

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**REGINA CÉLIA MACÊDO DO NASCIMENTO**

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM ESTUÁRIOS  
TROPICAIS: FERRAMENTAS E MODELO CONCEITUAL  
PARA GESTÃO**

São Carlos-SP  
2024

REGINA CÉLIA MACÊDO DO NASCIMENTO

VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM ESTUÁRIOS TROPICAIS:  
FERRAMENTAS E MODELO CONCEITUAL PARA GESTÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar, campus São Carlos) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais<sup>1</sup>.

Linha de pesquisa: Ambiente e sociedade.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai

São Carlos-SP  
2024

---

<sup>1</sup> Apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001*

Nascimento, Regina Célia Macêdo do

Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais:  
ferramentas e modelo conceitual para gestão / Regina  
Célia Macêdo do Nascimento -- 2024.  
172f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,  
campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Frederico Yuri Hanai  
Banca Examinadora: Frederico Yuri Hanai, Clemente  
Coelho Junior, Múcio Luiz Banja Fernandes, Denilson  
Teixeira, Cibele Rodrigues Costa  
Bibliografia

1. Ecossistema estuarino. 2. Ferramentas de gestão. 3.  
Gestão integrada. I. Nascimento, Regina Célia Macêdo  
do. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Regina Célia Macêdo do Nascimento, realizada em 29/02/2024.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai (UFSCar)

Prof. Dr. Clemente Coelho Junior (UPE)

Prof. Dr. Múcio Luiz Banja Fernandes (UPE)

Prof. Dr. Denilson Teixeira (UFG)

Profa. Dra. Cibele Rodrigues Costa (UFPE)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

## Dedicatória

Aos meus pais, Célia e Everaldo, que sempre acreditaram no meu sonho  
de ser uma pesquisadora nesse país.

À minha pequena afilhada, Melina Ayres, que me protege do céu, me  
dando forças nos momentos mais difíceis. Ainda vamos nos encontrar!

## **Agradecimentos**

Ao percorrer os passos que me conduziram até este momento, contei com uma corrente do bem que me sustentou nos momentos mais desafiadores, tanto no âmbito profissional quanto pessoal. Recebi um imenso apoio afetivo e científico, que foram fundamentais para que eu não considerasse desistir de alcançar meu sonho. Inúmeras pessoas fazem parte deste momento, e sou grata a cada uma que contribuiu, direta ou indiretamente, para que eu chegasse até aqui.

Agradeço infinitamente aos meus pais, Célia e Everaldo, que embarcaram comigo no sonho de me tornar graduada, mestre e doutora. Em dois longos anos sem bolsa de estudo, eles nunca permitiram que me faltasse nada material e, mais importante ainda, sempre me ofereceram suporte afetivo nos momentos mais difíceis, possibilitando que chegássemos até aqui juntos. Vocês dois são tudo o que tenho de mais precioso!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai, um ser humano que nasceu com o dom de ensinar. Nunca imaginei que os quatro anos do doutorado seriam tão leves (na medida do possível) como foram. Isso só foi possível porque tive ao meu lado um orientador íntegro, humano, sempre disposto a ajudar, que ouvia e valorizava o que eu tinha a dizer, mesmo que em alguns momentos os pensamentos fossem imaturos. Ele soube lapidá-los perfeitamente, deixando-me confiante para chegar até aqui.

Aos integrantes do grupo de pesquisa SUSTENTA, que me acolheram genuinamente e proporcionaram muitas trocas de experiências. Em especial, agradeço à Roberta, que sempre acreditou mais em mim do que eu mesma. À minha Priqui, que nunca soltou minhas mãos e sempre me incentivou a reagir quando estava desmotivada. Ao Sid, que pacientemente ouvia meus surtos e me aconselhava da melhor maneira possível. À Fer e à Margarita por sempre se fazerem presentes, mesmo que à distância.

Ao meu querido amigo de turma do doutorado, Leonardo Petrilli. Formamos uma parceria forte, na qual um apoiava o outro ao longo dos anos, sem permitir que nenhum enfraquecesse.

Aos meus queridos amigos Paulo Ayres e Marcela Ayres, que são a minha família do coração. Que torcem verdadeiramente por minha felicidade e

conquistas. Nossa pequena estrela nos uniu ainda mais e nos deu forças para seguir em frente. Vocês são a minha Ohana, nunca irei abandonar.

Aos meus amigos de Recife (PE), em especial Luciana Pinheiro, Paulo Roberto, Rodrigo Rarom, Klyvia Leuthier, Marcela Rachel e Rayssa Lima, que se orgulham de ter uma amiga que chegou tão longe. Desde o início do curso, eles me apresentavam como a amiga doutora. Sabendo das dificuldades financeiras que enfrentei, ajudaram-me a mobiliar uma casa, enviando conjuntos de copos, talheres, almofadas, entre outros. Em cada detalhe, eu podia sentir o amor de vocês, dando-me forças para seguir sempre em frente.

Aos amigos que São Carlos (SP) me presenteou, Raquel, Arthur, Thaís, Cissa, Karime, Milena. Em especial Edna Calpa, que nos momentos de maior tribulação na reta final se fez presente, ajudando a seguir em frente e a dar risada de toda situação. Afinal de contas, o que não resolvemos com um churrasco. Guilherme Smania, que no auge da pandemia saía comigo para caminhar, tomar um sol, ou simplesmente conversava por horas para que eu não me sentisse tão triste.

Aos professores da banca de qualificação Betânia Guilherme, Clemente Coelho Jr. e Múcio Banja, por analisarem cuidadosamente o trabalho e tecer comentários que possibilitaram a continuidade da pesquisa. Aproveito para expressar minha gratidão especial a Betânia e Clemente por me orientarem na graduação e me inspirarem no amor pelos estuários. Ao professor Denilson Teixeira, por aceitar participar da banca de defesa e fornecer contribuições valiosas.

À Júlia Comin, a melhor designer em linha reta, que gentilmente me ajudou no momento de maior desespero para estruturar o modelo conceitual de uma forma visualmente atrativa aos leitores.

Aos professores do PPGCAm que contribuíram para a minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Epígrafe

*“Um dia vai tá nos conforme  
Que um diploma é uma alforria  
Minha cor não é um uniforme  
Hashtags PretoNoTopo, bravo!”  
(Ismália - Emicida)*

## Resumo

NASCIMENTO, R.C.M. **Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais: ferramentas e modelo conceitual para gestão.** 2024 – 172p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, São Carlos, 2024.

Os estuários são ambientes complexos de extrema importância tanto do ponto de vista ecológico quanto socioeconômico. No entanto, eles enfrentam ameaças decorrentes de ocupações não planejadas e fragilidades ecossistêmicas e sociais. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi identificar e analisar os componentes e as ferramentas existentes sobre vulnerabilidades ambientais para possível aplicação em regiões estuarinas tropicais, visando propor um modelo conceitual para gestão dessas regiões, tendo como estudo de caso o estuário do Rio Capibaribe, localizado em Recife (estado de Pernambuco, Brasil). Para atingir esse objetivo, foi conduzida uma Revisão Bibliográfica Sistemática para identificar as principais vulnerabilidades ambientais em estuários tropicais e as ferramentas aplicáveis para a gestão desses ambientes. A partir da revisão, foram identificadas vulnerabilidades relacionadas às mudanças climáticas e às ações antrópicas, tais como: o aumento do nível do mar; inundações; erosão costeira; lançamento de poluentes urbanos; excesso de nutrientes na água; e derramamento de óleo. Além disso, ao considerar a capacidade adaptativa dos estuários, destacam-se três aspectos fundamentais: a participação de atores sociais; a proteção do ecossistema estuarino; e a gestão integrada. A revisão também permitiu identificar e analisar 14 ferramentas que podem dar suporte à gestão e à análise da vulnerabilidade relacionada às mudanças climáticas. Essas ferramentas incluem, dentre outras funcionalidades, o uso de imagens de satélite, sistemas de georreferenciamento e modelagem numérica. Por meio da utilização da Matriz de Pugh, foram avaliadas as principais potencialidades e fragilidades de cada ferramenta em relação ao seu uso em estuários e exploradas possibilidades para integrá-las a um modelo conceitual para o estuário do Rio Capibaribe. O modelo conceitual foi estruturado em 4 unidades integradoras (componentes de exposição e processos ambientais afetados; ferramentas para análise da vulnerabilidade; gestão integrada e; melhorias para o estuário). Sua estrutura permitiu uma visão abrangente da vulnerabilidade em estuários, favorecendo diretrizes e possibilidades de ferramentas a serem utilizadas para gestão ambiental integrada do estuário do Rio Capibaribe e consequente preservação desse importante ecossistema estuarino. O modelo conceitual elaborado torna-se um aliado para o entendimento da vulnerabilidade ambiental nessas regiões, bem como consegue ser adaptado às demais localidades estuarinas.

**Palavras-chave:** Capacidade Adaptativa; Ecossistema Estuarino; Ferramentas de Gestão; Gestão Integrada.

## Abstract

NASCIMENTO, R.C.M. **Environmental vulnerability of tropical estuaries: tools and conceptual model for management.** 2024 – 172p. Thesis (Doctorate) – Federal University of São Carlos, Center for Biological and Health Sciences, Graduate Program in Environmental Sciences, São Carlos, 2024.

Estuaries are complex environments of extreme importance from both ecological and socio-economic perspectives. However, they face threats from unplanned occupations and ecosystem and social fragilities. Therefore, the objective of this research was to identify and analyze the components and existing tools related to environmental vulnerabilities for possible application in tropical estuarine regions, aiming to propose a conceptual model for managing these regions, using the Capibaribe River estuary, located in Recife (state of Pernambuco, Brazil), as a case study. To achieve this objective, a Systematic Literature Review was conducted to identify the main environmental vulnerabilities in tropical estuaries and the applicable tools for managing these environments. From the review, vulnerabilities related to climate change and anthropogenic actions were identified, such as: sea-level rise; flooding; coastal erosion; discharge of urban pollutants; excess nutrients in the water; and oil spills. Additionally, when considering the adaptive capacity of estuaries, three fundamental aspects stand out: the participation of social actors; the protection of the estuarine ecosystem; and integrated management. The review also identified and analyzed 14 tools that can support the management and analysis of vulnerability related to climate change. These tools include, among other functionalities, the use of satellite images, georeferencing systems, and numerical modeling. Using the Pugh Matrix, the main potentialities and weaknesses of each tool were evaluated in relation to their use in estuaries, and possibilities for integrating them into a conceptual model for the Capibaribe River estuary were explored. The conceptual model was structured into four integrating units (exposure components and affected environmental processes; tools for vulnerability analysis; integrated management; and improvements for the estuary). Its structure provided a comprehensive view of vulnerability in estuaries, favoring guidelines and possibilities for tools to be used for integrated environmental management of the Capibaribe River estuary and the consequent preservation of this important estuarine ecosystem. The conceptual model developed becomes an ally in understanding environmental vulnerability in these regions and can be adapted to other estuarine locations.

**Keywords:** Adaptive Capacity; Estuarine Ecosystem; Management Tools; Integrated Management.

## Lista de Figuras

Figura 1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe no Estado de Pernambuco, nordeste do Brasil .....	25
Figura 2. Esquema metodológico dos procedimentos metodológicos associados a cada capítulo da tese. ....	30
Figura 3. Quantitativo de dados obtidos por meio de critérios de inclusão nas respectivas bases de dados.....	39
Figura 4. Distribuição geográfica onde os estudos foram desenvolvidos. ....	47
Figura 5. Mapa bibliométrico das palavras-chave. ....	48
Figura 6. Resumo esquemático dos passos metodológicos para execução da Revisão Bibliográfica Sistemática .....	59
Figura 7. Desenho esquemático de um estuário com delimitação de setores. ....	62
Figura 8. Relações conceituais entre vulnerabilidade, resiliência e capacidade adaptativa. Em que $\subset$ = “subconjunto de”; $\not\subset$ = “não é um subconjunto de”; R, V, AC e CR significam resiliência, vulnerabilidade, capacidade adaptativa e capacidade de resposta, respectivamente. ....	67
Figura 9. Modelo conceitual da vulnerabilidade adotado para discussões na Tese. ....	71
Figura 10. Modelo conceitual da vulnerabilidade com respectivos componentes e relações existentes.....	150
Figura 11. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade frente à ameaça das mudanças climáticas, considerando (✓) como sim/presente e (x) como não/ausente.....	153
Figura 12. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade frente à ameaça das ações antrópicas, considerando (✓) como sim/presente e (x) como não/ausente.....	154
Figura 13. Componentes de exposição e processos ambientais afetados frente à ameaça das mudanças climáticas.....	156
Figura 14. Componentes de exposição e processos ambientais afetados frente à ameaça das ações antrópicas.....	157
Figura 15. Ferramentas para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das mudanças climáticas. ....	159
Figura 16. Ferramentas para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das ações antrópicas. ....	160

## Lista de Gráficos

Gráfico 1. Evolução das publicações no período de 1995 a 2021.....	45
Gráfico 2. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.....	123
Gráfico 3. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.....	124
Gráfico 4. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”. .....	125
Gráfico 5. Ferramentas de eventos climáticos extremos em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.....	128
Gráfico 6. Ferramentas de eventos climáticos extremos em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.....	129
Gráfico 7. Ferramentas de eventos climáticos extremos relacionados à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”. .....	130
Gráfico 8. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”. .....	135
Gráfico 9. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.....	136
Gráfico 10. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”.....	137
Gráfico 11. Ferramentas de degradação ambiental em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”. .....	140
Gráfico 12. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.....	141
Gráfico 13. Ferramentas de degradação ambiental em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”.....	142

## Lista de Quadros

Quadro 1. Variáveis adotadas para análise bibliométrica. ....	38
Quadro 2. Vulnerabilidades ambientais associadas às mudanças climáticas levando em consideração os componentes de exposição e sensibilidade.....	77
Quadro 3. Vulnerabilidades ambientais associadas às atividades antrópicas levando em consideração os componentes de exposição e sensibilidade.....	82
Quadro 4. Síntese dos aspectos da capacidade adaptativa associadas às vulnerabilidades ambientais com respectivas ênfases e direcionamentos.....	100
Quadro 5. Categorias e critérios de análise das ferramentas para aplicação na Matriz de Pugh .....	107
Quadro 6. Ferramentas de modelagem identificadas para abordagem da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais.....	120
Quadro 7. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Aumento do Nível do Mar e Inundações.....	127
Quadro 8. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Eventos Climáticos Extremos.....	133
Quadro 9. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Erosão Costeira.....	138
Quadro 10. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Degradação Ambiental .....	143

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Artigos que possuem menção em seu título à combinação dos termos vulnerabilidade e estuários.....	40
Tabela 2. Autores com maior número de publicação na RBS e seus índices de citação.....	42
Tabela 3. Periódicos científicos que apresentaram maior concentração de publicações identificadas na pesquisa e seu respectivo fator de impacto.....	43
Tabela 4. Palavras-chave com maior incidência no estudo bibliométrico. ....	49

## Sumário

Apresentação .....	18
Histórico e trajetória pessoal, de formação e profissional da autora .....	20
1. Introdução e contextualização da pesquisa .....	22
1.1. Objetivo geral e específicos.....	28
1.2. Procedimentos metodológicos.....	28
Referências bibliográficas .....	31
2. Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais e desafios de gestão: uma análise bibliométrica sistemática .....	34
2.1. Métodos.....	35
2.1.1. Estágios e Condução da RBS .....	36
2.2. Resultados e Discussões.....	38
2.2.1. Análise dos títulos .....	40
2.2.2. Autores.....	41
2.2.3. Revistas (Periódicos) Científicas.....	43
2.2.4. Análise do ano de publicação.....	44
2.2.5. Países das localidades dos estudos identificados.....	46
2.2.6. Palavras-chave.....	48
2.2.7. Desafios existentes para a gestão integrada de regiões estuarinas tropicais .....	50
2.3. Conclusões.....	51
Referências bibliográficas .....	53
3. Vulnerabilidades ambientais em estuários tropicais: conceitos, abordagens e reflexões.....	57
3.1. Procedimentos metodológicos.....	58
3.2. Resultados.....	60
3.2.1. Abordagens, Conceitos e Reflexões sobre estuários .....	60
3.2.2. Definições, Discussões e Reflexões sobre Vulnerabilidade .....	65

3.2.3. Vulnerabilidades ambientais existentes em regiões estuarinas tropicais .....	72
3.3. Considerações finais.....	83
Referências bibliográficas .....	84
4. Aspectos da Capacidade Adaptativa relacionados à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais .....	94
4.1. Procedimentos metodológicos.....	95
4.2. Resultados e discussão .....	95
4.3. Considerações finais.....	101
Referências bibliográficas .....	101
5. Identificação e análise de ferramentas da vulnerabilidade ambiental para aplicação em estuários tropicais .....	103
5.1. Procedimentos metodológicos.....	104
5.1.1. Identificação de ferramentas de vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais.....	104
5.1.2. Análise das ferramentas.....	105
5.2. Resultados e discussão .....	113
5.2.1. Ferramentas de gestão que consideram a vulnerabilidade ambiental das regiões estuarinas tropicais: ênfase nas mudanças climáticas.....	113
5.2.2. Ferramentas direcionadas à abordagem de Aumento do Nível do Mar e Inundações .....	122
5.2.3. Ferramentas direcionadas à abordagem de Eventos Climáticos Extremos.....	128
5.2.4. Ferramentas direcionadas à Erosão Costeira .....	134
5.2.5. Ferramentas direcionadas à Degradação Ambiental.....	139
5.3. Considerações finais.....	144
Referências bibliográficas .....	145
6. Proposta do Modelo Conceitual para vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais .....	149
6.1. Modelo conceitual teórico da vulnerabilidade .....	150

6.2. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais .....	152
6.2.1. Unidade Integradora - Componentes de exposição e processos ambientais afetados.....	155
6.2.2. Unidade Integradora - Ferramentas para análise da vulnerabilidade .....	158
6.2.3. Unidade Integradora - Gestão integrada .....	161
6.2.4. Unidade Integradora - Melhorias para o estuário .....	162
6.3. Considerações finais.....	164
Referências .....	165
7. Considerações finais da pesquisa .....	168

## **Apresentação**

Prezado(a) leitor(a), esta pesquisa se propõe a fornecer insights para aprimorar a gestão de estuários tropicais, por meio de uma profunda reflexão sobre a vulnerabilidade ambiental de regiões estuarinas.

No primeiro capítulo, é apresentada introdução geral da tese, questões norteadoras da pesquisa, objetivo geral e específicos e os procedimentos metodológicos utilizados em cada capítulo.

No segundo capítulo, é apresentado o panorama das publicações científicas relacionadas à vulnerabilidade de estuários tropicais, sua evolução temporal e as principais abordagens relacionadas à temática e principais localidades de execução dos trabalhos científicos sobre vulnerabilidade ambiental de estuários tropicais.

No terceiro capítulo, são apresentadas reflexões e definições relacionadas aos estuários e à vulnerabilidade para que possam ser compreendidas suas complexidades e importância. Em seguida, são exploradas as principais vulnerabilidades ambientais existentes nos estuários tropicais, tanto associadas às mudanças climáticas, bem como as de origem antrópica. Com o embasamento teórico, discute-se os principais componentes de exposição e sensibilidade da vulnerabilidade.

No quarto capítulo, são apresentados os principais direcionamentos relacionados ao componente de capacidade adaptativa da vulnerabilidade. Leva-se em consideração o envolvimento da sociedade na gestão dos estuários tropicais, bem como instrumentos que possam subsidiar o planejamento desses ambientes e conseqüentemente mitigar as vulnerabilidades ambientais presentes.

No quinto capítulo, identificam-se e analisam-se as principais ferramentas que podem ser utilizadas na gestão de regiões estuarinas tropicais, considerando a vulnerabilidade ambiental desses ambientes. Este estudo foi fundamental para verificar as possibilidades de ferramentas que podem ser associadas ao modelo conceitual para gestão dessas regiões, uma vez que é apresentado um quadro com as características e os critérios fundamentais para identificação de ferramentas apropriadas para a gestão de estuários tropicais.

No sexto capítulo, é desenvolvido um modelo conceitual da vulnerabilidade e um modelo conceitual para gestão de estuários tropicais, considerando as possíveis vulnerabilidades ambientais, tendo como estudo de caso o estuário do Rio Capibaribe, localizado na cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco.

## **Histórico e trajetória pessoal, de formação e profissional da autora**

Nasci na cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco. Esse ilustre município também é carinhosamente chamado de “Veneza Brasileira”, por ser cortada por importantes rios e canais, além de muitíssimas pontes que nos fazem chegar aos destinos. Esses aspectos fazem com que os recifenses sejam orgulhosos do seu lugar, além de encantar qualquer turista que venha a conhecer.

Falo carinhosamente da minha cidade natal por ter sido nela, o grande *start* para minha vida acadêmica. Afinal, mesmo que intrinsecamente, o contato com a natureza diária despertou em mim a vontade de ser bióloga. E assim o fiz. No segundo semestre de 2010 ingressei na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) no curso de Licenciatura Plena em Ciências Biológicas. Lá, pude unir minhas grandes paixões, a natureza e lecionar.

Foi durante a graduação, que meu amor pelas águas aflorou. Pude realizar estágios que me aproximaram dos estuários, em especial o do Rio Capibaribe, em que pude ver e entender a magnífica importância desse ecossistema. Trabalhei no Espaço Ciência (museu interativo, localizado entre as cidades de Olinda e Recife), fiz parte de projetos de extensão ao longo do Capibaribe, ingressei no Programa de Educação Tutorial (PET) em Ecologia, dentre outras experiências. Mas, em todas elas eu tinha contato direto com o Capibaribe. Assim, aos poucos, fui entendendo que aquele era o meu propósito. Investigar sobre os estuários, entender as relações entre o ser humano e esse ambiente, bem como o que eu podia fazer para atenuar as ações antrópicas ali presentes. O Capibaribe pedia e continua pedindo socorro! Muitas construções irregulares, depósito de resíduos a céu aberto, águas contaminadas, dentre outros. E foi assim, que mergulhei nesse estuário tão magnífico e importante para os pernambucanos.

Com o passar dos tempos, percebi que eu queria estudar mais. Concluí a graduação, realizei uma especialização em Perícia e Auditoria Ambiental na Faculdade Frassinetti do Recife (FAFIRE) em 2015, em que mais uma vez investiguei impactos ambientais presentes no manguezal da Lagoa do Araçá, localizada na Imbiribeira, onde morei por quase 30 anos. Ainda assim, achei que precisava mais. Deixei algumas inseguranças de lado e iniciei, em 2017, o

mestrado em Biodiversidade e Conservação, na UFRPE, agora no *campus* de Serra Talhada, localizado no sertão de Pernambuco.

Durante os percalços do mestrado, pude me debruçar com a análise da qualidade da água do estuário do Capibaribe, e mais uma vez pude ver, o quanto aquele rio estava precisando de ajuda. Além disso, também pude identificar a necessidade de uma gestão eficaz, que identifique e priorize ações em prol do ambiente. Assim, na busca incessante por conhecimento, mesmo estando desgastada psicologicamente, resolvi procurar um curso de doutorado que pudesse me apresentar uma visão mais sistêmica em relação ao meio ambiente. E foi assim, que em 2020 entrei para o doutorado em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) sob a orientação do Prof. Dr. Frederico Yuri Hanai.

Durante o doutorado, pude ver que é necessário ter várias perspectivas em relação ao ambiente, e isso, me instigou ainda mais. Aos poucos, fui trilhando meu caminho nas Ciências Ambientais e após inúmeras conversas de orientação, fui delimitando minha pesquisa de tese. Mesmo estando no interior de São Paulo e meu orientador não ter muito contato com a região estuarina, a paixão por estuários e o Capibaribe não cessava. Assim, chegamos a um denominador comum para que eu pudesse ter a *expertise* do meu orientador, guiando-me nos passos para elaboração deste trabalho, juntamente com as motivações pessoais anteriormente explanadas para fazer algo ao estuário do Capibaribe.

De forma breve, foram essas as principais experiências e motivações que me fizeram chegar à conclusão deste doutorado, bem como a realização deste trabalho de tese, que tanto representa a mim e as minhas origens recifenses.

# 1. Introdução e contextualização da pesquisa



Estuário do Rio Capibaribe – Recife, Pernambuco

Fonte da imagem: Regina Nascimento (2022)

Nas últimas décadas é perceptível a crescente preocupação em relação aos problemas ambientais e suas implicações para o ser humano, uma vez que, o desenvolvimento econômico adotado pelas últimas gerações pauta-se no uso desenfreado dos recursos naturais, o que tende a favorecer um colapso ambiental (ALBERT *et al.*, 2021; LADE *et al.* 2020; MARTINE; ALVES, 2015). Assim, o meio ambiente torna-se cada vez mais suscetível a estressores externos, o que acarreta uma crescente vulnerabilidade tanto do ponto de vista ambiental quanto do socioeconômico (BIESDORF *et al.*, 2022).

Ao abordar sobre a vulnerabilidade, de modo geral, sua conceituação relaciona-se ao estresse em que um sistema<sup>2</sup> está exposto (ADGER *et al.*, 2006). Assim, a vulnerabilidade pode ser externada pela exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa de uma comunidade ou sistema diante das ameaças ambientais (TURNER *et al.*, 2003). O entendimento de cada um desses componentes e suas relações, torna-se fundamental para se compreender a vulnerabilidade ambiental, o qual é base para o desenvolvimento desta Tese.

As transformações sofridas pelo meio ambiente são constantes, seja com as mudanças climáticas, degradação de ecossistemas ou aumento da urbanização, por exemplo. Desta forma, a compreensão da vulnerabilidade torna-se relevante para solucionar os desafios ambientais e suas implicações para a sociedade, bem como para a gestão sustentável dos recursos naturais (ADGER *et al.*, 2004). Além disso, o entendimento e conseqüentemente a análise da vulnerabilidade podem auxiliar na formulação de políticas públicas e estratégias de adaptação que visam reduzir os prejuízos diante das mudanças ambientais (FUSSEL; KLEIN, 2006).

Um dos ambientes mais vulneráveis do mundo são os estuários, devido principalmente à sua localização geográfica (ENNOUALI *et al.*, 2023; RAW *et al.*, 2023). Os estuários são ambientes transitórios, localizados entre o rio e o mar, a qual sofrem influência diária das marés, resultando em variações de salinidade e circulação das águas. Além disso, os estuários são considerados

---

<sup>2</sup> Patten (1978, p., 206) define sistema como “um conjunto de componentes parcialmente interconectados (interagindo ou unidos causalmente)”. Relyea e Ricklefs (2021, p. 29) considera como sistema “entidades biológicas que têm os próprios processos internos e que interagem com o ambiente externo imediato”, podendo ser um indivíduo, população, comunidade, ecossistema ou a biosfera. A delimitação será dada a partir do nível de organização desejado.

ambientes únicos e de alta produtividade desempenhando papéis fundamentais para a biodiversidade, filtragem de poluentes e ciclagem de nutrientes, por exemplo (DITTMAR *et al.*, 2006; HOANG; MOMTAZ; SCHREIDER, 2020; KELLEWAY *et al.*, 2017).

Mesmo com toda importância e serviços ecossistêmicos prestados, os estuários sofrem drasticamente com as ações humanas (NASCIMENTO; HANAI; GUILHERME, 2021). De acordo com o levantamento do *World Resources Institute* (2008), muitos estuários no mundo encontram-se em situação de criticidade, principalmente no que tange a baixa oxigenação das águas devido ao enriquecimento excessivo de nutrientes. E no Brasil, foram registrados estuários em nível de hipóxia<sup>3</sup> nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Pernambuco (WRI, 2008).

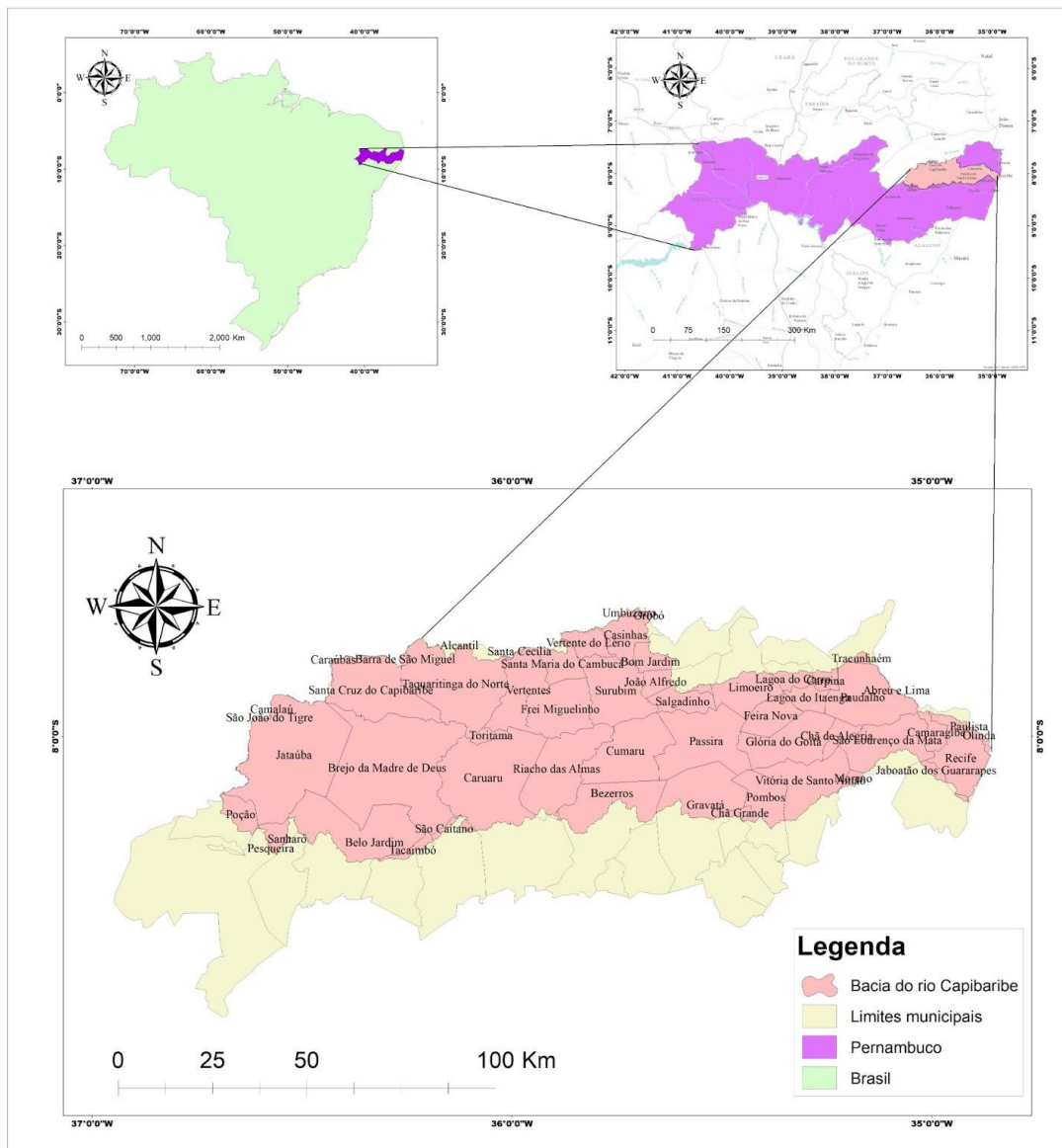
Destacando o estado de Pernambuco, a hipóxia registrada relaciona-se ao complexo estuarino do Pina, a qual fazem parte os rios Tejipló, Pina, Jordão e Capibaribe. Os registros de oxigenação inferior a 2 mg/L<sup>-1</sup> nessa região são datados desde a década de 90 (WRI, 2008).

A bacia hidrográfica Rio do Capibaribe é uma das principais do estado de Pernambuco devido à sua abrangência territorial e à densidade demográfica (1.328.361 habitantes em 7.557,41km<sup>2</sup> - 7,58% da área do estado) (LIMA *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2020) e por concentrar as zonas fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico da região (SILVA; SILVA, 2014). A bacia apresenta aproximadamente 280 km de extensão, com nascente no município de Poção (região agreste do estado), percorrendo 42 municípios até chegar a sua foz, na cidade do Recife, onde desemboca no oceano Atlântico (SILVA *et al.*, 2016) (Figura 1).

---

<sup>3</sup> De acordo com Tyler, Brady e Target (2009), entende-se por hipóxia, níveis entre 0,1 e 2,0 mg L<sup>-1</sup> de oxigênio dissolvido na água.

Figura 1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe no Estado de Pernambuco, nordeste do Brasil



Fonte: Elaboração dos autores (2022)

Alguns dos problemas ambientais que percorrem o Capibaribe são os escoamentos agrícolas, os efluentes domésticos (ALVES *et al.*, 2021) e industriais, como os resíduos químicos da indústria têxtil (ALVES *et al.*, 2020) que deterioram a qualidade das águas. Além disso, ao chegar na região estuarina, o Capibaribe sofre demasiadamente com a pressão urbana (NASCIMENTO *et al.*, 2020; NASCIMENTO, HANAI, GUILHERME, 2021).

Devido à forte influência urbana, o estuário do Rio Capibaribe acaba perdendo gradativamente sua vegetação nativa em suas margens em função da urbanização descontrolada, acarretando prejuízos ambientais à localidade (BORGES *et al.*, 2020). Além disso, a deterioração da qualidade da água é

ainda mais evidenciada pelo fato de o estuário receber efluentes domésticos não tratados das construções irregulares em sua margem<sup>4</sup> (ARRUDA-SANTOS *et al.*, 2023), tornando o ambiente altamente perturbado (SOUZA *et al.*, 2021).

Assim, faz-se cada vez mais necessário estudos que possam identificar as possíveis vulnerabilidades dessa região, bem como ferramentas que possam subsidiar uma gestão efetiva e eficaz a fim de minimizar os impactos ambientais existentes.

Um dos grandes desafios para a gestão das regiões estuarinas diz respeito à necessidade de encontrar um equilíbrio entre diferentes e contrastantes objetivos em relação à utilização e exploração desses ambientes (LONSDALE *et al.*, 2015). Assim, a mudança de paradigma entre uma gestão convencional e fragmentada para uma gestão sistêmica e integradora, favorece uma visão detalhada das problemáticas existentes no ambiente e suas possíveis soluções (BOEREMA; MEIRE, 2017).

A gestão de ambientes costeiros, em especial de áreas estuarinas, é dada de forma complexa, sendo ela eficaz por meio da integração de abordagens interdisciplinares com tendências transdisciplinares, a fim de se obter uma visão sistêmica (DIAS *et al.*, 2011). E, um dos grandes aliados para que a gestão integrada aconteça é a utilização de ferramentas que deem suporte na geração de dados e avaliação ambiental de determinado problema.

Com o passar dos tempos, a utilização de ferramentas para a análise da vulnerabilidade foi se aprimorando gradualmente. Metodologias que tinham em seu teor mais teoria deram espaço aos métodos técnicos que incluem a modelagem matemática, análise de componentes principais, método de análise espacial e métodos analíticos tendo como base o sistema de georreferenciamento (HU *et al.*, 2021). Assim, cada vez mais as ferramentas de análise foram aprimoradas e utilizadas para avaliação da vulnerabilidade em regiões costeiras considerando a tecnologia 3S (sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica e sistemas globais de posicionamento), simulações com modelagem ambientais e numéricas, inteligência artificial, dentre outros (YANG *et al.*, 2021).

Além da parte operacional com as ferramentas para análise da vulnerabilidade, outro forte aliado para a gestão das regiões estuarinas são os

---

<sup>4</sup> Existem aproximadamente 16 mil habitantes por km<sup>2</sup> nas margens do estuário do Rio Capibaribe em situação de vulnerabilidade social (ARRUDA-SANTOS *et al.*, 2023).

modelos conceituais. Esses modelos permitem que seja elaborada/constituída uma descrição envolvendo aspectos relacionados ao ambiente de estudo (como o caso de estuário tropical) e os possíveis métodos que podem ser utilizados para uma análise sistêmica e detalhada (MYLOPOULOS, 1992; TALHEIM, 2011). Os modelos conceituais são importantes para entender a modelagem, uma vez que elas são regidas por meio de linguagem de programação<sup>5</sup>. Assim, a estrutura conceitual favorece o entendimento de todos os passos e objetivos estabelecidos (TALHEIM, 2011) aos atores envolvidos na gestão, e nos estuários, corroboram também para o entendimento da complexidade e conexões existentes nesses ambientes (KHOJASTEH *et al.*, 2021).

O contexto apresentado deu origem às seguintes indagações, que orientaram a concepção deste estudo:

- Quais são as principais vulnerabilidades ambientais existentes nas regiões estuarinas tropicais evidenciadas?
- Existem modelos de gestão que incorporam a vulnerabilidade ambiental, levando em consideração os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa?
- Quais aspectos e funcionalidades são relevantes e devem ser considerados num modelo para gestão de estuários tropicais para sua gestão ser satisfatória, pensando na vulnerabilidade ambiental?

A busca por respostas às questões mencionadas configura os seguintes pressupostos da pesquisa:

- As regiões estuarinas tropicais são um dos ambientes mais vulneráveis do mundo, decorrentes das ações de origem antrópica assim como relacionadas às mudanças climáticas;
- As atuais ferramentas para gestão de regiões estuarinas têm focado em determinadas vulnerabilidades específicas e, portanto, há necessidade de configuração de modelo conceitual que incorpore a diversidade de vulnerabilidades, e leve em consideração os componentes intrínsecos da vulnerabilidade (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa).

---

<sup>5</sup> Linguagem formal, composta por um conjunto de regras sintáticas e semânticas, que permite aos programadores escreverem instruções que um computador pode entender e executar.

## **1.1. Objetivo geral e específicos**

O objetivo geral deste trabalho foi identificar e analisar os componentes e ferramentas existentes sobre vulnerabilidades ambientais para possível aplicação em regiões estuarinas tropicais, visando propor um modelo conceitual para gestão dessas regiões, tendo como estudo de caso o estuário do Rio Capibaribe – Recife (Pernambuco).

Assim, a pesquisa abrangeu os seguintes objetivos específicos:

- Configurar um panorama atual dos principais estudos e das relevantes publicações existentes sobre as vulnerabilidades ambientais;
- Diagnosticar os desafios existentes na gestão integrada dos ambientes estuarinos;
- Investigar e analisar quais são os principais componentes de vulnerabilidades ambientais existentes em estuários tropicais;
- Identificar e analisar os principais modelos e ferramentas de gestão que consideram a vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais;
- Estabelecer e propor um modelo conceitual de gestão pensando na vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais.

## **1.2. Procedimentos metodológicos**

Para a realização da pesquisa, foi adotado um conjunto de metodologias com o objetivo de oferecer suporte metodológico para a compreensão e reflexão da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais, bem como para subsidiar a concepção do modelo conceitual de gestão.

Os capítulos 2, 3, 4 e 5 foram embasados em uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). De acordo com Donthu *et al.* (2021), essa abordagem proporciona um nível mais elevado de rigor científico, permitindo identificar lacunas potenciais no conhecimento sobre um tema, além de investigar a evolução científica desse campo de estudo. Portanto, a utilização da RBS é essencial para adquirir conhecimentos sobre a vulnerabilidade ambiental em áreas estuarinas. Ademais, em complemento à RBS, o Capítulo 2 inclui uma análise bibliométrica que contribuiu para uma análise quantitativa das publicações científicas e suas mudanças ao longo do tempo.

No Capítulo 3, para fundamentar teoricamente as discussões relacionadas a estuários e vulnerabilidade, foi realizada uma pesquisa exploratória na literatura científica. A principal diferença entre essa abordagem e a RBS reside nos métodos de execução. Na pesquisa exploratória, conforme Gil (2008), o pesquisador se aproxima mais do tema, desenvolvendo uma maior familiaridade com o assunto, sem a necessidade de um protocolo estritamente definido. Além disso, no referido capítulo, foi aplicada uma análise de conteúdo, a qual auxilia a investigação e agrupamento de características comuns entre os artigos científicos obtidos na pesquisa, permitindo avaliar a conformidade do material com a temática abordada, bem como identificar suas potencialidades e limitações (BARDIN, 2016). Ainda, a análise de conteúdo possibilitou a construção dos quadros de análise referente às vulnerabilidades ambientais.

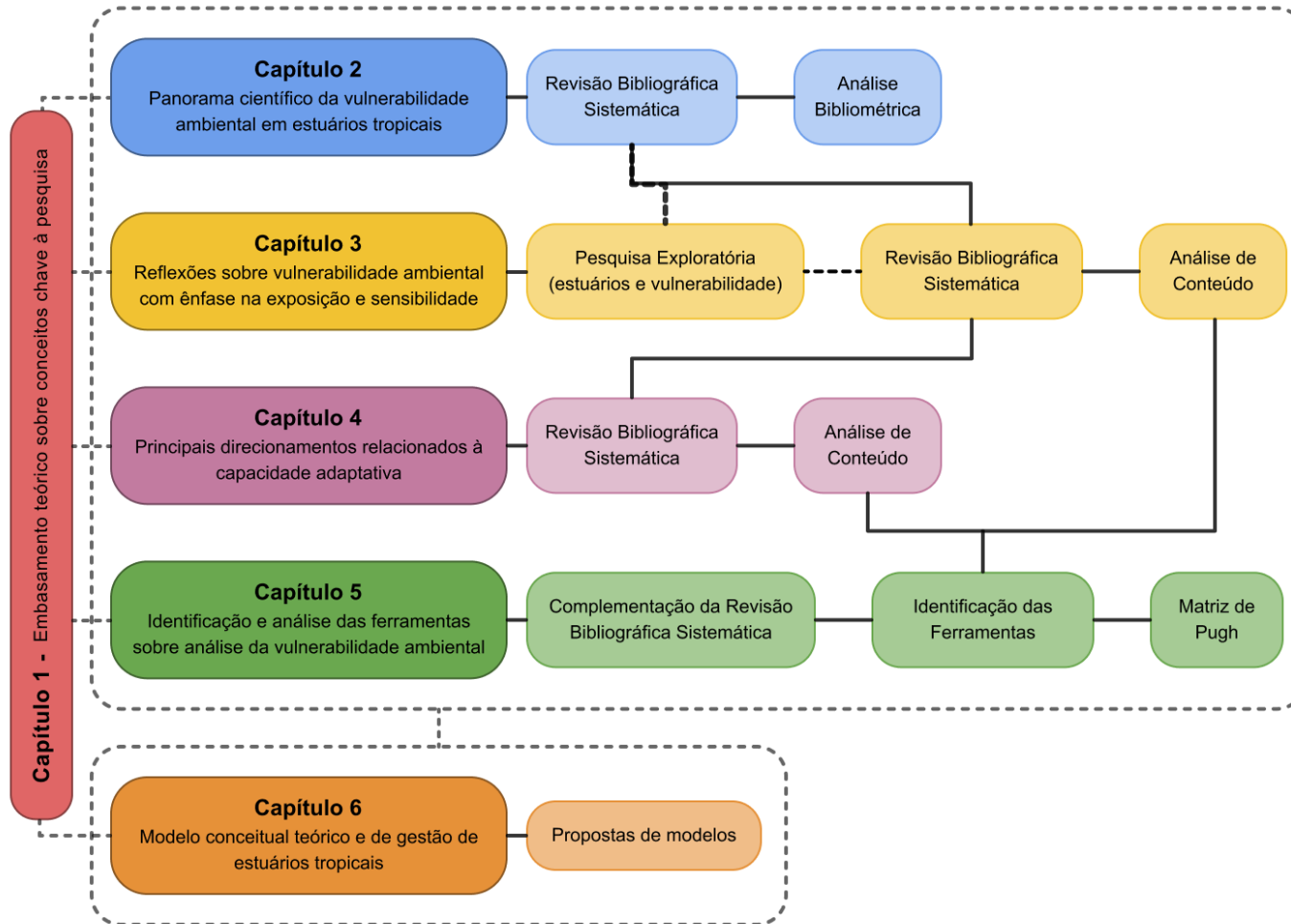
No capítulo 4, fez-se o uso da RBS para identificar os principais direcionamentos relacionados à capacidade adaptativa dos estuários tropicais, sejam elas aspectos de adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento.

