

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LAÍS COUTINHO ZAYAS JIMENEZ

**Estratégias para recuperação de manguezais contaminados, uma
revisão sistemática**

São Paulo

2022

Estratégias para recuperação de manguezais contaminados

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador(a): Prof.^a Dra. Marilda M. G.
Ramos Vianna

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Jimenez, Laís

Estratégias para recuperação de manguezais contaminados, uma revisão sistemática / L. Jimenez -- São Paulo, 2022.

36 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.ecossistemas de mangue 2.recuperação ambiental 3.recuperação do solo 4.poluição ambiental 5.oligoelementos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

Jimenez, Laís Coutinho Zayas. Estratégias para recuperação de manguezais contaminados. 2022. 36 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Manguezais são ambientes estuarinos que provém uma série de serviços ecossistêmicos. Por estarem no interseco entre os corpos d'água do continente e o oceano, os manguezais estão constantemente vulneráveis a variadas fontes de contaminação e degradação química. O presente trabalho se propõe a construir uma análise sistemática da literatura acerca do estado da arte das estratégias de recuperação química de manguezais. Foram resgatados 30 artigos das plataformas de busca escolhidas, dos quais metade foi selecionada para o presente trabalho por apresentar expressamente uma estratégia de recuperação de manguezais. É perceptível que tanto a caracterização da extensão das contaminações quanto dos potenciais de recuperação dos manguezais ainda é muito incipiente, diante do grande número de artigos descritivos a respeito dos manguezais. Observou-se que tanto os trabalhos que se debruçavam sobre manguezais contaminados por poluentes orgânicos quanto aqueles que dissertavam sobre contaminações por poluentes inorgânicos fizeram uso de organismos endógenos de manguezais para a proposição de sua recuperação. Essa característica aponta para a capacidade de autorregulação dos manguezais e para a possibilidade de prospecção de seus mecanismos intrínsecos, com uso em outros contextos de ambientes contaminados na forma de uma *Natured Based Solution*. Também ficou evidente a necessidade de definição de parâmetros ambientais para o monitoramento contínuo dessas áreas sob processo de recuperação.

Palavras-chave: Manguezais. Recuperação. Poluentes orgânicos. Elementos potencialmente tóxicos.

ABSTRACT

Jimenez, Laís Coutinho Zayas Jimenez. Estrategias for recovery of contaminated mangroves. 2022. 36 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Mangroves are estuarine environments that provide a range of ecosystem services. Because they are at the intersection between the continent's water bodies and the ocean, mangroves are constantly vulnerable to various sources of contamination and chemical degradation. The present work aims at building a systematic analysis of the literature on the state of the art of chemical recovery strategies for mangroves. Thirty articles were retrieved from the chosen search platforms, half of which were selected to be analyzed in this work for expressly presenting a mangrove recovery strategy. It is noticeable that both the characterization of the contamination extent and the potential for recovery of mangroves is still very incipient, due to the large number of descriptive articles on mangroves. It was observed that the works that focused on mangroves contaminated by organic pollutants and those that discussed contaminations by inorganic pollutants made use of endogenous mangrove organisms to propose their recovery. This characteristic indicates the self-regulation capacity of mangroves and the possibility of prospecting their intrinsic mechanisms for use in other contexts of contaminated environments, in the form of Nature Based Solutions. The need to define environmental parameters to monitor the areas under recovery process was also evident.

Key words: Mangroves. Recovery. Organic pollutants. Potentially toxic elements.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	OBJETIVOS	8
3.	JUSTIFICATIVA	9
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	9
5.	RESULTADOS	10
5.1	Seleção dos artigos	13
5.2	Tipos de contaminação	15
5.2.1	Orgânica	15
5.2.2	Inorgânica.....	17
5.3	Técnicas de remediação	18
5.3.1	Transporte e imobilização	18
5.3.2	Fitorremediação.....	19
5.3.3	Degradação.....	20
6.	DISCUSSÃO	21
6.1	Mecanismos endógenos de manguezais como atenuação ambiental monitorada	21
6.2	Monitoramento e intervenções nas áreas de manguezais contaminados	25
6.3	Relevância da abordagem holística dos manguezais	26
6.4	Considerações acerca dos artigos excluídos na etapa de seleção	28
7.	CONCLUSÕES.....	29
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas naturais provêm uma série de serviços para o bem-estar humano (MATZEK et al., 2019; HUANG et al., 2018). Constanza et al. (1997) sintetizaram e valoraram os serviços ecossistêmicos, considerando-os como capital natural (COSTANZA et al., 1997; COSTANZA et al., 2014). Desde então, o assunto virou tema de estudos acadêmicos e também pauta para o desenvolvimento de políticas públicas e iniciativas de recuperação ambiental. Iniciativas como Millennium Ecosystem Assessment (2001; 2005) e The Economics of Ecosystems and Biodiversity Initiative (2008) se debruçaram em classificar os serviços e avaliar os reflexos dos impactos ambientais na capacidade de geração de serviços.

Wetlands naturais presentes em estuários (manguezais, marismas e pradarias marinhas) são amplamente reconhecidos como geradores de serviços ecossistêmicos e sua valoração econômica é superior a 140 mil dólares por hectare por ano (COSTANZA et al., 2014). Esses serviços são tanto físicos, de proteção costeira e atenuação dos efeitos da ocorrência de eventos extremos (tais como furacões, tsunamis etc.); quanto culturais, no que diz respeito, por exemplo, à identidade cultural de populações caiçaras/ribeirinhas e originárias; e biológicos, pois esses ambientes são responsáveis pela manutenção de espécies marinhas e terrestres por meio da provisão de habitat, oferecendo proteção à biodiversidade de peixes, caranguejos, aves etc. Além disso, esses serviços ecossistêmicos providos por áreas de *wetlands* estuarinos são também biogeoquímicos, uma vez que promovem ciclagem de nutrientes, sequestro de carbono, retenção de poluentes etc. (COSTANZA et al., 2014; KELLEWAY et al., 2017).

