHFUSS, L.; STOJANOVIC, T. Nature-based solutions for climate change mitigation: Assessing the Scottish Public's preferences for saltmarsh carbon storage. **Ecological Economics**, set. 2023. v. 211, n. September 2022, p. 107863. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107863>>.

RIISAGER-SIMONSEN, C. *et al.* Marine nature-based solutions: Where societal challenges and ecosystem requirements meet the potential of our oceans. **Marine Policy**, out. 2022. v. 144, n. February, p. 105198. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308597X22002457>>.

RINKEVICH, B. Ecological engineering approaches in coral reef restoration. *ICES Journal of Marine Science*, 24 mar. 2021. v. 78, n. 1, p. 410–420. Disponível em: <<https://academic.oup.com/icesjms/article/78/1/410/5780429>>.

RODRÍGUEZ-ROJO, C. N.; PÉREZ-CAYEIRO, M. L.; CHICA-RUIZ, J. A. Adaptation to Climate Change in Coastal Countries of the European Union—An Evaluation of Plans and Strategies. *Applied Sciences*, 3 jun. 2025. v. 15, n. 11, p. 6281. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6281>>.

SACRAMENTO, A. C.; ZICKEL, C. S.; ALMEIDA JR., E. B. De. Aspectos florísticos da vegetação de restinga no litoral de Pernambuco. *Revista Árvore*, dez. 2007. v. 31, n. 6, p. 1121–1130. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622007000600017&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622007000600017&lng=pt&tlng=pt)>.

SADDAF, N.; SULTANA, R.; ANJUM, B. Vulnerability and effectiveness of nature-based solutions (NbS) in the farming communities of coastal Bangladesh. *Environmental Challenges*, jan. 2024. v. 14, n. February, p. 100863. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100863>>.

SALA, E. *et al.* Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature*, 2021. v. 592, n. 7854, p. 397–402. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03371-z>>.

SAMPERIZ, A. *et al.* Coastal seawater turbidity and thermal stress control growth of reef-building Porites spp. corals in Fiji. *Scientific Reports*, 17 maio. 2025. v. 15, n. 1, p. 17172. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-025-02283-6>>.

SÁNCHEZ-ARCILLA, A. *et al.* Barriers and enablers for upscaling coastal restoration. *Nature-Based Solutions*, dez. 2022. v. 2, n. September, p. 100032. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772411522000246>>.

SANTOS, Juliana Lenartovicz; HOFFMANN-HOROCHOVSKI, Marisete. **O direito à moradia adequada: a realocação dos moradores da Vila Becker para o bairro Porto Seguro em Paranaguá (PR)**. GESTUS, Matinhos, v. 3, 2020.

SAYAH, M. J. AL; VERSINI, P.-A.; SCHERTZER, D. H2020 projects and EU research needs for nature-based adaptation solutions. *Urban Climate*, jul. 2022. v. 44, n. January, p. 101229. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101229>>.

SCHERER-WIDMER, M. Dune Revegetation with Native Species of Restinga on the Southern Coast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, [s. l.], p. 593–596, 2001. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25736324>.

SCHUERCH, M. *et al.* Invited perspectives: Managed realignment as a solution to mitigate coastal flood risks – optimizing success through knowledge co-production. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1 set. 2022. v. 22, n. 9, p. 2879–2890. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/22/2879/2022/>>.



SEDDON, N. *et al.* Getting the message right on nature-based solutions to climate change. **Global Change Biology**, abr. 2021. v. 27, n. 8, p. 1518–1546. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15513>>.

SEENATH, A.; ROMEO MAHADEO, S. M.; CATTERSON, J. Public perceptions of nature-based coastal solutions in the UK. **Journal of Environmental Management**, jan. 2025. v. 373, n. November 2024, p. 123413. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123413>>.

SIEGERSMA, T. R. *et al.* Protective structures as adaptive management strategy in Nature-based Solutions to mitigate sea level rise effects. **Ecological Engineering**, nov. 2023. v. 196, n. February, p. 107079. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107079>>.

SILVA, A. L. Da; SILVA, S. R. Da; LAFAYETTE, K. P. V. Análise espaço-temporal da deposição do resíduo da pesca de moluscos bivalves na Ilha de Deus, Recife - PE. **Geografia Ensino & Pesquisa**, 9 ago. 2024. v. 28, p. e84281. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/84281>>.

SILVA, E. R. A. C. *et al.* Análise espaço-temporal das características do mangue urbano no estuário do Pina (Pernambuco). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 1, 2018.

SILVA, L. M. D. A.; GONÇALVES, R. M. Análise e detecção das modificações antrópicas no ambiente praias em Boa Viagem, Recife, PE. **Cadernos de Geociências**, v. 14, n. 1–2, p. 54–63, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/17891>. Acesso em: 08 fev. 2025.

SILVA, L. M.; LIRA, M. M. Deslocamento espacial e temporal da linha de costa nas praias pertencentes a Recife e Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. **Revista Cartográfica**, n. 96, p. 13–31, 2019. Disponível em: <http://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/185>. Acesso em: 08 fev. 2025.