No capítulo 5, a execução da RBS deu suporte teórico para a identificação das principais ferramentas utilizadas pensando na vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais. Para analisar os pontos fortes e fracos dessas ferramentas, suas características de concepção, funcionalidades de execução, por exemplo, foi proposta uma metodologia com base na Matriz de Pugh, também conhecida como Matriz de Decisão (PUGH, 1981). Este método consiste na avaliação comparativa das ferramentas, a fim de gerar informações de forma eficaz e dinâmica relacionada às ferramentas que melhor atendem aos critérios essenciais para um bom funcionamento, propiciando sua utilização na gestão integrada de estuários.

O conjunto das metodologias escolhidas, favorecem uma visão sistêmica em relação às vulnerabilidades ambientais em estuários tropicais, bem como as ferramentas que podem subsidiar a gestão dessas regiões. Esses passos metodológicos, suportam e corroboram a elaboração do modelo conceitual, no Capítulo 6, uma vez que, os pontos fundamentais foram abordados anteriormente.

Na Figura 2, visualiza-se a estrutura metodológica adotada em cada capítulo da Tese.

Figura 2. Esquema metodológico dos procedimentos metodológicos associados a cada capítulo da tese.



Fonte: Elaboração dos autores (2024)

## Referências bibliográficas

ADGER, W. N. *et al.* **New indicators of vulnerability and adaptive capacity.** Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research, 2004.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global environmental change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.

ALBERT, J. S. *et al.* Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. **Ambio**, v. 50, n. 1, p. 85-94, 2021.

ALVES, Adriana Thays Araújo *et al.* Sorption of remazol black B dye in alluvial soils of the Capibaribe River Basin, Pernambuco, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, 2020.

ALVES, Romulo Nepomuceno *et al.* Contamination and toxicity of surface waters along rural and urban regions of the Capibaribe River in tropical northeastern Brazil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 40, n. 11, p. 3063-3077, 2021.

ARRUDA-SANTOS, Roxanny Helen *et al.* Sewage contamination assessment in an urbanized tropical estuary in Northeast Brazil using elemental, isotopic and molecular proxies. **Environmental Pollution**, v. 317, p. 120726, 2023.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo.** 3a reimp. da 1a edição. São Paulo: Edições, v. 70, 2016.

BIESDORF, D. L. *et al.* Bibliometric study of geotechnologies on the analysis of environmental vulnerability: perspectives for environmental management. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e155111032548, 2022.

BOEREMA, A.; MEIRE, P. Management for estuarine ecosystem services: A review. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 172-182, 2017.

BORGES, Gislayne Cristina Palmeira *et al.* Cell biovolume and carbon biomass of phytoplankton in degraded tropical estuaries in Northeastern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 40, p. 101522, 2020.

DIAS, J. A. *et al.* Importância do conhecimento sobre a morfodinâmica estuarina e costeira para a gestão do litoral. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 3, p. 271-272, 2011.

DITTMAR, T.; HERTKORN, N.; KATTNER, G.; LARA, R.J. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, n.1, p. 1-7, 2006.

DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines, **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021.

ENNOUALI, Z. *et al.* Mapping Coastal vulnerability using machine learning algorithms: A case study at North coastline of Sebou estuary, Morocco. **Regional Studies in Marine Science**, v. 60, 1 jun. 2023.

- FÜSSEL, H. M.; KLEIN, R. J. T. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. **Climatic change**, v. 75, n. 3, p. 301-329, 2006.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
- HOANG, H. D.; MOMTAZ, S.; SCHREIDER, M. Assessing the vulnerability of small-scale fishery communities in the estuarine areas of Central Vietnam in the context of increasing climate risks. **Ocean & Coastal Management**, v. 196, p. 105302, 2020.
- HU, X. *et al.* Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection—A case of Weifang City, China. **Ecological Indicators**, v. 125, p. 107464, 2021.
- KELLEWAY, J. J. *et al.* Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. **Global Change Biol.**, v. 23, p. 3967-3983, 2017.
- KHOJASTEH, D. *et al.* Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review. **Science of The Total Environment**, v. 780, p. 146470, 2021.
- LADE, S. J. *et al.* Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. **Nature sustainability**, v. 3, n. 2, p. 119-128, 2020.
- LIMA, M. C. G.; SÁ, S. M. F.; SOUZA, W. M.; SANTOS, T. E. M. Impactos gerados e a gestão da bacia do rio Capibaribe-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 075–085, 2018.
- LONSDALE, J.-A.; WESTON, K. BARNARD, S.; BOYES, S.J.; ELLIOTT, M. Integrating management tools and concepts to develop an estuarine planning support system: A case study of the Humber Estuary, Eastern England. **Marine Pollution Bulletin**, v. 100, p. 393-405, 2015.
- MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade? **Revista brasileira de estudos de população**, v. 32, p. 433-460, 2015.
- MYLOPOULOS, J. Conceptual modelling and Telos. **Conceptual modelling, databases, and CASE: An integrated view of information system development**, p. 49-68, 1992.
- NASCIMENTO, R. C. M.; COSTA, C. R.; MAGAROTTO, M. G.; SILVA-CAVALCANTI, J. S.; COSTA, M. F. Qualidade da água de três estuários tropicais expostos a diferentes níveis de urbanização. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 20, n. 3, p. 169-178, 2020.
- NASCIMENTO, R. C. M.; HANAI, F. Y.; GUILHERME, B.C. Estuário do Rio Capibaribe: problemas de uma bacia hidrográfica urbana. In: Karla Maria Silva de Faria; Silas Pereira Trindade. (Org.). **Planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas**. 1 ed. Goiania: C&A Alfa Comunicação, v. 1, p. 185-195, 2021.

PATTEN, B. C. Systems approach to the concept of environment. **Ohio J. Sci.**, v. 78, n. 4, p. 206-222, 1978.

PUGH, S. Design decision-how to succeed and know why. In: Session Sa, Paper 8, **Design Engineering Conference**, 1981.

RAW, J. L. *et al.* Blue carbon sinks in South Africa and the need for restoration to enhance carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 859, 10 fev. 2023.

RELYEA, R.; RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 8º Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda, 2021.

SILVA, R. N.; GOMES, D. D. M.; LIMA, C. E. S.; GOLDFARB, M. C. Uso do índice RDE para determinação de anomalias de drenagem no Rio Capibaribe (PE). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 552–565, 2016.

SILVA, A. P.; SILVA, C. M. Planejamento ambiental para bacias hidrográficas: convergências e desafios na bacia do rio Capibaribe, em Pernambuco-Brasil. **Holos**, v. 1, p. 20–40, 2014.

SOUZA, João Vitor Nunes *et al.* Responses of functional traits of macrobenthic communities on the presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons contamination in three tropical estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 250, p. 107105, 2021.

THALHEIM, B. The theory of conceptual models, the theory of conceptual modelling and foundations of conceptual modelling. In: **Handbook of Conceptual Modeling: Theory, Practice, and Research Challenges**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 543-577, 2011.

TYLER, R. M.; BRADY, D. C.; TARGETT, T. E. Temporal and spatial dynamics of diel-cycling hypoxia in estuarine tributaries. **Estuaries and Coasts**, v. 32, p. 123-145, 2009.

TURNER, B.L.; KASPERSON, R.E.; MATSON, P.A.; MCCARTHY, J.J.; CORELL, R.W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLET, N.; KASPERSON, J.X.; LUERS, A.; MARTELLO, M.L.; POLSKY, C.; PULIPHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proc Natl Acad Sci**, v. 100, p. 8074–8079, 2003.

WRI – World Resources Institute. **World Hypoxic and Eutrophic Coastal Areas**. 2008. Disponível em: <https://www.wri.org/data/world-hypoxic-and-eutrophic-coastal-areas>

YANG, X. *et al.* Vulnerability assessment and management planning for the ecological environment in urban wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 298, p. 113540, 2021.

## 2. Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais e desafios de gestão: uma análise bibliométrica sistemática<sup>6</sup>



Estuário do Rio Capibaribe – Recife, Pernambuco

Fonte da imagem: Regina Nascimento (2022)

---

<sup>6</sup> Artigo aceito para publicação na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais

O capítulo objetiva realizar uma análise bibliométrica sistemática das produções científicas sobre a vulnerabilidade ambiental em regiões estuarinas tropicais, com a intenção de configurar um panorama atual dos principais estudos e das relevantes publicações existentes sobre as de vulnerabilidade ambiental dessas regiões e os seus desafios para a gestão integrada dos ambientes costeiros.

## **2.1. Métodos**

A pesquisa caracterizou-se como exploratória, tendo como base a aplicação da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), que visa à identificação de estudos e pesquisas pertinentes a uma determinada temática, à qual são adotados métodos diretos e sistematizadores de busca, auxiliando na identificação, avaliação de qualidade e veracidade dos estudos existentes sobre o tema (DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO; TAKAHASHI; BERTOLOZZI, 2011; KITCHENHAM, 2004). Com a aplicação dos rigorosos métodos da RBS, identificam-se as contribuições da temática para responder perguntas específicas (ROTHER, 2007), tais como: “Quais as principais publicações e produções existentes sobre fatores que influenciam a vulnerabilidade ambiental e aquática de um estuário tropical? Quais são os desafios atuais, apresentados em publicações e produções científicas, relacionados à gestão de regiões estuarinas?”

Os procedimentos adotados para a RBS baseiam-se em protocolos propostos por Levy e Ellis (2006) e Conforto, Amaral, da Silva (2011), seguindo três estágios, a fim de obter informações pertinentes acerca da temática estudada: (i) Entrada - definição de protocolo de busca, com informações relacionadas a definição da problemática, objetivos, fontes primárias de estudo, palavras-chave a serem utilizadas, critérios de inclusão e ferramentas; (ii) Processamento - condução da busca, documentação obtida e respectiva análise; (iii) Saída - síntese dos resultados e organização dos modelos teóricos dos conteúdos obtidos, alertas para novas publicações nas plataformas de busca.

### 2.1.1. Estágios e Condução da RBS

A construção das *strings* de busca, ou seja, palavras-chave as quais englobam as temáticas de estudo para conseguir obter os artigos pertinentes, se deu a partir de testes e ajustes na combinação de palavras que condizem à temática, bem como a utilização de operadores booleanos (*OR*, *AND*) que facilitam e direcionam a estratégia de busca. Além disso, foi utilizado o caractere asterisco (\*) para ampliar os sufixos existentes nas palavras-chave adotadas, como por exemplo estuário, estuários, estuarinos e o uso de aspas nos termos, para que as buscas ficassem restritas apenas à grafia exatamente definida.

Além disso, foram realizadas discussões sobre as *strings* de busca com especialistas e integrantes de um Grupo de Trabalho sobre RBS (integrantes do Grupo de Pesquisa Sustentabilidade e Gestão Ambiental da Universidade Federal de São Carlos), com o intuito de construir coletivamente os protocolos robustos para a execução da RBS, em que foram definidas as palavras-chave e os melhores operadores utilizados na pesquisa. Ressalta-se que, foram adotados os termos na língua inglesa por abranger a indexação em todos os idiomas, já que, os periódicos científicos de relevância solicitam os resumos em inglês.

A fim de obter um melhor resultado, foi estabelecida a seguinte equação com a utilização das *strings* de busca e respectivos operadores booleanos nas bases de dados: “estuár\*” *OR* “tropical estuar\*” *AND* “vulnerab\*” *OR* “environm\* vulnerab\*” *OR* “aquatic vulnerab\*” *AND* “management”.

Como critério de inclusão dos resultados (artigos ou referências), foram consideradas publicações pertinentes ao objetivo central da pesquisa (identificar as problemáticas existentes quanto à vulnerabilidade ambiental de regiões estuarinas para o seu devido gerenciamento), excluindo-se artigos relacionados à ecologia de espécies animais e vegetais, e aos estuários não tropicais.

O levantamento de dados foi feito por meio das bases de dados *Web of Science* e SCOPUS, em que pôde-se estabelecer critérios de seleção e respectiva leitura do resumo. A preferência pelo banco de dados *Web of Science* se configurou por se tratar de um dos maiores e importantes repositórios de revistas científicas com grande abrangência quanto às suas

áreas de concentração bem como a atualização constante do acervo (ARCHAMBAULT *et al.*, 2009). Além disso, a SCOPUS foi selecionada por se tratar do maior banco de dados com resumos revistos por pares da Elsevier (ALBACH; MEDEIROS, 2020).

A busca nas bases de dados científicos ocorreu a partir da categoria tópico, em que foram verificados os títulos do artigo, resumo, palavras-chaves do autor e *keywords plus*. Como marco temporal, foi estabelecido o período da primeira publicação dos artigos nas respectivas bases de dados com o tema “vulnerabilidade ambiental em estuários”, até o mês de novembro de 2021.

Após o referido período de execução da RBS, foram criados alertas em ambas as plataformas de busca para que, assim, pudessem ser inseridos os novos artigos até a conclusão da pesquisa. Na sequência, foram estabelecidas três etapas com critérios de inclusão dos estudos, materiais e referências, visando o refinamento da pesquisa.

A primeira etapa referiu-se ao critério estabelecido sobre as áreas de conhecimento: ciências ambientais; ciências marinhas/oceanografia; ciências do solo; pesquisas da água; e ciência multidisciplinar. Com isso, excluiu-se vários artigos referentes às áreas de matemática, medicina e ciências da computação.

Por se tratar de dois bancos de dados científicos, a segunda etapa envolveu a junção dos resultados obtidos por ambas as plataformas de busca (*Web of Science* e SCOPUS) com a exclusão dos materiais duplicados.

A terceira etapa consistiu na leitura dos títulos e resumos para restrição apenas dos artigos relevantes à temática principal da pesquisa (vulnerabilidade ambiental em regiões estuarinas tropicais).

Após essas etapas, foram estabelecidas as variáveis consideradas na análise bibliométrica dos resultados obtidos (conforme apresentadas no Quadro 1).

Para realização da análise de dados, fez-se o uso do *software* VOSviewer na versão 1.6.11. O *software* viabiliza o estabelecimento e a visualização de conexões bibliométricas, podendo incluir artigos, autores e periódicos, identificando relações de coautoria, instituições, co-ocorrência de termos importantes para o estudo, dentre outras. A escolha do mesmo se justifica pelo fato do utilitário ser gratuito e ter uma funcionalidade atrativa quanto a qualidade gráfica e técnica. Conforme elencado por Van Eck e

Waltman (2010), o *VOSviewer* consegue elaborar excelentes mapas bibliométricos que facilitam a interpretação do leitor, sendo considerado um dos melhores da sua categoria.

Quadro 1. Variáveis adotadas para análise bibliométrica.

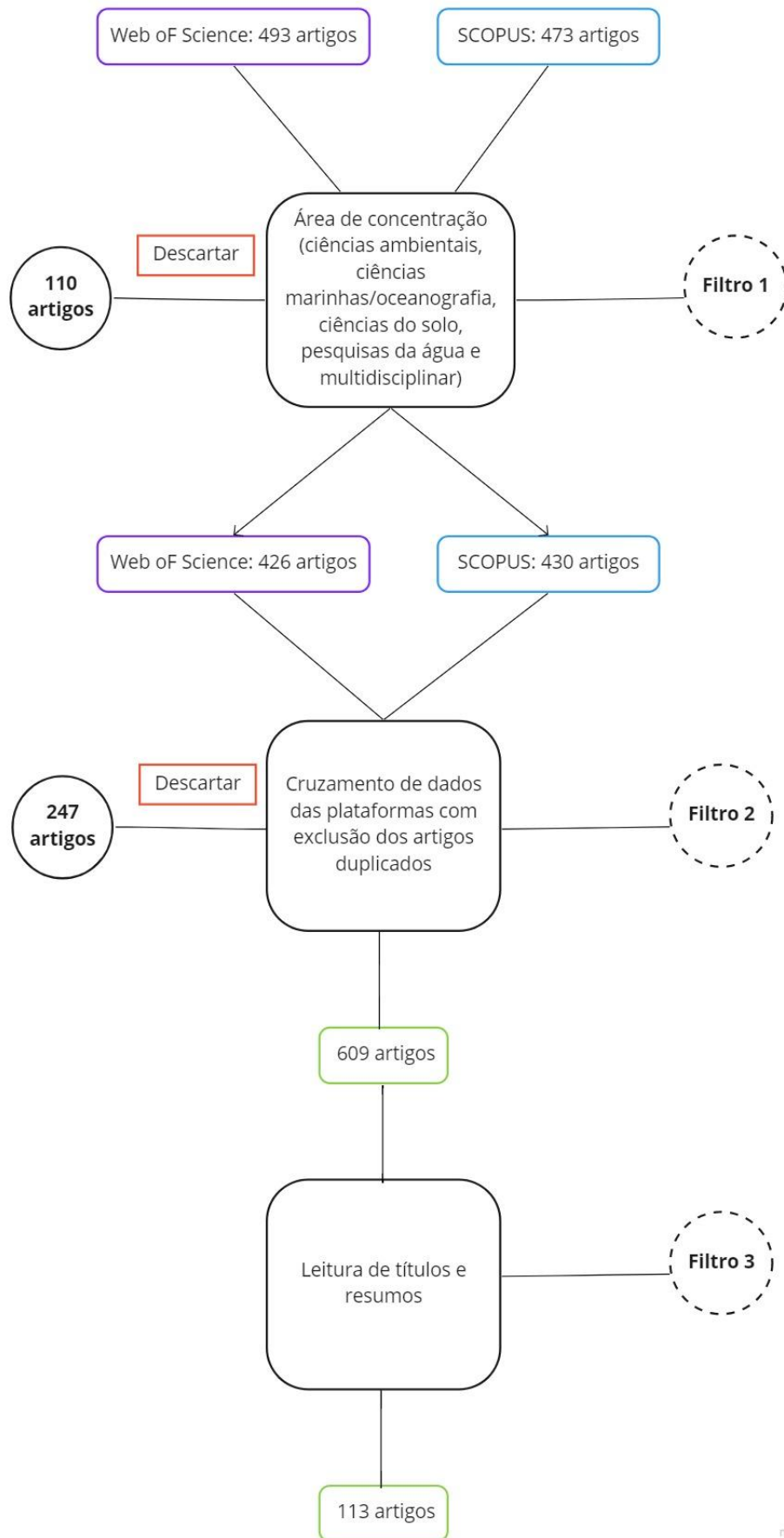
Variável	Análise bibliométrica
Título	Quantitativo de artigos científicos publicados no mundo com o tema “vulnerabilidade ambiental em estuários” em seu título
Autor	Índice de colaboração dos autores para o referido tema
Revista	Produtividade dos periódicos sobre “vulnerabilidade ambiental em estuários”
Ano de Publicação	Quantitativo e evolução de publicações no decorrer do tempo
Países	Quantitativo dos países onde foram realizados os estudos nos estuários
Palavras-chave	Quantitativo de palavras-chave utilizadas nos artigos científicos

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

## 2.2. Resultados e Discussões

Foram identificados 493 artigos na base de dados do *Web of Science* e 473 artigos na base de dados do SCOPUS. Com a realização da primeira etapa, os trabalhos referentes a outras áreas de conhecimento (definidas para análise) foram eliminados, chegando ao resultado de 426 produções no *Web of Science* e 430 no SCOPUS. Com o cruzamento de dados das plataformas (segunda etapa), pôde-se chegar ao quantitativo de 609 artigos, nos quais os títulos duplicados foram conferidos e excluídos manualmente. Por fim, ao fazer a leitura dos títulos e respectivos abstracts, chegou-se ao resultado de 110 artigos (conforme ilustrado na Figura 3). Vale ressaltar que um grande quantitativo de trabalhos, que foram excluídos, estava relacionado a estudos sobre espécies animais e a estuários não tropicais ou lagoas costeiras, não sendo considerados para a relevância da presente pesquisa.

Figura 3. Quantitativo de dados obtidos por meio de critérios de inclusão nas respectivas bases de dados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

### 2.2.1. Análise dos títulos

Dos 110 artigos selecionados na pesquisa, apenas 29 (25,7%) fazem menção à vulnerabilidade em seu título, seja ela com os termos “vulnerabilidade” ou “vulnerável”. Os demais, trazem a temática em seus respectivos abstracts.

Quanto ao termo “estuário” e suas terminações como “estuarino”, estes estão presentes em 38 (33,6%) artigos. Observando os termos "estuário tropical" e "manguezais" (devidamente ressaltados por apresentarem maior expressão territorial em relação aos demais estuários tropicais), verificou-se a presença de 16 (14,2%) artigos que fizeram uso dessas terminologias no título. Mas, ressalta-se que apenas 9 trabalhos (correspondentes a 8% do total) referem-se à combinação das temáticas da vulnerabilidade com os estuários e/ou manguezais (conforme apresentados na Tabela 1).

**Tabela 1.** Artigos que possuem menção em seu título à combinação dos termos vulnerabilidade e estuários.

AUTOR	TÍTULO	ANO
VIEIRA <i>et al.</i>	<i>An integrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area</i>	2019
ISLAM; REINSTÄDTLE; GNAUCK	<i>Vulnerability of mangrove forests and wetland ecosystems in the sundarbans natural world heritage site (Bangladesh)</i>	2018
GHOSH; MUKHOPADHYAY	<i>Vulnerability assessment through index modeling: a case study in Muriganga-Saptamukhi estuarine interfluvium, Sundarban, India</i>	2017
ROGERS; WOODROFFE	<i>Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate</i>	2016
ELLISON	<i>Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts</i>	2015
CAMACHO-IBAR; RIVERA-MONROY	<i>Coastal Lagoons and Estuaries in Mexico: Processes and Vulnerability</i>	2014
ELLISON; ZOUH	<i>Vulnerability to climate change of mangroves: Assessment from Cameroon, Central Africa</i>	2012
PELLEGRINI <i>et al.</i>	<i>A Method for the Classification of Mangrove Forests and Sensitivity/Vulnerability Analysis</i>	2009
RISSIK <i>et al.</i>	<i>VPSIRR (Vulnerability - Pressure - State - Impact - Risk and Response): An approach to determine the condition of estuaries and to assess where management responses are required</i>	2005

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Dentre os artigos combinantes com a temática vulnerabilidade e estuários, destaca-se os trabalhos de Rogers e Woodroffe (2016) e Rissik *et al.* (2005), os quais são considerados artigos de referência para demais estudos que investigam tal temática. Ambos os autores sintetizam a importância e a necessidade de se investigar as vulnerabilidades de um estuário, a fim de se ter um gerenciamento integrado para essas regiões, visto seu grande potencial como prestador de serviços ecossistêmicos.

Em complemento, o trabalho de Ellison (2015) confere definições e exemplificações de extrema valia no que diz respeito a abordagem da vulnerabilidade em estuários tropicais, sejam elas em suas diferentes dimensões (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa).

### **2.2.2. Autores**

Foram identificados nas produções pesquisadas 422 autores distribuídos em 222 instituições, sendo destes, apenas 9 estavam presentes em mais de 2 artigos. A pesquisadora australiana Rogers, K. da *University of Wollongong*, se destaca com 4 publicações. Suas pesquisas são direcionadas ao gerenciamento de regiões estuarinas frente às mudanças climáticas, bem como a utilização de indicadores de vulnerabilidade para manguezais e estuários. Suas publicações concentram, até a análise do presente estudo, 101 citações (conforme apresentado na Tabela 2). Além disso, seus trabalhos foram desenvolvidos em parceria com autores como Saintilan, N. da *Macquarie University* e Woodroffe, C.D. da *University of Wollongong*, que se destacam nessa lista por publicação.

Os autores Al-Nasrawi, A.K.M.; Hamylton, S.M. e Jones, B.G., ambos vinculados à *University of Wollongong*, estão presentes em 3 artigos abordando o sensoriamento remoto como ferramenta de investigação da vulnerabilidade ambiental de estuários na Austrália. Ressalta-se que os autores realizaram parcerias de autoria e, deste modo, comparecem nos mesmos três artigos, apresentando 27 citações.

O autor Ghosh, A., vinculado à *Visva-Bharati University*, publicou 3 artigos na temática de estudo da presente RBS, em que abordou a erosão como uma variável relacionada à vulnerabilidade de um estuário indiano, além

de realizar avaliações do estado de vulnerabilidade da localidade, configurando 21 citações.

Visando à execução de trabalhos no Brasil, o autor Morgado, F. vinculado à Universidade de Aveiro - Portugal, contribuiu com 2 publicações, cujos trabalhos foram realizados em estuários do Brasil devido às suas colaborações com instituições brasileiras, concentrando, até o momento, 6 citações. Suas pesquisas dizem respeito à elaboração de modelos, por meio de georreferenciamento, para analisar a vulnerabilidade da região costeira em regiões estuarinas, as quais fazem parte de áreas protegidas, segundo a legislação brasileira (Leis n. 11.428/2006 e 12.651/2012).

Tabela 2. Autores com maior número de publicação na RBS e seus índices de citação.

AUTOR	ARTIGOS	CITAÇÕES
	<i>Impacts and adaptation options for estuarine vegetation in a large city</i>	13
	<i>Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate</i>	16
ROGERS, K.	<i>The significance and vulnerability of Australian saltmarshes: implications for management in a changing climate</i>	46
	<i>Measuring, mapping and modelling: an integrated approach to the management of mangrove and saltmarsh in the Minnamurra River estuary, southeast Australia</i>	26
	<i>An assessment of anthropogenic and climatic stressors on estuaries using a spatio-temporal GIS-modelling approach for sustainability: Towamba estuary, southeastern Australia</i>	8
AL-NASRAWI, A. K. M.; HAMILTON, S. M.; JONES, B. G.	<i>Geoinformatics vulnerability predictions of coastal ecosystems to sea-level rise in southeastern Australia</i>	9
	<i>GIS-based modelling of vulnerability of coastal wetland ecosystems to environmental changes: Comerong Island, southeastern Australia</i>	10
SAINTILAN, N.	<i>The significance and vulnerability of Australian saltmarshes: implications for management in a changing climate</i>	46
	<i>Impacts and adaptation options for estuarine vegetation in a large city</i>	13
WOODROFFE, C. D.	<i>Measuring, mapping and modelling: an integrated approach to the management of mangrove and saltmarsh in the Minnamurra River estuary, southeast Australia</i>	26

AUTOR	ARTIGOS	CITAÇÕES
	<i>Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate</i>	16
GHOSH, A.	<i>Quantitative approach on erosion hazard, vulnerability and risk assessment: case study of Muriganga-Saptamukhi interfluve, Sundarban, India</i>	13
	<i>Vulnerability assessment through index modeling: a case study in Muriganga-Saptamukhi estuarine interfluve, Sundarban, India</i>	8
MORGADO, F.	<i>GIS Models for Vulnerability of Coastal Erosion Assessment in a Tropical Protected Area</i>	3
	<i>An integrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area</i>	6

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

### 2.2.3. Revistas (Periódicos) Científicas

As publicações analisadas foram identificadas em 83 revistas científicas, em que as de maior concentração podem ser observadas na Tabela 3, obtendo-se destaque para a *Ocean & Coastal Management* concentrando 7 publicações, seguida de *Journal for Nature Conservation* e *Wetlands Ecology and Management* ambas com 4 produções, e *Journal of Coastal Research*, *Marine and Freshwater Research* e *Water* com 3 artigos cada.

Tabela 3. Periódicos científicos que apresentaram maior concentração de publicações identificadas na pesquisa e seu respectivo fator de impacto.

PERIÓDICO CIENTÍFICO	QUANTITATIVO	FATOR DE IMPACTO
<i>Ocean &amp; Coastal Management</i>	7	4.295
<i>Journal for Nature Conservation</i>	4	2.575
<i>Wetlands Ecology and Management</i>	4	2.134
<i>Journal of Coastal Research</i>	3	1.11
<i>Marine and Freshwater Research</i>	3	2.36
<i>Water</i>	3	5.530
<i>Coastal Research Library</i>	2	0.4
<i>African Journal of Aquatic Science</i>	2	1.758
<i>Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems</i>	2	3.254
<i>Environmental Conservation</i>	2	3.012

PERIÓDICO CIENTÍFICO	QUANTITATIVO	FATOR DE IMPACTO
<i>Environmental Monitoring and Assessment</i>	2	3.307
<i>Estuaries and Coasts</i>	2	3.032
<i>Estuarine Coastal and Shelf Science</i>	2	3.229
<i>Journal of Environmental Management</i>	2	8.91
<i>Modeling Earth Systems and Environment</i>	2	3.899
<i>Science of the Total Environment</i>	2	10.753

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

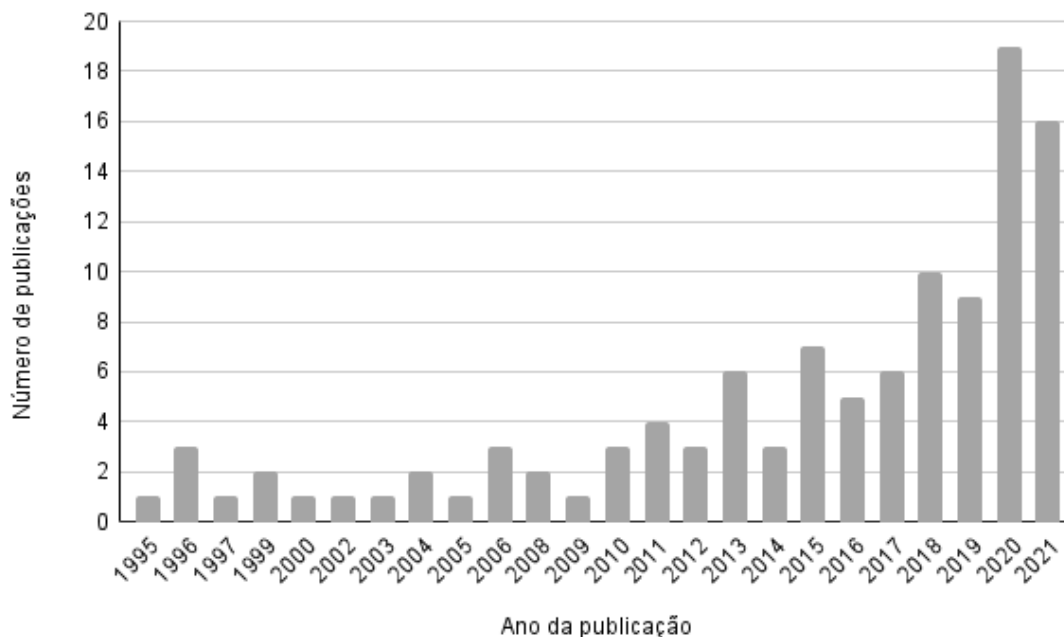
Nota-se que todas as revistas mencionadas na Tabela 3 estão diretamente relacionadas a assuntos ambientais, e as de maior concentração de publicação dizem respeito a ambientes costeiros, onde os estuários e manguezais em estudo fazem parte.

Observando o fator de impacto destas revistas, a *Science of the Total Environment* obteve o maior índice com valor de 10.753, sendo considerada a mais importante dentre os periódicos observados, seguida do *Journal of Environmental Management* (8.91) e *Water* (5.530). Essas revistas científicas apresentam uma boa reputação e confiabilidade no âmbito acadêmico, as quais fazem com que os pesquisadores dêem preferência tanto para publicação como para leitura e citações dos seus artigos.

#### 2.2.4. Análise do ano de publicação

Analisando os anos de publicação, pôde-se verificar a evolução das publicações ao longo do tempo (conforme apresentado no Gráfico 1). A primeira publicação com a incidência da temática do Gerenciamento Integrado atrelado a ambientes costeiros tropicais, produzida pelos autores Humphries e Robinson (1995), estudou o estuário de *Peel-Harvey* na Austrália Ocidental. Mesmo com o passar dos anos, a evolução das publicações ocorreu de modo lento. As maiores concentrações de produções se deram a partir de 2018, quando as publicações que tinham um quantitativo máximo de 7 produções ao ano, ficando acima de 9 artigos científicos, conforme verificado no Gráfico 1. Salienta-se que os anos de 1998, 2001 e 2007 não apresentaram artigos que contemplassem o presente estudo bibliométrico.

**Gráfico 1.** Evolução das publicações no período de 1995 a 2021.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Observando o período da produção crescente (2018 - 2021), foram identificados 54 artigos correspondentes a pouco menos da metade (49,1%) do montante total (110 artigos). Destas, a maior concentração se deu em 2020 com 19 artigos, correspondentes a 17,3% do total, seguidos de 2021 com 16 artigos (14,5%), 2018 com 10 artigos (9,1%) e 2019 com 9 artigos (8,2%).

A abordagem da temática do gerenciamento integrado e vulnerabilidade de ambientes estuarinos encontra-se em desenvolvimento e ascensão desde sua primeira publicação em 1995. O desenvolvimento de pesquisas científicas relacionadas a essas temáticas são fundamentais para o enfrentamento e conhecimento de desafios relacionados ao ambiente estuarino tropical, bem como o funcionamento desses ambientes.

Tratando-se do panorama obtido com o estudo, paradigmas relacionados às mudanças de concepção de regiões estuarinas e à formulação de políticas para seu gerenciamento, vêm mudando com o auxílio de comprovações científicas. Segundo DasGupta e Shaw (2013), o aumento de investigações nessas regiões favorecem as transformações de abordagem relacionadas ao gerenciamento dessas regiões, que anteriormente ocorriam de modo fragmentado e exploratório, passando a propiciar um olhar mais conservador e sistêmico, visando à proteção desses ambientes. Essa afirmativa corrobora com a constatação de um aumento de produções a partir

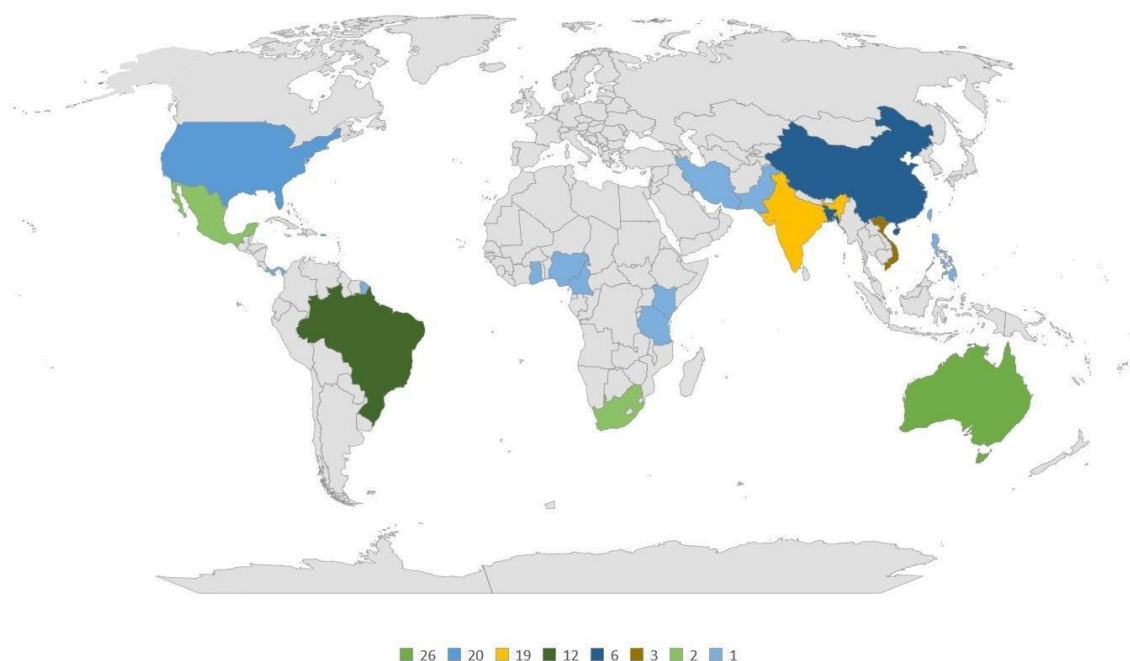
de 2013 com crescente número de publicações acerca da temática. Posto isto, Fernandes e Zappes (2020) afirmam que os trabalhos científicos são ferramentas imprescindíveis para subsidiar a gestão, uma vez que possibilitam maior acurácia tanto na coleta de dados, bem como um maior rigor científico na elaboração de um desenho amostral e até mesmo auxiliando o entendimento quanto às complexidades ambientais.

É importante destacar que, a partir dos anos 2000, com a Avaliação Ecosistêmica do Milênio, ocorreu um impulsionamento de estudos e publicações para discutir tais serviços, obtendo-se destaque ao ecossistema marinho-costeiro. Ainda, as discussões relacionadas às mudanças climáticas foram ampliadas e intensificadas a partir dos relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

#### **2.2.5. Países das localidades dos estudos identificados**

Os 110 artigos identificados pelo estudo bibliométrico, relacionaram 23 países como localidades de execução dos estudos de campo. Devido às abrangências territoriais que por muitas vezes ultrapassam a linha tropical do planeta, tomou-se o cuidado de verificar todas as localidades para que as mesmas condissessem com uma região de estuário tropical. Assim, verificou-se que 26 artigos (23%) apresentaram os estuários localizados na Austrália como objeto de estudo, seguidos dos Estados Unidos com 20 (18,1%), Índia com 19 (17,2%) e Brasil com 12 artigos (11%) (Figura 4).

Figura 4. Distribuição geográfica onde os estudos foram desenvolvidos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A alta contribuição dessas localidades de estudo nas produções científicas, pode ser associada ao potencial de pesquisa dos estuários tropicais existentes nessas regiões e proximidade com importantes Instituições de Ensino Superior como por exemplo, Universidade da Califórnia (EUA), Universidade de Sydney (AUS) e Universidade Federal de Santa Catarina (BRA), as quais realizam muitas investigações relacionadas às zonas costeiras e estuários. Desse modo, essas instituições se tornaram referência no gerenciamento de áreas costeiras tropicais, desenvolvendo metodologias e modelos que subsidiam a gestão de regiões estuarinas. Nessa vertente, Klinger *et al.* (2018) destacam que ocorre um incentivo financeiro quanto à realização de pesquisas e publicações em bons periódicos, favorecendo a disseminação de conteúdo por parte das instituições, além de serem motivadas a continuar fazendo ciência.

Localidades de estudo em países como Bangladesh e China, estiveram presentes em 6 artigos científicos cada, correspondente a 5,3%. Ilhas Fiji, Nova Zelândia e Vietnã foram mencionadas em 3 artigos cada (2,7%), além da África do Sul e México, ambos com 2 artigos (1,7%). Estuários dos países Camarões, Filipinas, Tanzânia, Gana, Guiana Francesa, Irã, Nigéria, Panamá, Paquistão, Porto Rico, Quênia e Taiwan obtiveram 1 artigo científico cada.



Com a organização no mapa bibliométrico, pode-se destacar as principais temáticas abordadas pelas publicações identificadas com 23 palavras-chave, distribuídas em 5 agrupamentos, diferenciadas por cores. O primeiro grupo de palavras-chave, na cor vermelha, corresponde a *bay, coastal management, dynamics, estuary, impacts, salt-marsh* e *vulnerability*; o segundo, na cor verde, com *adaptation, coastal vulnerability, forests, management, mangroves* e *sea-level rise*; o terceiro, em cor azul, com *coastal, coastal wetlands, conservation, restoration, conservation* e *salinity*; o quarto, em cor amarela, com *coastal erosion, delta* e *erosion*; e o quinto, na cor lilás, com *climate-change* e *resilience*.

Ressalta-se ainda, que algumas palavras-chave tiveram maior incidência no estudo bibliométrico, sendo representadas na Figura 5 com um maior destaque de tamanho. As ocorrências correspondem à palavra-chave como temática principal do artigo (quando diretamente relacionadas ao cerne da pesquisa) e temática transversal (quando incorporadas à pesquisa sem estar diretamente relacionada à motivação principal). Desse modo, destacam-se as palavras-chave: mudanças climáticas, gerenciamento, aumento do nível médio relativo do mar<sup>7</sup>, impactos, vulnerabilidade e estuários (conforme apresentado na Tabela 4).

**Tabela 4.** Palavras-chave com maior incidência no estudo bibliométrico.

<b>Palavra-chave</b>	<b>Número de produções com a palavra-chave sendo a temática principal</b>	<b>Número de produções com a palavra-chave sendo a temática transversal</b>
Mudanças climáticas	19	53
Gerenciamento	19	48
Aumento do nível do mar	18	39
Impactos	12	35
Vulnerabilidade	11	29
Estuários	9	18

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

<sup>7</sup> A expressão Aumento do Nível Médio Relativo do Mar na presente tese foi abordada apenas como aumento do nível do mar.

### **2.2.7. Desafios existentes para a gestão integrada de regiões estuarinas tropicais**

Com a iminente consequência das mudanças do clima, uma das principais vulnerabilidades ambientais associadas aos estuários são o aumento do nível do mar, visto que, por ser um ambiente de transição entre a região costeira e marinha, além de dar suporte na proteção da costa, os estuários, segundo projeções, sofrerão com o aumento dos mares e fluxos de intrusão salina (GHALAMBOR *et al.* 2021; MARTIN *et al.*, 2021).

Outro destaque condiz com a influência da pressão antrópica, a qual acarreta diversas problemáticas e impactos, sejam elas associadas a erosão costeira, aumento dos nutrientes (como por exemplo amônia, nitrogênio e fósforo) nos corpos d'água, oriundos do lançamento de efluentes domésticos não tratados, construções irregulares, uso indevido da terra, dentre outras. Essas pressões, fazem com que os estuários não consigam restaurar suas características ambientais no tempo natural do processo, promovendo um desequilíbrio ecossistêmico (PENG; WANG; CAI, 2021; THRUSH *et al.*, 2021).

Os estuários devem ser gerenciados de uma forma integrada, onde sejam elencadas suas vulnerabilidades e respectivas consequências, sem apenas evidenciar um único problema (WU *et al.*, 2018). De acordo com a literatura estudada no presente estudo bibliométrico, os principais desafios quanto à gestão estuarinas estão relacionados: à falta de se dar devida importância às regiões estuarinas tropicais por parte dos tomadores de decisão; à falta de conhecimento científico ampliado e detalhado dessas regiões; bem como a ausência da ciência para nortear as políticas públicas.

Compreender e identificar os níveis e fatores, que envolvem as vulnerabilidades ambientais em ambientes estuarinos tropicais, favorecem a redução significativa dessa problemática. Mas, para que isso ocorra, a gestão integrada precisa aplicar práticas, políticas e estratégias que vislumbram a diminuição da vulnerabilidade (ADDO *et al.*, 2020), bem como consigam atingir uma justiça social aos atores presentes nessas regiões (HARRIS *et al.*, 2021).

Uma das estratégias que visam dar suporte aos tomadores de decisão para a redução da vulnerabilidade é a estruturação de modelos de gestão. Porém, muitos são vistos de forma desafiadora devido às diversas técnicas utilizadas para coleta de dados, validação, calibração do modelo, dentre outros.