O Brasil possui cerca de 7400 km de litoral, dos quais cerca de 90% possuem cobertura vegetal de florestas de mangue. Por este motivo, o Brasil é o terceiro país com maior cobertura de manguezais no mundo, ficando atrás apenas da Indonésia e Austrália (GIRI et al., 2012; SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000). A legislação brasileira enquadra os mangues em sua Lei de Proteção de Vegetação Nativa (popularmente conhecida como Código Florestal, que foi revista em 2012) como Áreas de Preservação Permanente (APP). Seriam áreas que deveriam ser prioritariamente preservadas para manutenção biológica dos estuários (Brasil, Lei nº12651, de 25 de maio de 2012). No entanto, essas regiões costeiras estão sob constante ameaça por mudança de uso do solo, interesse imobiliário, para a produção de alimentos (como tanques de carcinicultura), dentre outras ameaças (PRIMAVERA et al., 2019). Além disso, estuários estão sempre vulneráveis à contaminação, na medida em que se configuram como zonas de sedimentação, para as quais são destinados quaisquer contaminantes descartados nos rios. As

estratégias de revitalização e de recuperação dessas áreas variam de acordo com a forma como são degradadas. Segundo a legislação vigente (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) a vegetação situada em Área de Preservação Permanente deverá ser mantida e sua eventual supressão só é autorizada, excepcionalmente, em locais onde a função ecológica do manguezal esteja comprometida e que sua área seja destinada para funções habitacionais de interesse social em regiões de ocupação urbana de baixa renda.

No caso de degradações físicas, como desmate da flora de manguezal, a principal maneira de recuperar esse ecossistema se dá pelo plantio de mudas, e as metodologias para isso são difundidas na forma de normativas. As iniciativas de recuperação de manguezais apoiam-se na Resolução n. 369 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 369/2006), e são elaboradas a partir do Plano de Recuperação de Áreas de Preservação Permanente (PRAPP), que são separados em 3 etapas: (i) avaliação e análise da área; (ii) plano de recuperação; e (iii) avaliação e monitoramento (CONAMA, 2005).

No entanto, não há protocolos ou metodologias padronizadas para o caso de contaminações químicas nessas regiões. Isso se dá por variados motivos. O primeiro deles diz respeito à alta capacidade dos manguezais em absorver contaminantes orgânicos e inorgânicos e se tornar um dreno de elementos potencialmente tóxicos, bem como de poluentes orgânicos no meio (GHOZALI et al., 2017; MARCHAND et al., 2016). Outra razão para que as estratégias de recuperação química de manguezais não sejam amplamente difundidas se dá pelo fato de que essas regiões não são potencialmente utilizadas para produção de biomassa, tal como são as regiões destinadas à produção agrícola. Por este motivo, seu potencial de contaminação não tem efeitos diretos sobre a balança comercial nacional, e sua recuperação não é priorizada. Não há, no âmbito do código florestal brasileiro (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) quaisquer instruções com relação à avaliação e/ou punição para degradações químicas em manguezais.

Neste sentido, estratégias de recuperação de manguezais contaminados por poluentes químicos são prospectadas principalmente no âmbito acadêmico. Assim, o presente trabalho se debruça em sumarizar as publicações científicas mais recentes e relevantes acerca do tema, a fim de criar um documento de referência no assunto de recuperação química desse ecossistema.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo desse trabalho é sintetizar as informações da literatura científica mais relevantes acerca do tema de recuperação de manguezais contaminados.

De forma específica, pretende-se:

- Compreender as formas de contaminação química de manguezais;
- Levantar as principais estratégias de recuperação deste ecossistema.

3. JUSTIFICATIVA

Manguezais são ecossistemas localizados na região estuarina, no contato entre o rio e o mar, e estão constantemente vulneráveis a contaminações químicas de origem orgânica, tais como derramamento de diesel em cursos d'água; e inorgânica, tais como produtos de efluentes industriais depositados nas bacias hidrográficas, que por fim atingem os estuários (KHAN et al., 2021; CHOUDHURY et al., 2021). Por ser um ecossistema com fortes influências na dinâmica da vida marinha, além de ser habitat de espécies terrestres, fonte de renda para famílias locais, dentre inúmeros outros serviços prestados, sua manutenção e recuperação é de extrema importância (KELLEWAY et al., 2017).

Dessa forma, realizar o levantamento das principais estratégias estudadas desde 2010 para mitigar contaminações químicas nos manguezais se faz relevante uma vez que o Brasil é o terceiro maior país com cobertura de manguezais do mundo. Além disso, as estratégias de recuperação de manguezais contaminados estão sendo cada vez mais estudadas, diante das ameaças constantes que estes ecossistemas sofrem, resultantes de ações humanas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os mecanismos para a recuperação de manguezais contaminados foram explorados neste trabalho através da revisão sistemática da literatura científica. Artigos publicados a partir de 2010 até o presente foram considerados. A metodologia utilizada foi estabelecida por Kitchehan (2004) e previamente aplicada em outros estudos de qualidade ambiental (MARTINI et al., 2020).

A busca bibliográfica foi feita por meio de uma combinação de termos de busca considerando as bases de dados das plataformas Scopus e Science Direct. Para buscar os artigos que contemplassem a descontaminação de manguezais utilizou-se a seguinte *string* de busca: “mangrove* AND contamination AND (remediation OR recovery OR regeneration)”. Os termos deveriam estar localizados no título, resumo ou palavras-chave dos documentos. A busca foi limitada para artigos científicos, classificando a pesquisa como primária e artigos de revisão.

Artigos de revisão foram excluídos dessa revisão sistemática uma vez que não se debruçam sobre um mecanismo de recuperação específico, ou não se limitam a descrever uma única forma de contaminante. A proposta com dados primários é compreender os principais mecanismos e as principais formas de contaminação observados na literatura científica recente.

Limitou-se a pesquisa para artigos publicados a partir de 2010, somente arquivos em inglês, e as sub áreas selecionadas foram ciências ambientais, agrícolas, da terra, químicas, bioquímicas e de engenharia. Dessa forma a *string* de busca completa caracterizou-se da seguinte maneira: “TITLE-ABS-KEY (mangrove* AND contamination AND (remediation OR recovery OR regeneration)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BIOC") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "CENG")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))”.

A etapa de seleção dos arquivos foi feita com suporte do software StArt, baseada nos seguintes critérios: *O artigo apresenta estratégia de recuperação de manguezais?* Em casos positivos, os arquivos eram aceitos para a próxima etapa da revisão. A partir de então, os arquivos eram divididos entre aqueles que contemplavam estratégias de recuperação desses ecossistemas contaminados (i) por poluentes orgânicos e (ii) inorgânicos e também entre os principais mecanismos de remediação estudados: (i) degradação, (ii) fitorremediação, (iii) transporte e imobilização.