SILVA, Rodrigo Cândido Passos da; PAZ, Diogo Henrique Fernandes da; NASCIMENTO, Crisleide Maria da Silva; ARAÚJO, Gabriela Valones Rodrigues de; TAVARES, Rosângela Gomes. Impactos ambientais na bacia do rio Capibaribe: avaliação da poluição de suas águas no centro da cidade do Recife – PE. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 19., 2011, Maceió. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2011.

SLINGER, J.; STIVE, M.; LUIJENDIJK, A. Nature-Based Solutions for Coastal Engineering and Management. **Water**, 1 abr. 2021. v. 13, n. 7, p. 976. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/976>>.

SONG, S. *et al.* Mangrove reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change. **Nature Communications**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 756, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-36477-1>.

SOUZA, N.; TORRES, M.; FERREIRA, A. Percepção Ambiental e Inventário dos Serviços Ecosistêmicos nas Praias do Pina e Boa Viagem, Recife, Pernambuco (Environmental Perception and Inventory of Ecosystem Services in the Pina and Boa Viagem Beaches, Recife, Pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15 out. 2019. v. 12, p. 1238.

SUGGETT, D. J. *et al.* An integrative framework for sustainable coral reef restoration. *One Earth*, jun. 2023. v. 6, n. 6, p. 666–681. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.007>>.

SUNKUR, R. *et al.* Mangroves' role in supporting ecosystem-based techniques to reduce disaster risk and adapt to climate change: A review. **Journal of Sea Research**, dez. 2023. v. 196, n. October, p. 102449. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102449>>.

TECHERA, E. J. The intersection of marine and coastal conservation and nature-based solutions to climate change: Governance insights from Indian Ocean small island States. **Ocean & Coastal Management**, maio. 2023. v. 239, n. February, p. 106579. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106579>>.

TIWARI, A. *et al.* Building Climate Resilience in Coastal City Living Labs Using Ecosystem-Based Adaptation: A Systematic Review. **Sustainability**, 31 ago. 2022. v. 14, n. 17, p. 10863. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10863>>.

UDDIN, M. M. *et al.* How Does Mangrove Restoration or Reforestation Change Trace Metal Pollution in Mangrove Ecosystems? A Review of Current Knowledge. **Toxics**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 812, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/12/11/812>.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Technical guidelines for the national adaptation plan process**. Bonn: UNFCCC Secretariat, 2012. Disponível em: [https://unfccc.int/files/adaptation/cancun\\_adaptation\\_framework/national\\_adaptation\\_plans/application/pdf/naptechguidelines\\_eng\\_high\\_res.pdf](https://unfccc.int/files/adaptation/cancun_adaptation_framework/national_adaptation_plans/application/pdf/naptechguidelines_eng_high_res.pdf). Acesso em: 28 jul. 2025.

UNGUENDOLI, S. *et al.* A modeling application of integrated nature based solutions (NBS) for coastal erosion and flooding mitigation in the Emilia-Romagna coastline (Northeast Italy). **Science of The Total Environment**, abr. 2023. v. 867, n. March 2022, p. 161357. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161357>>.

UNSWORTH, R. K. F. *et al.* Tropical seagrass meadows modify seawater carbon chemistry: implications for coral reefs impacted by ocean acidification. **Environmental Research Letters**, 1 jun. 2012. v. 7, n. 2, p. 024026. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/2/024026>>.

VARDI, T. *et al.* Six priorities to advance the science and practice of coral reef restoration worldwide. *Restoration Ecology*, 20 nov. 2021. v. 29, n. 8, p. 1–7. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.13498>>.

VASILIEV, D.; HAZLETT, R. W. Envisaging nature-based solutions as designed ecosystems in the changing world. **Land Use Policy**, mar. 2025. v. 150, n. October 2024, p. 107438. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837724003910>>.

VEIGA LIMA, F. A. DA; SOUZA, D. C. DE. Climate change, seaports, and coastal management in Brazil: An overview of the policy framework. **Regional Studies in Marine Science**, maio. 2022. v. 52, p. 102365. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102365>>.

WALTON, M. E. M. *et al.* Are mangroves worth replanting? The direct economic benefits of a community-based reforestation project. **Environmental Conservation**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 335–343, 2006. Disponível em: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892906003341/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892906003341/type/journal_article).

WANG, C. *et al.* Flood risk management in sponge cities: The role of integrated simulation and 3D visualization. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, out. 2019. v. 39, n. March, p. 101139. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101139>.

WANG, F. *et al.* Coastal blue carbon in China as a nature-based solution toward carbon neutrality. **The Innovation**, set. 2023. v. 4, n. 5, p. 100481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100481>.

WANG, F. *et al.* Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. **National Science Review**, 10 set. 2021. v. 8, n. 9. Disponível em: <https://academic.oup.com/nsr/article/doi/10.1093/nsr/nwaa296/6035244>.

WANNEWITZ, M. *et al.* Progress and gaps in climate change adaptation in coastal cities across the globe. **Nature Cities**, 26 ago. 2024. v. 1, n. 9, p. 610–619. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s44284-024-00106-9>.