Além disso, muitos gestores ao replicarem os modelos não ponderam as mesmas circunstâncias a qual a proposta original foi realizada, acarretando desafios e dados questionáveis (ÖZKUNDAKCI *et al.*, 2018).

Implementar uma gestão integrada em ambientes estuarinos requer um monitoramento constante de suas peculiaridades e vulnerabilidades, uma vez que esses ambientes apresentam constante mudança e dão grande suporte ecossistêmico ao planeta. Aderir a boas tomadas de decisões a nível local nesses ambientes favorecem a resposta de desafios ambientais globais como as mudanças do clima e sustentabilidade nos oceanos (LAURINO *et al.*, 2021).

Assim, um programa de monitoramento da vulnerabilidade ambiental e a estruturação de modelos de gestão integrada de estuários tropicais configuram-se em estratégias desafiadoras e imprescindíveis para viabilizar iniciativas, proposições, tomada de decisões e ações para a diminuição da vulnerabilidade desses ambientes.

### **2.3. Conclusões**

Pesquisas de análise bibliométrica são fundamentais para se observar os panoramas científicos relacionados a uma temática específica. Com sua aplicação, constatou-se que a vulnerabilidade ambiental em estuários foi discutida pela primeira vez em meados dos anos 90. Por se tratar de uma temática relativamente nova, com menos de 30 anos desde sua primeira abordagem, espera-se o aumento da realização de estudos e produções acadêmicas, mantendo a curva de publicações científicas em ascensão. A tendência de aumento favorece as discussões em âmbito acadêmico bem como na gestão integrada desses ambientes. Por se tratar de áreas vulneráveis, com as projeções de mudanças do clima, a mesma será altamente impactada principalmente no que se refere às suas diversas interferências em estuários tropicais, sendo necessários cada vez mais investimentos e incentivos à investigação da temática.

As duas renomadas bases de dados (*Web of Science* e SCOPUS) escolhidas e a definição das strings de busca tornaram-se fundamentais para o desenvolvimento e a acurácia dos resultados obtidos. E, com a definição das etapas e critérios de realização da RBS, teve-se a certeza de que as publicações em relação à temática foram devidamente conquistadas na busca.

Periódicos científicos, que tem em seu escopo o estudo de zonas costeiras e da água, ganharam maior destaque pela concentração de publicações, visto que o conteúdo dos artigos científicos se torna melhor contextualizados e ganham maior visibilidade nessas revistas acadêmico-científicas, tais como a *Ocean & Coastal Management*, *Journal for Nature Conservation*, *Wetlands Ecology and Management*, *Journal of Coastal Research*, *Marine and Freshwater Research* e. Em contrapartida, verifica-se a necessidade da ampliação de incentivos à pesquisa nessa temática, que por sua vez, tende a favorecer o aumento significativo de artigos científicos para disseminação do conhecimento, passando a ser algo comum nas instituições, não estando somente relacionado às universidades de países desenvolvidos e subdesenvolvidos presentes na região tropical, conforme constatado na análise.

Quando observadas as principais publicações da temática, a Austrália foi o país que mais apresentou contribuições com suas áreas de estudo, bem como o vínculo institucional dos autores com maior incidência do estudo bibliográfico. Desse modo, os artigos científicos, em sua maioria, abordam o gerenciamento de ambientes estuarinos tropicais e as vulnerabilidades associadas a esses ambientes.

Vislumbrando as principais nuances relacionadas aos desafios atuais para a gestão integrada, o desentusiasmo de gestores aos estuários tropicais são um dos fatores mais incitantes para esse ambiente, visto que, precisam de maior atenção em virtude das vulnerabilidades ambientais existentes. Em complemento aos desafios, a falta do conhecimento científico relacionado a esses ambientes e maior detalhamento das causas de vulnerabilidades se tornam um fator de complexidade para a elaboração e execução de uma gestão integrada. Porém, essa falta não pode e nem deve ser impeditiva para execução de boas políticas públicas e ações que restaurem e conservem os estuários tropicais.

A realização do estudo bibliométrico se tornou fundamental para analisar o desenvolvimento de estudos relacionados à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais, temática crescente devido às mudanças ambientais ocorridas nas últimas décadas, bem como a eminente preocupação relacionada ao clima. Assim, destaca-se a importância e necessidade de

investimentos em estudos que visem essas regiões, as quais dão suporte direto aos tomadores de decisão para o seu devido gerenciamento.

## Referências bibliográficas

ADDO, K.A.; BREMPONG, E. K.; JAYSON-QUASHIGAH, P. N. Assessment of the dynamics of the Volta River estuary shorelines in Ghana. **Geoenvironmental Disasters**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2020. DOI: 10.1186/s40677-020-00151-1

ADGER, W.N. Vulnerability. **Glob Environ Change**, v. 16, p. 268–281, 2006. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

ALBACH, V., MEDEIROS, M. Utilização da revisão bibliográfica sistemática em turismo: panorama internacional e ibero-americano dos trabalhos presentes no SCOPUS e Redalyc. **Publ. UEPG Appl. Soc. Sci.**, Ponta Grossa, v. 28, p. 1-14, e202014492, 2020. DOI: 10.5212/PublicatioCi.Soc.v.28.2020.14492

AQUINO, A. R.; LANGE, C. N.; LIMA, C. M.; AMORIM, E. P.; PALETTA, F. C.; FERREIRA, H. P.; BORDON, I. C. A.; ALMEIDA, J. R.; GOMES, M. A. U. G.; ZAMPIERI, M. C. T.; OLIVEIRA, M. J. A.; CORREIA JUNIOR, P. A.; SOUZA, R. R.; MATTIOLO, S. R.; RODRIGUES, S. G. "Vulnerabilidade ambiental", p. 15 - 28. In: AQUINO, A. R.; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017. ISBN: 978-85-803-9242-5

ARCHAMBAULT, E.; CAMPBEEL, D.; GINGRAS, Y.; LARIVIÈRE, V. Comparing Bibliometric Statistics Obtained from the Web of Science and Scopus. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 60, n. 7, p. 1320 – 1326, 2009. DOI: 10.1002/asi.21062

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 34, p. 53-66, 2020. DOI: 10.1590/s0103-4014.2020.34100.005

BIESDORF, D. L.; MIOTO, C. L.; BARBOSA, D. S.; PARANHOS FILHO, A. C.; SILVA, N. M. Bibliometric study of geotechnologies on the analysis of environmental vulnerability: perspectives for environmental management. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e155111032548, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i10.32548.

CONFORTO, E. C., AMARAL, D. C., DA SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: **VIII Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Porto Alegre, RS, Brasil: UFRS. 2011.

DASGUPTA, R., SHAW, R. Changing perspectives of mangrove management in India – An analytical overview. **Ocean & Coastal Management**, v. 80, p. 107-118, 2013. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.04.010

DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO. M. C.; TAKAHASHI, R. F.; BERTOLOZZI, M. R. Revisão sistemática: noções gerais. **Revista Esc Enferm USP**, v. 45, n. 5, p. 1260 – 1266, 2011. DOI: 10.1590/S0080-62342011000500033

- DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N. LIM, W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines, **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070
- ELLISON, J.C. Vulnerability Assessment of Mangroves to Climate Change and Sea-Level Rise Impacts. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, p. 115-137, 2015. DOI: 10.1007/s11273-014-9397-8
- FERNANDES, J. M.; ZAPPES, C. A. Oceanografia socioambiental da pesca artesanal no estado do Espírito Santo: uma análise bibliométrica. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 6, p. 545-558, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0044
- FÜSSEL, H.M. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. **Global Environ Change**, v. 17, p. 155–167, 2007. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002
- GHALAMBOR, C. K.; GROSS, E. S.; GROSHOLTZ, E. D.; JEFFRIES, K. M.; LARGIER, J. K.; MCCORMICK, S. D.; ... & WHITEHEAD, A. Ecological Effects of Climate-Driven Salinity Variation in the San Francisco Estuary: Can We Anticipate and Manage the Coming Changes? **San Francisco Estuary and Watershed Science**, v. 19, n. 2, 2021. DOI: 10.15447/SFEWS.2021V19ISS2ART3
- HARRIS, L. A.; GRAYSON, T.; NECKLES, H. A.; EMRICH, C. T.; LEWIS, K. A.; GRIMES, K. W.; ... & QUISPE, J. A socio-ecological imperative for broadening participation in coastal and estuarine research and management. **Estuaries and Coasts**, v. 45, n. 1, p. 38-48, 2021. DOI: 10.1007/s12237-021-00944-z
- KENNISH, M. Environmental threats and environmental future of estuaries. **Environmental Conservation**, 29 (1): 78-107, 2002. DOI: 10.1017/S0376892902000061
- KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele University Technical Report TR/SE-0401. 2004. ISSN: 1353-7776
- KLINGER, D.; EIKESET, B.; DAVÍGSDÓTTIR, A.; WINTER, M.; WATSON, J. The mechanics of blue growth: management of oceanic natural resource use with multiple, interacting sectors. **Marine Policy**, v. 87, p. 356-362, 2018. DOI: 10.1016/j.marpol.2017.09.025
- LAURINO, I. R.; SERAFINI, T. Z.; COSTA, T. M.; CHRISTOFOLETTI, R. A. The role of estuarine macrofaunal patterns for the management of marine protected areas in a changing world. **Journal for Nature Conservation**, v. 63, p. 126042, 2021. DOI: 10.1016/j.jnc.2021.126042
- LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, p. 181-212, 2006. DOI: 10.28945/479
- MARTIN, S.; SPARKS, E. L.; CONSTANTIN, A. J.; CEBRIAN, J.; CHERRY, J. A. Restoring fringing tidal marshes for ecological function and ecosystem resilience to moderate sea-level rise in the Northern Gulf of Mexico.

**Environmental Management**, v. 67, n. 2, p. 384-397, 2021. DOI: 10.1007/s00267-020-01410-5

MOYA-ANEGÓN, F.; CHINCHILLA-RODRÍGUEZ, Z.; CORERA-ÁLVAREZ, E.; VARGAS-QUESADA, B.; MUÑOZ-FERNÁNDEZ, F. J.; HERRERO-SOLANA, V.; GRANADA, U. La producción científica de la Universidad de Granada (SCI, 1991-99). **Revista Española de Documentación Científica**, v. 28, n. 2, p. 170-195, 2005. DOI: 10.3989/redc.2005.v28.i2.167

NASCIMENTO, R. C. M.; COSTA, C. R.; MAGAROTTO, M.; SILVA-CAVALCANTI, J.S.; COSTA, M.F. Qualidade da água de três estuários tropicais expostos a diferentes níveis de urbanização. **Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 20, n. 3, p. 169 – 178, 2020. DOI: 10.5894/rgci-n284

NASCIMENTO, R. C. M.; HANAI, F. Y.; GUILHERME, B.C. Estuário do Rio Capibaribe: problemas de uma bacia hidrográfica urbana. In: Karla Maria Silva de Faria; Silas Pereira Trindade. (Org.). **Planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas**. 1 ed. Goiânia: C&A Alfa Comunicação, v. 1, p. 185-195, 2021. ISBN: 978-85-495-0451-7

NASCIMENTO, R.C.M.; GUILHERME, B.C.; ARAUJO, M.C.B.; MAGAROTTO, M.; SILVA-CAVALCANTI, J.S. Uso de Indicadores Ambientais em áreas costeiras: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 1, p. 052-069, 2018. ISSN: 2595-4431

ÖZKUNDAKCI, D.; WALLACE, P.; JONES, H. F.; HUNT, S.; GILES, H. Building a reliable evidence base: legal challenges in environmental decision-making call for a more rigorous adoption of best practices in environmental modelling. **Environmental Science & Policy**, v. 88, p. 52-62, 2018. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.06.018

PENG, W.; WANG, D.; CAI, Y. Assessing Ecological Vulnerability under Climate Change and Anthropogenic Influence in the Yangtze River Estuarine Island-Chongming Island, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 21, p. 11642, 2021. DOI: 10.3390/ijerph182111642

ROTHER, E. T. Revisão Sistemática X Revisão Narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, n. 2, p. v – vi, 2007. DOI: 10.1590/S0103-21002007000200001

SAINTILAN, N.; WILSON, N.C.; ROGERS, K. RAJKARAN, A.; KRAUSS, K. W. Mangrove expansion and salt marsh decline at mangrove poleward limits. **Global Change Biology**, v. 20, n. 1, p. 147-157, 2014. DOI: 10.1111/gcb.12341

SANTOS, J. O.; SOUZA, M. J. N. Abordagem Geoambiental Aplicada à análise da vulnerabilidade e dos riscos em ambientes urbanos. **Boletim Goiano de Geografia**, [s.l.], v. 34, n. 2, p. 215-232, 2014. DOI: 10.5216/bgg.v34i2.31730

SILVA, M.R.; HAYASHI, C.R.M.; HAYASHI, M.C.P.I. Análise bibliométrica e cientométrica: desafios para especialistas que atuam no campo. **InCID: R. Ci.**

**Inf. e Doc.**, v. 2, n. 1, p. 110-129, 2011. DOI: 10.11606/issn.2178-2075.v2i1p110-129

THRUSH, S. F.; HEWITT, J. E.; GLADSTONE-GALLAGHER, R. V.; SAVAGE, C.; LUNDQUIST, C.; O'MEARA, T., ... & PILDITCH, C. Cumulative stressors reduce the self-regulating capacity of coastal ecosystems. **Ecological Applications**, v. 31, n. 1, p. e02223, 2021. DOI: 10.1002/eap.2223

TURNER, B.L.; KASPERSON, R.E.; MATSON, P.A.; MCCARTHY, J.J.; CORELL, R.W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLET, N.; KASPERSON, J.X.; LUERS, A.; MARTELLO, M.L.; POLSKY, C.; PULIPHER, A.; SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proc Natl Acad Sci**, 100: 8074–8079, 2003. DOI: 10.1073/pnas.123133510

VAN ECK, N.J.; WALTMAN, L. *Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping.* **Scientometrics**, v. 84, p. 523–538, 2010. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3

WEITZEL, S. R. O papel dos repositórios institucionais e temáticos na estrutura da produção científica. **Em Questão**, v. 12, n. 1, p. 51-71, 2006. ISSN 1808-5245

WRI – World Resources Institute. **World Hypoxic and Eutrophic Coastal Areas**. 2008.

WU, W.; YANG, Z.; TIAN, B.; HUANG, Y.; ZHOU, Y.; ZHANG, T. Impacts of coastal reclamation on wetlands: Loss, resilience, and sustainable management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 210, p. 153-161, 2018. DOI: 10.1016/j.ecss.2018.06.013

### 3. Vulnerabilidades ambientais em estuários tropicais: conceitos, abordagens e reflexões



Bosque de *Rhizophora mangle* no estuário do Rio Goiana – Pernambuco

Fonte da imagem: Regina Nascimento (2019)

No presente capítulo, investiga-se quais são as principais vulnerabilidades ambientais existentes em estuários tropicais. Para tanto, inicialmente são discutidas abordagens, características e reflexões sobre estuário e vulnerabilidade, conceitos fundamentais desta etapa da pesquisa. Posteriormente, apresenta-se uma síntese sobre a questão em análise, elaborada com base na Revisão Bibliográfica Sistemática.

### **3.1. Procedimentos metodológicos**

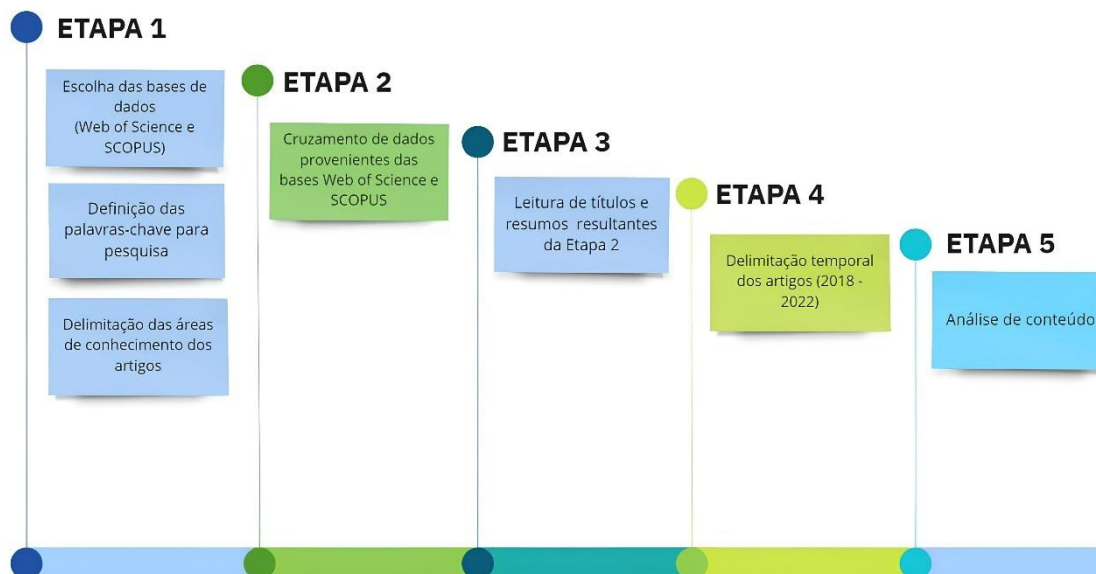
A primeira fase metodológica integrou uma pesquisa exploratória na literatura científica para elencar as principais definições e abordagens acerca de estuários e vulnerabilidade. A realização dessa metodologia, de acordo com Gil (2007), favorece a investigação ideológica de uma temática, estimulando reflexões e discussões sobre o assunto. Sua escolha foi dada devido a necessidade de abranger as nuances relacionadas aos estuários e vulnerabilidades, uma vez que, são assuntos que apresentam diferentes abordagens e conceituações. Assim, seus esclarecimentos são fundamentais para dar embasamento a esta pesquisa.

Na segunda fase metodológica, visando identificar as principais vulnerabilidades ambientais existentes em estuários tropicais, a pesquisa seguiu as etapas da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), seguindo as diretrizes apresentadas no capítulo anterior. Foram estabelecidos os mesmos padrões constantes no protocolo aplicado da pesquisa, com a escolha da base de dados (Web of Science e SCOPUS), a definição das *strings* de busca e seleção das áreas de conhecimento. A partir desses padrões, foi realizado o cruzamento de dados entre as bases para posterior leitura de títulos e resumos, a fim de verificar se os artigos eram pertinentes ao objetivo da RBS (Figura 6).

Com a execução da análise bibliométrica referente às vulnerabilidades ambientais de estuários tropicais (NASCIMENTO; HANAI, 2022), relatada no capítulo anterior, foi estabelecida, para a busca de produções científicas, a delimitação temporal a partir de 2018, uma vez que esse período apresentou uma maior concentração de publicações. Ressalta-se também que outros artigos de grande relevância científica sobre a temática foram levados em

consideração para análise e discussão nesta pesquisa, mesmo não estando presentes na delimitação temporal pré-estabelecida (2018-2022).

Figura 6. Resumo esquemático dos passos metodológicos para execução da Revisão Bibliográfica Sistemática



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A fim de realizar a Análise de Conteúdo dos artigos selecionados pela pesquisa bibliográfica, foram estabelecidas categorias de análise, que são definidas, segundo Bardin (1977; 2021), como agrupamentos que apresentam características em comum, de acordo com os seguintes critérios e qualidades (BARDIN, 1977; 2021; CARLOMAGNO; ROCHA, 2016):

1. Regras claras de inclusão e exclusão nas categorias;
2. As categorias precisam ser mutuamente excludentes (exclusividade);
3. As categorias não podem ser muito amplas, devendo elas serem pertinentes;
4. As categorias devem contemplar todos os conteúdos possíveis, e “outros conteúdos” precisam ser residuais (visando a exaustividade);
5. Objetividade, sem subjetivismos (visando a confiabilidade).

Desse modo, foram estabelecidas duas categorias para a análise do conteúdo dos artigos selecionados, que contemplassem os tópicos e as questões motivadoras da pesquisa bibliográfica, sendo elas:

- (i) Vulnerabilidades ambientais associadas às mudanças climáticas;

(ii) Vulnerabilidades ambientais associadas às ações antrópicas.

Em complemento à Análise de Conteúdo, foi realizada a categorização da vulnerabilidade em relação a seus componentes. De acordo com as premissas de Füssel e Klein (2006), Polsky *et al.* (2007) e Ellison (2015), os componentes da vulnerabilidade consistem em:

(i) Exposição: estresses externos, de origem biofísica e/ou climática, que apresentam uma grande amplitude e taxa de alteração a qual o sistema será submetido;

(ii) Sensibilidade: grau de intensidade em que o ambiente é afetado pela exposição, acarretando danos intrínsecos ao sistema.

Com os componentes supracitados, pôde-se elaborar quadros de análise, tendo como ponto inicial as informações coletadas na RBS. Além de indicar os possíveis processos ambientais afetados relacionados aos estuários tropicais a partir da exposição do ambiente a um estresse/estressor.

## **3.2. Resultados**

### **3.2.1. Abordagens, Conceitos e Reflexões sobre estuários**

Iniciando a compreensão sobre os estuários, a palavra, proveniente do latim *aestuarium*, significa “*esteiro ou espaço que o mar deixa descoberto na vazante*” (AULETE, 2023), definindo um local, geograficamente localizado entre a terra e o mar, onde as águas doces continentais encontram-se com os oceanos (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995; SENT *et al.*, 2021), podendo ainda ser considerado como a parte mais baixa de um rio, onde a maré e o fluxo do rio conseguem interagir (HARARI; GODOI, 2021).

Discussões acerca da definição de estuários foram iniciadas ainda nos anos de 50 e 60. Inicialmente, Pritchard (1952, p. 245) conceituou como “*um corpo d’água costeiro semifechado que tem uma conexão livre com o mar aberto contendo uma quantidade mensurável de água do mar*”. Posteriormente, Cameron e Pritchard (1963, p. 307), propuseram o conceito de estuários ainda de forma ampla, como “*um corpo d’água costeiro semifechado que tem uma conexão livre com o mar aberto no qual a água do mar é diluída de forma mensurável com água doce derivada da drenagem terrestre*”. Essa é uma das

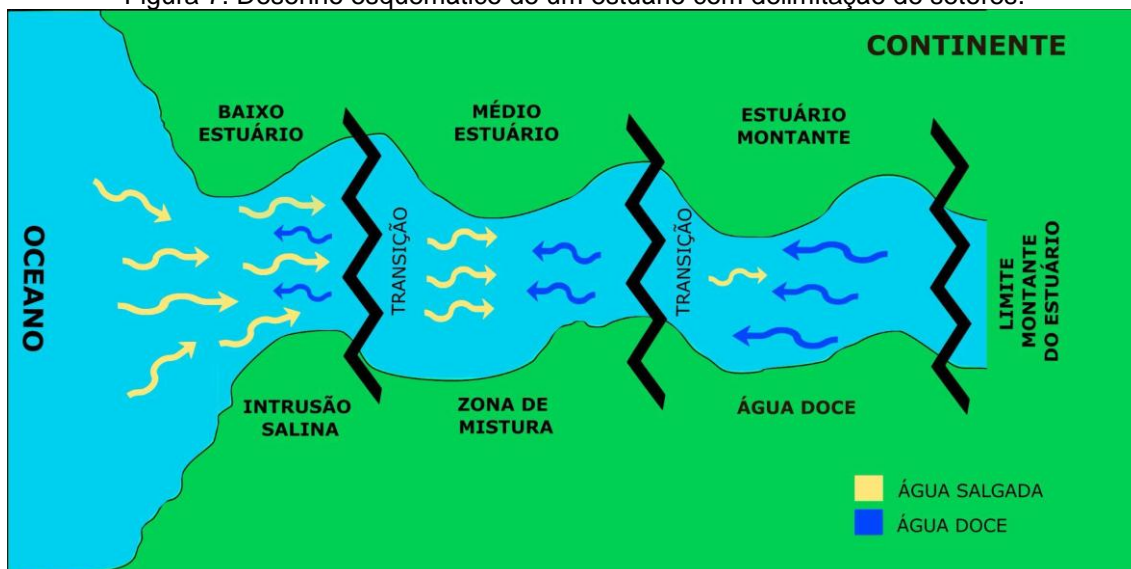
definições mais aceitas e utilizadas pela comunidade científica, porém, algumas lacunas existem em seu escopo, a exemplo de comportar as peculiaridades presentes nos diferentes estuários (de clima temperado, tropical, etc.). Assim, pesquisadores avançaram com novas definições e estabelecimento de características primordiais no contexto dos estuários para novas definições.

A partir da definição proposta supracitada de Cameron e Pritchard (1963), novos questionamentos e estudos foram desenvolvidos por pesquisadores em conjunto com as reuniões da Associação Americana para o Avanço da Ciência (*American Association for the Advancement of Science - AAAS*). Ainda na década de 60, novos avanços aconteceram após reuniões da AAAS, em que Pritchard (1967) e Casperts (1967) destacaram que, para que um ambiente seja considerado estuário, algumas características devem ser consideradas, sendo elas: ser um local em que o rio possa desaguar em um mar que necessariamente tenha influência das marés; que o local apresente padrão de circulação das águas e respectiva mistura hídrica; tenha trechos com variação de água salgada e; que apresente em seu percurso a intrusão salina, fator esse limitante para a delinear a extensão do estuário.

Considerando ainda as lacunas da definição inicial proposta por Cameron e Pritchard (1963), Fairbridge (1980, p.2) (Figura 7) propôs que:

*“Um estuário é uma reentrância de mar em um vale fluvial, estendendo-se até ao limite da propagação da maré dinâmica, e divisível em três setores: a) o baixo estuário, ou zona marítima, com ligação aberta com o mar; b) o estuário médio, onde ocorre mistura intensa de água doce e salgada; e c) o estuário superior ou fluviomarítimo, com água doce, mas sujeito à influência da maré dinâmica.”*

Figura 7. Desenho esquemático de um estuário com delimitação de setores.



Fonte: Adaptado de Fairbridge (1980).

Ao definir estuários, por mais que de forma genérica e amplamente utilizada pela literatura, Cameron e Pritchard (1963) levaram em consideração apenas estuários do hemisfério norte, que por sua vez, apresentam características de regiões temperadas (hipossalinos<sup>8</sup>, clima ameno e chuvas distribuídas ao longo do ano). Desse modo, estuários tropicais que apontam outras particularidades, como a hipersalinidade devido à grande taxa de evapotranspiração, acabam não sendo contemplados por completo na definição dos autores.

Sendo assim, Day (1980, 1981, p. 198), baseado na definição de Pritchard (1952; 1967), considera estuários como “*um corpo de água costeiro parcialmente fechado, permanente ou periodicamente aberto ao mar e dentro do qual há uma variação mensurável de salinidade devido à mistura de água do mar com água doce derivada da drenagem terrestre*”.

Com o passar do tempo, alguns aspectos foram incorporados às definições, como proposto por Dalrymple, Zaitlin e Boyd (1992, p. 1132) em que o estuário é considerado:

*“A porção em direção ao mar de um sistema de vale afogado que recebe sedimentos de ambos os flúvios e fontes marinhas, e contém fácies influenciadas por marés, ondas e processos fluviais. Considera-se que o estuário se estende desde o limite interior das faces de maré na sua cabeceira até ao limite exterior das faces costeiras na sua foz”.*

<sup>8</sup> Durante a maré alta os estuários apresentam hipossalinidade, ou seja, o nível de salinidade encontra-se com valores abaixo do encontrado no mar.

De forma ainda mais integradora, Perillo (1995, p. 26) conceitua como:

*“Um estuário é um corpo de água costeiro semifechado que se estende até o limite efetivo de influência das marés, dentro do qual a água do mar que entra de uma ou mais ligações livres com o mar aberto, ou qualquer outro corpo d’água costeiro salino, é significativamente diluído com água doce derivados da drenagem da terra, e podem sustentar espécies biológicas eurialinas de qualquer parte ou de todo o seu ciclo de vida”.*

Além dos fatores físicos do estuário, Elliot e Whitfield (2011, p. 306) incluíram em sua definição a biota característica dessas regiões. Desse modo, os autores consideram o estuário como *“um corpo de água costeiro semifechado que está ligado ao mar de forma permanente ou periódica, tem uma salinidade que é diferente da do mar aberto adjacente devido à insumos de água doce, e inclui uma biota característica”.*

Em síntese, os estuários precisam estar situados geograficamente entre a terra e o mar, onde possa ocorrer uma intrusão salina e mistura com os demais componentes das águas doces e sedimentos (ALCÂNTARA; HARARI, 2006). Exemplificando suas principais definições, a presente tese segue as diretrizes iniciais de Day (1980,1981), a qual leva em consideração os estuários tropicais e posterior incorporação conceitual de Elliot e Whitfield (2011).

As interfaces dos estuários apresentam características tanto da região continental como dos oceanos, por se tratar de uma região transitória (HILL, 1963; MIRANDA *et al.*, 2002), que sofrem influência diária do regime de marés (SCHUBEL; HAYES; PRITCHARD, 1974). Dentre os estuários tropicais, podem ser encontrados os manguezais<sup>9</sup> e marismas (*salt marsh*)<sup>10</sup>. Esses estuários acabam-se diferenciados pelo tipo de vegetação e sua localização nas marés.

Esses ambientes apresentam vegetação característica, as quais conseguem suportar a variação de salinidade presente no corpo d’água, além de conseguirem se adaptar a um sedimento lamoso e de baixa oxigenação (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995; SELVAM; KARUNAGARAN, 2004). Além

---

<sup>9</sup> De acordo com Mukherjee *et al.* (2014, p. 2253), os manguezais são considerados “plantas lenhosas que crescem normalmente em latitudes tropicais e subtropicais ao longo da interface terra-mar, baías, estuários, lagoas e remansos”.

<sup>10</sup> Consiste na “parte superior e vegetada dos lodaçais entre marés, situando-se aproximadamente entre as marés altas médias de maré morta e as marés altas médias de nascente”, segundo Mcowen *et al.* (2017, p.2).

disso, favorecem o depósito de sedimentos enriquecidos, seja por nutrientes, minerais ou metais (PRASAD; RAMANATHAN, 2008).

A junção das características ambientais desses estuários tropicais, o tornam ambientes únicos e de alta produtividade, sendo fundamentais na manutenção da biodiversidade, os ciclos biogeoquímicos, hidrogeoquímicos, hidrológicos, de matérias orgânicas e inorgânicas (ALONGI, 2022; BRAGA *et al.*, 2023; PRASAD; RAMANATHAN, 2008). Além de, com uma maior quantidade de carbono do que em águas interiores, os estuários influenciam diretamente a ciclagem de nutrientes (DITTMAR *et al.*, 2006).

Mesmo apresentando poucas espécies vegetais superiores, essas zonas úmidas são consideradas uma das mais produtivas do mundo, fornecendo importantes serviços ecossistêmicos tais como proteção da costa, disponibilidade de habitat e possibilidade de atividades culturais e recreativas para o ser humano (KELLEWAY *et al.*, 2017; ALONGI, 2002). Além disso, os serviços do ecossistema prestados pelos manguezais são fornecidos de forma direta, conforme citado, bem como indiretamente (MITRA; MITRA, 2020). Esses ambientes conseguem reter poluentes, bem como minimizam os impactos das marés, favorecendo a qualidade da água do estuário, visto que poderia ocorrer a ressuspensão de sedimentos (SCHAEFFER-NOVELLI; COELHO-JR, 2018). Com isso, em especial os manguezais, são considerados bons bioindicadores da qualidade ambiental (SINGH, 2020).

Dada sua estrutura e sedimento lodoso com baixa oxigenação, os estuários tropicais apresentam águas mais calmas e mornas em relação ao oceano, favorecendo o desenvolvimento de habitats heterogêneos contribuindo para a manutenção da biodiversidade global (CHEN *et al.*, 2016).

Dentre os estuários tropicais, os manguezais são os que apresentam maior abrangência, visto que nesse ecossistema podem ser associadas às feições marismas e baías<sup>11</sup>. De acordo com o *Global Mangrove Watch - GMW* versão 3.0, existem aproximadamente 147 mil quilômetros quadrados de manguezais no mundo, onde a maior concentração está no sudeste asiático (48,222 km<sup>2</sup>) (GLOBAL MANGROVE ALLIANCE, 2022). Ressalta-se ainda, que os países Indonésia, Brasil, Austrália, México e Nigéria são responsáveis por aproximadamente metade dos manguezais do mundo. Por outro lado, se

---

<sup>11</sup> Reentrância costeira na qual o mar consegue adentrar o continente.

estimou a perda de áreas de aproximadamente 66 km<sup>2</sup>/ano (0,04%) nessas regiões, nos períodos de 2010 a 2020 (GLOBAL MANGROVE ALLIANCE, 2022).

Os manguezais são um dos principais ecossistemas que auxiliam diretamente na mitigação dos impactos frente às mudanças do clima, uma vez que conseguem armazenar aproximadamente 21.896,56 Mt de Carbono Orgânico, também chamado de Carbono Azul, sendo distribuído 2.817,23 Mt CO<sub>2</sub> em biomassa acima do solo e 19.079,32 Mt CO<sub>2</sub> no primeiro metro de solo (GWM, 2020). Com isso, os manguezais são considerados reservatórios vivos de carbono por conseguir armazenar esse elemento em toda sua estrutura vegetal, principalmente no caule e raízes por um grande período, chegando a séculos de armazenamento (ROVAL *et al.*, 2021; 2022).

Devido ao seu grande potencial, os manguezais foram incorporados como valioso meio de combate às mudanças climáticas por meio do Carbono Azul e REDD+ (Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal) (ALONGI, 2012). Por outro lado, o desmatamento em massa de sua vegetação favorece a liberação do carbono armazenado, o que intensifica o aquecimento global (GILMAN *et al.*, 2008; KRISTENSEN *et al.*, 2008).

Além de ser forte aliado frente às mudanças do clima, essas regiões são primordiais para o desenvolvimento costeiro e conseqüentemente à segurança humana, devido à proteção da costa contra inundações e tsunamis, além de processos erosivos (GILMAN *et al.*, 2008; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2016). Mesmo com tamanha importância, os manguezais sofrem diretamente com a influência humana, alterando a provisão de seus serviços ecossistêmicos e diminuindo drasticamente sua área, devido ao desmatamento para construção de infraestruturas urbanas tornando-se vulnerável a essas pressões.

### **3.2.2. Definições, Discussões e Reflexões sobre Vulnerabilidade**

Antes de iniciarmos as discussões relacionadas à vulnerabilidade, é necessário esclarecer que, ocorrem diversas conceituações sobre a temática, seja por diferentes áreas de conhecimento ou até mesmo dentro do mesmo grupo de estudo (FÜSSEL, 2007). Além disso, com a constante evolução de discussões relacionadas ao tema, muitas pesquisas são desenvolvidas para se

chegar a um determinado nível de consenso sobre a definição ideal da vulnerabilidade (GIUPPONI; BISCARO, 2015).

Uma das primeiras definições sobre a vulnerabilidade foi realizada por meio do Escritório de Coordenação de Ajuda em Desastres das Nações Unidas, do inglês, *Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator*, em que um grupo de especialistas relacionam a vulnerabilidade ao grau de perda de algum elemento associado ao risco ou em decorrência de uma manifestação natural que venha a causar nenhum dano ou perda total (UNDRO, 1980). Com isso, no final da década de 80 e início dos anos 90, as definições de vulnerabilidade eram associadas, principalmente, a um potencial de perda (MITCHEL, 1989; BLAIKIE *et al.*, 1994). Não havia muitos desdobramentos para compreender os componentes que faziam parte do processo, tornando a definição ainda abrangente.

Com o passar dos anos, Cutter (1996) elencou alguns questionamentos que favorecessem o desenvolvimento e aprimoramento para futuras definições sobre vulnerabilidade que consistem em: “Quem é/está vulnerável? Vulnerável a que processo? E em função de quais condições socioespaciais?”. De acordo com o autor, pensar nessas premissas é fundamental para entender a vulnerabilidade em ambas as dimensões, principalmente no que se refere à espacial com as interações biofísicas considerando também as respostas sociais.

Conceituar a vulnerabilidade se torna uma importante ferramenta analítica para relatar a suscetibilidade a danos, fragilidades do sistema, bem como auxiliar uma análise para o estabelecimento de ações que busquem reduzir o risco. Logo, a vulnerabilidade está relacionada ao estresse em que um determinado sistema está exposto, sua sensibilidade e conseqüentemente sua capacidade adaptativa (ADGER, 2006).

Por outro lado, a vulnerabilidade também pode ser associada como “*uma suscetibilidade ao dano, um potencial de mudança ou transformação do sistema quando confrontado com uma perturbação<sup>12</sup>, e não como resultado desse confronto*” (GALLOPÍN, 2006, p. 294).

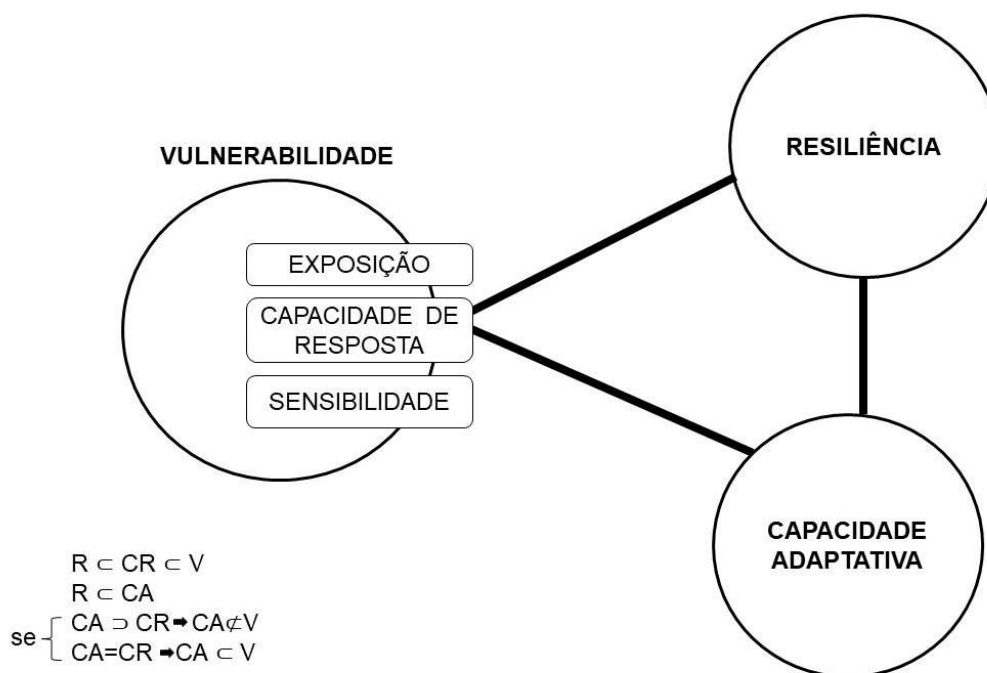
---

<sup>12</sup> De acordo com Turner *et al.* (2003), a perturbação refere-se a grandes picos de pressão que ultrapassam a variabilidade de normalidade em que o sistema opera, interferindo de forma lenta ou repentina.

Ainda, é importante destacar que em alguns casos, a vulnerabilidade pode ser considerada positiva, como exemplo de transformações favoráveis à degradação de regimes opressores ao sistema (GALLOPÍN, 2003). Assim, se o efeito de uma perturbação for apenas relacionado a mudanças triviais e temporárias, elas não consistem em um dano ao sistema, com isso não podem ser consideradas como vulnerável (GALLOPÍN, 2006). Compreendendo esses aspectos, consegue-se vislumbrar diferenças entre a vulnerabilidade e um termo comumente utilizado, a resiliência.

De acordo com Van Der Leeuw (2001), a principal diferença entre a vulnerabilidade e resiliência consiste no fato de que a vulnerabilidade condiz com a capacidade de manter a estrutura do sistema. O que não ocorre com a resiliência, que tem a capacidade de se recuperar das mudanças. Posto isso, a vulnerabilidade e resiliência são opostas, uma vez que *“um sistema é resiliente quando é menos vulnerável a choques numa escala de tempo, e pode se recuperar deles”* (GITZ; MEYBECK, 2012, p. 29). Mesmo que ocorra a oposição, na prática, conseguir diferenciar rapidamente a vulnerabilidade e resiliência não é tarefa fácil, uma vez que ocorrem intersecções no componente de capacidade adaptativa (GALLOPÍN, 2006) (Figura 8).

Figura 8. Relações conceituais entre vulnerabilidade, resiliência e capacidade adaptativa. Em que  $\subset$  = “subconjunto de”;  $\not\subset$  = “não é um subconjunto de”; R, V, AC e CR significam resiliência, vulnerabilidade, capacidade adaptativa e capacidade de resposta, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Gallopín (2006)

É importante destacar que, ocorrem duas principais abordagens no âmbito da vulnerabilidade, com ênfase nas mudanças climáticas e ambientais, sendo elas: vulnerabilidade do resultado (*endpoints*); e vulnerabilidade contextual (*starting point*). O que vem a diferir as abordagens é como a interpretação da vulnerabilidade ocorrerá, como início ou fim (FELLMANN, 2012).

A vulnerabilidade de resultado consiste nos impactos líquidos frente à exposição, que pode ser biofísica ou social, após as adaptações realizadas pelo sistema. Assim, essa abordagem é voltada para as mudanças biofísicas que ocorrem em sistemas fechados, onde a delimitação da “natureza” e “sociedade” são bem definidas. Com isso, a vulnerabilidade pode ser medida e quantificada, sendo ela determinada pela capacidade adaptativa, sugerindo que, os sistemas mais vulneráveis serão os que apresentarem maior alterações físicas (KELLY; ADGER, 2000; FÜSSEL, 2007; O'BRIEN *et al.*, 2007; FELLMANN, 2012).

A vulnerabilidade contextual refere-se a atual incapacidade do sistema para lidar com quaisquer alterações ambientais e climáticas, no qual a vulnerabilidade é influenciada pelas condições biofísicas, sociais, econômicas, políticas e institucionais, estruturas tecnológicas e processos. Desse modo, a vulnerabilidade consiste em uma característica dos sistemas ecológicos e sociais, determinada por múltiplos fatores. Além disso, a abordagem contextual volta-se em desenvolver estratégias que visem o desenvolvimento sustentável, aumentando a capacidade adaptativa das populações humanas para que possam lidar com as mudanças (ADGER, 2006; O'BRIEN *et al.*, 2007; FELLMANN, 2012).

Expostas as duas abordagens, entende-se que em parâmetro de comparabilidade, nenhuma abordagem é considerada melhor que a outra. É necessário que elas sejam vistas como abordagens complementares. Conseguir entender e avaliar a vulnerabilidade com diferentes perspectivas é fundamental para compreender as complexidades do sistema, uma vez que existem múltiplas variáveis. Com isso, tem-se uma visão integrada da vulnerabilidade e identificação das melhores respostas ao problema (KELLY; ADGER, 2000; ADGER, 2006, O'BRIEN, 2007; CORDONA *et al.*, 2012; FELLMANN, 2012).

Com o avanço nas discussões e abordagens, Elisson (2015, p.116) indicou que a vulnerabilidade é “um conceito inclusivo para analisar a resposta socioecológica acoplada à mudança ambiental, definida como a propensão ou predisposição a ser adversamente afetada”. Além disso, a autora leva em consideração os três componentes da vulnerabilidade. Sendo essa, uma das reflexões mais aceitas quando se trabalha em ambientes estuarinos.