5. RESULTADOS

Foram resgatados 30 artigos entre as plataformas Scopus e Science Direct, e a Tabela 1 apresenta informações sobre estes trabalhos. Em seguida, algumas considerações foram feitas acerca dos anos de publicação e países que se destacaram na produção acadêmica com este enfoque. Por fim, a forma de seleção dos artigos está apresentada em subtópicos quanto ao tipo de contaminação e às estratégias de remediação aplicadas.

Tabela 1: Ano de publicação; País de origem; Revista; e Natureza do contaminante abordado em cada um dos artigos resgatados pela *string* de busca definida nas Plataformas de busca

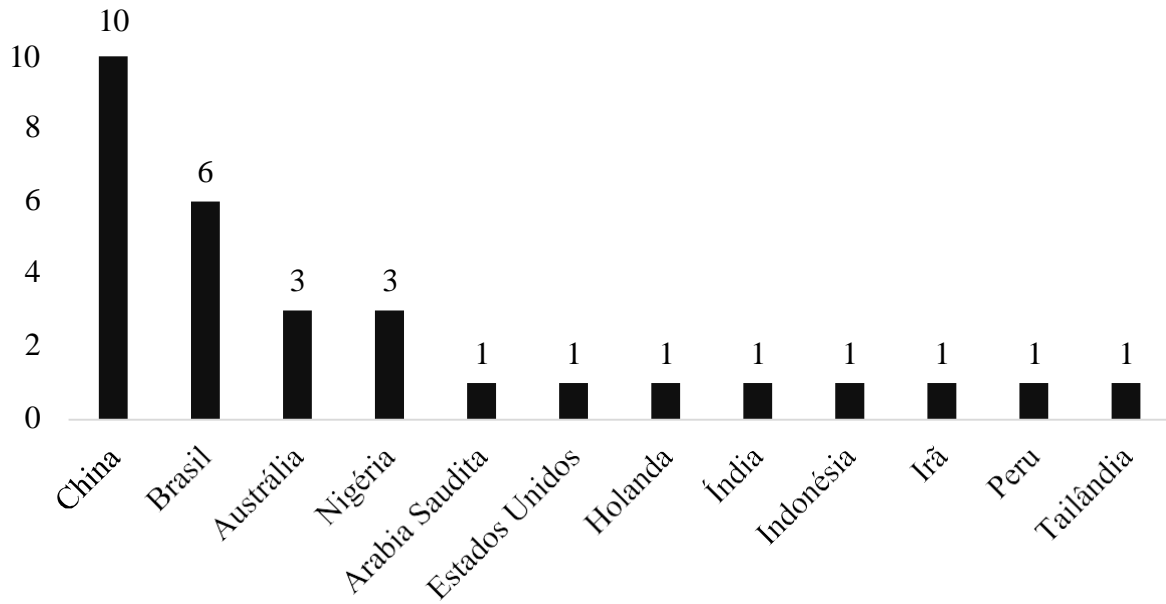
Ano	País	Journal	Natureza dos contaminantes
2010	Brasil	PLoS ONE	orgânica
2011	Brasil	International Journal of General and Molecular Microbiology	orgânica
2012	Brasil	Water, Air, and Soil Pollution	orgânica
2012	China	Marine Pollution Bulletin	orgânica
2013	China	Environmental Monitoring and Assessment	inorgânica
2013	Nigéria	Ambio	orgânica
2013	Nigéria	Geosystem Engineering	orgânica
2014	Holanda	Critical Reviews in Environmental Science and Technology	inorgânica
2014	Irã	Journal of Environmental Health Science and Engineering	orgânica
2014	Nigéria	Marine Pollution Bulletin	orgânica
2014	China	Chemosphere	orgânica
2015	Austrália	Environmental Science and Pollution Research	inorgânica
2015	China	Australian Journal of Botany	inorgânica
2015	China	Journal of Environmental Sciences (China)	orgânica
2016	Índia	Pollution Research	inorgânica
2016	Brasil	Clean - Soil, Air, Water	orgânica
2016	Estados Unidos	Journal of Marine Science and Engineering	orgânica
2017	Indonésia	AACL Bioflux	orgânica
2018	Brasil	Environmental Science and Pollution Research	inorgânica
2018	Peru	Revista Peruana de Biología	orgânica
2019	Arabia Saudita	Molecular Biology Reports	inorgânica
2020	Tailândia	Ecotoxicology and Environmental Safety	inorgânica
2020	Austrália	Bioresource Technology	inorgânica
2020	China	Environmental Pollution	inorgânica
2020	Brasil	Marine Pollution Bulletin	orgânica
2020	China	Environmental Pollution	orgânica
2021	China	Marine Pollution Bulletin	inorgânica
2021	Austrália	Fuel	inorgânica
2021	China	Sustainability (Switzerland)	inorgânica
2021	China	Journal of Cleaner Production	orgânica

Fonte: Autor

A produção acadêmica em relação ao tema da recuperação de manguezais na China se destaca, somando um terço dos artigos resgatados, apesar de o país não se encontrar entre os 20 países com maior cobertura de manguezais do mundo (GIRI et al., 2011). O Brasil tem a segunda maior produção acadêmica no tema, segundo os artigos resgatados pelas plataformas supracitadas, somando 6 artigos no total desde 2010. A Austrália, que tem a segunda maior cobertura vegetal de manguezais do mundo, publicou apenas 3 artigos acerca do tema nos últimos 11 anos, dentro da pesquisa realizada neste trabalho. A Nigéria enfrentou um dos maiores desastres ambientais das últimas décadas em razão de um derramamento de petróleo

no golfo do Niger, o que resultou em 3 produções acadêmicas com essa abordagem nos últimos anos (Figura 1).