WAYCARBON; PREFEITURA DO RECIFE; ICLEI. Sumário Executivo: Análise de Riscos e Vulnerabilidades Climáticas e Estratégia de Adaptação do Município do Recife. Recife, 2019.

WIKIMEDIA COMMONS. **Beach rock, Praia de Boa Viagem, Recife - PE**. 2020. Fotografia de Dornicke. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beach\\_rock,\\_Praia\\_de\\_Boa\\_viagem,\\_Recife\\_-\\_PE.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beach_rock,_Praia_de_Boa_viagem,_Recife_-_PE.jpg). Acesso em: 30 jun. 2025.

WORLD BANK. Nature-based solutions for improving resilience in the Caribbean. Washington, DC: Environment, Natural Resources & Blue Economy Global Practice, 2022.

WU, M. *et al.* Species choice in mangrove reforestation may influence the quantity and quality of long-term carbon sequestration and storage. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 714, p. 136742, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136742>.

XU, C. *et al.* A macro-level life cycle environmental-economic impact and benefit assessment of sponge cities in China. **Resources, Conservation and Recycling**, dez. 2024. v. 211, n. April, p. 107859. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107859>.

XUAN, T. LE *et al.* Evaluation of coastal protection strategies and proposing multiple lines of defense under climate change in the Mekong Delta for sustainable shoreline protection. **Ocean & Coastal Management**, set. 2022. v. 228, n. July, p. 106301. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106301>.

YANG, L.; YANG, X. Constructing a water ecological security pattern in sponge cities utilizing machine learning and geographic information systems. **Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering**, 20 mar. 2025. v. 25, n. 2, p. 1630–1643. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14727978241302164>.

YEEMIN, T.; SUTTHACHEEP, M.; PETTONGMA, R. Coral reef restoration projects in Thailand. *Ocean & Coastal Management*, jan. 2006. v. 49, n. 9–10, p. 562–575. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0964569106000780>>.

YILMAZ, D. G. Nature-based Solutions for climate-resilient cities: A proposal of a model for successful implementation. **Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning**, 30 ago. 2023. v. 4, n. 2, p. 189–203. Disponível em: <<https://drarch.org/index.php/drarch/article/view/154>>.

YU, R.; MU, Q. Implementation progress of Nature-based Solutions in China: A global comparative review. **Nature-Based Solutions**, dez. 2023. v. 4, n. June, p. 100075. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100075>>.

YUAN, Y. *et al.* Climate resilience of urban water systems: A case study of sponge cities in China. **Journal of Cleaner Production**, abr. 2024. v. 451, n. March, p. 141781. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141781>>.

ZANARDI-LAMARDO, Eliete; NÓBREGA, Anderson Sérgio de Carvalho; SANTOS, Roxanny Helen de Arruda; MACIEL, Daniele Claudino. Fontes e níveis de contaminação do sistema estuarino do rio Capibaribe (Pernambuco/Brasil). *Tropical Oceanography*, Recife, v. 44, n. 2, p. 118–131, 2016. ISSN 1679-3013.

ZEVENBERGEN, C.; FU, D.; PATHIRANA, A. Sponge cities: Emerging approaches, challenges and opportunities. 2018.

ZEVENBERGEN, C.; FU, D.; PATHIRANA, A. Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. **Water**, 12 set. 2018. v. 10, n. 9, p. 1230. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/9/1230>>.

ZHANG, G. *et al.* Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 9 jan. 2019. v. 16, n. 2, p. 179. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/16/2/179>>.

ZHAO, B.; ZHOU, Y.; CHEN, G. The effect of mangrove reforestation on the accumulation of PCBs in sediment from different habitats in Guangdong, China. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 64, n. 8, p. 1614–1619, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.029>.

ZHOU, Y. *et al.* Influence of mangrove reforestation on heavy metal accumulation and speciation in intertidal sediments. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 60, n. 8, p. 1319–1324, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.010>.

ZHU, D. *et al.* Nature-based solutions in Australia: A systematic quantitative literature review of terms, application and policy relevance. **Nature-Based Solutions**, dez. 2023. v. 4, n. April, p. 100092. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100092>>.

ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W. Influence of revegetation efforts on hydrologic response and erosion, Kaho’olawe Island, Hawai’i. **Land Degradation & Development**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 189–206, 1998. Disponível em:

<http://doi.wiley.com/10.1002/%28SICI%291099-145X%28199805%2F06%299%3A3%3C189%3A%3AAID-LDR272%3E3.3.CO%3B2-I>.

ZWEIFLER, A. *et al.* Turbid coral reefs: Past, present and future—a review. **Diversity**, 2021. v. 13, n. 6, p. 1–23. STEINER, A. Q. *et al.* Zonação de recifes emersos da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais, Nordeste do Brasil. **Iheringia. Série Zoologia**, jun. 2015. v. 105, n. 2, p. 184–192. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0073-47212015000200184&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0073-47212015000200184&lng=pt&tlng=pt)>.