Desse modo, esta tese considera que a vulnerabilidade é exteriorizada pelos fatores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, conforme aceito amplamente na literatura (WILLAMS; KAPUSTKA, 2000; TURNER *et al.*, 2003; ADGER, 2006; GALLOPÍN, 2006; SMIT; WANDEL, 2006; IPCC, 2007; O'BRIEN *et al.*, 2007; DONGMEI; BIN, 2009; YUSUF; FRANCISCO, 2009; ERIYAGAMA *et al.*, 2010; SAHIN; MOHAMED, 2014; ELISSON, 2015; ROGERS; WOODROFRE, 2016; BEVACQUA; YU; ZHANG, 2018; FONGNZOSSIE *et al.*, 2022; THURMAN *et al.*, 2022; MONTEFIORE *et al.*, 2023), sem considerar as discussões relacionadas à resiliência, por apresentarem distinção entre si. Considerando, assim, a vulnerabilidade de resultado explicada por ser a consequência residual depois de ocorrida a adaptação (O'BRIEN *et al.*, 2007).

Apresentando os componentes da vulnerabilidade, Sahin e Mohamed (2014) reiteram que é importante destacar as interações desses fatores as quais apresentam mudanças, seja no tempo ou espaço. Assim, a vulnerabilidade pode ser expressa em função dos componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, levando-se em consideração o tempo e espaço.

$$V = f\{E(t, s), S(t, s), CA(t, s)\}$$

Em que: V = vulnerabilidade; E= exposição; S= sensibilidade; CA= capacidade adaptativa; t= tempo s= espaço.

Sahin e Mohamed (2014) ressaltam ainda, que mesmo que a exposição esteja dependente da geografia da localidade, a sensibilidade e a capacidade adaptativa estão estreitamente associadas às condições existentes/atuais de cada localidade. Com isso, quanto maior for a exposição ou sensibilidade do sistema, maior será a vulnerabilidade. E, quanto maior for a capacidade adaptativa, menor será a vulnerabilidade.

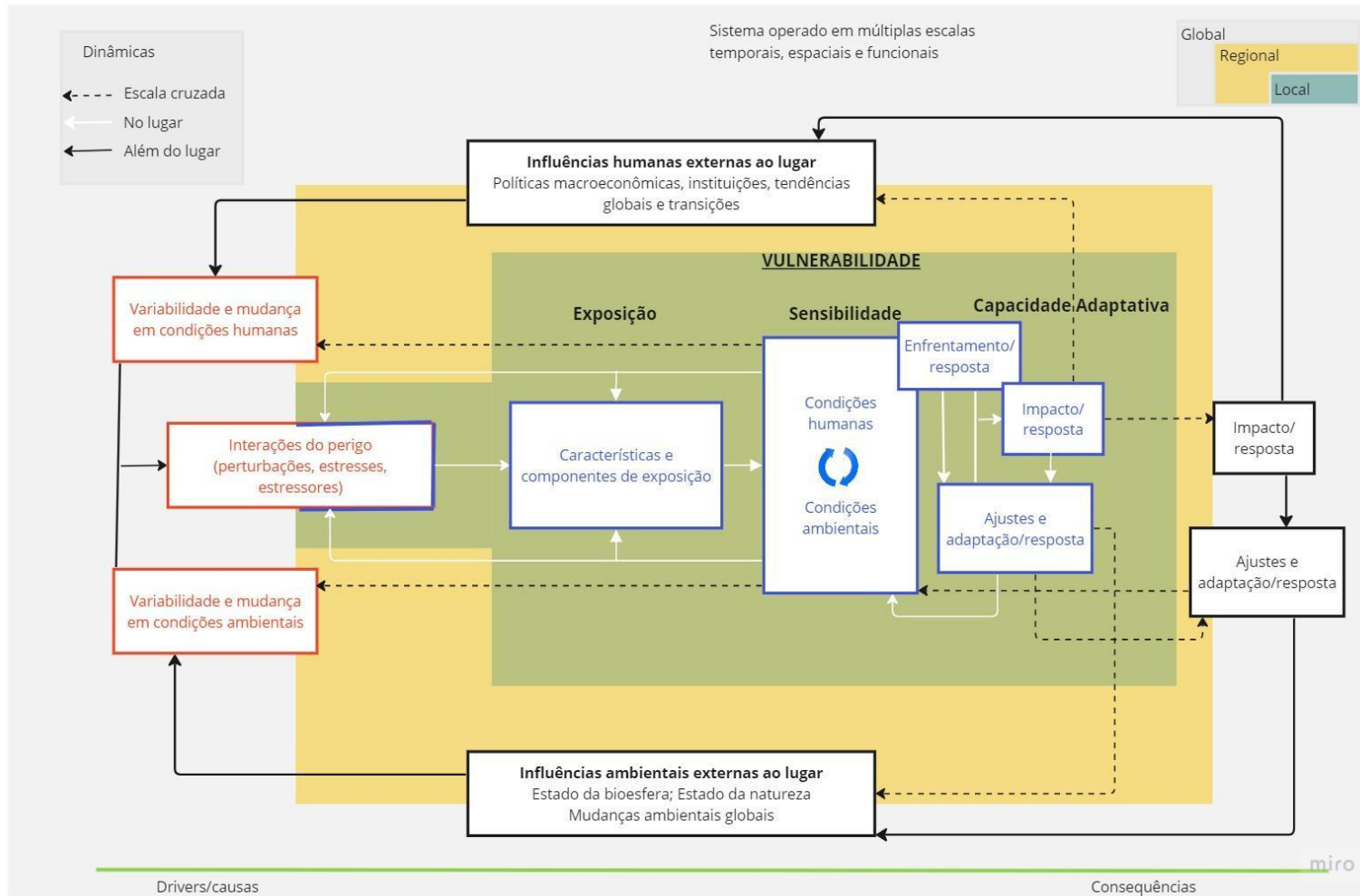
Para entender melhor a vulnerabilidade e sua complexidade, é necessário compreender as características de seus componentes em um determinado sistema humano-ambiente, as quais são consideradas:

- **Exposição:** caracterizada pelos estressores e as individualidades que estão sob estresse (TURNER *et al.*, 2003; POLSKY; NEFF; YARNAL, 2007). Ou seja, a natureza e grau em que o sistema vivenciará o estresse, independente da sua fonte de origem (a exemplo do ambiental e sociopolítico) (ADGER, 2006). Além disso, a exposição inclui a forma em que o sistema vem a experimentar os perigos (TURNER *et al.*, 2003).
- **Sensibilidade:** caracterizam os efeitos gerados pelas tensões que acarretam esforços internos do sistema (TURNER *et al.*, 2003). Parry *et al.* (2007, p. 782) classificam como “o grau em que um sistema é afetado pela variabilidade ou mudança climática”.
- **Capacidade Adaptativa:** associada às respostas aos efeitos provenientes dos estresses/estressores (TURNER *et al.*, 2003). Essas respostas são efetivadas com sucesso em relação à variabilidade ambiental, incluindo ajustes comportamentais tanto de recursos, como possíveis tecnologias (ADGER, 2007).

Com a exposição das conceituações e componentes da vulnerabilidade, entende-se que sua estrutura é complexa e devem ser levados em consideração o tempo e o espaço. Sua estrutura, por muitas vezes, não é fácil de ser vislumbrada, mesmo apresentando a equação em função da exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Com isso, Turner *et al.* (2003) desenvolveram um modelo conceitual, no qual a presente tese toma como base para o desenvolvimento da pesquisa (Figura 9).

A estrutura apresenta os aspectos relacionados a: (i) conexões entre as influências humanas e ambientais ao sistema; (ii) as perturbações e estresses/estressores provenientes das influências e processos; (iii) o sistema humano-ambiente relacionado às inquietações da vulnerabilidade (enfrentamentos, impactos, ajustes e adaptações). Todos esses aspectos, por sua vez, interagem e são dependentes de múltiplas escalas, sofrendo alterações de acordo com as peculiaridades do estudo.

Figura 9. Modelo conceitual da vulnerabilidade adotado para discussões na Tese.



Fonte: Adaptado de Turner *et al.* (2003)

### **3.2.3. Vulnerabilidades ambientais existentes em regiões estuarinas tropicais**

As vulnerabilidades ambientais que existem nos estuários são diversas. As regiões estuarinas, devido sua localização geográfica no encontro dos rios com os mares, tendem a ser mais susceptíveis a quaisquer mudanças climáticas, sejam elas de influência natural ou antrópica (ENNOUALI *et al.*, 2023; RAW *et al.*, 2023). De acordo com Imani *et al.* (2021), essas regiões são densamente povoadas e, mesmo as zonas costeiras que apresentam baixa elevação em relação ao baixo nível do mar (10m) correspondente a 2% de área total em relação ao planeta, conseguem acomodar 10% da população global e 13% quando relacionado aos habitantes urbanos.

A situação de vulnerabilidade desses ambientes ultrapassa a questão da natureza, de acordo com Nath *et al.* (2021), e acabam afetando a economia e sociedade a qual está em seu entorno, uma vez que essas regiões apresentam elevado grau de adensamento demográfico como apresentado por Imani *et al.* (2021). Com isso, identificar as vulnerabilidades e os fatores a elas associados se torna fundamental para compreender o que ocorre com os estuários tropicais. Desse modo, a execução da RBS selecionou 77 artigos no recorte temporal de 2018 a 2022 que abordam a vulnerabilidade ambiental de estuários tropicais. Com a pesquisa, pôde-se verificar dois grandes grupos associados à vulnerabilidade, o primeiro relacionado às mudanças climáticas e o segundo voltado às ações antrópicas.

#### **3.2.3.1. Vulnerabilidades ambientais associadas às mudanças climáticas**

Dentre as principais vulnerabilidades ambientais, tem-se o destaque para as de influências climáticas, discutidas amplamente na literatura (ELLISON, 2015; BORGES; FERREIRA; LACERDA, 2017; AL-NASWAWI *et al.*, 2018; ADDICOTT *et al.*, 2020; LOI; SANG; HUY, 2020; MIRCHI *et al.*, 2018; VAN COPPENOLLE; TEMMERMAN, 2020; ALVES *et al.*, 2020; AYYAM; PALANIVEL; CHANDRAKASAN, 2019; DOUGHTY *et al.*, 2019; GHALAMBOR *et al.*, 2021; PENG; WANG; CAI, 2021; BERA *et al.*, 2022).

De acordo com Ellison (2015), quando se trata de mudanças climáticas associadas aos estuários tropicais (em especial aos manguezais), a identificação e a avaliação das vulnerabilidades ambientais devem ser tratadas com atenção, visto que são fundamentais para a tomada de decisão relacionada a medidas corretivas e alertas preventivos quanto a futuros impactos na região. Além disso, Ellison e Zouh (2012) destacam vulnerabilidades associadas às mudanças climáticas, tais como o aumento do nível do mar, o qual afeta diretamente os ciclos inundativos do estuário, assim como sua produtividade e sedimentação, que, em muitos casos, aumentam a probabilidade de ocorrência da perda da área de mangue.

Por outro lado, ainda segundo Ellison e Zouh (2012), caso haja um aumento de temperatura gradual, esses ambientes conseguem se adaptar, visto que temperaturas mais altas favorecem a produtividade dos manguezais, principalmente em localidades com maior latitude (próximo aos trópicos), bem como a fertilização da atmosfera com CO<sub>2</sub>. No entanto, ressalta-se que eventos extremos climáticos, como os picos de aumento de temperatura de forma abrupta ou maior índice suportável do ambiente causam inevitavelmente a retração dessas regiões. Além disso, com um clima mais quente, ocorrerão alterações em padrões de ventos e tempestades, o que favorece a ocorrência de eventos de elevação dos níveis de águas costeiras (VAN NIEREK *et al.*, 2022).

Ao realizar estudos com os manguezais da Austrália, Duke *et al.* (2017) verificaram que, durante o El Niño de 2015/2016, ocorreu uma grande mortalidade da vegetação de mangue no nordeste australiano, por apresentar um alto índice de aquecimento e secas extremas na região. O estudo de Duke *et al.* (2017) corrobora com as informações destacadas por Ellison e Zouh (2012) em que, eventos extremos climáticos são prejudiciais à saúde e vitalidade dos estuários tropicais. Além disso, Addicott *et al.* (2020) reiteram que os danos causados por eventos climáticos pontuais e extremos, vão além dos estuários, interferindo nas regiões mais próximas aos continentes, bem como nos oceanos. Esses impactos podem favorecer alterações na biodiversidade local, uma vez que os organismos tendem a se adaptar para sobreviver à exposição do estresse/estressor.

Peng, Wang e Cai (2021) apontam que as vulnerabilidades ambientais de aumento do nível do mar, aumento exponencial da temperatura da água,

maior fluxo de intrusão salina no estuário, bem como o aumento da incidência de tempestades no local, estão diretamente associadas às mudanças climáticas. Essas vulnerabilidades acarretam consequências drásticas ao estuário por apresentar uma perda considerada de hábitat principalmente para vida marinha e selvagem, além de aumentar a frequência da amplitude e magnitude das marés no local. Ademais, ocorrem perdas de serviços ecossistêmicos em suas três dimensões (provisão, regulação e cultural).

Por outro lado, Van Coppenolle e Temmerman (2020) destacam que, mesmo sendo vulneráveis às questões climáticas, os manguezais são fortes aliados para atenuar os efeitos de fortes tempestades e inundações. Esse ecossistema desempenha serviços de proteção costeira, conseguindo minimizar os efeitos para a costa, evitando maiores inundações.

Corroborando com Peng, Wang e Cai (2021), Imani *et al.* (2021) reiteram que as alterações relacionadas às amplitudes de marés são, de modo geral, umas das principais causas de flutuações (a curto prazo), e, quando combinadas a períodos de ressaca dos oceanos, podem causar gravíssimos danos, principalmente os relacionados a enchentes. Ademais, Leal Filho *et al.* (2022) destacam que os estuários estão expostos a diferentes graus de pressão em consequência das alterações climáticas, tendo sua hidrologia e ecologia drasticamente prejudicadas em períodos de seca extrema e contínua.

De acordo com Martin *et al.* (2021), a elevação do nível do mar e alterações climáticas (secas e/ou chuvas extremas) tendem a contribuir para a perda acentuada das zonas úmidas, como os manguezais. Uma vez que, o estresse salino afeta negativamente a riqueza de espécies presentes na região, a abundância de espécies incooperantes à salinidade, alteração da composição de espécies dessas regiões, bem como a produção de biomassa vegetal. Dependendo da dimensão e frequência da incidência associada a essas vulnerabilidades, podem apresentar alterações na composição e distribuição da comunidade vegetal acarretando prejuízos para as funções ecológicas desses ambientes, bem como nos serviços ecossistêmicos oriundos dos estuários.

Uma das vulnerabilidades ambientais identificadas na execução da RBS, foi a erosão costeira. Um dos principais fatores que influenciam diretamente a erosão é a exposição às mudanças climáticas com o aumento das ondas, ventos e tempestades extremas. Rogers e Woodroffe (2016) destacam que

compreender e estudar a erosão costeira em estuários se torna fundamental para verificar como o ambiente comporta-se à exposição de mudanças do clima. Além disso, a erosão torna-se elemento fundamental para elaboração de modelos para análise da vulnerabilidade ambiental, uma vez que, dependendo do grau erosivo, seu dano pode ser irreversível.

Ao realizar uma pesquisa na costa oeste da Índia, Das (2020) constatou que uma região de manguezal, com grandes índices erosivos, não conseguiu diminuir a área impactada, mesmo com incentivos de plantio e estabilização de litoral, em virtude de que em algumas regiões dos estuários, o plantio era realizado em lodaçal. O mangue não conseguia se desenvolver em consequência do substrato e a incessante presença de fortes ondas, aumentando seu grau erosivo. Ressalta-se, que em alguns pontos das faixas de mangue ocorrem falhas de vegetação, ou seja, abertura de clareiras. Esses pontos tendem a apresentar maior erosão devido à transferência de energia das regiões mais densas, acarretando mais prejuízos ambientais por aumentar consideravelmente a quantidade de nutrientes e plâncton, por exemplo.

Quando uma região se encontra altamente fragilizada, no que compete à erosão, a cobertura vegetal apenas consegue retardar seu avanço (DAS, 2020). Entretanto, Bera e Maiti (2019) reiteram que os manguezais continuam sendo eficientes para a estabilidade e a resistência de processos erosivos, sendo a plantação de mangue uma excelente opção para o manejo da erosão. Desse modo, quando os processos de deterioração do solo iniciam, os mangues são bons aliados para limitar os incrementos, uma vez que eles são fundamentais para deposição e aumento de sedimentos (KIMELI *et al.*, 2022). Assim, Martin *et al.* (2021) destacam que, ao conseguir restaurar uma grande área de cobertura vegetal, pode-se prover mecanismos de adaptação para os estuários tropicais enfrentarem quaisquer mudanças ambientais posteriores. Além disso, é ressaltado que o balanço sedimentológico ditará sobre o retardo do processo erosivo e o aceleração do aprisionamento de sedimentos.

Em complemento, Loi, Sang e Huy (2020) ao realizar um estudo no Parque Nacional Xuan Thuy, o primeiro sítio Ramsar no Vietnã, puderam constatar que realizar ações planejadas e a longo prazo para restauração e plantio de manguezais é fundamental para minimizar os impactos ambientais relacionadas à mudança climática.

De modo geral, os estuários tropicais (em especial os manguezais) são fortemente impactados com as vulnerabilidades ambientais associadas às mudanças climáticas. Porém, é importante ressaltar que, são fortes aliados na mitigação desse problema, como visto na seção 3.2.1 devido sua eficiência no sequestro de CO<sub>2</sub> da atmosfera.

Raw *et al.* (2023) destacam que, a destruição ou perturbação nessas regiões faz com que ocorra uma redução na capacidade de sequestro de carbono, acarretando emissões significativas de CO<sub>2</sub>. Assim, manter esses ecossistemas vivos, seja por meio da restauração da vegetação nativa ou com um bom gerenciamento, faz com que se tenha melhorias no sequestro de carbono. Fazer com que isso aconteça, é uma “solução climática natural” já que esses ambientes de zonas úmidas sequestram mais carbono do que florestas terrestres, de acordo com os autores. Assim, os manguezais favorecem efetivamente na redução de emissões e conseqüentemente na remoção de gases do efeito estufa.

No Quadro 2, está apresentada a síntese com as principais vulnerabilidades associadas às mudanças climáticas e relacionadas aos componentes de exposição e de sensibilidade, bem como os processos ambientais afetados sem se levar em consideração um estuário em específico. Van Nierek *et al.* (2022) destacam que as especificidades de cada estuário irão influenciar a gravidade ou intensidade dos componentes da vulnerabilidade a seus estressores em relação às mudanças climáticas.

Quadro 2. Vulnerabilidades ambientais associadas às mudanças climáticas levando em consideração os componentes de exposição e sensibilidade.

VULNERABILIDADE	COMPONENTE DE EXPOSIÇÃO	PROCESSOS AFETADOS	COMPONENTE DE SENSIBILIDADE	FONTES
<b>MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	Aumento do nível do mar	Produtividade dos estuários Período de Inundações Proteção costeira Acreção Alterações nas condições Ecogeomórficas <sup>13</sup> Mudança de hábitat Serviços ecossistêmicos Produtividade de Biomassa vegetal Abundância de espécies intolerantes à salinidade Diminuição acentuada da riqueza de espécies Migração de nutrientes Sequestro de Carbono Mudanças nas características biogeoquímicas	Mortalidade da vegetação nativa Alteração na linha de costa Intrusão salina Inundação de zonas baixas Erosão Costeira	Ellison e Zouh (2012); Ellison (2015); Al-Naswawi <i>et al.</i> , (2018); Mirchi <i>et al.</i> (2018); Ayyam, Palanivel, Chandrakasan (2019); Doughty <i>et al.</i> (2019); Addicott <i>et al.</i> (2020); Carol <i>et al.</i> (2020); Loi, Sang, Huy (2020); Khalil <i>et al.</i> (2020); Van Coppenolle e Temmerman (2020); Alves <i>et al.</i> (2020); Ghalambor <i>et al.</i> (2021); Imani <i>et al.</i> (2021); Martin <i>et al.</i> (2021); Peng, Wang, Cai (2021); Bera <i>et al.</i> (2022); Raw <i>et al.</i> (2023)
	Secas extremas e contínuas	Ciclo hidrológico Recarga de aquíferos Sequestro de Carbono Padrões de ventos e tempestades	Diminuição acentuada da produtividade dos estuários tropicais Diminuição da disponibilidade de água	Ellison e Zouh (2012); Ellison (2015); Duke <i>et al.</i> (2017); Addicott <i>et al.</i> (2020); Carol <i>et al.</i> (2020); Peng, Wang e Cai (2021); Ferreira <i>et al.</i> (2022); Leal Filho <i>et al.</i> (2022); Van Nierek <i>et al.</i> (2022); Raw <i>et al.</i> (2023)
	Aumento da temperatura do ar e da água	Produtividade das florestas de vegetação nativa Produtividade primária e	Diminuição acentuada da produtividade dos estuários tropicais	Rogers e Woodoffre (2016); Heimhuber <i>et al.</i> (2019); Carol <i>et al.</i> (2020).

<sup>13</sup> Define-se como ecogeomórfico, de acordo com Thoms e Parsons (2002, p. 113), “a abordagem interdisciplinar para o estudo do rio, sistemas que integram hidrologia, geomorfologia fluvial e ecologia”.

VULNERABILIDADE	COMPONENTE DE EXPOSIÇÃO	PROCESSOS AFETADOS	COMPONENTE DE SENSIBILIDADE	FONTES
		secundária Sequestro de carbono		Peng, Wang e Cai (2021)
	Aumento de tempestades e ventos	Produtividade das florestas de vegetação nativa Sequestro de Carbono Produtividade primária e secundária Período de Inundações Proteção costeira Influxo de água doce Serviços ecossistêmicos	Mortalidade da vegetação nativa Diminuição acentuada da produtividade dos estuários tropicais Perda de hábitat Erosão Costeira	Rogers e Woodoffre (2016); Duke <i>et al.</i> (2017); Heimhuber <i>et al.</i> (2019); Addicott <i>et al.</i> (2020); Das (2020); Khalil <i>et al.</i> (2020); Van Coppenolle e Temmerman (2020); Peng, Wang e Cai (2021); Kimeli <i>et al.</i> (2022); Ferreira <i>et al.</i> (2022); Hossain <i>et al.</i> (2022); Raw <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

### 3.2.3.2. Vulnerabilidades ambientais associadas às ações antrópicas

Um dos fatores que agravam as vulnerabilidades ambientais em estuários tropicais são as ações antrópicas. Observando diretamente essa influência, os estuários sofrem demasiadamente com a presença humana, visto que em alguns casos, como destacam Islam *et al.* (2018), os manguezais reduzem acentuadamente os serviços ecossistêmicos devido as ações não planejadas do ser humano (ex. construções irregulares, supressão de áreas de mangue, lançamento de efluentes domésticos), o que acarreta uma consequência ecológica de longo alcance, como evidenciado por Kenish (2002).

Kenish (2002) destaca o acentuado aumento de fontes poluidoras nos estuários, como os efluentes domésticos que apresentam sobrecarga de nutrientes e matéria orgânica, contaminantes químicos e patógenos, afetam a qualidade da água. Reitera-se ainda que os estuários são considerados ambientes altamente produtivos, devido à gama de alta densidade populacional de organismos aquáticos. Entretanto, esses organismos se tornam vulneráveis às alterações em seu hábitat devido às ações antrópicas e à perda da qualidade da água.

Com as ações não planejadas, as interações entre o ser humano e natureza acabam se tornando uma relação de estressor cumulativo<sup>14</sup> *versus* funções ecossistêmicas (THRUSH *et al.*, 2021). Com isso, Zhu *et al.* (2021) destacam que o uso incorreto da terra, mal planejamento do aporte urbano, dentre outros, provocam o escoamento direto de nutrientes para os corpos d'água e oceanos, o que prejudicam os micro-hábitats existentes nos mares, desencadeando problemas em toda cadeia trófica, assim como evidenciado por Kenish (2002) há 20 anos atrás. Além disso, a presença de metais pesados, excessos de nutrientes, como por exemplo amônia, fósforo e nitrogênio na água, são prejudiciais aos organismos aquáticos (LU *et al.*, 2018; TEMINO-BOES *et al.*, 2020; WANG; ZHANG, 2020; FAN *et al.*, 2022) e deterioram a qualidade da água (CLAASSENS *et al.*, 2020; FAN *et al.*, 2022), favorecendo o

---

<sup>14</sup> Exemplificam-se por estressor cumulativo, de acordo com Thrush *et al.* (2021), a eutrofização, mariscagem (captura artesanal de mariscos), entrada de sedimentos, dentre outros.

aumento de partículas em suspensão e de fitoplânctons (ZHU *et al.*, 2021) acarretando um desequilíbrio ambiental.

A poluição aquática por nutrientes torna-se um grande problema para os estuários. De acordo com Temino-Boes *et al.* (2020), por ser uma região que apresenta um desenvolvimento urbano acentuado, por muitas vezes, aspectos relacionados à implementação de estações de tratamento de águas residuais são falhos. Além disso, ocorrem problemas relacionados a um gerenciamento adequado para essas regiões, que contemplem todas as necessidades do ecossistema costeiro. Assim, a pressão urbana e alto nível de lançamento dos nutrientes diretamente na água faz com que a autodepuração estuarina seja insuficiente proporcionando uma maior vulnerabilidade ambiental. Com isso, um dos principais papéis dos manguezais, como filtro biológico, se torna totalmente prejudicado.

Devido à proximidade com os oceanos, outro fator que favorece a exposição dos estuários às vulnerabilidades ambientais, são os derramamentos de óleo. Como as regiões costeiras apresentam, em sua maioria, um grande quantitativo de portos, os estuários acabam sofrendo impactos crônicos e cumulativos devido a manutenção e/ou acidentes com navios petroleiros e rompimentos de dutos. De acordo com Garcia e Martins (2021), a hidrodinâmica marinha e os processos de diluição geoquímica nos estuários favorecem uma ampla distribuição dessas substâncias tóxicas, fazendo com que as zonas abrigadas dos estuários sejam atingidas.

Cuny *et al.* (2020) ressaltam a importância de se entender essas regiões, destacando sua alta complexidade, importância ecológica e econômica, para que se desenvolvam políticas de gestão que visem ações de prontidão quando um derramamento de óleo ocorrer. A falta de planejamento e ações para prevenção e mitigação frente a essa vulnerabilidade faz com que os estuários tenham seus serviços ecossistêmicos fortemente afetados. Um exemplo disso é a disponibilidade de alimentos lípidos, uma vez que a cadeia alimentar será contaminada por esse tipo de hidrocarboneto saturado. Por isso, de acordo com Carvalho *et al.* (2020), é fundamental desenvolver metodologias e ferramentas de monitoramento frente a essa vulnerabilidade, que venham a propiciar informações à gestão local.

As ações antrópicas, de modo geral, potencializam as vulnerabilidades ambientais, uma vez que suas atividades interferem no equilíbrio ambiental, seja direta ou indiretamente.

Ao realizar um estudo no nordeste do Brasil, Ferreira *et al.* (2022) verificaram problemas relacionados à dizimação de áreas de mangue para a construção de salinas e fazendas de carcinicultura, seja nas áreas mais próximas ao corpo d'água como também nos apicuns<sup>15</sup>. E, ao pensar em soluções que pudessem minimizar esse aspecto, os autores puderam constatar que a restauração vegetal seria uma boa alternativa quando associada ao manejo hidrológico. A construção desses empreendimentos favorece a erosão costeira e, assim, a criação de caminhos que levam a água às regiões do estuário mais afastados se tornaram primordiais por aumentar a elevação da taxa de crescimento e desenvolvimento dos mangues. Desse modo, a restauração tornou-se eficaz e restabeleceu a produtividade e o equilíbrio do ecossistema frente à vulnerabilidade associada à erosão costeira.

Mesmo os autores Ferreira *et al.* (2022) destacarem a restauração da região como eficaz, é interessante reforçar que ocorrem prejuízos ao restaurar regiões de apicuns por bosques de mangue. Os apicuns são extremamente importantes como zona de amortecimento e refúgio natural das árvores de mangue frente a elevação do nível do mar. Sendo assim, com a substituição dessa feição, as espécies não teriam para onde migrar.

Os componentes da vulnerabilidade e os processos ambientais afetados relacionados às ações antrópicas estão sintetizados no Quadro 3.

---

<sup>15</sup> De acordo com o Novo Código Florestal, os apicuns são definidos como “áreas de solos hipersalinos situadas nas regiões entremarés superiores, inundadas apenas pelas marés de sizígias, que apresentam salinidade superior a 150 (cento e cinquenta) partes por 1.000 (mil), desprovidas de vegetação vascular”.

Quadro 3. Vulnerabilidades ambientais associadas às atividades antrópicas levando em consideração os componentes de exposição e sensibilidade

VULNERABILIDADE	COMPONENTE DE EXPOSIÇÃO	PROCESSOS AFETADOS	COMPONENTE DE SENSIBILIDADE	FONTES
<b>ATIVIDADES ANTRÓPICAS</b>	Aporte urbano	Produtividade vegetal e marinha Serviços ecossistêmicos	Supressão de área vegetada Perda de habitat Escoamento de nutrientes (ex. NH <sub>3</sub> , P) para o corpo d'água Deterioração da qualidade da água Erosão costeira	Kenish (2002); Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) Rogers <i>et al.</i> (2019); Zhu <i>et al.</i> (2021); Thrush <i>et al.</i> (2021); Ferreira <i>et al.</i> (2022)
	Aumento de fontes poluidoras (efluentes domésticos, sobrecarga de efluentes, matéria orgânica, contaminantes químicos e patógenos)	Produtividade vegetal e marinha Cadeia trófica Serviços ecossistêmicos	Escoamento de nutrientes (ex. NH <sub>3</sub> , P) para o corpo d'água Deterioração da qualidade da água	Kenish (2002); Lu <i>et al.</i> (2018); Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) Rogers <i>et al.</i> (2019); Vieira <i>et al.</i> (2019); Claassesns <i>et al.</i> (2020); Zhu <i>et al.</i> (2021); Thrush <i>et al.</i> (2021)
	Excesso de nutrientes na água (nitrogênio amoniacal, fósforo)	Partículas em suspensão Produtividade primária Eutrofização Serviços ecossistêmicos	Deterioração da qualidade da água Desequilíbrio da cadeia trófica	Kenish (2002); Lu <i>et al.</i> (2018); Vieira <i>et al.</i> (2019); Claassesns <i>et al.</i> (2020); Temino-Boes <i>et al.</i> (2020); Whang e Zhang (2020); Zhu <i>et al.</i> (2021); Fan <i>et al.</i> (2022)
	Derramamento de óleo	Produtividade vegetal e marinha Serviços ecossistêmicos	Deterioração da qualidade da água Desequilíbrio ecológico	Cuny <i>et al.</i> (2020); Garcia e Martins (2021)

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

### **3.3. Considerações finais**

Os estuários são ambientes de alta produtividade que oferecem diversos serviços ecossistêmicos tanto ao homem como à natureza. Ao defini-los é importante incorporar as peculiaridades desse sistema natural, principalmente relacionado às peculiaridades climáticas que incidem na localidade o qual está inserido (clima temperado, tropical, por exemplo).

Devido a suas características, os estuários acabam se tornando um dos ambientes mais vulneráveis devido a presença de diversos estresses/estressores. Ao observar a vulnerabilidade, entende-se que a mesma é exteriorizada por meio dos componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Assim, o ambiente mais vulnerável será aquele sofrerá maior exposição a uma ameaça e terá uma menor capacidade adaptativa.

As vulnerabilidades ambientais existentes nas regiões estuarinas tropicais são diversas, mas consegue-se verificar dois principais agrupamentos. O primeiro, associado às mudanças climáticas, verifica-se uma maior exposição relacionada ao aumento do nível do mar, secas extremas e contínuas, aumento da temperatura do ar e das águas, e o aumento de tempestades e ventos. O segundo agrupamento, relaciona-se às vulnerabilidades associadas às ações antrópicas, com exposição ao aporte urbano, aumento de fontes poluidoras, excesso de nutrientes nos corpos d'água e incidentes com o derramamento de óleo.

Mesmo conseguindo verificar em dois grupos, as vulnerabilidades ambientais estão por muitas vezes interligadas, sendo o ser humano um dos principais estressores ao ambiente, seja com sua influência direta em suas ações, como também em suas consequências atitudinais nas alterações climáticas, chegando a alterar e interferir em processos naturais.

Com suas diversas exposições, os principais processos ambientais alterados nos estuários dizem respeito a produtividade vegetal, perda de hábitat e deterioração da qualidade da água. Essas alterações são sentidas em diferentes escalas espaço-temporais, favorecendo o desenvolvimento de estudos e ações que vislumbram a capacidade adaptativa dos estuários.

O entendimento dos aspectos que promovem a vulnerabilidade ambiental nos estuários são fundamentais para o desenvolvimento de ações que possam mitigar as ameaças em que estão expostos.

## Referências bibliográficas

ADDICOTT, E. *et al.* The intertidal plant communities in north-eastern Australia, their carbon stores and vulnerability to extreme climate events. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 30, n. 12, p. 2298–2312, 2020.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global environmental change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.

ADGER, W. N. Assessment of Adaptation Practices, Options, Constraints and Capacity. In: **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, PARRY, M. L. (ed.), p. 719–743. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

ALCÂNTARA, E.H.; HARARI, J. Análise unidimensional dos processos de mistura no sistema estuarino do Rio Periá (MA), Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 18, n. 35, p. 65-77, 2006.

AL-NASRAWI, A. K. M.; HAMYLTON, S. M.; JONES, B. G. An assessment of anthropogenic and climatic stressors on estuaries using a spatio-temporal GIS-modelling approach for sustainability: Towamba estuary, southeastern Australia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 7, 2018.

ALONGI, D.M. Carbon Balance in Salt Marsh and Mangrove Ecosystems: A Global Synthesis. **J. Mar. Sci. Eng.**, v. 8, n. 10, p. 767, 2020.

ALONGI, D.M. Carbon sequestration in mangrove forests. **Carbon Management**, v. 3, n. 3, p. 313-322, 2012.

ALONGI, D.M. Present state and future of the world's mangrove forests. **Environmental Conservation**, v. 29, p. 331-349, 2002.

ALVES, B. *et al.* A review on coastal erosion and flooding risks and best management practices in West Africa: what has been done and should be done. **Journal of Coastal Conservation**, v. 24, n. 3, 2020.

ADDO, K. A.; BREMPONG, E. K.; JAYSON-QUASHIGAH, P. N. Assessment of the dynamics of the Volta River estuary shorelines in Ghana. **Geoenvironmental Disasters**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2020.

AYYAM, V.; PALANIVEL, S.; CHANDRAKASAN, S. Coastal ecosystems of the tropics - Adaptive management. **Coastal Ecosystems of the Tropics - Adaptive Management**, n. November, p. 1–595, 2019.

AULETE Digital. **Dicionário de Língua Portuguesa**. Disponível em: [www.aulete.com.br](http://www.aulete.com.br) . Acesso em julho de 2023

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.

- BERA, A. *et al.* Vulnerability and Risk Assessment to Climate Change in Sagar Island, India. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 5, 1 mar. 2022.
- BERA, R.; MAITI, R. Quantitative analysis of erosion and accretion (1975–2017) using DSAS — A study on Indian Sundarbans. **Regional Studies in Marine Science**, v. 28, p. 100583, 2019.
- BEVACQUA, A.; YU, D.; ZHANG, Y. Coastal vulnerability: Evolving concepts in understanding vulnerable people and places. **Environmental Science & Policy**, v. 82, p. 19-29, 2018.
- BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. **At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters**. Routledge, London. 1994.
- BORGES, R.; FERREIRA, A.C.; LACERDA, L.D. Systematic planning and ecosystem-based management as strategies to reconcile mangrove conservation with resource use. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 353, 2017.
- BRAGA, E. S. *et al.* Research in a RAMSAR site: The Cananéia-Iguape-Peruíbe estuarine-lagoon complex, Brazil. **Ocean and Coastal Research**, v. 71, n. suppl 1, p. e23062, 2023.
- CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. **Estuaries**. In: The sea - Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas, M. N. Hill (Ed.) v.2 - The Composition of Sea Water. Interscience Publishers, John Wiley and Sons, New York, 1963.
- CARDONA, O.D. *et al.* Determinants of risk: exposure and vulnerability. In FIELD, C.B *et al.* (eds). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**, p. 65–108. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, UK, and New York, USA, Cambridge University Press., 2012
- CAROL, E. *et al.* Surface water–groundwater interactions in the Matusagaratí wetland, Panama. **Wetlands Ecology and Management**, v. 28, p. 971-982, 2020.
- CARVALHO, Gabriel Vieira *et al.* Methodology to Evaluate the Coastal Susceptibility to Oil Spills Originated in Large Marine Areas–Costa Norte Project. **Journal of Coastal Research**, v. 95, n. SI, p. 1344-1348, 2020.
- CASPERS, H. **Estuaries: Analysis of Definitions and Biological Considerations** In: Estuaries, G. H. Lauff (Ed.), American Association for the Advance of Science, nº83, Washington D. C. 1967.
- CHEN, Q.; ZHAO, Q.; LI, J. *et al.* Mangrove succession enriches the sediment microbial community in South China. **Scientific Reports**, v. 6, p. 27468, 2016.
- CLAASSENS, L. *et al.* Knysna Estuary health: ecological status, threats and options for the future. **African Journal of Aquatic Science**, v. 45, n. 1–2, p. 65–82, 2020.

CUNY, P. *et al.* Oil Spill Response in Mangroves: Why a Specific Ecosystem-Based Management Is Required? the Case of French Guiana - a Mini-Review. **Vie Et Milieu-Life and Environment**, v. 70, n. 3–4, p. 69–76, 2020.

CUTTER, S.L. Vulnerability to environmental hazards. **Progress in human geography**, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.A.; BOYD, R. A conceptual model of estuarine sedimentation. **J. Sediment. Petrol.**, 62 (1992), pp. 1130-1146

DAS, S. Does mangrove plantation reduce coastal erosion? Assessment from the west coast of India. **Regional Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 10113, 2020.

DAY, J.H. **The nature, origin and classification of estuaries**. In: J.H. Day (Ed.), *Estuarine Ecology: With Particular Reference to Southern Africa*, Balkema, Rotterdam, p. 1-6, 1981.

DAY, J.H. **What is an estuary?** *South African Journal of Science*, 76 (1980), p. 198

DITTMAR, T.; HERTKORN, N.; KATTNER, G.; LARA, R.J. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, n.1, p. 1-7, 2006.

DONGMEI, J.; BIN, L. Countermeasures of adaptation to climate change: establishment and application for implementation matrix. **Ecological Economics**, v. 5, p. 102-111, 2009.

DOUGHTY, C. L. *et al.* Evaluating regional resiliency of coastal wetlands to sea level rise through hypsometry-based modeling. **Global Change Biology**, v. 25, n. 1, p. 78–92, 2019.

DUKE, N. C. *et al.* Large-scale dieback of mangroves in Australia's Gulf of Carpentaria: a severe ecosystem response, coincidental with an unusually extreme weather event. **Marine and Freshwater Research**, v. 68, n. 10, p. 1816-1829, 2017.

ELLIOTT, M.; WHITFIELD, A.K. Challenging paradigms in estuarine ecology and management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 94: 306 - 314, 2011.

ELLISON, J. C. Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, p. 115-137, 2015.

ELLISON, J. C.; ZOUH, I. Vulnerability to climate change of mangroves: Assessment from Cameroon, Central Africa. **Biology**, v. 1, n. 3, p. 617–638, 2012.

ENNOUALI, Z. *et al.* Mapping Coastal vulnerability using machine learning algorithms: A case study at North coastline of Sebou estuary, Morocco. **Regional Studies in Marine Science**, v. 60, 1 jun. 2023.

- ERİYAGAMA, N.; SMAKHTIN, V.; CHANDRAPALA, L.; FERNANDO, K. **Impacts of climate change on water resources and agriculture in Sri Lanka: a review and preliminary vulnerability mapping.** Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 51p. (IWMI Research Report 135). 2010.
- FAIRBRIDGE, R. W. **The Estuary: Tts Definition and Geodynamic Cycle.** In: Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries, E. Olausson & I. Cato (Eds.) p. 1-35, Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- FAN, X. *et al.* Urbanization and water quality dynamics and their spatial correlation in coastal margins of mainland China. **Ecological Indicators**, v. 138, 1 maio 2022.
- FELLMANN, T. The assessment of climate change-related vulnerability in the agricultural sector: reviewing conceptual frameworks. **Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector**, v. 23, p. 37-61, 2012.
- FERREIRA, A. C. *et al.* Mangrove Recovery in Semiarid Coast Shows Increase of Ecological Processes from Biotic and Abiotic Drivers in Response to Hydrological Restoration. **Wetlands**, v. 42, n. 7, 1 out. 2022.
- FONGNZOSSIE, E.; SONWA, D. J.; MBEVO, P.; KENTATCHIME, F.; MOKAM, A.; TATUEBU TAGNE, C.; RIM, L.F.E.A. Climate Change Vulnerability Assessment in Mangrove-Dependent Communities of Manoka Island, Littoral Region of Cameroon. **The Scientific World Journal**, p. 1-14, 2022.
- FÜSSEL, Hans-Martin. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. **Global Environmental Change**, v. 17, n. 2, p. 155-167, 2007.
- GALLOPÍN, C.G. A systemic synthesis of the relations between vulnerability, hazard, exposure and impact, aimed at policy identification. **Handbook for Estimating the Socio-Economic and Environmental Effects of Disasters**, ECLAC, LC/MEX/G.S., Mexico, D.F., pp. 2-5, 2003.
- GALLOPÍN, G.C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 293-303, 2006.
- GARCIA, M. R.; MARTINS, C. C. A systematic evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in South Atlantic subtropical mangrove wetlands under a coastal zone development scenario. **Journal of Environmental Management**, v. 277, n. October 2020, 2021.
- GHALAMBOR, C. K. *et al.* Ecological Effects of Climate-Driven Salinity Variation in the San Francisco Estuary: Can We Anticipate and Manage the Coming Changes? **San Francisco Estuary and Watershed Science**, v. 19, n. 2, p. 1–30, 2021.
- GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GILMAN, E.L.; ELLISON, J.; DUKE, N.C.; FIELD, C. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. **Aquatic Botany**, v. 86, n. 2, p. 237-250, 2008.

GITZ, V.; MEYBECK, A. Risks, vulnerabilities and resilience in a context of climate change. **Building resilience for adaptation to climate change in the agriculture sector**, v. 23, p. 19-36, 2012.

GIUPPONI, C.; BISCARO, C. Vulnerabilities—bibliometric analysis and literature review of evolving concepts. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 123002, 2015.

GLOBAL MANGROVE ALLIANCE. **The State of the World's Mangroves**. Leal, Maricé e Spalding, Mark D (Eds.) 92p., 2022

GMW - Global Mangrove Watch. **Mangrove Blue Carbon**. Versão 3.0. 2020. [<https://www.globalmangrovetwatch.org/>]

HARARI, J.; GODOI, S.S. Oceanografia física costeira e estuarina. In: HARARI, Joseph (org.). **Noções de Oceanografia**. São Paulo: Instituto Oceanográfico, E-book. Cap. 9: p. 205-223, 2021.

HARRIS, L. A. *et al.* A Socio-ecological Imperative for Broadening Participation in Coastal and Estuarine Research and Management. **Estuaries and Coasts**, v. 45, n. 1, p. 38–48, 2022.