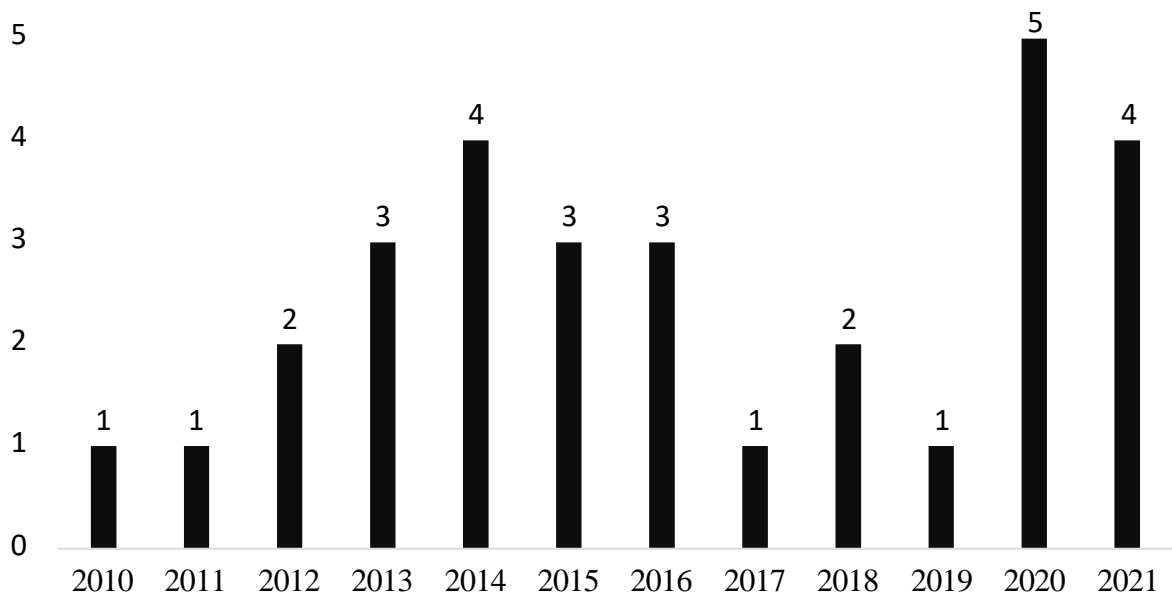
Figura 1:Contagem da produção acadêmica resgatada pelo presente trabalho por país



Fonte: Autor

A distribuição dos artigos entre os anos também chama a atenção. No início da década, em 2010, parecia crescente o interesse pelo tema. No entanto as produções caíram entre 2016 e 2017. De 2019 para a atualidade, parece ter havido um aumento do interesse acerca do tema novamente (Figura 2), dentre os artigos pesquisados neste trabalho.

Figura 2: Contagem do número de artigos extraídos na busca do presente trabalho por ano.

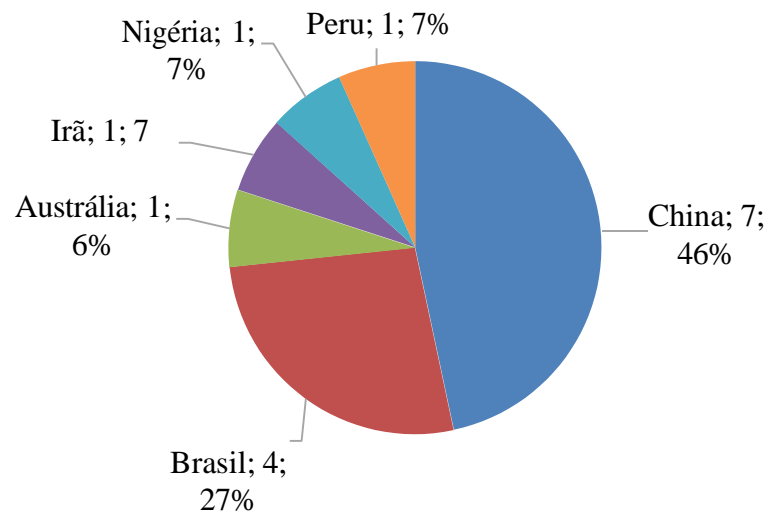


Fonte: Autor

5.1 Seleção dos artigos

Metade dos artigos foram excluídos por não apresentarem estratégias de recuperação de manguezais. Os demais foram selecionados por se debruçarem sobre essas estratégias. A distribuição da produção entre os países se manteve semelhante à observada antes dessa etapa de seleção, com a China e o Brasil em lugar de destaque (Figura 3).

Figura 3: Contribuições de cada país para as produções científicas selecionadas no presente trabalho

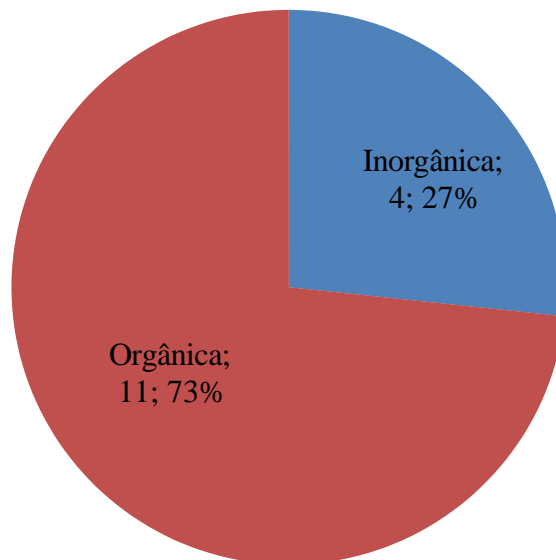


Fonte: Autor

Após a seleção dos artigos, e a partir da resposta afirmativa à pergunta “*O artigo apresenta estratégia de recuperação de manguezais?*”, os trabalhos foram divididos de acordo com os contaminantes que eram explorados e pelos mecanismos de remediação sobre os quais se propuseram a dissertar.

Dos 15 artigos aceitos, 4 (27%) se debruçaram sobre formas de recuperação de manguezais contaminados por poluentes inorgânicos, em alguns casos com o estudo da dinâmica de algum elemento traço, e em outros analisando a dinâmica de metais catiônicos nos diferentes compartimentos do ecossistema de maneira geral. No entanto, a maioria dos artigos selecionados no presente trabalho (11 artigos, 73% do total de artigos selecionados) descreveu contaminações por poluentes orgânicos, em sua maioria hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (Figura 4)

Figura 4: Natureza dos contaminantes estudados dos artigos selecionados pelo presente trabalho, número absoluto e porcentagem de participação no total de trabalhos selecionados.



Fonte: Autor

Com relação aos 11 artigos selecionados cuja fonte de contaminação é de origem orgânica, a maioria dos trabalhos se debruçou na proposição de estratégias de recuperação pautadas na capacidade de comunidades da microbiota do solo (na maioria bactérias e, em um caso, fungos) em decompor compostos orgânicos por meio da respiração celular. Os demais trabalhos de contaminação orgânica estudaram a fitorremediação, que trata da capacidade de espécies florísticas em acumular poluentes em seus tecidos vegetais

Quatro artigos selecionados tratavam de mecanismos de recuperação de manguezais alvos de contaminações inorgânicas. Destes, três estudaram a capacidade de imobilização destes contaminantes (em sua maioria, metais) pelos compostos coloidais dos solos, e um dissertou sobre a fitorremediação destes contaminantes.

5.2 Tipos de contaminação

A seguir serão descritas duas formas de contaminações comuns em manguezais, bem como os principais trabalhos acerca delas.

5.2.1 Orgânica

A contaminação de manguezais por compostos orgânicos pode ocorrer em razão do descarte inapropriado de resíduos orgânicos em leitos de rios, ou por lixiviação ou escoamento superficial desses compostos. Este fator de contaminação em manguezais é comumente registrado em artigos que dissertam sobre a contaminação por pesticidas e outros agroquímicos, pois estes produtos são usados em grandes quantidades e em áreas extensas, muitas vezes próximas dos corpos d'água. Como exemplo, é possível citar os pesticidas organoclorados comumente encontrados em ambientes de estuário (SHETE et al., 2009).

Os contaminantes orgânicos são formados por moléculas complexas que apresentam resistência à decomposição pelos microorganismos. Além de agroquímicos, subprodutos de atividades urbanas e industriais, por vezes chegam aos corpos hídricos e percorrem as bacias hidrográficas, em suspensão, até atingirem a região do estuário e concentrarem-se nos manguezais, como é o caso dos chamados “retardantes de chama halogenados”. Em razão de sua facilidade de transporte e assimilação pelos organismos, esses compostos podem ser biomagnificados no meio ambiente. Diante disso, alguns foram incluídos na lista dos poluentes orgânicos persistentes criada na convenção de Estocolmo, na Suécia (HU et al., 2020; UN environment programme, 2019).

Outro tipo de contaminantes orgânicos bastante comum em mangues são os compostos derivados de petróleo, que também podem apresentar compostos aromáticos complexos e de difícil mineralização (HE et al., 2014; ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2015). É o caso dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Os HPAs são um grupo de poluentes orgânicos persistentes, formados por dois ou mais anéis aromáticos condensados (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2015). Suas principais fontes no meio ambiente são fontes petrogênicas (derramamentos acidentais de óleo e seus derivados) e fontes pirogênicas (queima de biomassa

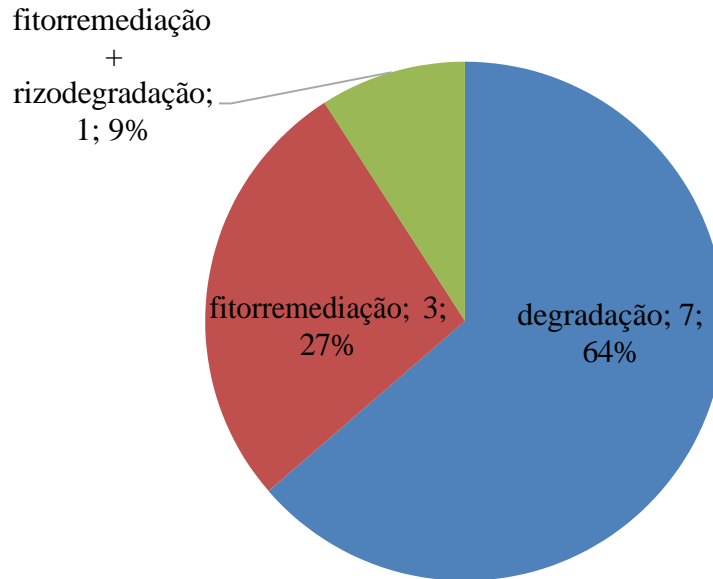
e combustíveis fósseis, incineração de resíduos de combustíveis fósseis e incêndios florestais e de plantações). Alguns destes compostos foram reconhecidos como particularmente importantes pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency* (EPA)) devido às suas propriedades carcinogênicas e mutagênicas (BANESHI et al., 2014; WU et al., 2011).

Manguezais são geralmente o destino final dos derramamentos de petróleo no oceano, uma vez que, pelo movimento das marés, essa substância atinge a região do estuário e fica retida nos manguezais em razão da arquitetura da flora e do sistema radicular destes ambientes, que fornecem barreiras físicas para a distribuição deste material para os demais ecossistemas aos quais está interligado (JIN-EONG, 1995; HARTY, 1997).

Alguns eventos de vazamento de óleo chamam a atenção por sua magnitude e inspiram trabalhos de recuperação nessas regiões, como o British Petroleum Deepwater Horizon (BP-DWH), que foi o maior vazamento de óleo em ambiente marinho na história dos Estados Unidos, e o derramamento de óleo no delta Niger, na Niagéria que também foi considerado uma das maiores catástrofes ambientais da última década. Além disso, por serem ambientes alagados, manguezais possuem altas taxas de acúmulo de carbono orgânico. Por este motivo, os solos de manguezais se associam aos contaminantes orgânicos e se comportam como um dreno desses poluentes no meio ambiente (WANG et al., 2014a; WANG et al 2014b).

Em razão desta variedade de possíveis fontes de contaminação orgânica, e do desafio de remediação dessa forma de contaminação, parte dos artigos selecionados no presente trabalho representaram mecanismos de recuperação de manguezais contaminados por espécies orgânicas. Os mecanismos de remediação de manguezais contaminados por esse tipo de poluente são principalmente degradação e fitorremediação (Figura 5), como será posteriormente explorado.

Figura 5: Mecanismos de remediação de manguezais contaminados, seu número absoluto e suas porcentagens de ocorrência entre os artigos selecionados pelo presente trabalho que se debruçaram sobre poluentes orgânicos.



Fonte: Autor

5.2.2 Inorgânica

Em razão da condição de alagamento, os manguezais possuem formas reduzidas de enxofre, que naturalmente se associam a elementos catiônicos e se precipitam. Por este motivo, manguezais são conhecidos por serem um importante reservatório para elementos traço, além de potencial fonte desses metais para o meio, caso haja mudança na condição físico-química que promova a oxidação de seus componentes, por exemplo (BOURGEOIS et al., 2019; USMAN et al., 2013). Estes elementos ocorrem naturalmente na natureza, na composição química de muitas espécies minerais. No entanto, suas altas concentrações no meio geralmente estão associadas ao descarte indevido de substâncias que as contêm, como por exemplo agroquímicos e resíduos da indústria química (YADAV et al., 2022).