HEIMHUBER, V. *et al.* A consistent climate change baseline for estuarine impact and adaptation planning along the New South Wales coastline. **Australasian Coasts and Ports 2019 Conference**, n. September, p. 553–559, 2019.

HILL, M.N. **The Sea**. v.2, Interscience Publishers. p. 306-324, 1963.

HOSSAIN, S. A. *et al.* Coastal vulnerability assessment of India's Purba Medinipur-Balasore coastal stretch: A comparative study using empirical models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 77, 1 jul. 2022.

IMANI, M. *et al.* Risk assessment of coastal flooding under different inundation situations in southwest of taiwan (Tainan city). **Water**, v. 13, n. 6, p. 880, 2021.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp, 2007.

ISLAM, S. N.; REINSTÄDTLER, S.; GNAUCK, A. Vulnerability of mangrove forests and wetland ecosystems in the Sundarbans natural world heritage site (Bangladesh). **Coastal Research Library**, v. 25, n. April 2020, p. 223–243, 2018.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; AMACHANDRAN, K. K. Coastal habitat vulnerability of southern India: A multiple parametric approach of GIS based

HVI (habitat vulnerability index) model. **Geogr Fis Din Quat**, v. 42, p. 27-41, 2019.

KELLEWAY, J.J.; CAVANAUGH, K.; ROGERS, K.; FELLER, I.C.; ENS, E.; DOUGHTY, C.; SAINTILAN, N. Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. **Glob. Change Biol.**, v. 23, p. 3967-3983, 2017.

KELLY, P. M.; ADGER, W. N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and Facilitating adaptation. **Climatic change**, v. 47, n. 4, p. 325-352, 2000.

KHALIL, U. *et al.* Investigating an innovative sea-based strategy to mitigate coastal city flood disasters and its feasibility study for Brisbane, Australia. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

KIMELI, A. K. *et al.* Surface elevation changes in an estuarine mangrove forest in Vanga, Kenya: Implications for management and mitigation of sea-level rise. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, 2 nov. 2022.

KRISTENSEN, E.; BOUILLON, S.; DITTMAR, T.; MARCHAND, C. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. **Aquatic Botanic**, v. 89, p. 201-219, 2008.

KUMARI, P.; SINGH, J.K.; PATHAK, B. Potential contribution of multifunctional mangrove resources and its conservation. **Biotechnological Utilization of Mangrove Resources**, Academic Press, p. 1-26, 2020.

LAURINO, I. R. A. *et al.* The role of estuarine macrofaunal patterns for the management of marine protected areas in a changing world. **Journal for Nature Conservation**, v. 63, n. July 2021.

LEAL FILHO, W. *et al.* Influences of Climate Change and Variability on Estuarine Ecosystems: An Impact Study in Selected European, South American and Asian Countries. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 1, 1 jan. 2022.

LOI, T. T.; SANG, T. V.; HUUY, N. Q. Mangroves restoration in response to climate change: A case study in Xuan Thuy National Park, vietnam. **APAC 2019 - Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts**, n. Apac 2019, p. 1163–1168, 2020.

LU, Y. *et al.* Major threats of pollution and climate change to global coastal ecosystems and enhanced management for sustainability. **Environmental Pollution**, v. 239, p. 670–680, 2018.

MARTIN, S. *et al.* Restoring fringing tidal marshes for ecological function and ecosystem resilience to moderate sea-level rise in the Northern Gulf of Mexico. **Environmental Management**, v. 67, p. 384-397, 2021.

MCOWEN, C. J. *et al.* A global map of saltmarshes. **Biodiversity data journal**, n. 5, p. e11764 , 2017.

- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. Ed. Da USP. 408 pp., 2002.
- MIRCHI, A. *et al.* A hydro-economic model of South Florida water resources system. **Science of the Total Environment**, v. 628–629, p. 1531–1541, 2018.
- MITCHELL, J.K. Hazards research. In Gaile, G.L. and Willmott, C.J., editors, **Geography in America**, Columbus, OH: Merrill, 410-424, 1989.
- MITRA, A.; MITRA, A. **Ecosystem services of mangroves: An overview**. Mangrove Forests in India: Exploring Ecosystem Services, p. 1-32, 2020.
- MONTEFIORE, L.R.; NELSON, N.G.; STAUDINGER, M.D.; TERANDO, A. Vulnerability of Estuarine Systems in the Contiguous United States to Water Quality Change Under Future Climate and Land-Use. **Earth's Future**, v. 11, n. 3, p. e2022EF002884, 2023.
- MUKHERJEE, N. *et al.* Using expert knowledge and modeling to define mangrove composition, functioning, and threats and estimate time frame for recovery. **Ecology and Evolution**, v. 4, n. 11, p. 2247-2262, 2014.
- NATH, A. *et al.* Identification of the coastal hazard zone between the areas of Rasulpur and Subarnarekha estuary, east coast of India using multi-criteria evaluation method. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 7, n. 4, p. 2251–2265, 20 nov. 2021.
- O'BRIEN, K.; ERIKSEN, S.; NYGAARD, L. P.; SCHJOLDEN, A. N. E. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. **Climate policy**, v. 7, n.1, p.73-88, 2007.
- PARRY, M. L.; CANZIANI, O.; PALUTIKOF, J.; VAN DER LINDEN, P.; HANSON, C. **Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC**, v. 4, Cambridge University Press, 2007.
- PENG, W.; WANG, D.; CAI, Y. Assessing ecological vulnerability under climate change and anthropogenic influence in the Yangtze River estuarine island-Chongming island, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 21, 2021.
- PERILLO, G.M.E. **Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries**. In: PERILLO, G.M.E. *Developments in Sedimentology*, Elsevier, Volume 53, p. 17-47, 1995.
- POLSKY, C.; NEFF, R.; YARNAL, B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. **Global environmental change**, v. 17, n. 3-4, p. 472-485, 2007.
- PRASAD, M.B.K.; RAMANATHAN, A.L. Sedimentary nutrient dynamics in a tropical estuarine mangrove ecosystem. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 80, n. 1, p. 60 - 66, 2008.
- PRITCHARD, R.W. Estuarine Hydrography. **Advances in Geophysics**, p. 243–280, 1952.

- PRITCHARD, R.W. **What is an estuary? Physical viewpoint.** In: G.H. Lauff (Ed.), *Estuaries*, American Association for the Advancement of Science, Washington D.C. (1967), pp. 3-5.
- RAW, J. L. *et al.* Blue carbon sinks in South Africa and the need for restoration to enhance carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 859, 10 fev. 2023.
- ROGERS, K. *et al.* Impacts and adaptation options for estuarine vegetation in a large city. **Landscape and Urban Planning**, v. 182, n. October 2017, p. 1–11, 2019.
- ROGERS, K.; WOODROFFE, C. D. Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate. **Journal of Coastal Conservation**, v. 20, n. 2, p. 127–144, 2016.
- ROVAI, A. S., COELHO-JR, C., DE ALMEIDA, R., CUNHA-LIGNON, M., MENGHINI, R. P., TWILLEY, R. R., ... & SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Ecosystem-level carbon stocks and sequestration rates in mangroves in the Cananéia-Iguape lagoon estuarine system, southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 479, p.118553, 2021.
- ROVAI, A. S. *et al.* Brazilian mangroves: blue carbon hotspots of national and global relevance to natural climate solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 787533, 2022.
- SAHIN, O.; MOHAMED, S. Coastal vulnerability to sea-level rise: a spatial–temporal assessment framework. **Natural hazards**, v. 70, 395-414, 2014.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **A diversidade do ecossistema manguezais.** IN: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 176 p., 2018. ISBN: 978-85-61842-75-8
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *et al.* Climate changes in mangrove forests and salt marshes. **Brazilian Journal of Oceanography**, 64 (sp2), p.37-52, 2016.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. **Manguezal, ecossistema entre a terra e o mar.** São Paulo: Caribbean Ecological Research, 64p., 1995.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; COELHO-JR, C. **Onde vivem os manguezais e porque são tão importantes.** IN: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 176 p., 2018. ISBN: 978-85-61842-75-8
- SCHUBEL, J. R.; HAYES, M. O.; PRITCHARD, D. W. **The estuarine environment:** estuaries and estuarine sedimentation. Washington: American Geological Institute, 1974.
- SELVAM, V.; KARUNAGARAN, V.M. **Ecology and Biology of Mangroves.** M.S. Swaminathan Research Foundation, 3rd Cross Street, Institutional Area Taramani, Chennai – 600 113, Índia. 61p., 2004.

- SENT, G. *et al.* Deriving water quality parameters using sentinel-2 imagery: A case study in the Sado Estuary, Portugal. **Remote sensing**, v. 13, n. 5, p. 1043, 2021.
- SINGH, J.K. Structural characteristics of mangrove forest in different coastal habitats of Gulf of Khambhat arid region of Gujarat, west coast of India. **Heliyon**, v. 6, n.8, e04685, 2020.
- SMIT, B.; WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. **Global environmental change**, v. 16, n. 3, p. 282-292, 2006.
- TEMINO-BOES, R. *et al.* Document downloaded from: This paper must be cited as: Copyright Elsevier Additional Information Using grey clustering to evaluate nitrogen pollution in estuaries with limited data. p. 1–12, 2020.
- THRUSH, S. F. *et al.* Cumulative stressors reduce the self-regulating capacity of coastal ecosystems. **Ecological Applications**, v. 31, n. 1, p. 1–12, 2021.
- THURMAN, L. L.; GROSS, J. E.; MENGELT, C.; BEEVER, E. A.; THOMPSON, L. M.; SCHUURMAN, G. W.; ... & OLDEN, J. D. Applying assessments of adaptive capacity to inform natural-resource management in a changing climate. **Conservation Biology**, v. 36, n. 2, p. e13838, 2022.
- TSAI, Y. L. S. Monitoring 23-year of shoreline changes of the Zengwun Estuary in Southern Taiwan using time-series Landsat data and edge detection techniques. **Science of the Total Environment**, v. 839, 15 set. 2022.
- TURNER, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; MCCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ... & SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003.
- UNDRO, Natural Disasters. Vulnerability analysis. In: **Report of Experts Group Meeting**, Geneva. 1980.
- VAN COPPENOLLE, R.; TEMMERMAN, S. Identifying global hotspots where coastal wetland conservation can contribute to nature-based mitigation of coastal flood risks. **Global and Planetary Change**, v. 187, n. December 2019, p. 103125, 2020.
- VAN DER LEEUW, S.E. '**Vulnerability**' and the integrated study of socio-natural phenomena. IHDP Update 2/01, art.2 [online], 2001. [http://www.ihdp.uni-bonn.de/html/publications/update/IHDPUpdate01\\_02.html](http://www.ihdp.uni-bonn.de/html/publications/update/IHDPUpdate01_02.html)
- VIEIRA, J. G. M. S. *et al.* An integrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 2, p. 289–307, 2019.
- WANG, J.; ZHANG, Z. Phytoplankton, dissolved oxygen and nutrient patterns along a eutrophic river-estuary continuum: Observation and modeling. **Journal of Environmental Management**, v. 261, n. July 2019, p. 110233, 2020.

WILLIAMS, L. R. R.; KAPUSTKA, L. A. Ecosystem vulnerability: a complex interface with technical components. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 19, n. 4, p. 1055-1058, 2000.

WU, W. *et al.* Impacts of coastal reclamation on wetlands: Loss, resilience, and sustainable management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 210, n. July 2017, p. 153–161, 2018.

YUSUF, A. A.; FRANCISCO, H. **Climate change vulnerability mapping for Southeast Asia**. International Development Research Centre (IDRC), p. 32, 2009.

ZHU, B. *et al.* Long-term changes in the land–ocean ecological environment in small island countries in the south pacific: A fiji vision. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 1–24, 2021.

#### 4. Aspectos da Capacidade Adaptativa relacionados à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais



Mangue e construções irregulares no estuário do Rio Capibaribe – Pernambuco

Fonte da imagem: Regina Nascimento (2022)

Neste capítulo, identificam-se: os principais aspectos da capacidade adaptativa frente a um risco ou exposição em relação à vulnerabilidade ambiental; os principais direcionamentos para mitigação das vulnerabilidades; e os principais desafios associados às vulnerabilidades socioambientais para a gestão de estuários tropicais.

#### **4.1. Procedimentos metodológicos**

Para identificar os principais aspectos que viabilizam a capacidade adaptativa frente a um risco ou exposição em relação à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais, fez-se o uso da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). Com este procedimento metodológico, buscou-se responder ao seguinte questionamento: “Quais são os desafios atuais, apresentados em publicações e produções científicas, relacionados à gestão de regiões estuarinas?”.

Todas as diretrizes e protocolos estabelecidos para a busca estão descritos nos capítulos 2 e 3, utilizando-se como condições: as bases de dados do Web of Science e SCOPUS; as strings de busca “estuar\*” OR “tropical estuar\*” AND “vulnerab\*” OR “environm\* vulnerab\*” OR “aquatic vulnerab\*” AND “management”; e a delimitação temporal de 2018 a 2023.

Com a realização da RBS, foram incluídos na análise artigos que abordaram a gestão de estuários tropicais frente às vulnerabilidades ambientais. E, na sequência, foi feita a análise de conteúdo seguindo as diretrizes de Bardin (1977; 2021), estabelecendo agrupamentos quanto aos conteúdos abordados nos artigos, considerando-se a abordagem da capacidade adaptativa do estuário e seus respectivos direcionamentos à gestão ambiental.

#### **4.2. Resultados e discussão**

Muitos são os desafios existentes no gerenciamento de regiões estuarinas tropicais frente às suas vulnerabilidades ambientais. Um deles, de acordo com Harris *et al.* (2021), é a grande densidade populacional nessas regiões, visto que além dos problemas de natureza ambiental, existem os

associados às ações antrópicas. Desse modo, um dos avanços de gestão deve acontecer a partir de soluções que coloquem o ser humano como protagonista, uma vez que eles são os principais potencializadores das vulnerabilidades ambientais.

Harris *et al.* (2021) propõem a premissa da justiça social, a qual leva informação e profissionalização as comunidades mais vulneráveis que vivem no entorno dos estuários. O diferencial dessa abordagem é a sensibilização e transformação de atitudes, levando o conhecimento e necessidades de melhorias para o ambiente. E, melhorando o ambiente, no caso dos estuários em que vivem, a qualidade de vida conseqüentemente melhorará. Assim, esses próprios atores elaboram e sugerem melhorias para os estuários, contribuindo numa melhora significativa na cadeia de impactos ambientais geradas por eles mesmos (exemplo de descarte irregular de resíduos, pesca predatória, lançamento de efluentes).

Corroborando com a premissa de Harris *et al.* (2021), Montefiore *et al.* (2023) presumem que o acesso direto ao conhecimento científico local simplifica a compreensão do comportamento e das ameaças inerentes ao sistema que fundamenta a avaliação, o desenvolvimento e a implementação de políticas e tecnologias voltadas para mitigar os impactos adversos das vulnerabilidades ambientais. Com isso, ter o ser humano aliado à capacidade adaptativa do sistema torna-se fundamental para propiciar melhorias aos estuários.

Enfatizando ainda as comunidades mais vulneráveis, Addo *et al.* (2020) destacam a necessidade de se elaborar estratégias que visem a redução de risco e conseqüentemente a exposição às vulnerabilidades, compreendendo seus diversos níveis e fatores que a influenciam. Essas estratégias, por sua vez, são baseadas em conhecimentos pretéritos para diversos estuários.

Os riscos se tornam mais elevados em comunidades costeiras de cidades em que os países ainda se encontram em desenvolvimento, e que conseqüentemente, ocorre uma defasagem de dados relacionados à localidade, além de sistemas que possam alertar previamente sobre os riscos e perigos ambientais (ADDON *et al.*, 2020). Com isso, a gestão local passa a desenvolver e aplicar políticas públicas com um olhar sistêmico, envolvendo as comunidades vulneráveis e os estuários, conseguindo reduzir as potenciais vulnerabilidades para o ambiente e comunidades. Para tanto, se torna

necessário compreender os níveis e fatores que agravam a vulnerabilidade ambiental.

Um outro destaque, ressaltado por Wu *et al.* (2018), relaciona-se ao expressivo grau de densidade demográfica nas regiões estuarinas do mundo. Os autores afirmam que a zona costeira é a região mais populosa e que apresenta maior dinâmica do planeta frente ao alto grau e velocidade de urbanização. Com isso, tornou-se uma das mais vulneráveis do mundo devido ao elevado estresse provocado pelas atividades antrópicas e consequências das alterações climáticas.

Para um bom gerenciamento das regiões estuarinas, torna-se fundamental começar a compreender os serviços ecossistêmicos ali presentes, bem como realizar um monitoramento da qualidade ambiental de forma contínua e como esses ambientes respondem às mudanças climáticas. Para tanto, Laurino *et al.* (2021) ressaltam que, por muitas vezes, não se faz necessária a utilização de grandes tecnologias para gerir bem um ambiente já que, muitas soluções estão na própria natureza. Seja ela para minimizar os impactos frente às mudanças do clima, como até mesmo aumentar a produtividade local.

Laurino *et al.* (2021) sugerem que sejam utilizados bioindicadores para o monitoramento de regiões estuarinas, bem como o monitoramento dos serviços ecossistêmicos, uma vez que a própria natureza e os animais que nela habitam começam a dar “sinais” quando ocorrem alterações em seu equilíbrio, principalmente no que diz respeito às mudanças climáticas. Assim, esse modo de gestão corrobora para a tomada de decisões a nível local respondendo a desafios globais.

Outro grande desafio atual para a gestão está relacionado às adaptações e mitigações das alterações climáticas. Frente a isso, Raw *et al.* (2023) destacam que os ecossistemas estuarinos podem e devem ser potencialmente utilizados para responder às necessidades climáticas, uma vez que esses ambientes são bons sumidouros de carbono. Os autores recomendam a necessidade de inclusão desses ambientes nas políticas públicas que direcionam respostas às mudanças climáticas.

Seguindo a mesma vertente de Laurino *et al.* (2021), Alves *et al.* (2020) reiteram que é necessário o conhecimento profundo do local, bem como o monitoramento das vulnerabilidades ambientais existentes, as quais os autores

destacam a erosão costeira que afeta diretamente a economia local, visto que, dentre esse fator, estão variáveis que por muitas vezes não são identificadas (diferenças regionais ao clima, dinâmica costeira, amplitudes de marés, etc.). Para os autores, a geomorfologia natural dos ambientes costeiros está e deve ser definitivamente associada à gestão e políticas públicas, uma vez que as diferenças regionais são fortemente influentes na vulnerabilidade. Em complemento, Machado e Albino (2023) destacam que ter ciência em relação às peculiaridades locais e que as zonas costeiras não são homogêneas, é fundamental para uma gestão eficaz.

A necessidade de realização de um monitoramento ambiental eficaz por muitas vezes acarreta alguns desafios aos tomadores de decisão. Tsai (2022), ao realizar um monitoramento temporal do estuário de Zengwun em Taiwan, verificou que a precisão e continuidade de informações relacionadas a costa e estuários são fundamentais para um bom gerenciamento e conseqüentemente para a conservação desses ambientes. Porém, o desejável por muitas vezes acaba não sendo a realidade, trazendo limitações e escassez de dados para os tomadores de decisão. Além de realizar os monitoramentos, se fazem necessárias as padronizações de seus desenhos amostrais (a exemplo de índices de utilização e periodicidade) para a acurácia de dados e conseqüente aplicabilidade em suas áreas de estudo.

A vulnerabilidade ambiental nos estuários tropicais ocorre com maior incidência em países em desenvolvimento. Assim, os aspectos da capacidade adaptativa e respectivos direcionamentos de gestão, necessitam incorporar as comunidades que circundam essas regiões, conforme elencado anteriormente. Partindo dessa premissa, Mattah *et al.* (2023) ao estudarem a vulnerabilidade socioeconômica no estuário do Volta, em Gana, verificaram que as condições da comunidade interferem diretamente na região estuarina. As implicações voltam-se principalmente nos aspectos de saneamento básico, os quais os efluentes domésticos são lançados diretamente no corpo d'água comprometendo a qualidade hídrica da região.

O lançamento de efluentes domésticos nos corpos d'água acabam se tornando um dos maiores problemas nos estuários. A partir disso, Montefiore *et al.* (2023) puderam verificar que programas do governo e agências ambientais locais dos Estados Unidos fazem uso de ferramentas para o monitoramento da qualidade da água, a fim de compreender e reduzir os efeitos do excesso

excessivo de nutrientes na pluma estuarina. Mas, o grande destaque nesse processo se dá pelo fato de que os planejamentos e ações ocorreram por meio do acesso ao conhecimento científico, propiciando maior gama de informações aos tomadores de decisão.

Ainda, Montefiore *et al.* (2023) destacam que pesquisas científicas proporcionam melhores estratégias para gestão de estuários. E, se os diversos atores sociais de determinada bacia hidrográfica estuarina tivessem acesso à informação e pesquisas científicas, maior seria a probabilidade de minimizar os efeitos das vulnerabilidades ambientais, principalmente a respeito da qualidade hídrica, apresentando possíveis recursos para implementação de ações eficazes ao estuário.

Nascimento, Hanai e Guilherme (2021) ao realizarem um estudo no estuário do Capibaribe - Brasil, evidenciaram que é fundamental que haja a identificação dos principais problemas que afetam a região estuarina bem como seus efeitos em cadeia para a localidade. A identificação das problemáticas corroboram para o desenvolvimento de um plano de monitoramento ambiental, uma vez que as evidências são usadas com confiabilidade pelos tomadores de decisão.

Em síntese, estabelecer e implementar estratégias para a gestão de estuários tropicais requer um olhar integrador que deve ser baseado em evidências científicas, as quais proporcionam maior rigor no estabelecimento de propostas e ações buscando a adaptação do sistema. Segundo Dada, Almar e Morand (2024), essas estratégias podem e devem ser compostas por diferentes métodos para envolver as diferentes vulnerabilidades. Ainda, de acordo com Roy *et al.* (2023), um conjunto de estratégias para analisar a vulnerabilidade favorece a geração de dados consistentes e úteis para os tomadores de decisão estabelecerem estratégias para minimização de impactos e desenvolvimento sustentável da localidade.

A partir dos principais desafios voltados à gestão dos estuários elencados na literatura, no Quadro 4, pode-se verificar as possíveis adaptações a serem realizadas, sua ênfase e respectivos direcionamentos para minimizar a vulnerabilidade ambiental.

Quadro 4. Síntese dos aspectos da capacidade adaptativa associadas às vulnerabilidades ambientais com respectivas ênfases e direcionamentos.

ASPECTOS DA CAPACIDADE ADAPTATIVA	ÊNFASE	DIRECIONAMENTOS	FONTES
<b>Envolvimento de atores sociais</b>	Justiça social	Eleger uma gestão ambiental integrada que inclua o ser humano, buscando uma justiça social a qual favorece a redução acentuada de impactos ambientais nos estuários	Addo <i>et al.</i> (2020); Harris <i>et al.</i> (2021)
<b>Proteção do ecossistema estuarino</b>	Redução de riscos e vulnerabilidades	Elaborar e desenvolver ações que busquem compreender as vulnerabilidades em suas diferentes escalas, incorporando suas complexidades, favorecendo uma redução acentuada da vulnerabilidade ambiental e social, uma vez que, os estuários sofrem demasiadamente com a pressão urbana	Wu <i>et al.</i> (2018); Addo <i>et al.</i> (2020); Machado e Albino (2023); Raw <i>et al.</i> (2023)
<b>Gestão Integrada</b>	Monitoramento ambiental	Enfatizar no plano de gestão integrada a necessidade de compreender as complexidades ambientais, para isso, é necessário realizar monitoramento ambiental a longo prazo. Isso faz com que, os tomadores de decisão entendam as reais necessidades do estuário, além de verificar as principais causas que induzem a vulnerabilidade ambiental.	Alves <i>et al.</i> (2020); Laurino <i>et al.</i> (2021); Nascimento, Hanai, Guilherme (2021); Tsai (2022); Montefiore <i>et al.</i> (2023)
	Ferramentas de modelagem	Utilizar ferramentas pertinentes a localidade de aplicação, uma vez que um modelo apresenta algumas peculiaridades e a simples replicação pode afetar na acurácia de dados. Além disso, faz-se necessário e fundamental sua elaboração por especialistas.	Al-Nasrawi <i>et al.</i> (2018); ; Doughty <i>et al.</i> (2019); Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019); Heimhuber <i>et al.</i> (2019); Rogers <i>et al.</i> (2019); Vieira <i>et al.</i> (2019); Van Copellone e Temmerman (2020); Khalil <i>et al.</i> (2020); Hossain <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

### 4.3. Considerações finais

Como componente estrutural da vulnerabilidade, vislumbrar e considerar as capacidades adaptativas dos estuários frente à exposição ou riscos, foram fundamentais para identificar os principais desafios de gestão em estuários tropicais.

Foram observados três principais aspectos relacionados a capacidade adaptativa, sendo: (I) o envolvimento de atores sociais que circundam essas regiões, para que seja elaborada uma gestão integrada que tenha em seu escopo a justiça social; (II) os desafios para proteção do ecossistema estuarino, uma vez que é necessário compreender as vulnerabilidades em suas diferentes escalas e; (III) o desenvolvimento de uma gestão integrada, que compreenda as complexidades ambientais por meio de um bom monitoramento e que tenha como suporte ferramentas de modelagem que incorporem as peculiaridades locais para se obter dados acurados que darão suporte aos tomadores de decisão.

Assim, o entendimento dos três aspectos citados são fundamentais para o estabelecimento de direcionamentos que visem mitigar as vulnerabilidades ambientais existentes em estuários tropicais, a fim de estabelecer uma gestão integradora.

### Referências bibliográficas

ADDO, K. A.; BREMPONG, E. K.; JAYSON-QUASHIGAH, P. N. Assessment of the dynamics of the Volta River estuary shorelines in Ghana.

**Geoenvironmental Disasters**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2020.

DADA, O. A.; ALMAR, R.; MORAND, P. Coastal vulnerability assessment of the West African coast to flooding and erosion. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 890, 2024.

KHALIL, U. *et al.* Investigating an innovative sea-based strategy to mitigate coastal city flood disasters and its feasibility study for Brisbane, Australia. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; AMACHANDRAN, K. K. Coastal habitat vulnerability of southern India: A multiple parametric approach of GIS based HVI (habitat vulnerability index) model. **Geogr Fis Din Quat**, v. 42, p. 27-41, 2019.

HARRIS, L. A. *et al.* A Socio-ecological Imperative for Broadening Participation in Coastal and Estuarine Research and Management. **Estuaries and Coasts**, v. 45, n. 1, p. 38–48, 2022.

- HEIMHUBER, V. *et al.* A consistent climate change baseline for estuarine impact and adaptation planning along the New South Wales coastline. **Australasian Coasts and Ports 2019 Conference**, n. September, p. 553–559, 2019.
- HOSSAIN, S. A. *et al.* Coastal vulnerability assessment of India's Purba Medinipur-Balasure coastal stretch: A comparative study using empirical models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 77, 1 jul. 2022.
- LAURINO, I. R. A. *et al.* The role of estuarine macrofaunal patterns for the management of marine protected areas in a changing world. **Journal for Nature Conservation**, v. 63, n. July, 2021.
- MACHADO, G. M. V.; ALBINO, J. Avaliação conceitual e síntese de ferramentas metodológicas na determinação da sensibilidade à erosão e inundação costeira. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 43, p. e197486, 2023.
- MATTAH, M. M. *et al.* Assessment of social factors that promote the vulnerability of communities to coastal hazards in the Volta estuary in Ghana. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 95, p. 103896, 2023.
- MONTEFIORE, L. R. *et al.* Vulnerability of Estuarine Systems in the Contiguous United States to Water Quality Change Under Future Climate and Land-Use. **Earth's Future**, v. 11, n. 3, p. e2022EF002884, 2023.
- NASCIMENTO, R. C. M; HANAI, F. Y.; GUILHERME, B. C. Estuário do Rio Capibaribe. In: Karla Maria Silva de Faria, Silas Pereira Trindade (Organização). **Planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas**. Ed. C&A Alfa Comunicação, p. 185 - 195, 2021.
- RAW, J. L. *et al.* Blue carbon sinks in South Africa and the need for restoration to enhance carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 859, 10 fev. 2023.
- ROY, Paramita *et al.* Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117187, 2023.
- TSAI, Y. L. S. Monitoring 23-year of shoreline changes of the Zengwun Estuary in Southern Taiwan using time-series Landsat data and edge detection techniques. **Science of the Total Environment**, v. 839, 15 set. 2022.
- VAN COPPENOLLE, R.; TEMMERMAN, S. Identifying global hotspots where coastal wetland conservation can contribute to nature-based mitigation of coastal flood risks. **Global and Planetary Change**, v. 187, n. December 2019, p. 103125, 2020.
- VIEIRA, J. G. M. S. *et al.* An integrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 2, p. 289–307, 2019.
- WU, W. *et al.* Impacts of coastal reclamation on wetlands: Loss, resilience, and sustainable management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 210, n. July 2017, p. 153–161, 2018.

## **5. Identificação e análise de ferramentas da vulnerabilidade ambiental para aplicação em estuários tropicais**



Estuário do Rio Capibaribe – Pernambuco  
Fonte da imagem: Regina Nascimento (2022)

O presente capítulo apresenta a identificação e a análise das principais ferramentas de gestão que consideram a vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais, enfatizando sua possível utilização e aplicação no estuário do Rio Capibaribe.

## **5.1. Procedimentos metodológicos**

### **5.1.1. Identificação de ferramentas de vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais**

A Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foi realizada para identificação das principais ferramentas de gestão voltados à vulnerabilidade ambiental de estuários tropicais, seguindo-se as diretrizes e protocolos estabelecidos, conforme apresentados nos capítulos anteriores (2 e 3): uso da base de dados do *Web of Science* e SCOPUS; escolhas e definição das strings de busca; delimitação das áreas de conhecimento das produções consideradas; e delimitação temporal (desde 2018).

Para completar as informações obtidas na RBS, foram feitas pesquisas no buscador da plataforma do Google e do Google Acadêmico, a fim de identificar modelos e ferramentas de gestão, uma vez que, esse conteúdo não se restringe apenas ao âmbito acadêmico, podendo-se ser encontrado materiais importantes para a formulação desta pesquisa.

Com a busca na plataforma do Google, pôde-se ter acesso a informações de documentos, planos de gestão, portais governamentais, dentre outros. Essa complementação, seguiu as diretrizes propostas por Cerezini, Rosso e Hanai (2017), a qual fez-se o uso de *strings* de busca em português e inglês, bem como a utilização do operador de busca "*allintext*" que proporciona a junção de palavras em uma única busca. Assim, foram utilizadas as seguintes *strings* de busca: "ferramentas" OR "instrumentos" OR "modelos" AND "gestão" AND "vulnerabilidade" AND "estuários tropicais" OR "manguezais".

### 5.1.2. Análise das ferramentas

As ferramentas identificadas foram analisadas com a metodologia da Matriz de Pugh, também conhecida como Matriz de Decisão (PUGH, 1981). Este método se fundamenta na avaliação comparativa das alternativas, que neste estudo correspondem a diferentes ferramentas, com o intuito de disponibilizar informações de maneira eficaz e dinâmica acerca daquela que melhor atende aos critérios essenciais para uma ferramenta de alta qualidade. Em alguns casos, essa comparação é realizada com base em um conceito de referência, conhecido como *baseline* (FREY *et al.*, 2009; OLABANJI; MPOFU, 2020; SREEJITH; MATHIRAJAN, 2022).

No entanto, devido à realidade específica apresentada nesta pesquisa, todas as ferramentas foram consideradas como referência, a fim de estabelecer uma análise comparativa mais precisa entre elas. Ressalta-se ainda que, mesmo realizando as comparações, a intenção da matriz não é estabelecer qual a melhor ferramenta ou até mesmo classificá-las, mas verificar as potencialidades e fragilidades de cada uma.

Destaca-se que, a Matriz de Pugh é amplamente utilizada nas áreas de engenharias de produção e de materiais, para comparações entre produtos desenvolvidos. Assim, a abordagem aqui apresentada, caracteriza-se pela inovação e adaptação de sua aplicação no âmbito da gestão de estuários tropicais.

A Matriz de Pugh, adaptada para o presente trabalho, foi estabelecida por meio de três categorias e características essenciais para dar suporte à gestão de estuários tropicais. Assim, foi concebida a primeira categoria de “concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade” com as características de “exposição, sensibilidade, capacidade adaptativa, correlação e espacialidade”. A segunda categoria de “características de execução da ferramenta” com as características “proposta da ferramenta, compreensibilidade, flexibilidade, replicabilidade, confiabilidade e precisão. E por fim, a terceira categoria sobre “características da ferramenta/programas e dados” com as características de “acesso a ferramenta/*software* e existência e disponibilidade de dados”.

A fim de realizar a avaliação das categorias e características supracitadas, foram estabelecidos critérios com valores variáveis de 1 a 5, detalhados no Quadro 5 a seguir.

Quadro 5. Categorias e critérios de análise das ferramentas para aplicação na Matriz de Pugh

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS	
		VALOR	DESCRIÇÃO
1 - Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade	1.1 - Exposição	1	A ferramenta <b>não</b> detecta as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem e <b>não</b> identifica as perturbações e impactos gerados no estuário
		2	A ferramenta <b>pouco</b> detecta as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem e <b>pouco</b> identifica as perturbações e impactos gerados no estuário
		3	A ferramenta detecta <b>razoavelmente</b> as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem e identifica <b>razoavelmente</b> identifica as perturbações e impactos gerados no estuário
		4	A ferramenta detecta <b>bastante</b> as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem e identifica <b>bastante</b> identifica as perturbações e impactos gerados no estuário
		5	A ferramenta detecta <b>completamente</b> as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem e identifica <b>completamente</b> identifica as perturbações e impactos gerados no estuário
	1.2 - Sensibilidade	1	A ferramenta <b>não</b> é capaz de detectar os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> capaz de detectar os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> capaz de detectar os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> capaz de detectar os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS	
		VALOR	DESCRIÇÃO
	1.3 - Capacidade adaptativa	5	A ferramenta é <b>completamente</b> capaz de detectar os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário
		1	A ferramenta <b>não</b> é capaz de mostrar as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário, sejam elas por adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> capaz de mostrar as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário, sejam elas por adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> capaz de mostrar as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário, sejam elas por adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> capaz de mostrar as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário, sejam elas por adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento
		5	A ferramenta é <b>completamente</b> capaz de mostrar as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário, sejam elas por adaptações ambientais, tecnológicas ou de gerenciamento
	1.4 - Correlação	1	A ferramenta <b>não</b> considera correlações entre os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa
		2	A ferramenta <b>pouco</b> considera correlações entre os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa
		3	A ferramenta considera <b>razoavelmente</b> correlações entre os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa
		4	A ferramenta considera <b>bastante</b> correlações entre os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS	
		VALOR	DESCRIÇÃO
	1.5 - Espacialidade	5	A ferramenta considera <b>completamente</b> correlações entre os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa
		1	A ferramenta <b>não</b> é capaz incorporar a vulnerabilidade em diferentes escalas espaciais, incluindo local, regional e global
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> capaz de incorporar a vulnerabilidade em diferentes escalas espaciais, incluindo local, regional e global
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> capaz de incorporar a vulnerabilidade em diferentes escalas espaciais, incluindo local, regional e global
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> capaz de incorporar a vulnerabilidade em diferentes escalas espaciais, incluindo local, regional e global
		5	A ferramenta é <b>completamente</b> capaz de incorporar a vulnerabilidade em diferentes escalas espaciais, incluindo local, regional e global
2 - Características de execução da ferramenta	2.1 - Proposta da ferramenta	1	A ferramenta <b>não</b> é apropriada ao objetivo pré-estabelecido
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> apropriada ao objetivo pré-estabelecido
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> apropriada ao objetivo pré-estabelecido
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> apropriada ao objetivo pré-estabelecido
		5	A ferramenta é <b>completamente</b> apropriada ao objetivo pré-estabelecido
	2.2 - Compreensibilidade	1	A ferramenta <b>não</b> é clara de modo que sua execução seja compreendida pelos usuários envolvidos na gestão
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> clara de modo que sua execução seja compreendida pelos usuários envolvidos na gestão

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS	
		VALOR	DESCRIÇÃO
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> clara de modo que sua execução seja compreendida pelos usuários envolvidos na gestão
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> clara de modo que sua execução seja compreendida pelos usuários envolvidos na gestão
		5	A ferramenta é <b>completamente</b> clara de modo que sua execução seja compreendida pelos usuários envolvidos na gestão
	2.3 - Flexibilidade	1	A ferramenta <b>não</b> apresenta flexibilidade em sua estrutura para inserção de novos fatores/condicionantes da vulnerabilidade de acordo com a necessidade do estuário em estudo
		2	A ferramenta <b>pouco</b> apresenta flexibilidade em sua estrutura para inserção de novos fatores/condicionantes da vulnerabilidade de acordo com a necessidade do estuário em estudo
		3	A ferramenta <b>razoavelmente</b> apresenta flexibilidade em sua estrutura para inserção de novos fatores/condicionantes da vulnerabilidade de acordo com a necessidade do estuário em estudo
		4	A ferramenta apresenta <b>bastante</b> flexibilidade em sua estrutura para inserção de novos fatores/condicionantes da vulnerabilidade de acordo com a necessidade do estuário em estudo
		5	A ferramenta apresenta <b>completamente</b> flexibilidade em sua estrutura para inserção de novos fatores/condicionantes da vulnerabilidade de acordo com a necessidade do estuário em estudo
	2.4 - Replicabilidade	1	A ferramenta <b>não</b> apresenta as etapas e os procedimentos de execução de forma clara, possibilitando sua replicação em diferentes estuários tropicais
		2	A ferramenta <b>pouco</b> apresenta as etapas e os procedimentos de execução de forma clara, possibilitando sua replicação em diferentes estuários tropicais

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS		
		VALOR	DESCRIÇÃO	
		3	A ferramenta <b>razoavelmente</b> apresenta as etapas e os procedimentos de execução de forma clara, possibilitando sua replicação em diferentes estuários tropicais	
		4	A ferramenta apresenta <b>bastante</b> as etapas e os procedimentos de execução de forma clara, possibilitando sua replicação em diferentes estuários tropicais	
		5	A ferramenta apresenta <b>completamente</b> as etapas e os procedimentos de execução de forma clara, possibilitando sua replicação em diferentes estuários tropicais	
	2.5 - Confiabilidade e precisão	1	A ferramenta <b>não</b> é apresentada de forma confiável e/ou não informa a margem de erro aceitável dos resultados gerados	
		2	A ferramenta é <b>pouco</b> apresentada de forma confiável e/ou pouco informa a margem de erro aceitável dos resultados gerados	
		3	A ferramenta é <b>razoavelmente</b> apresentada de forma confiável e/ou razoavelmente informa a margem de erro aceitável dos resultados gerados	
		4	A ferramenta é apresentada <b>bastante</b> de forma confiável e/ou bastante informa a margem de erro aceitável dos resultados gerados	
		5	A ferramenta é apresentada <b>completamente</b> de forma confiável e/ou informa completamente a margem de erro aceitável dos resultados gerados	
	3 - Características da ferramenta/programas e dados	3.1 - Acesso a ferramenta/ <i>Software</i>	1	A ferramenta <b>não</b> é operacionalizada por meio de um <i>software</i> de acesso gratuito e de código livre, não favorecendo sua utilização aos usuários
			2	A ferramenta é <b>pouco</b> operacionalizada por meio de um <i>software</i> de acesso gratuito e de código livre, pouco favorecendo sua utilização aos usuários
3			A ferramenta é <b>razoavelmente</b> operacionalizada por meio de um <i>software</i> de acesso gratuito e de código livre, favorecendo razoavelmente sua utilização aos usuários	

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIOS	
		VALOR	DESCRIÇÃO
		4	A ferramenta é <b>bastante</b> operacionalizada por meio de um <i>software</i> de acesso gratuito e de código livre, favorecendo sua utilização aos usuários
		5	A ferramenta é <b>completamente</b> operacionalizada por meio de um <i>software</i> de acesso gratuito e de código livre, favorecendo completamente sua utilização aos usuários
	3.2 - Existência e disponibilidade de dados	1	A ferramenta exige dados <b>não</b> acessíveis e disponíveis
		2	A ferramenta exige dados <b>pouco</b> acessíveis e disponíveis
		3	A ferramenta exige dados <b>razoavelmente</b> acessíveis e disponíveis
		4	A ferramenta exige dados <b>bastante</b> acessíveis e disponíveis
		5	A ferramenta exige dados <b>completamente</b> acessíveis e disponíveis

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Com os critérios apresentados, pôde-se realizar a análise a cada ferramenta identificada pelos resultados da RBS e pela busca na plataforma Google. Além disso, ao realizar a análise com as características e critérios estabelecidos, foram destacadas as potencialidades de cada ferramenta que poderão ser incorporadas ao modelo conceitual, tendo como estudo de caso o estuário do Rio Capibaribe, localizado na cidade do Recife - Pernambuco.

## **5.2. Resultados e discussão**

Com a realização da RBS foram selecionados 15 artigos para identificação de possíveis ferramentas de identificação e análise da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais. Em sua maioria, as ferramentas apresentam ênfases voltadas às mudanças climáticas e seus efeitos na região estuarina.

Reitera-se que os dados apresentados a seguir foram completamente extraídos da RBS uma vez que pela pesquisa na plataforma Google não obteve-se acréscimos e identificação de outras e novas ferramentas. A busca na plataforma Google obteve resultados idênticos aos identificados com a RBS.

### **5.2.1. Ferramentas de gestão que consideram a vulnerabilidade ambiental das regiões estuarinas tropicais: ênfase nas mudanças climáticas**

Em se tratando dos modelos e das ferramentas de gestão que consideram a vulnerabilidade ambiental das regiões estuarinas tropicais, a principal contribuição dos artigos provenientes da RBS indicou trabalhos, estudos e ferramentas com a utilização de geoprocessamento para o mapeamento das mudanças climáticas, abordando riscos de inundações e alterações do nível do mar. Dependendo das características a serem priorizadas para a execução de um modelo, o SIG (Sistema de Informação Geográfica) é forte aliado na simulação e projeções de cenários, visto que ele pode utilizar uma gama de banco de dados, bem como explorar possíveis cenários em determinado espaço e tempo, por exemplo.

Essas ferramentas de modelagem, baseadas em SIG, dão suporte aos tomadores de decisão e maior autonomia para explorar suas respectivas áreas

de estudo. Porém, ferramentas de modelagem, em alguns casos, tornam-se um desafio para a gestão. Ao propor e executar um modelo, devem ser levadas em consideração as peculiaridades e necessidades locais, verificando se o modelo suporta tais particularidades. Sendo assim, a simples replicação dos modelos em outras localidades, em alguns casos, acaba acarretando obstáculos e desafios no que diz respeito à replicação e confiabilidade dos dados. Além desse fator, outro desafio a ser destacado é a necessidade de um monitoramento ambiental, vislumbrando a provisão de seus serviços ecossistêmicos, uma vez que, para conseguir elaborar e executar uma gestão integrada é necessário compreender todos os fatores que compõem o ambiente.

Al-Nasrawi *et al.* (2018) desenvolveram um modelo numérico com a combinação de dados geomorfológicos da Ilha Camerong, costa do sudeste da Austrália, com dados hidrodinâmicos do nível do mar. O propósito da modelagem desenvolvida pelos autores está relacionado às projeções do aumento do nível do mar, visto que, as mudanças do clima e suas ligações diretas com o aumento dos mares é uma preocupação eminente. À vista disso, o modelo é alimentado com dados da região por meio da base do LiDAR (Detecção e alcance da luz) com informações do nível de solo, e IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Com as projeções do aumento do nível do mar, Al-Nasrawi *et al.* (2018) constataram que a Ilha Camerong já apresentava indícios de vulnerabilidade, como a erosão costeira e alterações nos processos ecogeomórficos devido à infraestrutura urbana desde 2015. Com isso, os autores indicam que, entre 2050 e 2100, a Ilha Camerong perderá consideravelmente parte de sua costa.

Ao realizar um estudo a nível global, Van Copellone e Temmerman (2020) conseguiram, por meio de uma modelagem para inundações costeiras, identificar *hotspots* no mundo em que, conservando as áreas costeiras, podem corroborar para a mitigação de impactos e riscos a inundações da costa, tendo como base as soluções baseadas na natureza. Essa ferramenta de modelagem, com aporte do sensoriamento remoto, simula como uma onda proveniente de inundações atinge a costa, colocando em risco o ambiente e as pessoas que nela vivem. Com isso, os autores destacam a importância de manter em equilíbrio os estuários, em especial os manguezais, visto que eles desempenham papel fundamental na proteção costeira.

Devido à grande concentração da população na região da costa da Austrália e grande risco à inundação, Khalil *et al.* (2020) desenvolveram um modelo hidrodinâmico inovador baseado nos próprios oceanos para mitigar desastres relacionados às inundações em cidades litorâneas. A proposta inclui um reservatório de costa que, por meio das previsões na modelagem, diminuiu acentuadamente os picos de inundação e sua gravidade ao atingir as zonas costeiras. Isso se dá pelo fato de o reservatório conseguir amortecer a velocidade com que a onda chega na costa.

Riscos às inundações são uma problemática eminente principalmente aos estuários que apresentam uma topografia baixa, como o caso de Sebou no Marrocos, estudado por Ennouali *et al.* (2023). Os autores fizeram uso do aprendizado de máquina (com algoritmos de computação) e Índice de Vulnerabilidade Costeira (ICV). A junção dessas metodologias favorece uma avaliação da vulnerabilidade mais precisa, sendo ela uma abordagem recente. Assim, eles puderam identificar e quantificar as áreas mais vulneráveis associadas aos diversos usos do solo. Para tanto, fizeram o uso de parâmetros como geomorfologia, altura máxima das ondas e subida do nível do mar.

Conseguir identificar as áreas com maior propensão às inundações é fundamental para a elaboração de políticas de adaptação das regiões costeiras, de acordo com Imani *et al.* (2021). Assim, os autores desenvolveram uma modelagem associada às inundações, com o auxílio do Modelo de Elevação Digital (DEM) e mudanças regionais relacionadas ao nível do mar por meio do marégrafo e da altimetria, para analisar a zona costeira no sudoeste de Taiwan. Constatou-se que, as regiões mais desmatadas, principalmente as com fins agrícolas, eram mais vulneráveis à inundação, onde, de acordo com as projeções elaboradas, esses locais poderiam desaparecer em um futuro próximo.

Ainda destacando o aumento dos mares, Doughty *et al.* (2019) avaliaram a resiliência das regiões costeiras. Com a elaboração de uma modelagem, os autores utilizaram dados de hipsometria<sup>16</sup>, aumento do nível do mar, acreção<sup>17</sup>, dinâmica temporal (em meses), mudanças na elevação e nível de água, e mudanças de hábitat. O conjunto de variáveis utilizadas favoreceu a análise das mudanças nas zonas úmidas costeiras da Califórnia - Estados Unidos. A

---

<sup>16</sup> Medida da elevação do terreno em relação ao nível do mar.

<sup>17</sup> Processo sedimentar positivo, em que a costa avança em direção ao mar.

aplicação do modelo conseguiu prever alterações na área de estudo, além de auxiliar diretamente a gestão do ambiente, visto que os dados forneceram entendimentos quanto à resposta ambiental frente ao aumento do nível do mar. Ressalta-se ainda, que a modelagem aplicada comporta as peculiaridades de demais localidades, facilitando sua replicação em outros estuários tropicais.

Os efeitos das mudanças climáticas não somente se resumem ao aumento dos níveis nos oceanos, que diretamente implicam a costa e bacias hidrográficas (a exemplo do assoreamento, alterações na linha de costa, intrusão salina e modificações na cadeia trófica), mas também, a uma junção de problemas ambientais, como o aquecimento global, declínio da disponibilidade de água doce, dentre outros.

Atentando para os efeitos das mudanças climáticas, Heimhuber *et al.* (2019) desenvolveram uma modelagem que leva em consideração aspectos como precipitação, tempestades, temperatura do ar, temperatura superficial dos oceanos, acidificação oceânica, aumento do nível do mar, ventos e ondas. Com o estabelecimento dessas variáveis, os autores puderam inferir vulnerabilidades associadas aos efeitos do clima, bem como os riscos a ela associados, fornecendo dados valiosos para os tomadores de decisão em aspectos a serem priorizados nas regiões estuarinas principalmente nos efeitos relacionados a eventos extremos.

Com tantas variações associadas às mudanças climáticas, Rogers *et al.* (2019) desenvolveram uma modelagem vislumbrando as possíveis adaptações dos manguezais a essa realidade. A ferramenta, que teve como base um estuário densamente urbanizado na Austrália, conseguiu mostrar resultados inversos ao esperado. Ou seja, mesmo com muita pressão e estressores ambientais, os mangues apresentaram grande potencial em expandir sua área, seja avançando em direção à costa ou até mesmo longitudinalmente no percurso estuarino. Essa constatação remete-se ao grande poder de resiliência dos manguezais, que conseguem se adaptar às condições ambientais considerando a geomorfologia, com extensa área de planície como área de refúgio, além do balanço sedimentar, levando em consideração a progradação e retrogradação da floresta. Entretanto, Addicott *et al.* (2020), ao desenvolver um modelo teórico para mortalidade de regiões estuarinas, ressaltaram que eventos climáticos extremos, como os ligados ao El Niño, por exemplo, são um dos grandes causadores da morte de mangues. Mesmo apresentando grande

potencial de resiliência, os estuários e/ou manguezais sofrem diretamente com alterações ambientais dadas de forma abrupta.

Enfatizando os eventos extremos e as variabilidades climáticas, Hossain *et al.* (2022), ao estudar o estuário de Subarnarekha na Índia, fez uso da modelagem ambiental relacionada ao ICV com o Processo Hierárquico Analítico (AHP) para compreender a distribuição espacial da vulnerabilidade costeira. Com auxílio do sensoriamento remoto e utilização de parâmetros como batimetria, alteração na linha de costa e aumento do nível do mar, os autores puderam avaliar o que provoca a erosão costeira, inundações e impactos biofísicos no estuário. Ressalta-se ainda, que a utilização do ICV com o AHP em conjunto, resultou em dados acurados para a implementação de políticas que visam a redução de riscos.

Devido às alterações em todo o processo costeiro e estuarino, os serviços ecossistêmicos dessas regiões tendem a diminuir drasticamente. Assim, Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) utilizaram um modelo de SIG tendo como base o Índice de Vulnerabilidade de Hábitat, levando em consideração múltiplos fatores. A modelagem consiste em calcular o nível em que os habitats costeiros não irão mais conseguir enfrentar os danos, degradações e riscos provenientes de ações antrópicas. Para tanto, os autores fizeram uso de bases de dados primários e secundários interligados à vulnerabilidade ambiental, podendo-se verificar mudanças costeiras, tais como alteração na linha de costa, uso e cobertura do solo, erosão, dentre outros.

As atividades antrópicas conseguem induzir diretamente a produtividade e o crescimento dos habitats costeiros, acarretando problemáticas a curto e longo prazo. Assim, a utilização de modelos tendo como base o SIG, como o proposto por Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019), consegue mapear as vulnerabilidades existentes e fornecer informações para uma gestão sustentável, que contempla ações e resultados a longo prazo. Em complemento, Vieira *et al.* (2019), ao também realizarem a modelagem com suporte do SIG, informam que essas ferramentas de modelagem ambiental dão suporte para a prevenção da degradação de ambientes costeiros.

Visando realizar uma modelagem para recuperação da zona costeira da Louisiana, nos Estados Unidos, Freeman *et al.* (2021) realizaram uma análise tendo como base o “Plano Diretor Abrangente da Louisiana para uma Costa Sustentável”. No Plano, menciona-se o uso de modelagem numéricas

individuais, que juntas auxiliam na recuperação eficaz da região, compondo o Modelo de Compartimento Integrado (MCI). Nele, foram levados em consideração aspectos relacionados à hidrodinâmica e qualidade da água; geomorfologia emergente de zonas húmidas e ecologia vegetal; respostas focais de espécies de peixes e animais selvagens; ondas e tempestades; e avaliação de riscos e danos a ativos humanos. Assim, aspectos mais abrangentes, porém realistas, favorecem a abordagem da modelagem hidrodinâmica dos estuários, como um dos primeiros passos para uma gestão eficaz da vulnerabilidade ambiental.

Ressalta-se que a ferramenta apresentada por Freeman *et al.* (2021) fez parte apenas da identificação das principais ferramentas que consideram a vulnerabilidade de estuários, sem participar da análise com a aplicação da Matriz de Pugh devido ao teor do artigo. Os autores apresentam a ferramenta, suas potencialidades e relatos relacionados a sua aplicação. Porém, por ter sido uma análise a partir da aplicação na zona costeira dos Estados Unidos, não se tem informações suficientes da ferramenta e sua execução propriamente dita, impossibilitando a posterior análise do presente trabalho com a Matriz de Pugh.

O MCI, analisado por Freeman *et al.* (2021), considera tanto os aspectos naturais do ambiente que acarretam mudanças ecossistêmicas, bem como as influências antropogênicas que potencializam essas alterações ambientais. O MCI consegue projetar cenários de 50 anos, prevendo mudanças nas relações entre terra e água, vegetação e graus de salinidade. Ressalta-se, ainda, que são realizadas constantes modificações e acompanhamentos junto ao modelo para que ocorram melhorias para que essa ferramenta possa passar de uma estrutura determinística para uma probabilística.

Ao realizar estudos nas zonas húmidas do Gabão (África Central), Aldous *et al.* (2021) estabeleceram uma ferramenta de modelagem com o suporte de mapeamento por drones para conseguir identificar as áreas mais vulneráveis da região, para estabelecer melhorias quanto a proteção do hábitat e as manutenções dos serviços ecossistêmicos. O destaque na pesquisa de Aldous *et al.* (2021) foi constatar a importância da conectividade hidrológica entre os hábitats e regiões para a gestão desses ambientes. Uma vez que, a água permite a movimentação e dispersão de espécies, favorecendo uma maior variabilidade ambiental.

Outra ferramenta para identificação da vulnerabilidade e riscos ambientais em estuários, é a metodologia de avaliação de multicritério conforme utilizado por Nath *et al.* (2021). Com esse método, os autores puderam identificar os principais fatores que influenciam a vulnerabilidade costeira (pressões antrópicas) utilizando o DEM, imagens de satélite e parâmetros diversos (talude costeiro, distância entre rio e estuário, alterações na linha de costa, uso e cobertura do solo, dentre outros). Fazer uso dessa metodologia auxilia os tomadores de decisão no planejamento de desenvolvimento da zona costeira a curto e longo prazo, podendo descentralizar as pressões relacionadas ao uso e ocupação do solo. Além disso, com o mapeamento, consegue-se prever os principais pontos a serem atingidos frente uma mudança ambiental, seja de origem natural ou antrópica, o que traz benefícios ambientais e socioeconômicos para a região.

No Quadro 6, encontra-se a síntese das ferramentas de modelagem e seus respectivos componentes encontrados na literatura científica para vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais.

Quadro 6. Ferramentas de modelagem identificadas para abordagem da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais.

<b>AMEAÇA</b>	<b>COMPONENTE DE EXPOSIÇÃO</b>	<b>FERRAMENTA</b>	<b>INSTRUMENTOS</b>	<b>FONTES</b>
<b>Mudanças climáticas</b>	Aumento do nível do mar	Modelagem numérica e ambiental	Geomorfologia LiDAR (Detecção e alcance da luz) Detecção de alterações climáticas DEM (Modelo de Elevação Digital) Marégrafo Altimetria	Al-Nasrawi <i>et al.</i> (2018); Heimhuber <i>et al.</i> (2019); Imani <i>et al.</i> (2021); Hossain <i>et al.</i> (2022); Ennouali <i>et al.</i> (2023)
	Inundação costeira	Modelagem ambiental e hidrodinâmica	Hidrodinâmica costeira e marinha (ondas, marés, ventos, etc.) SBN (Soluções Baseadas na Natureza)	Al-Nasrawi <i>et al.</i> (2018); Khalil <i>et al.</i> (2020) Van Copellone e Temmerman (2020); Imani <i>et al.</i> (2021); Ennouali <i>et al.</i> (2023)
	Eventos extremos e as variabilidades climáticas	Modelagem ambiental	Hipsometria Aumento do nível do mar Acreção Alteração na linha de costa Precipitação Tempestades Temperatura do ar Ventos Ondas Mudanças de hábitat Perda de hábitat Morte de vegetação nativa ICV (Índice de Vulnerabilidade Costeira) AHP (Processo Hierárquico Analítico) Batimetria	Doughty <i>et al.</i> (2019); Heimhuber <i>et al.</i> (2019); Rogers <i>et al.</i> (2019); Addicott <i>et al.</i> (2020); Hossain <i>et al.</i> (2022)
<b>Antropogênica</b>	Erosão	Modelagem ambiental	Alteração na linha de costa Uso e cobertura do solo	Al-Nasrawi <i>et al.</i> (2018); Kaliraj, Chandrasekhar,

AMEAÇA	COMPONENTE DE EXPOSIÇÃO	FERRAMENTA	INSTRUMENTOS	FONTES
			Processos erosivos	Amachandran (2019); Rogers <i>et al.</i> (2019); Hossain <i>et al.</i> (2022); Ennouali <i>et al.</i> (2023)
	Degradação ambiental	Modelagem ambiental e numérica, Análise multicritério	DEM (Modelo de Elevação Digital) Imagens de satélite IVH (Índice de Vulnerabilidade e Hábitat) Dados primários e secundários do ambiente frente à vulnerabilidade Alteração na linha de costa Uso e cobertura do solo Processos erosivos Hidrodinâmica e qualidade da água Geomorfologia Ecologia vegetal Resposta focal Ondas Tempestades Avaliação de riscos Talude costeiro Distância entre rio e estuário	Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019); Vieira <i>et al.</i> (2019); Aldous <i>et al.</i> (2021); Freeman <i>et al.</i> (2021); Nath <i>et al.</i> (2021); Hossain <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

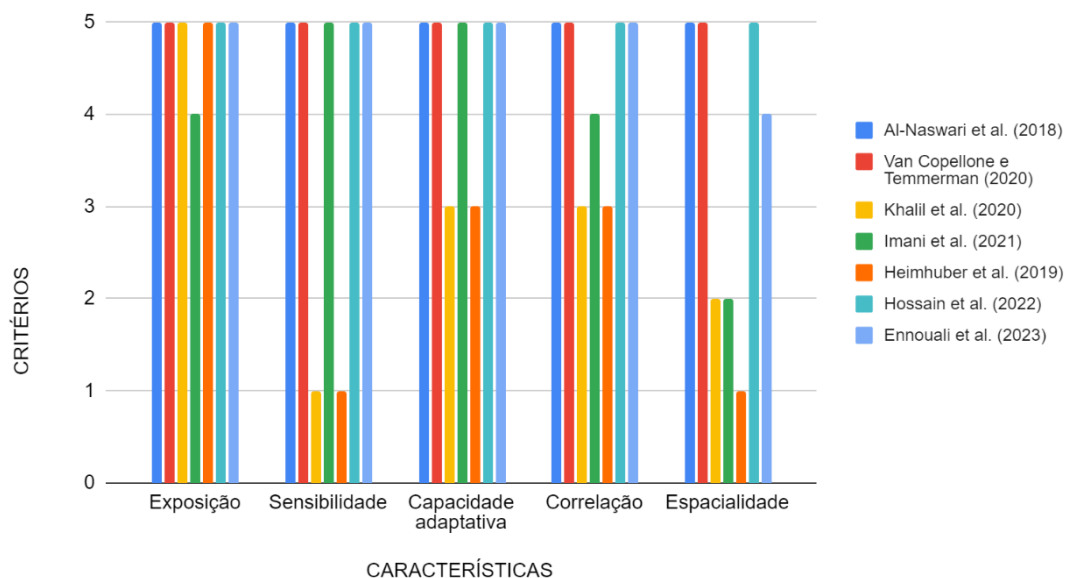
## 5.2.2. Ferramentas direcionadas à abordagem de Aumento do Nível do Mar e Inundações

Ao elaborar uma ferramenta que vise a análise da vulnerabilidade, é fundamental pensar em sua concepção, tendo como base os três componentes envolvidos na vulnerabilidade ambiental (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa). De acordo com Borbor-Cordova *et al.* (2020), esses componentes favorecem perspectivas interdisciplinares que corroboram para um melhor entendimento e gerenciamento de estratégias para salvaguardar os estuários, principalmente no que tange às mudanças climáticas.

Realizando a análise das ferramentas relacionadas ao aumento do nível do mar e inundações, pôde-se verificar que todas as 7 ferramentas faziam relação com o componente da vulnerabilidade associado à exposição, detectando as mudanças por estresse/estressores independente de sua origem. Porém, quando visto o componente da vulnerabilidade associado à sensibilidade, apenas duas ferramentas (KHALIL *et al.*, 2020; HEIMHUBER *et al.*, 2019) não abordaram os efeitos ambientais e/ou sociais frente ao aumento do nível do mar e inundações. Devido a isso, quando verificada a concepção da ferramenta tendo como característica a capacidade adaptativa da vulnerabilidade, essas duas ferramentas abordaram mais geneticamente as respostas aos efeitos causados pelos estresses/estressores no estuário. Uma vez que, as ferramentas citadas não traziam diretamente os efeitos provocados por estresse/estressores que resultam em alterações ambientais no estuário, conseqüentemente não conseguiam enfatizar a capacidade adaptativa. Por outro lado, por mais que exista a constatação e geração de dados, em alguns casos não existem melhorias significativas quanto ações de melhorias de infraestrutura, medidas de mitigação, proteção da biodiversidade, serviços ecossistêmicos e monitoramento. Entretanto, esses planos de gestão possibilitam a busca por recursos para melhorar essas lacunas.

Quando observado as escalas espaciais (abrangência) de aplicação das ferramentas, Al-Naswari *et al.* (2018), Van Copellone e Temmerman (2020) e Hossain *et al.* (2022) desenvolveram a ferramenta de nível global, enquanto que Ennouali *et al.* (2023) de nível regional, Khalil *et al.* (2020) e Imani *et al.* (2021) de nível local mas com possíveis potencialidades para o regional, enquanto que Heimhuber *et al.* (2019) apenas de nível local (Gráfico 2).

Gráfico 2. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.



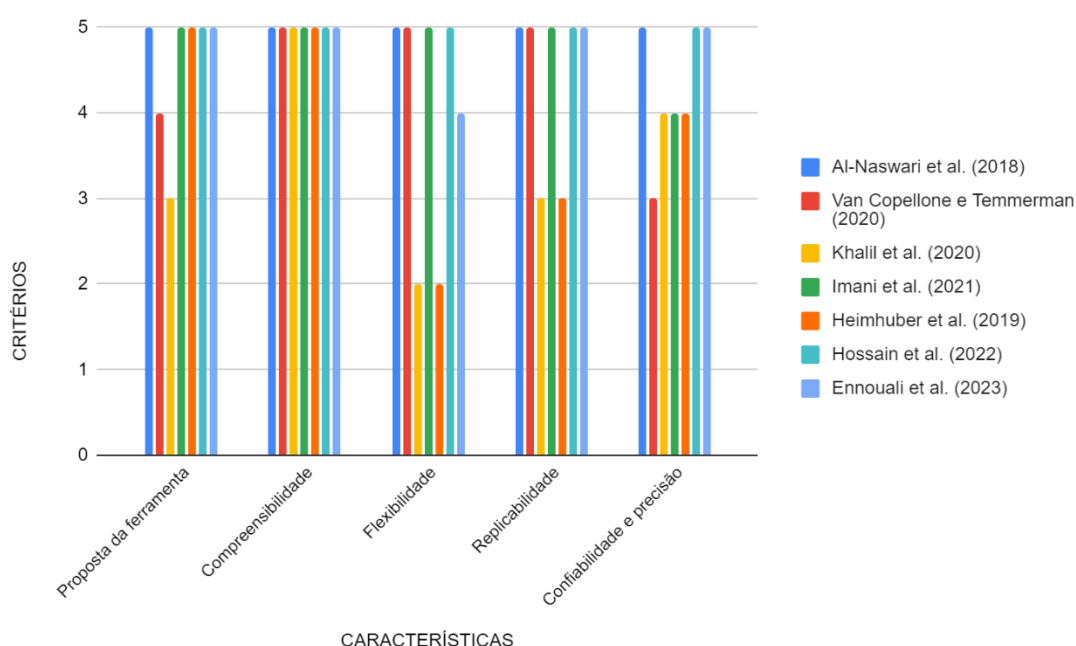
Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Ao executar uma ferramenta de nível global, alguns desafios são levados em consideração. De acordo com Van Copellone e Temmerman (2020), os principais desafios relacionam-se às lacunas de dados para essa perspectiva global, uma vez que, ter acesso a um maior banco de dados que seja conciso e preciso em muitas localidades, requer um grande esforço e envolvimento de diversos pesquisadores. Com esse déficit, acaba tendo prejuízos na geração e resultados propostos pelo modelo. Ainda, Hossain *et al.* (2022) destacam que numa perspectiva global e temporal maior, os dados gerados com as ferramentas de modelagem ambiental conseguem subsidiar autoridades costeiras para o estabelecimento de melhores planos de gestão de regiões estuarinas a longo prazo.

Quando consideradas as características de execução da ferramenta (Gráfico 3), a proposta por Van Copellone e Temmerman (2020) apresentou pequenas falhas no atendimento da proposta, que de acordo com os próprios autores se deu pelo grau de espacialidade. Por outro lado, a ferramenta de Khalil *et al.* (2020) não conseguiu atender completamente ao objetivo de análise relacionado ao aumento do nível do mar e inundações por restrição temporal. Assim, observa-se que é necessário ao planejar e estabelecer uma ferramenta de modelagem levar em consideração a disponibilidade de tempo de execução, bem como a complexidade relacionada à espacialidade.

Verificando a compreensibilidade e flexibilidade, as ferramentas em sua maioria apresentaram uma completa compreensão bem como a possibilidade de incluir novos condicionantes/fatores em suas ferramentas (Gráfico 3). Destaca-se que, as ferramentas desenvolvidas por Khalil *et al.* (2020) e Heimhuber *et al.* (2019), carecem de novos testes e simulações que permitam realizar a inclusão desses fatores. Com isso, elas também apresentam dificuldades em relação a serem replicadas em outros estuários que necessitam incluir alguma informação relevante acerca da região.

Gráfico 3. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.



Fonte: Elaboração dos autores (2023)

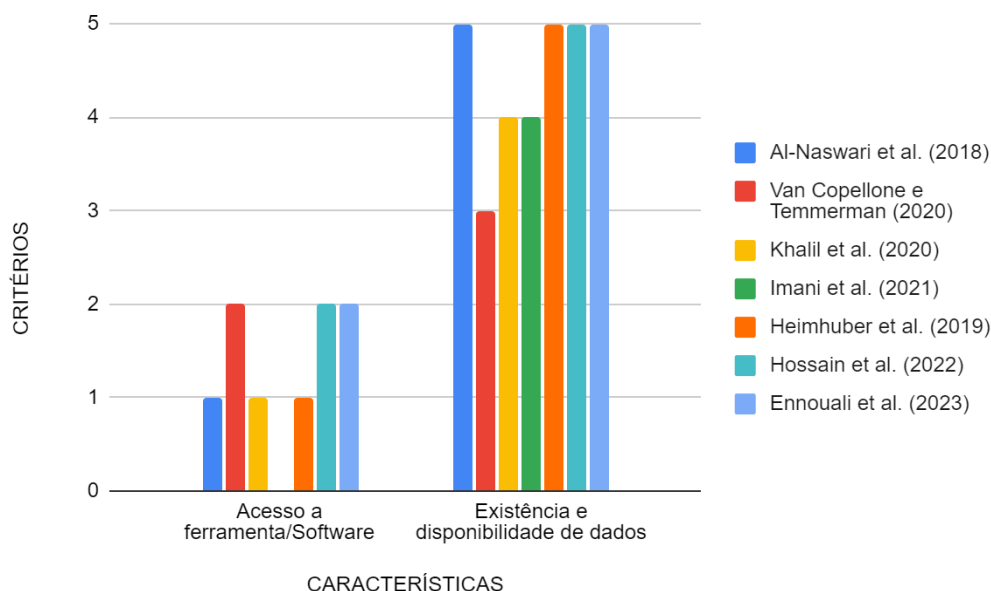
Observando as características da ferramenta/programas e dados, verificou-se que todas fizeram uso de ferramentas/programas de acesso pago ou código fechado (Gráfico 4). Entende-se que, a escolha por *softwares* como ArcGis<sup>18</sup> e ERDAS IMAGINE<sup>19</sup> se dá pelo fato da robustez para realização das análises, além de uma maior qualidade e precisão das imagens satelitais. Ressalta-se ainda, que mesmo apresentando o conteúdo pago, esses *softwares* são amplamente utilizados para o georreferenciamento, tendo seus conhecimentos difundidos na literatura. Então, um tomador de decisão, ao

<sup>18</sup> Software desenvolvido pela ESRI para o sistema de georreferenciamento.

<sup>19</sup> Software desenvolvido pela Hexagon Geospatial para detecção e fotogrametria remoto.

realizar a replicação da ferramenta, por exemplo, conseguirá ter facilidade de acesso ao conhecimento/entendimento do *software*.

Gráfico 4. Ferramentas de aumento do nível do mar e inundações em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”.



Fonte: Elaboração dos autores (2023)

O *software* Mike 21<sup>20</sup> utilizado por Khalil *et al.* (2020), também de acesso pago, realiza modelagem hidrodinâmica com maior versatilidade e precisão do que *softwares* de acesso gratuito. Os autores destacam que sua utilização favorece a versatilidade e precisão nas simulações hidrodinâmicas, podendo gerar um melhor produto final.

Destaca-se que Imani *et al.* (2021) não deixaram claro no desenvolvimento do artigo, qual a ferramenta utilizada por eles ao fazer as simulações. Devido a isso, sua pontuação foi inexistente.

De modo geral, as ferramentas analisadas nesta seção foram dadas como satisfatórias (Quadro 7), uma vez que os menores valores dos critérios foram direcionados ao acesso das ferramentas, porém, entende-se que as ferramentas e *softwares* de acesso pago, acabam apresentando maior resolução e versatilidade para geração e análise de dados.

Ao vislumbrar a possível utilização das ferramentas analisadas nessa seção no estuário do Rio Capibaribe, observa-se o potencial das desenvolvidas

<sup>20</sup> *Software* desenvolvido pelo Grupo DHI para solucionar desafios em águas costeiras e marinhas.

por Al-Nasrawi *et al.* (2019), Hossain *et al.* (2022) e Ennouali *et al.* (2023). Essas ferramentas conseguem incorporar e identificar os três componentes da vulnerabilidade, além de serem completamente replicáveis e gerarem dados precisos e confiáveis.

A existência de ferramentas que possam analisar a vulnerabilidade ambiental associada ao aumento do nível do mar e inundações é fundamental para o estuário do Capibaribe, uma vez que essa região, de acordo com Leão, Andrade e Nascimento (2021) e Nóbrega *et al.* (2023), apresenta baixas altitudes e suscetibilidade à inundação, seja por alterações climáticas (sendo a 16ª cidade mais vulnerável do mundo frente às mudanças climáticas de acordo com o IPCC), ou pelas suas características fisiográficas ou pelo processo de urbanização intensivo que ocorre na cidade do Recife e, conseqüentemente, nas margens do estuário. Além disso, de acordo com o Plano Diretor de Drenagem do Recife, a cidade possui 159 pontos críticos de inundação (ICLEI, 2020).

Quadro 7. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Aumento do Nível do Mar e Inundações

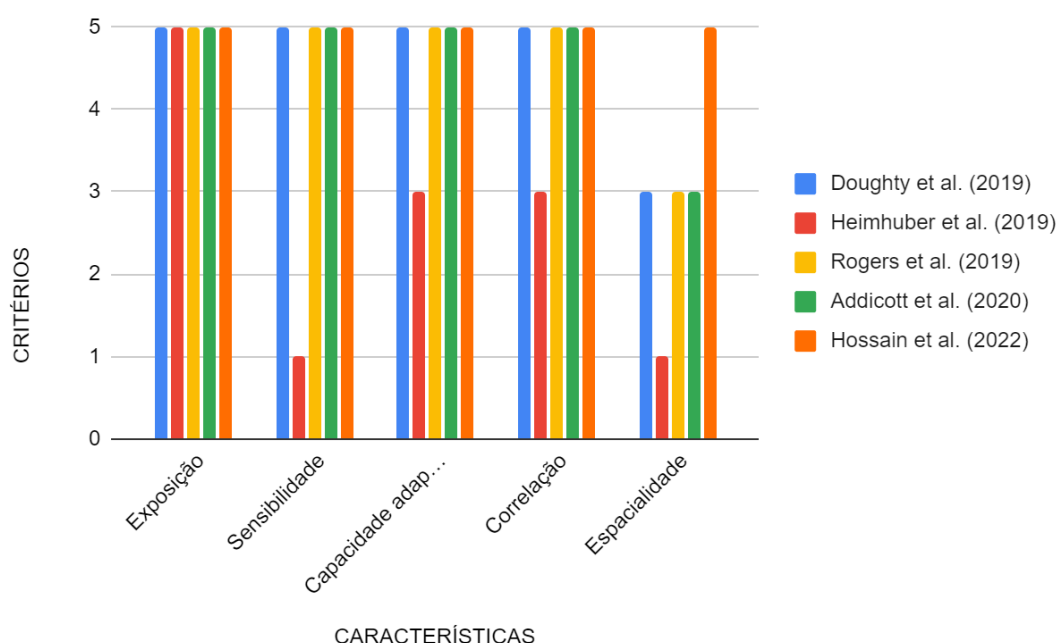
CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTAS						
		Al-Naswari <i>et al.</i> (2018)	Van Copellone e Temmerman (2020)	Khalil <i>et al.</i> (2020)	Imani <i>et al.</i> (2021)	Heimhuber <i>et al.</i> (2019)	Hossain <i>et al.</i> (2022)	Ennouali <i>et al.</i> (2023)
Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade	Exposição	5	5	5	4	5	5	5
	Sensibilidade	5	5	1	5	1	5	5
	Capacidade adaptativa	5	5	3	5	3	5	5
	Correlação	5	5	3	4	3	5	5
	Espacialidade	5	5	2	2	1	5	4
Características de execução da ferramenta	Proposta da ferramenta	5	4	3	5	5	5	5
	Compreensibilidade	5	5	5	5	5	5	5
	Flexibilidade	5	5	2	5	2	5	4
	Replicabilidade	5	5	3	5	3	5	5
	Confiabilidade e precisão	5	3	4	4	4	5	5
Características da ferramenta/programas e dados	Acesso a ferramenta/ <i>Software</i>	1	2	1	0	1	2	2
	Existência e disponibilidade de dados	5	3	4	4	5	5	5
<b>Somatório dos critérios</b>		<b>56</b>	<b>52</b>	<b>36</b>	<b>48</b>	<b>38</b>	<b>57</b>	<b>55</b>

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

### 5.2.3. Ferramentas direcionadas à abordagem de Eventos Climáticos Extremos

Todas as 5 ferramentas relacionadas à Eventos Climáticos Extremos traziam o componente da exposição em sua abordagem (Gráfico 5). Porém, quando observada a característica de sensibilidade, Heimhuber (2019) não levou esse componente em consideração da sua abordagem, conforme elencado na seção anterior. Conseqüentemente, sua abordagem em relação à capacidade adaptativa e as correlações, atenderam razoavelmente a esses requisitos.

Gráfico 5. Ferramentas de eventos climáticos extremos em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.



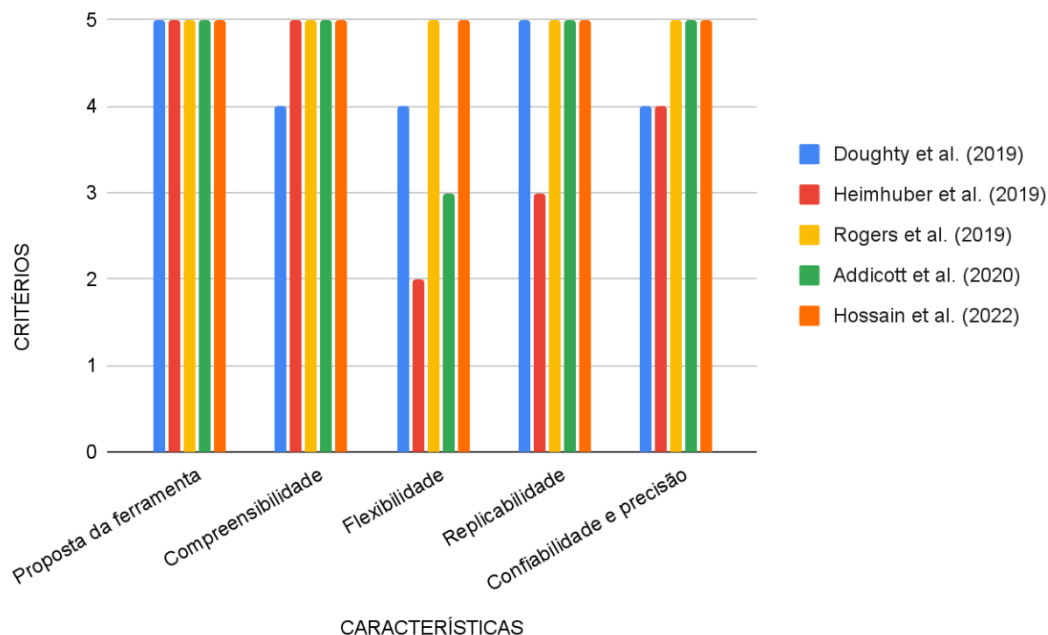
Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Dentre as ferramentas que abordam os eventos climáticos extremos, a proposta estabelecida por Rogers *et al.* (2019) foi a que melhor abordou os componentes da vulnerabilidade ambiental. Os autores, explicitaram cada componente na proposta, bem como suas possíveis interações, atendendo completamente a esses requisitos. Ao realizar essas distinções, Costa e Kropp (2013) colocam que o detalhamento dos componentes da vulnerabilidade ambiental favorece o direcionamento de metodologias específicas que de fato possam evidenciar e analisar a vulnerabilidade na localidade pretendida.

Quando observada a espacialidade das propostas, apenas Hossain *et al.* (2022) fizeram a abordagem global (Gráfico 5). Enquanto Doughty *et al.* (2019), Rogers *et al.* (2019) e Addicott *et al.* (2020) abordaram com caráter regional e Heimhuber *et al.* (2019) localmente. Por muitas vezes, a preferência por abordagens regionais é relacionada, de acordo com Pike (2007), a utilidade em pontuar questões eminentes, sendo elas abertas a questionamentos mais amplos, facilitando o desenvolvimento de políticas públicas para o gerenciamento da região.

Ao realizar a análise de acordo com as características de execução da ferramenta, todas as propostas atenderam completamente os objetivos previamente propostos (Gráfico 6). Quando observada a característica de compreensibilidade, Doughty *et al.* (2019) não conseguiram atender completamente o requisito, devido ao fato de que em alguns passos do desenvolvimento de execução da ferramenta, a informação não estar inteiramente clara ao leitor.

Gráfico 6. Ferramentas de eventos climáticos extremos em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.



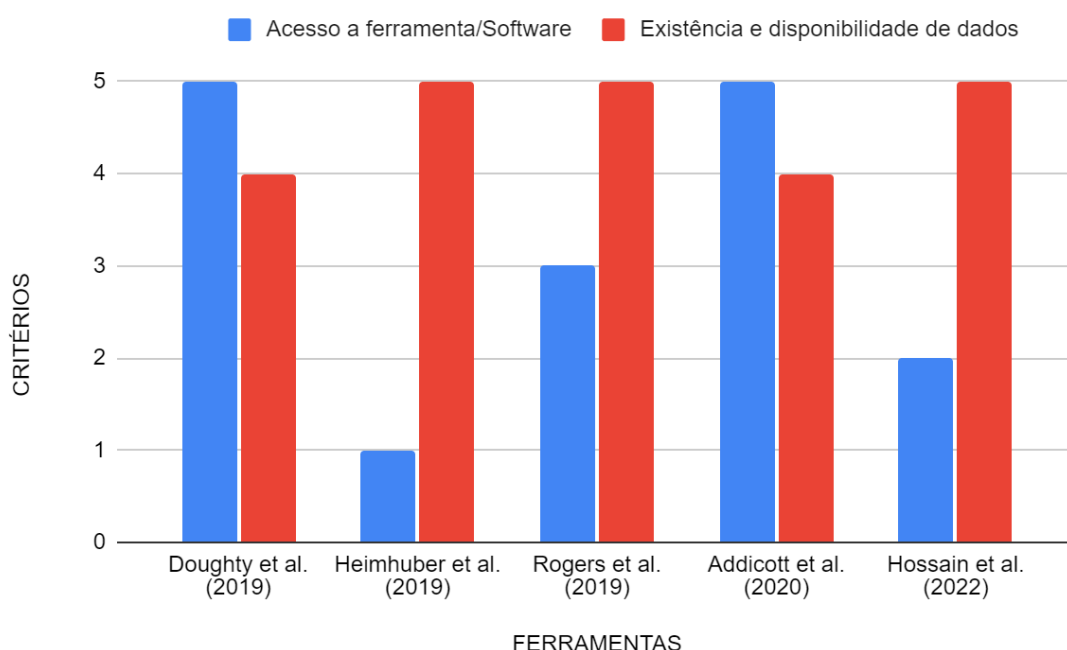
Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Quando observada a característica de flexibilidade da ferramenta, apenas Rogers *et al.* (2019) e Hossain *et al.* (2022) conseguiram em sua estrutura incorporar quaisquer outros componentes para análise (Gráfico 7). Ao investigar a replicabilidade, a ferramenta proposta por Heimhuber *et al.* (2019),

por apresentar uma estrutura mais fechada, acaba não conseguindo contemplar bastante sua replicação.

Visualizando a confiabilidade e precisão dos dados gerados com as ferramentas, Doughty *et al.* (2019) não atenderam completamente ao requisito por apresentarem algumas incertezas relacionadas à precisão do modelo, mesmo realizarem análises adicionais como o cluster k-means<sup>21</sup>.

Gráfico 7. Ferramentas de eventos climáticos extremos relacionados à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”.



Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Na categoria de acesso a ferramenta/*software*, apenas duas fizeram uso de *softwares* gratuitos. Doughty *et al.* (2019) realizaram a modelagem por meio do R<sup>22</sup>, que por sua vez é um *software* livre para computação estatística e gráficos. Enquanto Addicott *et al.* (2020) fizeram uso do Quantum GIS (QGIS)<sup>23</sup>, que é um *software* livre com código-fonte aberto, o qual associa-se ao sistema de informação geográfica. É importante ressaltar que, mesmo com algumas limitações relacionadas à projeção e resolução, o QGIS nesse caso, atendeu ao objetivo proposto pelos autores.

<sup>21</sup> Consiste na segregação de grupos para que seja aceita a hipótese de que os dados atribuídos a cada centro de k-means sejam normais (KODINARIYA; MAKWANA, 2013).

<sup>22</sup> Linguagem de programação que permite a execução de modelagem e cálculos estatísticos, desenvolvido por Ross Ihaka e Robert Gentleman do departamento de Estatística da Universidade de Auckland, Nova Zelândia.

<sup>23</sup> *Software* desenvolvido pelo QGIS Development Team relacionado ao sistema de georreferenciamento.

Mesmo fazendo uso de um *software* pago (ArcGis), Rogers *et al.* (2019) associaram a ele o SLAMM 6.0<sup>24</sup> que é de código aberto. O SLAMM é um modelo que consegue simular simulações dos processos dominantes envolvidos nas alterações dos estuários frente a eventos climáticos extremos e nas modificações da linha da costa durante o aumento do nível do mar a longo prazo.

Além de *softwares* de acesso pago, existem os que são de posse do governo, como o utilizado por Heimhuber *et al.* (2019). Os autores fizeram a modelagem tendo como suporte o NARCLiM<sup>25</sup> (*Australian Regional Climate Modeling*). Para tanto, alguns requisitos e solicitações devem ser exclusivas de tomadores e/ou pesquisadores australianos. Porém, ressalta-se que mesmo com as restrições, muitos dados de modelagem são disponibilizados na plataforma AdaptNSW.

Ter opções de acesso gratuito para realização da modelagem é fundamental, uma vez que a realidade de alguns atores envolvidos na gestão para tomada de decisão não carece de recursos para adquirir licenças de *softwares* pagos como o ArcGis. Oliveira Filho e Peres (2023) pontuam que, no Brasil, até o ano de 2019, a preferência na utilização de *softwares* gratuitos de georreferenciamento são dados principalmente pelas prefeituras, devido à escassez de recursos financeiros. Enquanto na esfera federal, as escolhas prioritárias são de *softwares* pagos como o ArGis. Acredita-se que, mesmo com a disseminação e elaboração de novas ferramentas e *softwares* de acesso livre, o panorama na esfera federal, os responsáveis pela tomada de decisão deverão continuar optando pelo pagamento devido a maiores funcionalidades e qualidades de resolução. Assim, ressalta-se a importância das prefeituras realizarem planos de gestão a fim de arrecadar recursos com a União para obter ferramentas que possibilitem a gestão eficiente e precisa, sem necessariamente depender de eventuais iniciativas de Universidades.

Quando observada a existência e a disponibilidade de dados, todas as ferramentas atenderam de forma satisfatória (Quadro 8). Ainda assim, é importante ressaltar que, de acordo com Doughty *et al.* (2019), mesmo

---

<sup>24</sup> *Software* de modelagem ambiental desenvolvido pela Warren Pinnacle Consulting para simulação de alterações ambientais e aumento do nível do mar.

<sup>25</sup> *Software* de modelagem climática desenvolvido pelo Governo de Nova Gales do Sul - NSW, na Austrália (NSW / ACT Modelagem Regional Climática).

existindo base de dados e disponibilidade de dados, alguns requerem permissões de acesso, o que dificulta em alguns casos a sua obtenção.

**Quadro 8.** Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Eventos Climáticos Extremos

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTAS				
		Doughty <i>et al.</i> (2019)	Heimhuber <i>et al.</i> (2019)	Rogers <i>et al.</i> (2019)	Addicott <i>et al.</i> (2020)	Hossain <i>et al.</i> (2022)
Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade	Exposição	5	5	5	5	5
	Sensibilidade	5	1	5	5	5
	Capacidade adaptativa	5	3	5	5	5
	Correlação	5	3	5	5	5
	Espacialidade	3	1	3	3	5
Características de execução da ferramenta	Proposta da ferramenta	5	5	5	5	5
	Compreensibilidade	4	5	5	5	5
	Flexibilidade	4	2	5	3	5
	Replicabilidade	5	3	5	5	5
	Confiabilidade e precisão	4	4	5	5	5
Características da ferramenta/programas e dados	Acesso a ferramenta/ <i>Software</i>	5	1	3	5	2
	Existência e disponibilidade de dados	4	5	5	4	5
<b>Somatório dos critérios</b>		<b>54</b>	<b>38</b>	<b>56</b>	<b>55</b>	<b>57</b>

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Com exceção da ferramenta proposta por Heimhuber *et al.* (2019), as demais apresentam potencial de utilização no estuário do Capibaribe. São ferramentas que conseguem atender aos requisitos estabelecidos relacionados à qualidade e execução, uma vez que existem bancos de dados que possibilitam a execução dos modelos.