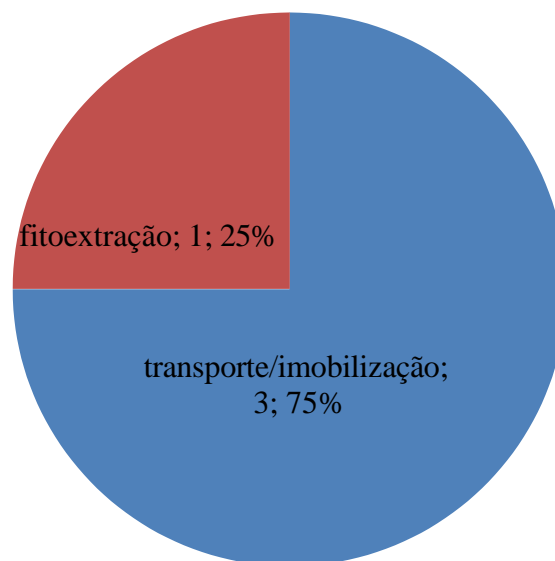
Elementos traço são aqueles que se apresentam no meio em baixas concentrações. No caso dos metais potencialmente tóxicos, quando nessa condição, mesmo em quantidades pequenas podem ser prejudiciais aos organismos vivos. A presença dos metais no meio ambiente pode acontecer por razões antrópicas ou por desequilíbrios em seus ciclos biogeoquímicos (ALI et al., 2020).

De maneira geral, as plantas absorvem esses metais do solo junto com os nutrientes disponíveis. Alguns desses metais são, em pequenas quantidades, parte da demanda nutricional

de espécies vegetais. Sua assimilação pelas plantas, quando atinge algum grau de toxicidade, é conhecida por inibir o crescimento da planta, a atividade enzimática, a função estomática, a atividade fotossintética e o acúmulo de outros elementos nutritivos, além de causar danos ao sistema radicular. Além disso, pode gerar biomagnificação destes elementos no meio ambiente e prejudicar uma série de organismos ao longo da cadeia trófica (MENG et al., 2021).

As formas de remediação destes poluentes nos ambientes de manguezais geralmente estão associadas a condições biogeoquímicas do solo e água, caracterizadas por exemplo por valores de Eh e pH, que condicionam a capacidade destes ambientes em imobilizar e também pela fitoextrair poluentes (Figura 6).

Figura 6: Mecanismos de remediação de manguezais contaminados, seu número absoluto e suas porcentagens de ocorrência entre os artigos selecionados sobre poluentes inorgânicos.



Fonte: Autor

5.3 Técnicas de remediação

As técnicas de transporte e imobilização, fitorremediação e degradação no contexto dos manguezais serão apresentadas a seguir.

5.3.1 Transporte e imobilização

Os solos de manguezais podem atuar como um dreno de longo prazo para metais e ter a capacidade de fitoestabilizá-los, processo nomeado de imobilização. Essa característica evita

e/ou reduz o transporte desses compostos para a coluna d'água, o que poderia ser nocivo para os sistemas aquáticos (BIRCH et al., 2015; SILVA et al., 1990). O transporte, como é entendido nessa seção, também é consequência da dinâmica metabólica dos microrganismos.

O metabolismo microbiano atua no processo de imobilização, por exemplo ao utilizar os metais como aceptores de elétron durante a respiração celular e na etapa de decomposição da matéria orgânica. Então, o estado de oxidação desses metais catiônicos é alterado, o que favorece sua precipitação. Consequentemente, há redução da mobilidade dos metais no solo e na coluna d'água, em razão da queda em sua solubilidade (QUEIROZ et al., 2018). Outros registros apontam para a indução da precipitação de metais com carbonatos, facilitada pelo metabolismo de algumas bactérias (JIANG et al., 2019).

E ainda, o processo de imobilização pode ocorrer espontaneamente por meio da alteração físico-química do meio. É o caso *iron plaques*, placas que se formam na região da rizosfera de manguezais que, por conta da oxidação local, precipitam óxidos de ferro, muitas vezes associados à metais catiônicos. Dessa forma, esses metais são imobilizados no sistema (CHAUDHURI et al., 2014).

Por transporte pode-se entender a utilização desses metais para qualquer etapa do desenvolvimento metabólico dos microrganismos da microbiota, que altera sua biodisponibilidade para assimilação por organismos, por exemplo no processo de biomineralização. Algumas comunidades de bactérias possuem vias metabólicas que lhes permitem utilizar metais potencialmente tóxicos como fonte de energia para o crescimento, metabolizando-os (AYANGBENRO; BABALOLA, 2017).

Assim, alguns microorganismos podem ser usados para biorremediação de metais potencialmente tóxicos, devido à sua capacidade de absorver, precipitar, oxidar e reduzir metais no solo (MISHRA; MOHAN, 2017).

5.3.2 Fitorremediação

A fitorremediação é uma técnica que se utiliza do processo de assimilação de poluentes por sistemas vegetais (KAMATH et al., 2004). As espécies de plantas que realizam fitorremediação geralmente possuem tolerância a altas concentrações de contaminantes em suas raízes, caules e folhas.

Muitas vezes associados a microrganismos específicos, essas plantas são capazes de remover, degradar e imobilizar substâncias tóxicas no ambiente por meio de sua assimilação para seus tecidos vegetais (KAMATH et al., 2004).

As espécies vegetais realizam fitorremediação por diversos mecanismos fisiológicos, dependendo da natureza físico-química do poluente ou propriedade. Esses mecanismos fisiológicos podem ser classificados como fitoextração, fitodegradação, fitoestabilização, fitoestimulação e fitovolatilização (REZAEI et al., 2021; IVORRA et al., 2021).

5.3.3 Degradação

A degradação nos solos é a decomposição e mineralização do material orgânico depositado em sua superfície. Pode acontecer através da quebra do material orgânico particulado em compostos solúveis, por meio da digestão extra-celular enzimática realizada pela microbiota do solo, que resulta em sua absorção pelas células microbianas (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

A recalcitrância de um material é a resistência em sofrer essa decomposição e dependerá de alguns fatores, como: (i) solubilidade; (ii) rota de decomposição; (iii) estrutura química, pois quanto maior a variabilidade da cadeia e de grupos funcionais do contaminante, maior será o número de enzimas necessárias para sua decomposição; e (iv) a relação com outros elementos do solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). A grande dificuldade de remediação envolvendo os contaminantes orgânicos estudados no presente trabalho é justamente a complexidade de suas cadeias.