Essas ferramentas podem desempenhar um papel crucial na obtenção de dados confiáveis relacionados à vulnerabilidade aos eventos climáticos extremos. O papel dessas ferramentas se torna ainda mais relevante devido ao fato de que a cidade do Recife, conforme relatado pela *Carbon Disclosure Project* (CDP) em 2021, foi inserida entre as 88 cidades do mundo que estão liderando iniciativas em resposta à crise climática. Dessa forma, a capacidade de utilizar ferramentas para identificar e analisar as vulnerabilidades associadas a esses eventos se torna uma prioridade. Além disso, Marengo *et al.* (2023) corroboram essa perspectiva, garantindo que a cidade do Recife é suscetível a esses eventos, principalmente no que diz respeito a ocorrências de precipitação intensa e chuvas fortes.

É interessante destacar que, mesmo com todas as iniciativas e trabalhos que demonstram a vulnerabilidade na cidade do Recife, muitos planos de gestão ainda não foram implementados. E, se tratando da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, mesmo com todos os alarmes quanto a possíveis inundações, os planos de gestão elaborados ao Recife não contemplam essa região acarretando prejuízos quanto ao planejamento e segurança frente à crise climática.

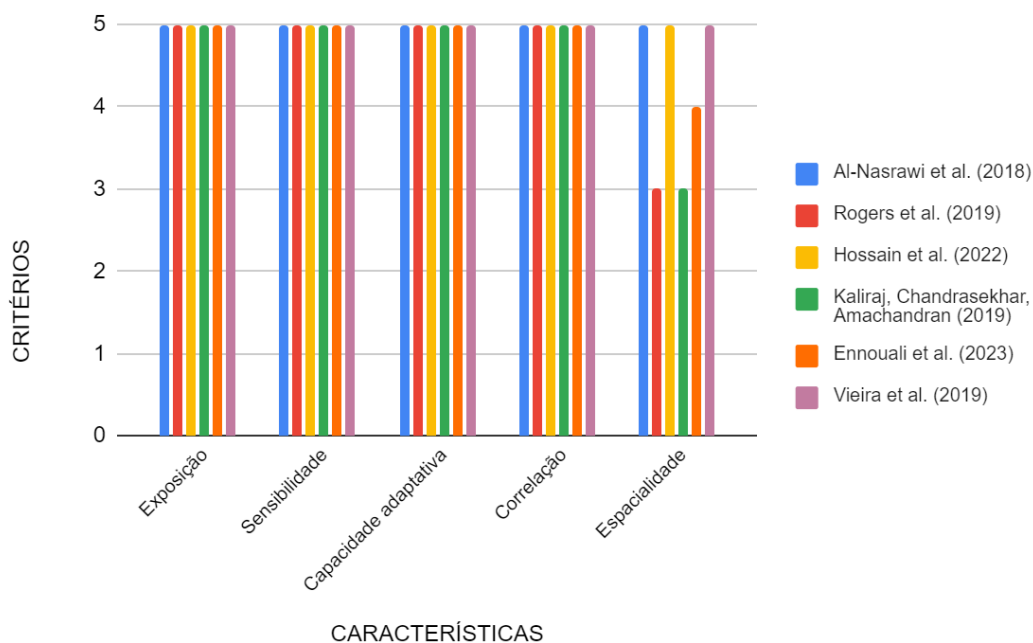
#### **5.2.4. Ferramentas direcionadas à Erosão Costeira**

Foram identificadas 6 ferramentas que possibilitam a análise relacionada à Erosão Costeira. Dessas ferramentas, 4 também foram incorporadas às mudanças climáticas por apresentar instrumentos e variáveis abrangiam a temática (AL-NASWARI *et al.*, 2018; ROGERS *et al.*, 2019; HOSSAIN *et al.*, 2022; ENNOUALI *et al.*, 2023) a qual foram descritas anteriormente. Desse modo, nesta seção será dado maior detalhamento à ferramenta proposta por Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) e Vieira *et al.* (2019).

Na categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”, todas as 5 ferramentas atenderam

completamente aos quesitos de exposição, sensibilidade, capacidade adaptativa e correlação (Gráfico 8) Quando observada a espacialidade das ferramentas propostas por Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) e Rogers *et al.* (2019), elas apresentaram um caráter regional. Ressalta-se que, a ferramenta de Vieira *et al.* (2019) possui uma abrangência global. Os autores destacam que sua ferramenta é adequada para a análise da distribuição global da vulnerabilidade da erosão costeira, apresentando métodos de análise válidos para definição da vulnerabilidade.

Gráfico 8. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.

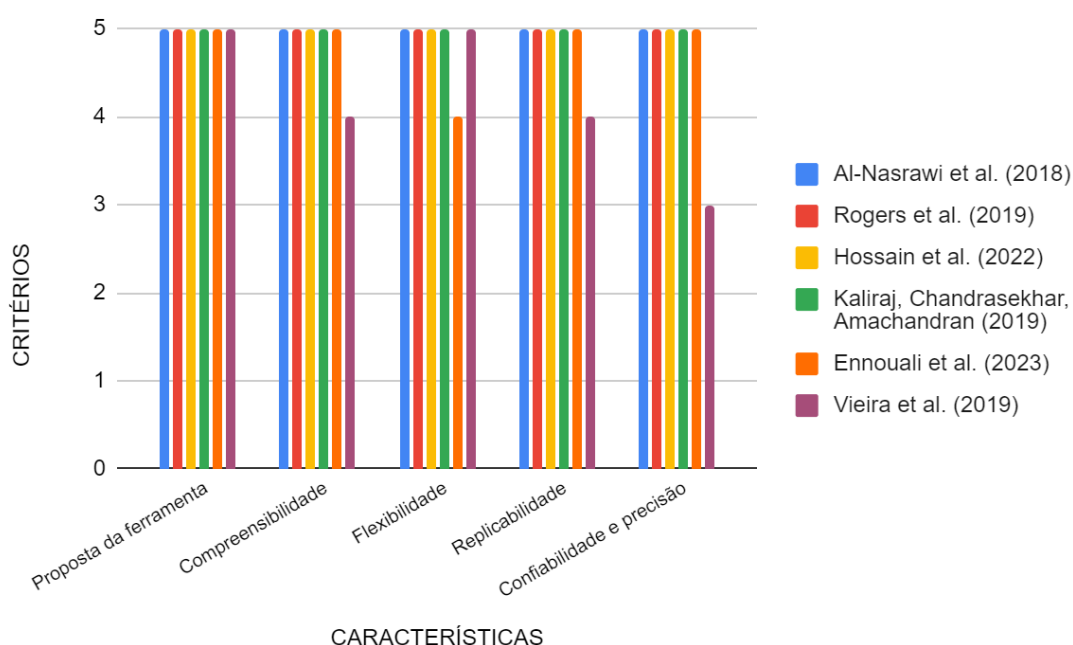


Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Quanto às “Características de execução da ferramenta”, a ferramenta proposta por Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) atenderam completamente os critérios estabelecidos (Gráfico 9). Ressalta-se ainda, que a ferramenta é aplicável a demais estuários tropicais, além de conseguir gerar dados confiáveis e robustos aos tomadores de decisão. De acordo com os autores, a utilização do sensoriamento remoto associado ao Índice de Vulnerabilidade Costeira, corrobora para a identificação de habitats costeiros vulneráveis, podendo-se também incorporar informações por meio de indicadores que possam facilitar o entendimento de tomadores de decisão, bem como corroborar para o planejamento ambiental sustentável.

Por mais que a ferramenta proposta por Vieira *et al.* (2019) possibilite a utilização de um conjunto diverso de variáveis e parâmetros para a análise da erosão costeira, os resultados gerados com a ferramenta por algumas vezes não são precisos. Segundo os autores, pode ocorrer de se utilizar os mesmos parâmetros e gerar resultados com algumas diferenças significativas, devendo o usuário optar pela melhor opção de acordo com o contexto utilizado.

Gráfico 9. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”.

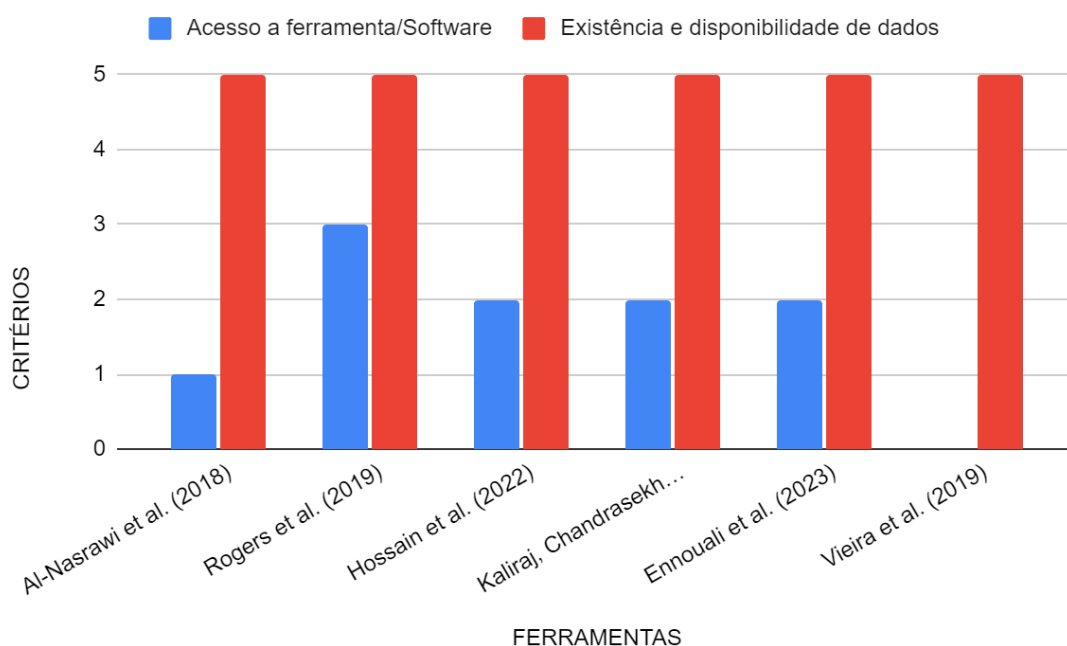


Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Quanto à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”, todas as ferramentas apresentadas, com exceção a de Vieira *et al.* (2019), dispõem de banco de dados de fácil entendimento, bem como fácil disponibilização (Gráfico 10). Além disso, todas as ferramentas fizeram uso de software comercial, uma vez que quanto ao georreferenciamento, eles apresentam maior resolução e funcionalidades.

Destaca-se que, a ferramenta de Vieira *et al.* (2019) não deixou claro em seu contexto qual é o software utilizado para execução da ferramenta. Sendo assim, não ocorreu a pontuação nessa característica, conforme evidenciado na Gráfico 10.

Gráfico 10. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”



Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Ter ferramentas que conseguem inferir dados de erosão costeira é fundamental para o desenvolvimento de ações na gestão integrada. De acordo com Rangel-Buitrago, Neal e Jonge (2020), fazer uso de ferramentas e modelos que consigam projetar os níveis de erosão na zona costeira favorece a política de antecipação. Ou seja, os tomadores conseguirão implementar ações antes que a vulnerabilidade tenda a aumentar, acarretando mais prejuízos ambientais e ao ser humano. Além disso, os autores destacam a necessidade de se trabalhar com a erosão costeira na gestão integrada, uma vez que essa vulnerabilidade está associada tanto aos processos naturais, como são intensificadas por ações humanas.

Devido a isso, Ahmed *et al.* (2021) pontuam que, quantos mais informações e dados disponíveis tiverem para avaliação da vulnerabilidade em relação à erosão, melhor será o entendimento em relação às causas e consequências da erosão na localidade.

Todas as categorias de análise das ferramentas quanto à erosão costeira, apresentadas nessa seção, foram dadas como satisfatórias para utilização relacionada à vulnerabilidade (Quadro 9).

Quadro 9. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Erosão Costeira

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTAS					
		Al-Nasrawi <i>et al.</i> (2018)	Rogers <i>et al.</i> (2019)	Hossain <i>et al.</i> (2022)	Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019)	Ennouali <i>et al.</i> (2023)	Vieira <i>et al.</i> (2019)
Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade	Exposição	5	5	5	5	5	5
	Sensibilidade	5	5	5	5	5	5
	Capacidade adaptativa	5	5	5	5	5	5
	Correlação	5	5	5	5	5	5
	Espacialidade	5	3	5	3	4	5
Características de execução da ferramenta	Proposta da ferramenta	5	5	5	5	5	5
	Compreensibilidade	5	5	5	5	5	4
	Flexibilidade	5	5	5	5	4	5
	Replicabilidade	5	5	5	5	5	4
	Confiabilidade e precisão	5	5	5	5	5	3
Características da ferramenta/programas e dados	Acesso a ferramenta/ <i>Software</i>	1	3	2	2	2	0
	Existência e disponibilidade de dados	5	5	5	5	5	5
<b>Somatório dos critérios</b>		56	56	57	55	55	51

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Como dito anteriormente, a erosão costeira tem como fatores condicionantes tanto as mudanças climáticas quanto as ações antrópicas. Sendo assim, destaca-se que o estuário do Rio Capibaribe é o que apresenta maior grau de urbanização no estado de Pernambuco (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Com todas as pressões exercidas ao estuário, todas as ferramentas apresentadas nesta seção apresentam potencial de utilização no estuário do Rio Capibaribe, com exceção da ferramenta de Vieira *et al.* (2019).

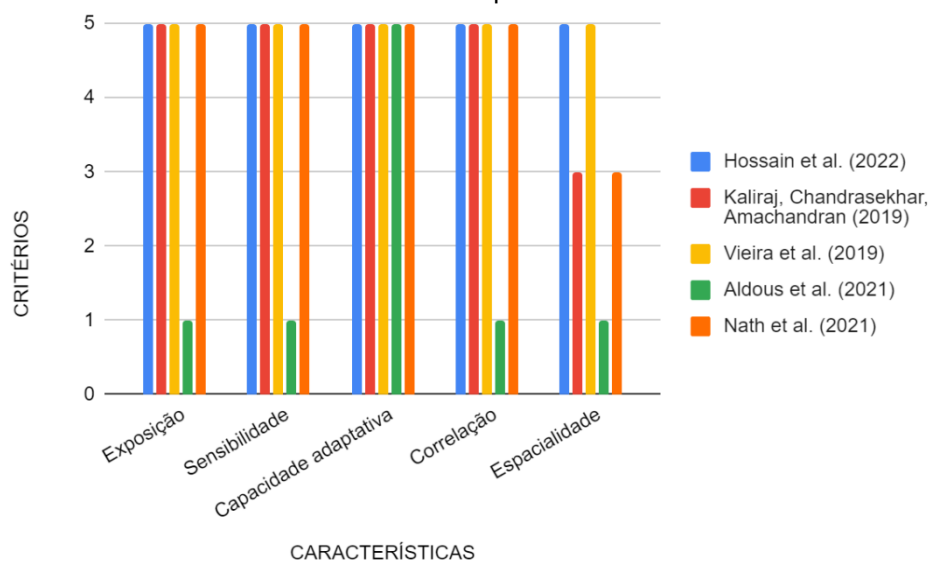
Devido às especificidades do estuário do Rio Capibaribe, é necessário esclarecer que, devido ao grau de urbanização, às margens do baixo Capibaribe, pouco sofrerão com a erosão costeira, tendo principal déficit em relação à perda de vegetação de mangue. A erosão pode ser mais acentuada na porção do alto Capibaribe que ainda apresenta trechos não edificados em suas margens. Assim, o mais importante a ser levado em consideração ao executar essas possíveis ferramentas na região, é a avaliação do grau de assoreamento dessa região, tendo em vista que há um plano de navegabilidade.

#### **5.2.5. Ferramentas direcionadas à Degradação Ambiental**

Foram destacadas 5 ferramentas para utilização na análise da degradação ambiental, sendo elas as propostas por Hossain *et al.* (2022), Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019), Vieira *et al.* (2019), Aldous *et al.* (2021) e Nath *et al.* (2021).

Quando observada a categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”, destaca-se a ferramenta proposta por Aldous *et al.* (2021) em que, mesmo abordando a vulnerabilidade, os autores não evidenciaram os componentes de exposição e sensibilidade. Essa ferramenta considerou apenas identificar e estabelecer ações visando à adaptação (Gráfico 11).

Gráfico 11. Ferramentas de degradação ambiental em relação à categoria de “Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade”.

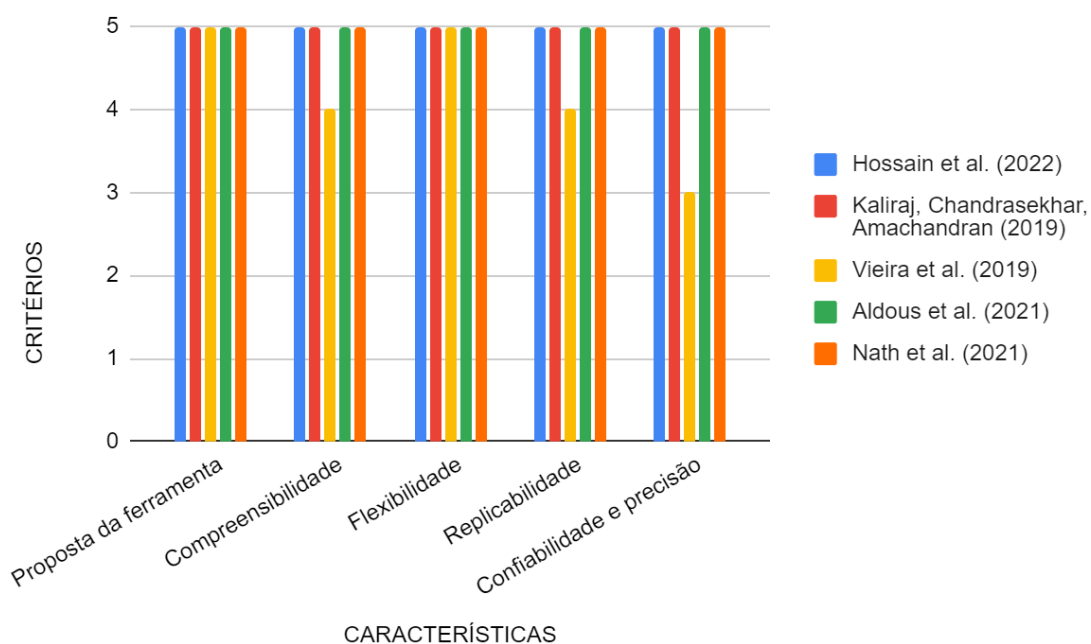


Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Quando visto a característica de espacialidade, a ferramenta de Aldous *et al.* (2021) considera apenas o local, enquanto as ferramentas de Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019) e Nath *et al.* (2021) tiveram abrangência regional. Nath *et al.* (2021) destacam que sua ferramenta proporciona a centralização e descentralização de variáveis relacionadas à costa. Sendo assim, os tomadores conseguem obter um panorama regional da localidade.

Ao analisar a categoria de “Características de execução da ferramenta”, todas atenderam ao objetivo proposto, bem como apresentaram flexibilidade de incorporar novos parâmetros e peculiaridades de outros estuários em seu escopo (Gráfico 12). Ainda, os déficits nessa categoria são observados na ferramenta de Vieira *et al.* (2019), a qual foi detalhada na seção anterior.

Gráfico 12. Ferramentas de erosão costeira em relação à categoria de “Características de execução da ferramenta”

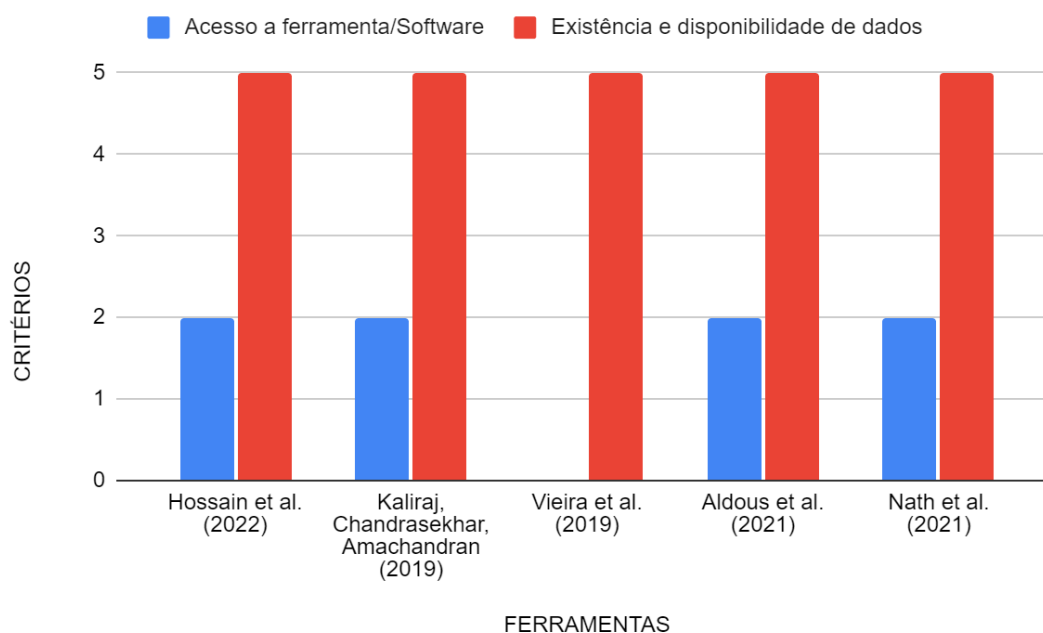


Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Quando observada a categoria de “Características da ferramenta/programas e dados), todas as ferramentas, com exceção a ferramenta de Vieira *et al.* (2019) que não detalhou o *software* utilizado, fizeram uso do ArcGIS, de acesso pago, em suas diferentes versões. Devido a isso, as ferramentas nessa característica foram pontuadas com 2 (Gráfico 13), uma vez que mesmo tendo acesso pago é um *software* com ampla divulgação quanto sua utilização favorecendo o entendimento ao seu uso.

Em se tratando da disponibilização dos dados, todas as ferramentas foram contempladas satisfatoriamente por esse requisito (Gráfico 13). Mesmo não apresentando o *software* utilizado, Vieira *et al.* (2019) fizeram a disponibilização de seus dados por meio do Fundo de Recursos Hídricos de São Paulo, bem como os dados coletados por georreferenciamento, que foram transformados em mapas temáticos para acesso à toda população. Na mesma diretriz, Ennouali *et al.* (2023) fizeram a inserção de suas informações em um banco de dados de acesso gratuito para toda sociedade civil e tomadores de decisão.

Gráfico 13. Ferramentas de degradação ambiental em relação à categoria de “Características da ferramenta/programas e dados”



Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Ter os dados disponíveis é fundamental para guiar novas ações e até mesmo prevenir futuros riscos ao meio ambiente. Em um estudo de caso no Paraná, Noli, Ferentz e Garcias (2020) destacaram que quanto mais acessível e completo for o banco de dados, melhor será o suporte ao planejamento de ações frente a uma vulnerabilidade. Outro ponto destacado pelos autores é a importância dos incentivos governamentais para fazer uso e disponibilização de dados para que as demais pessoas possam utilizar. Uma vez que, quanto mais ações e soluções forem pensadas em prol de uma problemática, melhor para o meio ambiente e para o ser humano.

Realizada as análises das ferramentas 5 associadas à degradação ambiental, apenas 3 (HOSSAIN *et al.*, 2022; KALIRAJ, CHANDRASEKHAR, AMACHANDRAN, 2019; NATH *et al.*, 2021) conseguem atender satisfatoriamente as categorias analisadas. Sendo assim, sua utilização pode ser recomendada a demais estuários tropicais. Ressalta-se ainda, que devido ao entendimento da vulnerabilidade ser associado à exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, a ferramenta proposta por Aldous *et al.* (2021) não consegue atender a expectativa integradora para análise da vulnerabilidade, conforme visto no Quadro 10.

Quadro 10. Análise das ferramentas direcionadas à abordagem de Degradação Ambiental

CATEGORIAS	CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTAS				
		Hossain <i>et al.</i> (2022)	Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran (2019)	Vieira <i>et al.</i> (2019)	Aldous <i>et al.</i> (2021)	Nath <i>et al.</i> (2021)
Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade	Exposição	5	5	5	1	5
	Sensibilidade	5	5	5	1	5
	Capacidade adaptativa	5	5	5	5	5
	Correlação	5	5	5	1	5
	Espacialidade	5	3	5	1	3
Características de execução da ferramenta	Proposta da ferramenta	5	5	5	5	5
	Compreensibilidade	5	5	4	5	5
	Flexibilidade	5	5	5	5	5
	Replicabilidade	5	5	4	5	5
	Confiabilidade e precisão	5	5	3	5	5
Características da ferramenta/programas e dados	Acesso a ferramenta/ <i>Software</i>	2	2	0	2	2
	Existência e disponibilidade de dados	5	5	5	5	5
<b>Somatório dos critérios</b>		<b>57</b>	<b>55</b>	<b>51</b>	<b>41</b>	<b>55</b>

Fonte: Elaboração dos autores (2023)

Em se tratando do estuário do Rio Capibaribe, as ferramentas que melhor que tiveram maior desempenho na análise, conforme indicado anteriormente, podem ser replicadas na região. Suas utilizações vêm a agregar na geração de dados relacionadas ao uso e cobertura do solo, vulnerabilidades de hábitat e qualidade da água. Ter essas ferramentas que possam dar suporte à análise das vulnerabilidades relacionadas à degradação ambiental, auxiliam na investigação da proporção em que o crescimento urbano, principalmente, está impactando o estuário. De acordo com Magarotto e Costa (2021), a cidade do Recife vem sofrendo progressivamente com diminuição e degradação de sua região estuarina devido à forte especulação imobiliária associada à falta de saneamento básico.

No que tange a avaliação da qualidade hídrica da região, é fundamental ter ferramentas que possam ser precisas e que consigam configurar um panorama da qualidade da água preciso. Por ser muito urbanizado, alguns fatores de planejamento urbano ficam a desejar na região, onde por muitas vezes ocorre o lançamento direto de efluentes domésticos no corpo d'água do estuário do Capibaribe. Esse impacto, faz com que em alguns pontos do estuário as condições hídricas fiquem críticas com a oxigenação inferior a 2 mg L<sup>-1</sup>, configurando hipóxia, podendo também chegar à anóxia (NASCIMENTO *et al.*, 2020; NASCIMENTO; HANAI; GUILHERME, 2021).

### **5.3. Considerações finais**

Diversas são as ferramentas de modelagem para a gestão de estuários tropicais tendo como base as vulnerabilidades ambientais existentes nessas regiões. O que pôde ser observado por meio deste estudo, é que a maioria dessas ferramentas apresentam ênfase nas mudanças climáticas, no que tange ao aumento do nível do mar, às inundações costeiras e aos efeitos de eventos climáticos extremos.

De acordo com sua finalidade, os instrumentos utilizados nas ferramentas irão mudar, contendo dados relacionados a parâmetros físicos, químicos, biológicos e geomorfológicos, por exemplo. E, sua forma de abordagem também será direcionada para uma modelagem ambiental ou

numérica. Além disso, existem opções de *softwares* que dão suporte a elaboração dessas ferramentas tanto de acesso gratuito como pago. Os que requerem pagamento, são escolhidos principalmente por apresentarem maiores versatilidades e resoluções no que tange o georreferenciamento.

De modo geral, observa-se uma escassez de dados tanto na literatura científica quanto ao investigar bases indexadoras, bem como em publicações que não percorrem o processo editorial convencional (artigos científicos), quando observado um modelo de gestão para vulnerabilidade ambiental nos estuários tropicais. Assim, disseminar informações sobre as ferramentas além do âmbito acadêmico é fundamental e servirá de suporte aos tomadores de decisão para salvaguardar essas regiões. Ressalta-se ainda, que todas as ferramentas elencadas nesta pesquisa são fundamentais para incorporar um modelo de gestão, visto que eles levam em consideração aspectos eminentes e importantes, tais como o aumento do nível do mar, erosão costeira e degradação ambiental.

A análise das ferramentas, por meio da Matriz de Pugh, permitiu verificar as potencialidades e fragilidades de cada uma delas. Ainda, se conseguiu observar as que conseguem ser replicadas e de fácil compreensão para os atores envolvidos na gestão. Por serem direcionadas a uma vulnerabilidade ambiental, a junção de ferramentas que possam analisar mais vulnerabilidades se torna essencial para compor o modelo conceitual pensando no estuário do Capibaribe, uma vez que são diversas as possíveis vulnerabilidades existentes nessas regiões.

## Referências bibliográficas

ALDOUS, A. *et al.* Mapping complex coastal wetland mosaics in Gabon for informed ecosystem management: use of object-based classification. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 7, n. 1, p. 64-79, 2021.

ADDICOTT, E. *et al.* The intertidal plant communities in north-eastern Australia, their carbon stores and vulnerability to extreme climate events. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 30, n. 12, p. 2298–2312, 2020.

AHMED, N. *et al.* Coastal erosion vulnerability assessment along the eastern coast of Bangladesh using geospatial techniques. **Ocean & Coastal Management**, v. 199, p. 105408, 2021.

AL-NASRAWI, A. K. M.; HAMYLTON, S. M.; JONES, B. G. An assessment of anthropogenic and climatic stressors on estuaries using a spatio-temporal GIS-modelling approach for sustainability: Towamba estuary, southeastern Australia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 7, 2018.

BORBOR-CORDOVA, M. J. *et al.* An operational framework for urban vulnerability to floods in the Guayas estuary region: The Duran case study. **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10292, 2020.

CEREZINI, M. T.; ROSSO, M.; HANAI, F. Y. Ferramentas de planejamento e gestão de recursos hídricos: proposta metodológica para levantamento e análise. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1-8, 2017.

COSTA, L.; KROPP, J. P. Linking components of vulnerability in theoretic frameworks and case studies. **Sustainability science**, v. 8, p. 1-9, 2013.

DOUGHTY, C. L. *et al.* Evaluating regional resiliency of coastal wetlands to sea level rise through hypsometry-based modeling. **Global Change Biology**, v. 25, n. 1, p. 78–92, 2019.

ENNOUALI, Z. *et al.* Mapping Coastal vulnerability using machine learning algorithms: A case study at North coastline of Sebou estuary, Morocco. **Regional Studies in Marine Science**, v. 60, p. 102829, 2023.

FREEMAN, A. M. *et al.* A review of how uncertainties in management decisions are addressed in coastal Louisiana restoration. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1528, 2021.

FREY, D. D. *et al.* The Pugh controlled convergence method: model-based evaluation and implications for design theory. **Research in Engineering Design**, v. 20, p. 41-58, 2009.

HEIMHUBER, V. *et al.* A consistent climate change baseline for estuarine impact and adaptation planning along the New South Wales coastline. **Australasian Coasts and Ports 2019 Conference**, n. September, p. 553–559, 2019.

HOSSAIN, S. A. *et al.* Coastal vulnerability assessment of India's Purba Medinipur-Balasore coastal stretch: A comparative study using empirical models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 77, 1 jul. 2022.

ICLEI. **Plano Local de Ação Climática da Cidade de Recife 2020**. Prefeitura de Recife, Urban Leeds. ONU Habitat, ICLEI. 81p. 2020.

IMANI, M. *et al.* Risk assessment of coastal flooding under different inundation situations in southwest of taiwan (Tainan city). **Water**, v. 13, n. 6, p. 880, 2021.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; AMACHANDRAN, K. K. Coastal habitat vulnerability of southern India: A multiple parametric approach of GIS based HVI (habitat vulnerability index) model. **Geogr Fis Din Quat**, v. 42, p. 27-41, 2019.

KHALIL, U. *et al.* Investigating an innovative sea-based strategy to mitigate coastal city flood disasters and its feasibility study for Brisbane, Australia. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

KODINARIYA, T. M.; MAKWANA, P. R. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. **International Journal**, v. 1, n. 6, p. 90-95, 2013.

LEÃO, E. B. S.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, L. F. Recife: A climate action profile. **Citeis**, v. 116, p. 103270, 2021.

MAGAROTTO, M.G.; COSTA, M.F. Mangrove Park of Recife: A century of extreme uses and abuses (?). **Regional Studies in Marine Science**, v. 42, p. 101654, 2021.

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, p. 100545, 2023.

NASCIMENTO, R. C. M.; COSTA, C. R.; MAGAROTTO, M.; SILVA-CAVALCANTI, J.S.; COSTA, M.F. Qualidade da água de três estuários tropicais expostos a diferentes níveis de urbanização. **Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 20, n. 3, p. 169 – 178, 2020.

NASCIMENTO, R. C. M.; HANAI, F. Y.; GUILHERME, B.C. Estuário do Rio Capibaribe: problemas de uma bacia hidrográfica urbana. In: Karla Maria Silva de Faria; Silas Pereira Trindade. (Org.). **Planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas**. 1 ed. Goiânia: C&A Alfa Comunicação, v. 1, p. 185-195, 2021.

NATH, A. *et al.* Identification of the coastal hazard zone between the areas of Rasulpur and Subarnarekha estuary, east coast of India using multi-criteria evaluation method. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 7, p. 2251-2265, 2021.

NÓBREGA, R. S. *et al.* Flood Events in the City of Recife, Northeastern Brazil: History and Contemporary Risks. In: **Urban Flooding in Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 171-192.

NOLI, M.F. *et al.* Disponibilidade de dados abertos para a resiliência às inundações em Curitiba (Paraná). **Revista de Morfologia Urbana**, v. 8, n. 2, p. e00139-e00139, 2020.

OLABANJI, O.; MPOFU, K. Pugh matrix and aggregated by extent analysis using trapezoidal fuzzy number for assessing conceptual designs. **Decision science letters**, v. 9, n. 1, p. 21-36, 2020.

OLIVEIRA FILHO, J.A.T.; PERES, F.F.F. Desenvolvimento de Soluções SIG para a Administração Pública Brasileira—Uma Revisão Sistemática: Development of GIS Solutions for the Brazilian Public Administration—A Systematic Review. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 9, n. 2, p. 69-82, 2023.

- PIKE, A. Whither regional studies? **Regional Studies**, v. 41, n. 9, p. 1143-1148, 2007.
- PUGH, S. Design decision-how to succeed and know why. In: **Session Sa, Paper 8, Design Engineering Conference**, 1981.
- RANGEL-BUITRAGO, N.; NEAL, W. J.; JONGE, V. N. Risk assessment as tool for coastal erosion management. **Ocean & Coastal Management**, v. 186, p. 105099, 2020.
- RAW, J. L. *et al.* Blue carbon sinks in South Africa and the need for restoration to enhance carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 859, 10 fev. 2023.
- ROGERS, K. *et al.* Impacts and adaptation options for estuarine vegetation in a large city. **Landscape and Urban Planning**, v. 182, n. October 2017, p. 1–11, 2019.
- SREEJITH, S. S.; MATHIRAJAN, M. A modified Pugh matrix method for continuous performance evaluation of employees. **South Asian Journal of Human Resources Management**, v. 9, n. 1, p. 149-163, 2022.
- VAN COPPENOLLE, R.; TEMMERMAN, S. Identifying global hotspots where coastal wetland conservation can contribute to nature-based mitigation of coastal flood risks. **Global and Planetary Change**, v. 187, n. December 2019, p. 103125, 2020.
- VIEIRA, J. G. M. S. *et al.* An integrated approach to assess the vulnerability to erosion in mangroves using GIS models in a tropical coastal protected area. **International Journal of Climate Change Strategies and Management**, v. 11, n. 2, p. 289–307, 2019.

## 6. Proposta do Modelo Conceitual para vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais



Garças repousando em bosque de mangue no estuário do Rio Capibaribe (PE)

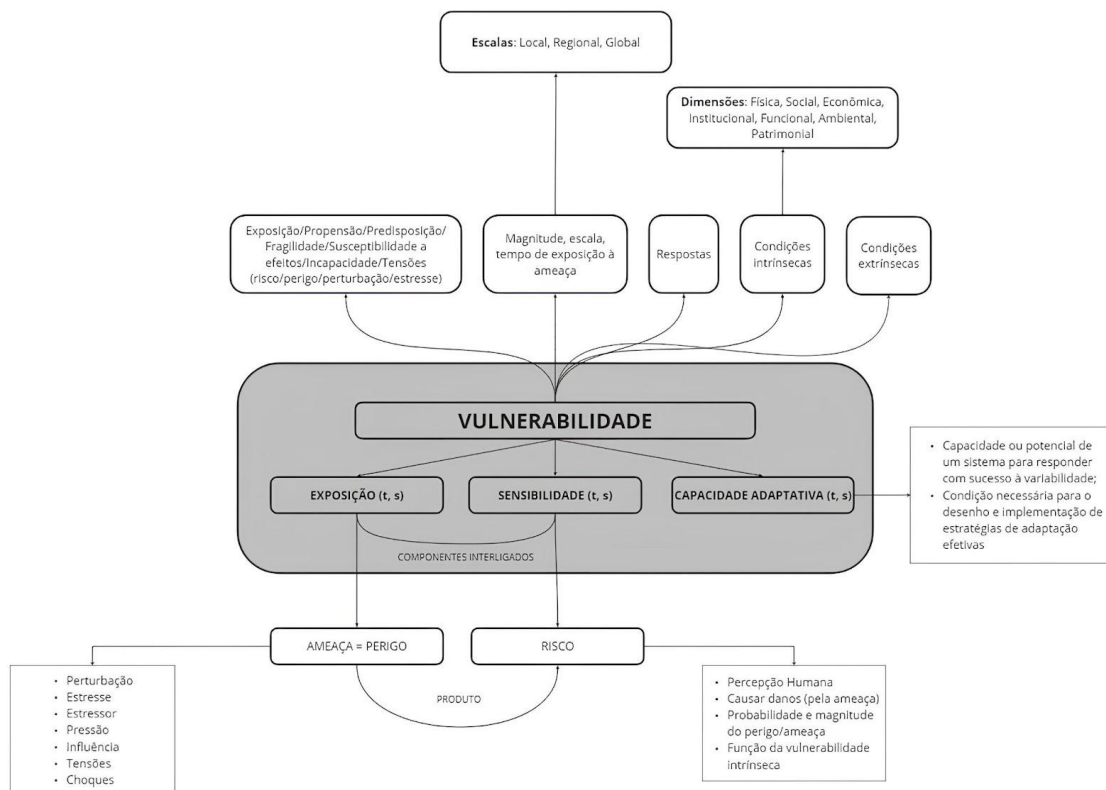
Fonte da imagem: Regina Nascimento (2022)

## 6.1. Modelo conceitual teórico da vulnerabilidade

Para iniciar as discussões referentes à elaboração do modelo de gestão visando à análise da vulnerabilidade em estuários, é fundamental considerar os componentes existentes da vulnerabilidade e suas respectivas inter-relações a partir dos conteúdos abordados, conceitos e variáveis previamente apresentados e discutidos por Turner *et al.* (2003), Adger (2006), Gallopín (2006) e O'Brien *et al.* (2007) e Polsky *et al.* (2007).

O modelo conceitual teórico da vulnerabilidade proposto aborda os principais elementos envolvidos à temática da vulnerabilidade (Figura 10). Por não apresentar consenso relacionado à definição da vulnerabilidade, o modelo traz a centralidade relacionada aos componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, os quais, de acordo com a literatura estudada, é a forma mais abordada e aceita da compreensão da vulnerabilidade.

Figura 10. Modelo conceitual da vulnerabilidade com respectivos componentes e relações existentes.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

No modelo conceitual, observa-se que a interpretação da vulnerabilidade corresponde à centralidade dos componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa de um determinado sistema (destacados em cinza). Ainda, esses componentes estão diretamente relacionados ao tempo e espaço.

A exposição pode ser considerada como a natureza e o grau em que o sistema sofre frente a uma ameaça. Essa ameaça, por sua vez, consiste em perturbações, estresse, estressores, tensões. Enquanto a sensibilidade pode ser considerada como o grau em que o sistema é afetado por essas ameaças. Os componentes de exposição e sensibilidade estão interligados, uma vez que, quanto maior for a exposição a uma ameaça/perigo, maior será a sensibilidade desse sistema (maior risco). Desse modo, quanto mais o sistema for exposto e sensível a uma ameaça, sua vulnerabilidade tenderá ser maior. E, quanto mais o sistema conseguir se adaptar, sua vulnerabilidade será menor.

A capacidade adaptativa, por sua vez, é dada como a capacidade em que o sistema evolui conseguindo acomodar a variabilidade ambiental (riscos ou mudanças ambientais). As adaptações exercidas podem ser naturais do próprio sistema ou externas. Ressalta-se que a capacidade adaptativa externa ao sistema diz respeito a estratégias e ferramentas de gerenciamento elaboradas pelo ser humano para minimizar as vulnerabilidades existentes no sistema.

Com isso, a compreensão da vulnerabilidade envolve aspectos dos seus principais componentes (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa), bem como a identificação de sua magnitude, escalas espaciais e temporais, além das condições intrínsecas e extrínsecas do sistema.

Devido à amplitude da vulnerabilidade, quando observadas as condições intrínsecas do sistema, pode-se identificar algumas dimensões, sendo elas: física, social, econômica, institucional, funcional, ambiental e patrimonial. A partir disso, as ênfases e os direcionamentos de pesquisas podem ser realizados para o aprofundamento da compreensão e análise da vulnerabilidade. Mas, é importante destacar que, por mais que existam dimensões distintas, por muitas vezes as análises da vulnerabilidade acabam envolvendo aspectos de outras dimensões, como é o caso da ambiental, em que as vulnerabilidades existentes acabam sendo potencializadas com as dimensões sociais e econômicas, por exemplo.

A elaboração do modelo conceitual teórico da vulnerabilidade vem a contribuir significativamente no entendimento dos conceitos que circundam a temática que, por muitas vezes, não se tem consenso em sua definição, conforme discutido no Capítulo 3 desta tese.