Através da quebra de macromoléculas pela ação das enzimas extracelulares liberadas pela microbiota do solo, monômeros de glicose, ácido graxos e aminoácidos são assimilados pelos microrganismos iniciando o que conhecemos por via glicolítica, cujo produto final é a geração de CO₂. Nesse caso, o carbono (C) encontra-se oxidado, uma vez que seus elétrons foram utilizados para a geração de energia no ciclo de Krebs (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

Essa oxidação do C e a produção de energia é chamada de respiração celular, e ocorre tanto em ambiente aeróbio quanto anaeróbio. Para a respiração celular em meio anaeróbio, se utiliza outro aceptor final de elétrons, alternativo ao O₂, e o ciclo de Krebs é parcialmente ativo. Assim, a geração de energia é menos eficiente. Isso acontece no caso dos manguezais, uma vez que os

substratos são geralmente anaeróbios. Portanto, as bactérias anaeróbias desempenham um papel importante na biodegradação dos compostos orgânicos nestes ambientes (LI et al., 2015).

Alguns contaminantes, como os HPAs, podem ser degradados sem oxigênio, na medida em que há outros aceptores de elétrons no solo, tais como: NO_3^- , SO_4^{2-} e Fe(III) (NOBREGA et al., 2013). Além disso, uma vantagem da biodegradação anaeróbia é que pode resultar em uma quebra completa das moléculas, e, portanto, converter esses contaminantes em CO_2 (MACRAE e HALL, 1998; NIEMAN et al., 2001). Já nos casos em que há biodegradação aeróbia, ocorre a formação de subprodutos decorrentes da decomposição incompleta no ambiente (CHANG et al., 2008). Assim, a degradação de poluentes orgânicos também é estratégia de remediação bastante difundida nos trabalhos que tratam da recuperação de manguezais.

6. DISCUSSÃO

6.1 Mecanismos endógenos de manguezais como atenuação ambiental monitorada

Os artigos observados no presente trabalho descreverem diferentes metodologias de recuperação de manguezais (degradação, fitorremediação e imobilização/transporte). No entanto, todas essas técnicas envolvem mecanismos biogeoquímicos dos solos ou plantas endógenos desses próprios ecossistemas, ou seja, tratam da capacidade de autorregulação dos manguezais.

Em alguns casos, observou-se o fenômeno da recuperação natural, que pode ser monitorado e então resultar em um processo de remediação conhecido: atenuação natural monitorada. Em outros casos, prospectou-se a possibilidade de ampliação desses mecanismos naturais.

Apesar da reconhecida capacidade dos manguezais em representar uma barreira biológica para contaminantes, a utilização desses mecanismos para recuperação deste e de outros ecossistemas ainda se mostra incipiente e os estudos se encontram, predominantemente, em fase exploratória. Por este motivo, há ainda dificuldade em estabelecer a capacidade de se autorregular dos manguezais como uma técnica de remediação propriamente dita. Neste sentido, muitos estudos pautam-se na investigação da capacidade de acumulação de contaminantes exercidas pelas próprias espécies microbiológicas e arbóreas comuns de manguezais para atenuar a contaminação local, de forma que espécies nativas possam ser utilizadas propositalmente nas etapas de remediação.

Hu et al. (2020) estudaram o mecanismo de adsorção de compostos orgânicos (retardantes de chama halogenados, comuns no ambiente principalmente em decorrência da atividade industrial) por espécies de comum ocorrência na flora de manguezais (*Avicennia marina*, *Bruguiera sexangula*, e *Kandelia obovata*). Foi realizado um estudo de bioacumulação dos compostos orgânicos nos caules e folhas de espécies nativas de manguezais, em relação a seu conteúdo no solo. Percebeu-se que alguns desses compostos tem maior facilidade de transporte e acumulação nos tecidos aéreos das plantas do que outros. O exercício de caracterização das diferentes formas de contaminação de manguezais, bem como de seus mecanismos de recuperação, é evidenciado pelo ineditismo na investigação dos poluentes orgânicos, como: Decabromodifenil etano (DBDPE), 1,2-bis(2,4,6 tribromofenoxi) etano (BTBPE), tetrabromo-p-xileno (pTBX), pentabromotolueno (PBT), pentabromoetilbenzeno (PBEB), hexabromobenzeno (HBB), bem como de seu comportamento nos solos e flora de mangue, revelados no estudo de Hu et al. (2020).

Diante desse contexto exploratório ainda incipiente, há estudos que não se debruçam sobre um mecanismo de uma ou outra espécie arbórea, mas que comparam bosques de mangues nativos em relação a bosques com espécies exóticas, para então avaliar as suas capacidades de autorregulação, como é caso da pesquisa de Zhao et al. (2012). Esses autores avaliam o efeito da revegetação de bosques com plantas nativas e exóticas para remediar manguezais contaminados por fontes orgânicas (bifenilos policlorados). Neste caso, os autores concluíram que, dentre os bosques estudados, aquele revegetado com espécies nativas obteve mais sucesso em relação à remediação da contaminação nos solos de manguezais.

No entanto, também há estudos acerca da prospecção de formas de remediação por meio de mecanismos específicos, referentes ao aumento da capacidade de degradação de poluentes orgânicos, por exemplo. Khan et al. (2022) realizaram a inoculação de bactérias específicas no contexto da engenharia de rizosfera, avaliando o aumento de sua capacidade de degradar poluentes para serem assimilados pelos tecidos vegetais com maior facilidade no processo de fitorremediação.

Os estudos de Lustosa et al. (2018) e Moghadam et al. (2014) sugerem que bactérias endógenas desse ecossistema, tais como *Proteobacterium*, *Pseudomonas* e *Exiguobacterium*, podem ser isoladas e inoculadas, e suas comunidades enriquecidas por serem capazes de degradar hidrocarbonetos aromáticos. Moghadam et al. (2014), além de isolar as comunidades de bactérias, testaram a eficiência do consórcio dessas comunidades bacterianas na

biodegradação dos HPAs. Tais bactérias podem ser utilizadas também em estratégias de biorremediação em outros ecossistemas. Ambos os estudos foram mantidos na revisão sistemática deste trabalho, já que uma de suas proposições poderia ser a utilização dessas bactérias para remediação de manguezais, caracterizando a autorregulação como uma estratégia de remediação deste ecossistema. Esse processo pode ser amplificado no sistema por meio de condições físico-químicas favoráveis, consórcios enriquecidos e inoculação de espécies previamente determinadas (LUSTOSA et al., 2018; MOGHADAM et al., 2014). Moreira et al. (2014) também sugeriram o uso de uma espécie muito comum de manguezais (*Avicennia schaueriana*) para fitorremediação de hidrocarbonetos de petróleo.