## **6.2. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais**

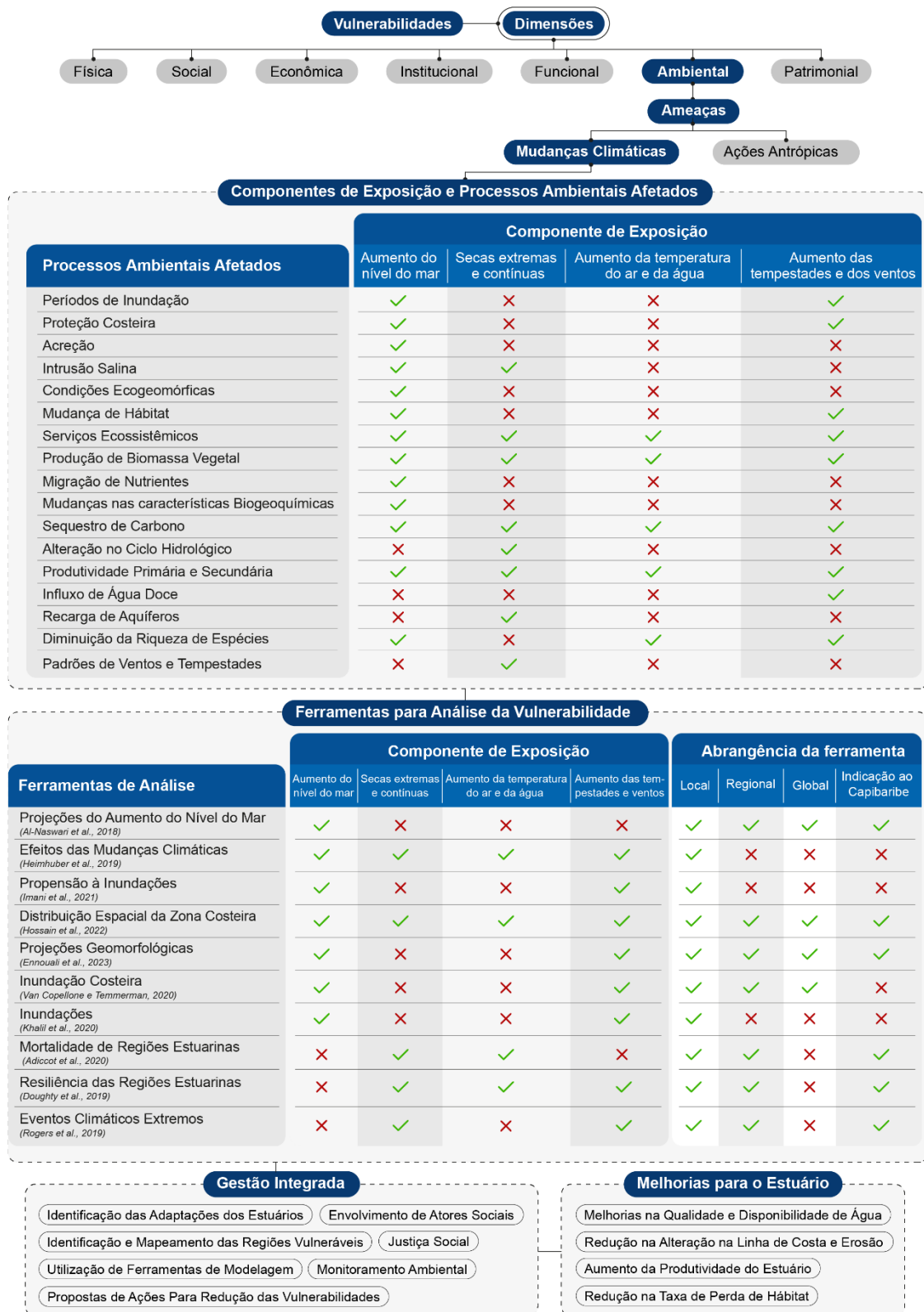
Com a abordagem teórica estabelecida na seção anterior, foi possível estruturar o modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade em estuários tropicais. Devido às diversas abordagens e dimensões da vulnerabilidade, o modelo conceitual proposto restringe-se à dimensão ambiental. Desse modo, aspectos aprofundados em relação às demais dimensões não são considerados no modelo. Ainda, os conteúdos existentes no modelo conceitual foram provenientes do levantamento de informações e revisões bibliográficas abordados no decorrer da Tese, em que foi possível identificar as potenciais vulnerabilidades ambientais existentes especificamente em estuários tropicais.

A identificação das vulnerabilidades possibilitou a compreensão dos processos ambientais afetados de acordo com a ameaça existente, bem como as possíveis ferramentas de análise direcionadas a cada componente de exposição da vulnerabilidade ambiental. Assim, as perspectivas para gestão e melhorias ambientais de estuários tropicais puderam ser elencadas.

O modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais apresenta quatro unidades integradoras, sendo elas concebidas de forma sequencial: (i) componentes de exposição e processos ambientais afetados; (ii) ferramentas para análise da vulnerabilidade; (iii) gestão integrada; (iv) melhorias para o estuário. Ainda, o modelo comporta as escalas local, regional e global quanto à abrangência de adoção das ferramentas de análise das vulnerabilidades, bem como a indicação da possível utilização específica no estuário do Rio Capibaribe.

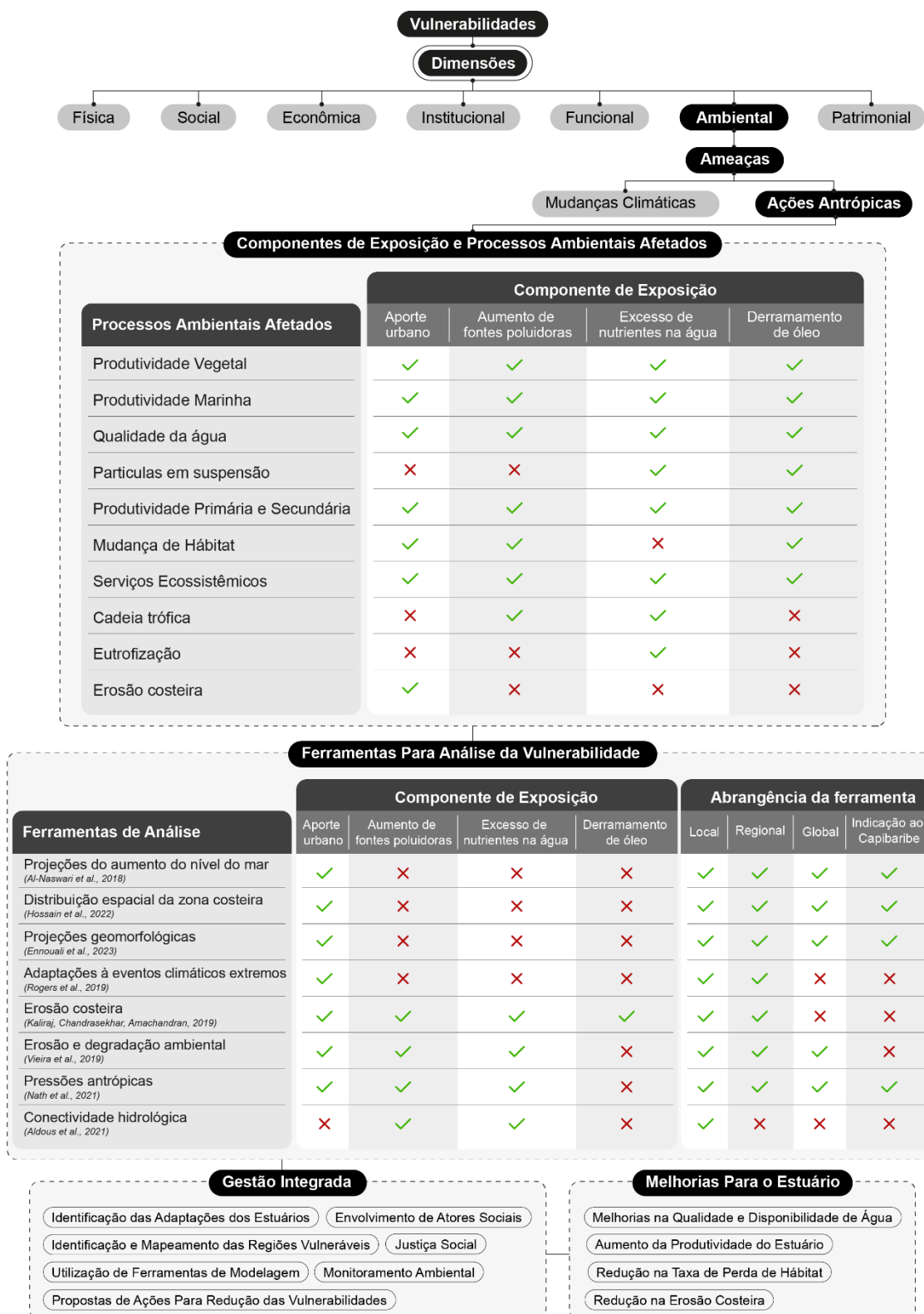
Ressalta-se que, devido às vulnerabilidades identificadas serem agrupadas em duas ameaças distintas (mudanças climáticas e ações antrópicas), foram desenvolvidos na Tese dois modelos conceituais para cada grupo de ameaças (Figura 11 e Figura 12), os quais serão detalhados a seguir.

Figura 11. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade frente à ameaça das mudanças climáticas, considerando (✓) como sim/presente e (x) como não/ausente.



Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Figura 12. Modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade frente à ameaça das ações antrópicas, considerando (✓) como sim/presente e (✗) como não/ausente.



Fonte: Elaboração dos autores (2024).

## **6.2.1. Unidade Integradora - Componentes de exposição e processos ambientais afetados**

A apresentação e a discussão do modelo conceitual iniciam-se por essa unidade integradora, devido à necessidade de identificar as vulnerabilidades ambientais existentes para desenvolver ações de planejamento e gestão para minimização dos impactos e consequentes melhorias das condições ambientais dos estuários.

### **6.2.1.1. Mudanças climáticas**

Foram identificados quatro componentes de exposição frente à ameaça das mudanças climáticas nos estuários tropicais (aumento do nível do mar; secas extremas e contínuas; aumento da temperatura da água e do mar; aumento de tempestades e ventos) e dezessete processos ambientais afetados (períodos de inundação, proteção costeira, acreção, intrusão salina, condições ecogeomórficas, mudança de hábitat, serviços ecossistêmicos, produção de biomassa vegetal, migração de nutrientes, mudanças nas características biogeoquímicas, sequestro de carbono, alteração no ciclo hidrológico, produtividade primária e secundária, influxo de água doce, recarga de aquíferos, diminuição da riqueza de espécies, padrões de ventos e tempestades). A verificação dessas relações possibilita a compreensão das consequências relacionadas à existência das vulnerabilidades em região estuarina. Ou seja, é possível verificar quais prejuízos do aumento do nível do mar, por exemplo, têm relação com o estuário e sua zona costeira.

Atualmente, os maiores registros das vulnerabilidades, relacionados à ameaça das mudanças climáticas, dizem respeito ao aumento do nível do mar, conforme indicado por Loi, Sang, Huy (2020), Khalil *et al.* (2020), Ghalambor *et al.* (2021), Imani *et al.* (2021), Bera *et al.* (2022) e Raw *et al.* (2023). Devido a isso, existem mais informações em relação a seus processos ambientais afetados, conforme pode-se verificar no modelo conceitual proposto.

Dos dezessete processos ambientais afetados em decorrência das ameaças das mudanças climáticas, quatro estão presentes em todos os componentes de exposição exemplificados. Sendo eles: os serviços

ecossistêmicos; a produção de biomassa vegetal; a migração de nutrientes; o sequestro de carbono; e a produtividade primária e secundária (Figura 13).

Figura 13. Componentes de exposição e processos ambientais afetados frente à ameaça das mudanças climáticas.

Processos Ambientais Afetados	Componente de Exposição			
	Aumento do nível do mar	Secas extremas e contínuas	Aumento da temperatura do ar e da água	Aumento das tempestades e dos ventos
Períodos de Inundação	✓	✗	✗	✓
Proteção Costeira	✓	✗	✗	✓
Acreção	✓	✗	✗	✗
Intrusão Salina	✓	✓	✗	✗
Condições Ecogeomórficas	✓	✗	✗	✗
Mudança de Hábitat	✓	✗	✗	✓
Serviços Ecossistêmicos	✓	✓	✓	✓
Produção de Biomassa Vegetal	✓	✓	✓	✓
Migração de Nutrientes	✓	✗	✗	✗
Mudanças nas características Biogeoquímicas	✓	✗	✗	✗
Sequestro de Carbono	✓	✓	✓	✓
Alteração no Ciclo Hidrológico	✗	✓	✗	✗
Produtividade Primária e Secundária	✓	✓	✓	✓
Influxo de Água Doce	✗	✗	✗	✓
Recarga de Aquíferos	✗	✓	✗	✗
Diminuição da Riqueza de Espécies	✓	✗	✓	✓
Padrões de Ventos e Tempestades	✗	✓	✗	✗

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

A identificação e a relação do componente de exposição da vulnerabilidade com os processos ambientais afetados favorecem aos tomadores de decisão a possibilidade de vislumbrar o que acontece com o estuário. Ainda, recomenda-se o incentivo a pesquisas locais para identificar possíveis outras vulnerabilidades associadas às mudanças climáticas nas regiões de cada estuário. Esses incentivos podem e devem ocorrer em suas diversas esferas, seja municipal, governamental, federal ou até mesmo do terceiro setor.

Quanto mais exposto à vulnerabilidade o estuário estiver, mais intensos serão os processos ambientais que serão afetados. Além disso, a duração em que o estuário está exposto também é levada em consideração. Um exemplo da relação entre o componente de exposição e os processos afetados é o de Guerra-Chanis *et al.* (2022), em que os autores destacam que a exposição a eventos climáticos extremos afeta o processo de intrusão salina do estuário e quanto mais intenso for, maior será a sua interferência nas taxas de evapotranspiração. Assim, quanto maior for a exposição à vulnerabilidade, maiores serão os prejuízos ambientais, podendo um processo ambiental interferir em outro, desencadeando uma sequência de prejuízos ambientais.

### 6.2.1.2. Ações antrópicas

Foram identificados quatro componentes de exposição frente à ameaça das ações antrópicas em estuários tropicais (aporte urbano; aumento de fontes poluidoras; excesso de nutrientes na água; e derramamento de óleo) e dez processos ambientais afetados (produtividade vegetal, produtividade marinha, qualidade da água, partículas em suspensão, produtividade primária e secundária, mudança de hábitat, serviços ecossistêmicos, cadeia trófica, eutrofização e erosão costeira). Destes, quatro estão relacionados a todos os componentes de exposição (produtividade vegetal, produtividade marinha, qualidade da água e serviços ecossistêmicos) (Figura 14).

Figura 14. Componentes de exposição e processos ambientais afetados frente à ameaça das ações antrópicas.

Processos Ambientais Afetados	Componente de Exposição			
	Aporte urbano	Aumento de fontes poluidoras	Excesso de nutrientes na água	Derramamento de óleo
Produtividade Vegetal	✓	✓	✓	✓
Produtividade Marinha	✓	✓	✓	✓
Qualidade da água	✓	✓	✓	✓
Partículas em suspensão	✗	✗	✓	✓
Produtividade Primária e Secundária	✓	✓	✓	✓
Mudança de Hábitat	✓	✓	✗	✓
Serviços Ecossistêmicos	✓	✓	✓	✓
Cadeia trófica	✗	✓	✓	✗
Eutrofização	✗	✗	✓	✗
Erosão costeira	✓	✗	✗	✗

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Mesmo sendo apresentados como componentes distintos, o aporte urbano está associado ao aumento de fontes poluidoras e ao excesso de nutrientes na água, uma vez que, devido ao crescimento desenfreado e mal planejado das cidades, ocorrem falhas relacionadas ao esgotamento sanitário, por exemplo.

As ações antrópicas intensificam os prejuízos principalmente no que se refere à qualidade de água e, a depender do tamanho do estuário, a perturbação pode afetar todo o sistema estuarino comprometendo mais

processos ambientais como o esgotamento de oxigênio (ARUEIRA *et al.*, 2022).

## **6.2.2. Unidade Integradora - Ferramentas para análise da vulnerabilidade**

A segunda unidade integradora remete as ferramentas para análise da vulnerabilidade ambiental de acordo com os componentes de exposição identificados. Assim, são apresentadas as ferramentas identificadas na literatura para análise específica das vulnerabilidades. Seus respectivos detalhes de análise e recomendações estão descritos no capítulo anterior (Capítulo 5 da Tese). Nesta unidade integradora ainda é possível observar as escalas de abrangência de cada ferramenta (local, regional e global), bem como sua possível utilização no estuário do Rio Capibaribe.

### **6.2.2.1. Mudanças climáticas**

As dez ferramentas utilizadas para o modelo são voltadas preferencialmente ao aumento do nível do mar, inundações e eventos climáticos extremos. Destas, apenas duas conseguem ser utilizadas para os quatro componentes da exposição, sendo elas as propostas por Heimhuber *et al.* (2019) e Hossain *et al.* (2022) (Figura 15).

Mesmo apresentando dez possíveis ferramentas de utilização para a análise da vulnerabilidade, nem todas apresentam o uso recomendado para aplicação. Essa constatação foi possível devido à análise das ferramentas no Capítulo 5 da Tese, em que as ferramentas propostas por Heimhuber *et al.* (2019), Imani *et al.* (2019), Van Copellone e Temmerman (2020) e Khalil *et al.* (2020) apresentavam algumas inconsistências, tanto na concepção da ferramenta, como na possibilidade de replicação a outros estuários tropicais.

Figura 15. Ferramentas para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das mudanças climáticas.

Ferramentas para Análise da Vulnerabilidade								
Ferramentas de Análise	Componente de Exposição				Abrangência da ferramenta			
	Aumento do nível do mar	Secas extremas e contínuas	Aumento da temperatura do ar e da água	Aumento das tempestades e ventos	Local	Regional	Global	Indicação ao Capibaribe
Projeções do Aumento do Nível do Mar <i>(Al-Naswari et al., 2018)</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Efeitos das Mudanças Climáticas <i>(Heimhuber et al., 2019)</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Propensão à Inundações <i>(Imani et al., 2021)</i>	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Distribuição Espacial da Zona Costeira <i>(Hossain et al., 2022)</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Projeções Geomorfológicas <i>(Ennouali et al., 2023)</i>	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Inundação Costeira <i>(Van Copellone e Temmerman, 2020)</i>	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Inundações <i>(Khalil et al., 2020)</i>	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Mortalidade de Regiões Estuarinas <i>(Adiccol et al., 2020)</i>	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
Resiliência das Regiões Estuarinas <i>(Doughty et al., 2019)</i>	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Eventos Climáticos Extremos <i>(Rogers et al., 2019)</i>	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Por mais que as ferramentas propostas estejam distribuídas nos três níveis de abrangências, as de aplicação no nível global e regional foram as que apresentaram melhor desempenho quanto à estrutura, replicação e dados gerados. A análise das ferramentas do capítulo anterior possibilitou verificar as potencialidades e fragilidades de cada ferramenta, podendo os tomadores de decisão, de acordo com a necessidade de suas regiões, fazer o seu uso. Para o estuário do Rio Capibaribe, por exemplo, devido às eminentes problemáticas de inundações e tendências relacionadas ao aumento do nível do mar, ter ferramentas como as propostas por Al-Nasrawi *et al.* (2019), Hossain *et al.* (2022) e Ennouali *et al.* (2023) favorecem a identificação das áreas que possuem potencial para sofrer maiores prejuízos ambientais e consequentemente conseguir planejar ações que possam reduzir os impactos associados.

#### 6.2.2.2. Ações antrópicas

O modelo conceitual permite visualizar oito ferramentas aplicáveis para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das ações antrópicas. Dessas oito, apenas uma, a ferramenta proposta por Kaliraj, Chandrasekhar, Amachadran (2019), consegue incorporar todos os componentes de exposição (Figura 16). Mas, é oportuno destacar que, quando relacionado ao derramamento de óleo,

a ferramenta direciona-se à análise da contaminação da água com a presença de hidrocarbonetos.

Figura 16. Ferramentas para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das ações antrópicas.

Ferramentas Para Análise da Vulnerabilidade								
Ferramentas de Análise	Componente de Exposição				Abrangência da ferramenta			
	Aporte urbano	Aumento de fontes poluidoras	Excesso de nutrientes na água	Derramamento de óleo	Local	Regional	Global	Indicação ao Capibaribe
Projeções do aumento do nível do mar <i>(Al-Naswan et al., 2018)</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Distribuição espacial da zona costeira <i>(Hossain et al., 2022)</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Projeções geomorfológicas <i>(Ennouali et al., 2023)</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Adaptações à eventos climáticos extremos <i>(Rogers et al., 2019)</i>	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Erosão costeira <i>(Kaliraj, Chandrasekhar, Amachandran, 2019)</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Erosão e degradação ambiental <i>(Vieira et al., 2019)</i>	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
Pressões antrópicas <i>(Nath et al., 2021)</i>	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
Conectividade hidrológica <i>(Aldous et al., 2021)</i>	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

O modelo também permite identificar que o aporte urbano é quem apresenta maiores possibilidades de ferramentas para análise da vulnerabilidade. Enquanto o derramamento de óleo está defasado nesse aspecto, sem apresentar demais ferramentas que possibilitem analisar essa exposição.

Por mais que exista uma escassez relacionada a ferramentas de análise da vulnerabilidade para o derramamento de óleo em estuários tropicais, algumas outras possibilidades podem ser exploradas e estudadas para a adequação dessas regiões. Um estudo proposto por Fattal *et al.* (2010) indica a possibilidade de ferramentas numéricas associadas à poluição hídrica para prever o comportamento de um estuário da França em relação a essa exposição.

Ainda, tem-se o exemplo do estudo de Monteiro *et al.* (2020), na região Sul do Brasil, em que realizaram uma avaliação integrada da vulnerabilidade em relação aos derramamentos de petróleo, incorporando um modelo hidrodinâmico em 3D para gerar dados relacionados à sensibilidade costeira.

Quando pensado no estuário do Rio Capibaribe, o modelo conceitual permite visualizar a possibilidade de aplicação de quatro ferramentas na região.

Sendo elas as propostas por Al-Naswari *et al.* (2018), Hossain *et al.* (2022), Ennouali *et al.* (2023) e Kaliraj, Chandrasekhar, Amachadran (2019).

Trazer ao modelo as ferramentas disponíveis para análise da vulnerabilidade frente à ameaça das mudanças climáticas e ações antrópicas facilita a visualização das possibilidades em que os tomadores de decisão podem usufruir e conseguir gerar dados concisos que retratem a situação local. Diante disso, Sommer, Conrad, Culberson (2023) destacam que cada vez mais é necessário unir as pesquisas científicas aos tomadores de decisão. A construção de modelos conceituais como esse corrobora na melhoria da comunicação entre os cientistas e gestores, em que pode-se verificar estratégias atualizadas e robustas de modo a facilitar a compreensão.

### **6.2.3. Unidade Integradora - Gestão integrada**

A terceira unidade integradora refere-se à gestão integrada para regiões estuarinas tropicais. Essa seção é abordada em conjunto com as duas ameaças ambientais (mudanças climáticas e ações antrópicas) por apresentarem o mesmo conteúdo relacionado aos direcionamentos da gestão.

Ao verificar a proposta do modelo conceitual, um tomador de decisão conseguirá identificar as principais potencialidades existentes quanto à vulnerabilidade ambiental no estuário tropical. Mas, é essencial incentivar pesquisas locais para o mapeamento das regiões mais vulneráveis, bem como possibilitar a identificação de algum outro possível componente de exposição.

A identificação de áreas prioritárias para a implementação de ações de resposta pode otimizar a realização dos objetivos de conservação dos estuários, ao mesmo tempo em que reduz as ameaças e minimiza as perdas esperadas em relação principalmente aos processos ambientais.

Realizando a análise da vulnerabilidade, é possível identificar as adaptações naturais do próprio sistema frente à fonte de ameaça, bem como as que podem ser estabelecidas para a gestão, em que são destacados direcionamentos quanto a:

- Utilização de ferramentas para análise da vulnerabilidade: fazer uso de ferramentas pré-existentes pertinentes a cada localidade e exposições

distintas corrobora para o mapeamento da vulnerabilidade e o planejamento de ações para minimizar tais impactos;

- Monitoramento ambiental: destacar no plano de gestão integrada a importância de compreender as complexidades ambientais é crucial. Para alcançar esse entendimento, é imperativo implementar um monitoramento ambiental de longo prazo, permitindo que os tomadores de decisão compreendam de maneira eficaz as necessidades reais do estuário, ao mesmo tempo em que identificam as principais causas que contribuem para a vulnerabilidade ambiental;
- Redução das vulnerabilidades: formular e implementar ações destinadas a compreender as vulnerabilidades em diversas escalas, integrando suas complexidades, com o objetivo de promover uma significativa redução da vulnerabilidade ambiental e social. Isso se torna ainda mais essencial, uma vez que os estuários enfrentam consideráveis desafios devido às mudanças climáticas e à pressão urbana.

Ainda, para uma melhor perspectiva em relação à gestão integrada, é necessário o acolhimento e envolvimento de diversos atores sociais, inclusive prezando pelo pressuposto da justiça social. Em que, de acordo com Addo *et al.* (2020) e Harris *et al.* (2021), optar por uma gestão ambiental integrada que englobe o ser humano, visando alcançar uma justiça social que propicie uma notável redução das vulnerabilidades ambientais nos estuários, é essencial para a sustentabilidade local.

Mesmo assim, fazer a gestão acontecer requer ultrapassar alguns desafios, que, concentram-se principalmente em melhorias quanto: (a) compreender as complexidades dos estuários; (b) dados de monitoramento ambiental defasados e sem acurácia quanto a elaboração do desenho amostral debilitando a tomada de decisão; (c) falta de conhecimento acerca de ferramentas de análise existentes; (d) falta de integração de gestões regionais acarretando lacunas transfronteiriças (ARUEIRA *et al.*, 2022).

#### **6.2.4. Unidade Integradora - Melhorias para o estuário**

Contemplada as três primeiras unidades integradoras, o modelo conceitual finaliza-se com a unidade de melhorias para o estuário (por seguir o

direcionamento de que, ao identificar os principais componentes de exposição e respectivos processos ambientais afetados, se tem a possibilidade de utilizar ferramentas para análise da vulnerabilidade e com isso ter direcionamentos relacionados à gestão integrada). Com esse conjunto, espera-se melhorias significativas para os estuários tropicais.

As ameaças às mudanças climáticas e às ações antrópicas apresentam interligações entre as melhorias ambientais. Sendo assim, serão apresentadas em conjunto nessa seção em que são destacadas possíveis melhorias quanto a:

- Aumento da produtividade do estuário: com a minimização dos impactos, as funcionalidades ambientais tendem a voltar progressivamente à normalidade. Assim, a produtividade primária e secundária do ecossistema estuarino, não sofrerá interferências quanto ao excesso de nutrientes na água (ARUEIRA *et al.*, 2022), recomposição das espécies em zonação que sofreram interferências com as ameaças climáticas e antrópicas (ASBRIDGE *et al.*, 2016; ZULFA *et al.*, 2021) bem como melhor funcionamento ecossistêmico (FREIRES; LAGE-PINTO; BERNINI, 2023);
- Qualidade e disponibilidade de água: identificadas as pressões antrópicas que interferem diretamente na qualidade e disponibilidade da água, podem ser realizadas ações que venham melhorar esse aspecto. Essas ações podem ser relacionadas, por exemplo, ao esgotamento sanitário apropriado (ADAMS *et al.*, 2020), melhorias no planejamento urbano e diminuição de construções irregulares (TSENG *et al.*, 2021), estabelecimento de leis e diretrizes (NASCIMENTO *et al.*, 2022);
- Redução na alteração da linha de costa e erosão costeira: minimizar os impactos, em especial, de aumento do nível do mar e tempestades tende a estabilizar e até mesmo conseguir reduzir as alterações na linha de costa. Essa redução é progressiva e natural, podendo ser observada em aproximadamente quinze anos a depender das especificidades de cada estuário e tempo de exposição à ameaça (FELLOWES *et al.*, 2021);
- Redução na taxa de perda de hábitat: com as melhorias ambientais, a taxa de perda de habitat tende a reduzir, sendo ela também possibilitada por meio do desenvolvimento de programas de monitoramento com

objetivos de conservação. Ressalta-se que, para que seja efetivo, é fundamental uma gestão integrada intersetorial do estuário e seu entorno (CLAASSENS *et al.*, 2020).

### **6.3. Considerações finais**

O modelo conceitual teórico apresenta avanços significativos em relação ao que se existe na literatura científica, uma vez que não existe consenso em relação à temática e suas possíveis abordagens. O modelo elaborado pode ser utilizado como ferramenta didática junto aos tomadores de decisão para que compreendam o que de fato é a vulnerabilidade e seus componentes associados, além de ter uma visão sistêmica em relação à temática.

O modelo conceitual para a análise da vulnerabilidade, ao estabelecer as quatro unidades integradoras, consegue propiciar aos tomadores de decisão uma visão geral em relação aos estuários quanto à causa da vulnerabilidade ambiental, seus efeitos, possibilidades de ferramentas para análise e possíveis melhorias ao ambiente.

Por ser um modelo genérico para estuários tropicais, estudos específicos são incentivados, uma vez que cada estuário possui sua peculiaridade, bem como estão expostos à mesma ameaça com intensidades diferentes. Sendo assim, os processos ambientais afetados poderão ser intensificados e até mesmo observados outros que não constam no modelo.

A proposta elaborada consegue incorporar as unidades fundamentais para o entendimento e análise da vulnerabilidade, assim, consegue ser replicada em demais estuários tropicais. Na proposta, ainda são incentivados estudos específicos que podem ser incorporados, devido às especificidades locais, bem como a exposição às ameaças em intensidades diferentes.

A possibilidade de observar as possíveis ferramentas para análise da vulnerabilidade também favorece o direcionamento para os tomadores de decisão, que por muitas vezes não têm conhecimento das metodologias formuladas por cientistas. Assim, o modelo também propicia uma aproximação entre a ciência e a gestão, uma vez que a linguagem favorece um fácil entendimento para a compreensão em relação a gestão da vulnerabilidade.

Ao tratar os aspectos propostos da vulnerabilidade, ocorrerão melhorias graduais em relação ao estuário, sendo especialmente voltadas a melhorias

quanto ao aumento da produtividade estuarina, qualidade e disponibilidade de água e reduções quanto às alterações na linha de costa e erosão costeira.

Com relação ao estudo de caso do estuário do Rio Capibaribe, foi possível vislumbrar a utilização das ferramentas tanto relacionadas à ameaça das mudanças climáticas como as de ações antrópicas. As ferramentas visualizadas no modelo conseguem se adaptar às peculiaridades do estuário em questão, bem como apresentam diretrizes para replicação e geração de dados confiáveis que subsidiem a gestão ambiental deste estuário.

Como sugestões de estudos futuros, sugere-se a incorporação de possíveis indicadores de monitoramento ambiental que possam ser associados ao modelo para análise da vulnerabilidade, bem como venha a facilitar a aplicação dessa ferramenta em outros estuários tropicais.

## Referências

ADAMS, J. B. *et al.* Nutrient enrichment as a threat to the ecological resilience and health of South African microtidal estuaries. **African Journal of Aquatic Science**, v. 45, n. 1-2, p. 23-40, 2020.

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global environmental change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.

AL-NASRAWI, A. K. M.; HAMYLTON, S. M.; JONES, B. G. An assessment of anthropogenic and climatic stressors on estuaries using a spatio-temporal GIS-modelling approach for sustainability: Towamba estuary, southeastern Australia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 7, 2018.

ARUEIRA, T. D. *et al.* Emission load, flux and estuarine modulation of ammonium and phosphate from a small subtropical river basin to the coast. **Journal of Marine Systems**, v. 235, p. 103786, 2022.

ASBRIDGE, Emma *et al.* Mangrove response to environmental change in Australia's Gulf of Carpentaria. **Ecology and evolution**, v. 6, n. 11, p. 3523-3539, 2016.

BERA, A. *et al.* Vulnerability and Risk Assessment to Climate Change in Sagar Island, India. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 5, 1 mar. 2022.

CLAASSENS, L. *et al.* Knysna Estuary health: ecological status, threats and options for the future. **African Journal of Aquatic Science**, v. 45, n. 1-2, p. 65-82, 2020.

ENNOUALI, Z. *et al.* Mapping Coastal vulnerability using machine learning algorithms: A case study at North coastline of Sebou estuary, Morocco. **Regional Studies in Marine Science**, v. 60, 1 jun. 2023.

FATTAL, Paul *et al.* Coastal vulnerability to oil spill pollution: the case of Noirmoutier Island (France). **Journal of Coastal Research**, v. 26, n. 5, p. 879-887, 2010.

FELLOWES, T. E. *et al.* Decadal shoreline erosion and recovery of beaches in modified and natural estuaries. **Geomorphology**, v. 390, p. 107884, 2021.

FREIRES, J.L.; LAGE-PINTO, F.; BERNINI, E. Spatial–temporal distribution of mangrove species in the estuary of the Mamanguape river in the state of Paraíba, Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 66, p. 103166, 2023.

GALLOPÍN, C.G. A systemic synthesis of the relations between vulnerability, hazard, exposure and impact, aimed at policy identification. **Handbook for Estimating the Socio-Economic and Environmental Effects of Disasters**, ECLAC, LC/MEX/G.S., Mexico, D.F., pp. 2-5, 2003.

GHALAMBOR, C. K. *et al.* Ecological Effects of Climate-Driven Salinity Variation in the San Francisco Estuary: Can We Anticipate and Manage the Coming Changes? **San Francisco Estuary and Watershed Science**, v. 19, n. 2, p. 1–30, 2021.

GUERRA-CHANIS, G. E. *et al.* Saltwater intrusion in estuaries with different dynamic depths. **Regional Studies in Marine Science**, v. 51, p. 102186, 2022.

HARRIS, L. A. *et al.* A Socio-ecological Imperative for Broadening Participation in Coastal and Estuarine Research and Management. **Estuaries and Coasts**, v. 45, n. 1, p. 38–48, 2022.

HEIMHUBER, V. *et al.* A consistent climate change baseline for estuarine impact and adaptation planning along the New South Wales coastline. **Australasian Coasts and Ports 2019 Conference**, n. September, p. 553–559, 2019.

HOSSAIN, S. A. *et al.* Coastal vulnerability assessment of India's Purba Medinipur-Balasore coastal stretch: A comparative study using empirical models. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 77, 1 jul. 2022.

IMANI, M. *et al.* Risk assessment of coastal flooding under different inundation situations in southwest of taiwan (Tainan city). **Water**, v. 13, n. 6, p. 880, 2021.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; AMACHANDRAN, K. K. Coastal habitat vulnerability of southern India: A multiple parametric approach of GIS based HVI (habitat vulnerability index) model. **Geogr Fis Din Quat**, v. 42, p. 27-41, 2019.

KHALIL, U. *et al.* Investigating an innovative sea-based strategy to mitigate coastal city flood disasters and its feasibility study for Brisbane, Australia. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

LOI, T. T.; SANG, T. V.; HUUY, N. Q. Mangroves restoration in response to climate change: A case study in Xuan Thuy National Park, vietnam. **APAC 2019 - Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts**, n. Apac 2019, p. 1163–1168, 2020.

MONTEIRO, C. B. *et al.* Integrated environmental vulnerability to oil spills in sensitive areas. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115238, 2020.

NASCIMENTO, Regina Célia Macedo *et al.* Seasonal variability of water quality parameters in an urban tropical estuary (Northeast Brazil). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 9, 2022.

O'BRIEN, K.; ERIKSEN, S.; NYGAARD, L. P.; SCHJOLDEN, A. N. E. Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. **Climate policy**, v. 7, n.1, p.73-88, 2007.

POLSKY, C.; NEFF, R.; YARNAL, B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. **Global environmental change**, v. 17, n. 3-4, p. 472-485, 2007.

RAW, J. L. *et al.* Blue carbon sinks in South Africa and the need for restoration to enhance carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 859, 10 fev. 2023.

SOMMER, Ted; CONRAD, J. Louise; CULBERSON, Steven. Data to Decisions: How to Make Science More Relevant for Management of the San Francisco Estuary. **San Francisco Estuary and Watershed Science**, v. 21, n. 1, 2023.

TSENG, Hsiao-Chun *et al.* Social–environmental analysis of estuary water quality in a populous urban area. **Elem Sci Anth**, v. 9, n. 1, p. 00085, 2021.

TURNER, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; MCCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ... & SCHILLER, A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 100, n. 14, p. 8074-8079, 2003.

ZULFA, A. W. *et al.* Spectral signature analysis to determine mangrove species delineation structured by anthropogenic effects. **Ecological Indicators**, v. 130, p. 108148, 2021.

## 7. Considerações finais da pesquisa



Bosque de *Rhizophora mangle* no estuário do Rio Formoso – Pernambuco

Fonte da imagem: Regina Nascimento (2017)

A vulnerabilidade é um tema abordado nas diferentes áreas de conhecimento, sendo assim, sua conceituação por muitas vezes é difícil de se ter um consenso. Porém, mesmo com a problemática relacionada à conceituação, estudos sobre a vulnerabilidade estão em ascensão em todo o mundo.

Dentre as dimensões observadas da vulnerabilidade, está a ambiental, a qual foi abordada nesta Tese. Com essa dimensão, pôde-se observar que a vulnerabilidade é identificada por três componentes principais: a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa.

Um dos ambientes que são considerados um dos mais vulneráveis do mundo são os estuários, que por sua vez, são ambientes altamente produtivos e que sofrem constantemente com as ameaças climáticas e urbanas. Assim, se torna fundamental uma gestão integrada que busque minimizar os impactos associados às essas vulnerabilidades.

Constatou-se, no Capítulo 2, que os estudos relacionados à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais começaram a ser abordados ainda na década de 90, mas começaram a ser intensificados a partir do ano de 2018. Ainda, as maiores concentrações relacionadas às áreas de estudo estão na Austrália, Estados Unidos e Índia.

Respondendo à primeira questão da pesquisa ("Quais são as principais vulnerabilidades ambientais existentes nas regiões estuarinas tropicais evidenciadas?"), a revisão bibliográfica realizada no Capítulo 3 propiciou a identificação e o agrupamento de duas ameaças relacionadas à vulnerabilidade: a de mudanças climáticas; e das ações antrópicas. As mudanças climáticas abordam as possíveis exposições ao aumento do nível do mar, secas extremas e contínuas, aumento da temperatura do ar e da água e aumento de ventos e tempestades. Enquanto as associadas às ações antrópicas condizem ao aporte urbano, aumento de fontes poluidoras, excesso de nutrientes na água e derramamento de óleo.

Ainda foi possibilitado, pela metodologia proposta, identificar os possíveis processos ambientais afetados em decorrência do componente de exposição a cada ameaça ambiental. Essas ameaças podem variar de acordo com as condições geomorfológicas do estuário, bem como a duração ao qual o ambiente está exposto à ameaça.

No Capítulo 4, observou-se que a gestão adaptativa relacionada às vulnerabilidades pode ser de origem natural do próprio sistema, bem como podem ser associadas à gestão. Desse modo, foram observados três principais eixos os quais remetem: (I) ao envolvimento de atores sociais que circundam essas regiões, para que seja elaborada uma gestão integrada que tenha em seu escopo a justiça social; (II) aos desafios para proteção do ecossistema estuarino, uma vez que é necessário compreender as vulnerabilidades em suas diferentes escalas e; (III) ao desenvolvimento de uma gestão integrada, que compreenda as complexidades ambientais por meio de um bom monitoramento e que tenha como suporte ferramentas de modelagem que incorporem as peculiaridades locais para se obter dados acurados que darão suporte aos tomadores de decisão.

Respondendo à segunda questão da pesquisa ("Existem modelos de gestão que incorporam a vulnerabilidade ambiental, levando em consideração os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa?"), o Capítulo 5 constatou que não foram encontrados modelos de gestão que abordassem a vulnerabilidade ambiental com seus respectivos componentes. O que foi visto na literatura foram ferramentas que pudessem incorporar um modelo que, em sua concepção, abordam os três componentes principais da vulnerabilidade, além de estabelecer correlações entre eles.

O Capítulo 5 ainda propiciou um resultado metodológico da Tese com a elaboração de uma matriz para análise de ferramentas de vulnerabilidade ambiental para estuários tropicais. A matriz foi baseada nas diretrizes da Matriz de Pugh, em que foram estabelecidas 3 categorias: (a) Concepção da ferramenta considerando os componentes da vulnerabilidade; (b) Características de execução da ferramenta; (c) Características da ferramenta/programas e dados.

A metodologia estabelecida favoreceu a análise de 14 ferramentas encontradas na revisão bibliográfica relacionadas à vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais. Assim, pôde-se observar por meio das características e critérios se as ferramentas de fato abordavam os componentes da vulnerabilidade, bem como suas facilidades de acesso e replicação em outros estuários, além de mais aspectos. Ainda, constatou-se que as ferramentas apresentam diferentes abrangências (local, regional e global) a depender do seu objetivo pré-estabelecido.

A proposta metodológica do Capítulo 5 propiciou a escolha de ferramentas que pudessem fazer parte do modelo conceitual para gestão da vulnerabilidade. Assim, respondendo à terceira pergunta da pesquisa ("Quais aspectos e funcionalidades são relevantes e devem ser considerados num modelo para gestão de estuários tropicais para sua gestão ser satisfatória, pensando na vulnerabilidade ambiental?"), o Capítulo 6 conseguiu abordar as nuances do questionamento.

Concluiu-se que é fundamental incorporar os componentes de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa para trabalhar a vulnerabilidade de forma integrada. Ainda, pensando na gestão, é necessário identificar quais ameaças ambientais o ambiente está vulnerável. Assim, são delimitados os componentes de exposição para essas ameaças, bem como quais processos ambientais estão sendo afetados.

Após realizar a identificação das potenciais vulnerabilidades, foram elencadas as possíveis ferramentas para análise da vulnerabilidade de acordo com cada situação. A utilização de ferramentas robustas propicia a geração de dados consistentes para serem usados na tentativa de mapear as áreas mais vulneráveis.

Ainda, para que a gestão seja dada de forma satisfatória, é necessário envolver os diversos atores sociais que circundam as regiões estuarinas, bem como estabelecer programas e ações de planejamento ambiental, com monitoramento constante da região para se ter como produto melhorias ambientais. Estas melhorias envolvem reduções em taxas de perda de hábitat, de erosão costeira, disponibilidade e qualidade da água, dentre outros aspectos.

Em relação ao estudo de caso no estuário do Rio Capibaribe, as ferramentas evidenciadas na pesquisa, após criteriosa análise, puderam ter suas respectivas indicações ao estuário. Para tanto, foram levadas em consideração algumas especificidades desse estuário, a qual puderam ser identificadas por meio de estudos anteriores na localidade.

Ter a indicação dessas possíveis ferramentas auxilia aos tomadores de decisão a escolha de metodologias robustas que de fato consigam analisar a vulnerabilidade. Ainda, devido a possibilidade de replicação, são economizados custos no planejamento e no desenvolvimento de novas ferramentas, podendo ser utilizadas as pré-existentes.

Conclui-se que, as propostas metodológicas elencadas na Tese conseguiram responder aos três questionamentos supracitados, assim, aos dois pressupostos que foram confirmados: (i) As regiões estuarinas tropicais são um dos ambientes mais vulneráveis do mundo, decorrentes das ações de origem antrópica assim como relacionadas às mudanças climáticas; (ii) As atuais ferramentas para gestão de regiões estuarinas têm focado em determinadas vulnerabilidades específicas e, portanto, há necessidade de configuração de modelo conceitual que incorpore a diversidade de vulnerabilidades, assim como leve em consideração os componentes intrínsecos da vulnerabilidade (exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa).

Como perspectiva futura, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas nos estuários para identificação das peculiaridades locais, bem como possíveis outras vulnerabilidades que estejam presentes nessas regiões. Esses esforços irão proporcionar maior entendimento da vulnerabilidade e seus respectivos componentes, bem como a compreensão da relação entre a vulnerabilidade e as complexidades dos estuários. Ainda, é fundamental unir esforços entre as pesquisas científicas e os tomadores de decisão, para que os resultados advindos de pesquisas acadêmico-científicas consigam chegar de forma clara e palatável à gestão ambiental integrada, favorecendo uma aproximação da ciência para se ter as desejáveis melhorias ambientais dos estuários.