Também se pautando pela investigação de espécies particulares e de otimização de componentes endógenos desses ambientes, Verane et al. (2020) sugeriram o uso de uma das espécies mais comuns da flora do mangue, o popularmente conhecido “mangue vermelho”, para fitorremediação de manguezal contaminado com HPAs em associação com a microbiota endógena de solos de manguezais (Verane et al., 2020). De fato, os resultados mostraram que *Rizhophora mangle*, associada à microbiota estudada, foi capaz de promover a degradação dos contaminantes orgânicos em sedimentos de mangue quando comparados com a atenuação natural, confirmando o efeito positivo promovido pelos exsudatos radiculares e pela microbiota associada (Verane et al., 2020). Esses autores também variaram as condições ambientais do meio em suas simulações, tais como pH, Eh, teor de matéria orgânica e de oxigênio dissolvido, e puderam identificar as condições ótimas para o desenvolvimento deste processo. Isso caracteriza uma estratégia de recuperação, baseada na autorregulação dos manguezais, prospectando sua ampliação a depender de condições do meio.

Esse tipo de análise demonstra como os manguezais podem fundamentar potenciais estratégias a serem mimetizadas com vistas à recuperação destes e de outros ambientes, em razão de seu potencial biogeoquímico, caracterizando-se como fonte potencial para desenvolvimento de soluções baseadas na natureza (*Nature Based Solutions*). Uma forma de explorar essas *Nature Based Solutions* seria por meio de conhecimentos químicos e biológicos, fomentando o aumento das condições naturais de autorregulação desses ecossistemas por meio do uso de compostos externos.

Li et al. (2015) estudaram o aumento da capacidade da microbiota local para degradar compostos orgânicos por meio da adição de bicarbonatos de sódio. A estratégia não foi eficaz, mas mostra um caminho possível em que se utilizam os conhecimentos acerca das

características físico-químicas naturais dos manguezais somados a noções fundamentais de química para aumentar suas possibilidades de autorregulação. Estratégia semelhante foi utilizada por Wu et al. (2015). Neste sentido a autorregulação de manguezais pode ser considerada uma atenuação natural monitorada de contaminantes, e fonte para *Nature Based Solutions* para estes e outros ecossistemas.

Outro mecanismo natural, descrito por Wang et al. (2013), é o de imobilização de metais na rizosfera da flora de manguezais, evitando assim tanto o seu transporte para as vias aéreas de extrato arbóreo, que podem possuir tecidos mais sensíveis a estes tipos de contaminação, quanto sua exportação para ecossistemas adjacentes, onde poderia ocorrer biomagnificação do contaminante na cadeia trófica (WANG et al., 2013). Comparativamente, foram muito superiores as concentrações de metais encontrados no sistema radicular, em relação aos tecidos da parte aérea das plantas. Esse resultado indica que as raízes imobilizam fortemente os metais, e que as plantas de mangue desenvolveram mecanismos que limitam o transporte ascendente de metais potencialmente tóxicos, excluindo-os dos tecidos sensíveis. Isso ocorre por conta de um mecanismo de tolerância da flora baseado na exclusão do contaminante, através do qual a assimilação do metal pelos tecidos vegetais é evitada por meio de limitação de seu transporte no sistema (DAHMANI-MULLER et al., 2000). Neste sentido, espécies de mangue podem ser usadas em áreas úmidas construídas para tratamento de águas residuais, bem como para remediar ambientes marinhos poluídos por metais potencialmente tóxicos (ZHANG et al., 2012).

Wu et al. (2015) utilizaram a capacidade natural dos solos do manguezal para imobilizar elementos traço na forma de sulfetos metálicos, comuns em ambientes anaeróbios e com altas fontes de carbono orgânico. Este ecossistema possui especificidades geoquímicas que lhe conferem a capacidade de se tornar um dreno de elementos traço, especialmente metais catiônicos (HARBISON, 1986). Isso ocorre porque, uma vez que são ambientes alagados, a decomposição da matéria orgânica se dá por meio da redução de outros componentes do solo, que não o oxigênio, durante a degradação anaeróbia (MOREL, 2003; YU et al, 2021). Neste processo, o ferro e o sulfato são reduzidos e suas formas reduzidas podem vir a se precipitar como sulfetos metálicos, que por sua vez podem co-precipitar contaminantes metálicos (QUEIROZ et al, 2018). A indução e aceleração deste processo natural é uma estratégia de descontaminação por meio da imobilização de metais em ambientes de manguezal que vem sendo prospectada, e foi testada no estudo de Wu et al. (2015). Ainda, os autores simularam o aumento dessa capacidade natural de sequestro de poluentes inorgânicos ao adicionar externamente o enxofre elementar; o enxofre natural desses ambientes ocorre na forma de

sulfatos e é oriundo do mar. Mimetizar esse processo natural e então acelerá-lo foi uma estratégia eficaz de biorremediação (WU et al., 2015; QUEIROZ et al., 2018).

Meng et al. (2021) e Essien et al. (2013) estudaram efeito sobre a ecologia microbiana de algumas comunidades de bactérias frente à contaminação de manguezais por metais e por óleo, respectivamente, e sugerem o amplo uso do inóculo dessas comunidades bacterianas para enfrentar contaminações de manguezais por estes poluentes (MENG et al., 2021; ESSIEN et al., 2013). Para uso em processos de biorremediação de derramamentos de óleo em manguezais, Essien et al. (2013) sugeriram o uso de bactérias anaeróbias facultativas de vida livre fixadoras de nitrogênio, tais como *Azotobacter* sp, *Klebsiella* sp, *Bacillus* sp e *Pseudomonas aeruginosa*, por possuírem forte capacidade de degradar hidrocarbonetos e suas cepas serem naturalmente encontradas em solos de manguezais. O mesmo acontece no estudo de Fasanella et al. (2012), mas nesse caso os autores observaram o aumento das populações de fungos para propor que essa microbiota seja um importante aliado na descontaminação de manguezais atingidos por derramamento de óleo.

Diante disso, percebe-se que ampliar os conhecimentos acerca das propriedades dos manguezais pode ser a peça-chave para sua recuperação. É importante aproveitar características naturais destes ambientes, que condicionam sua resiliência frente aos contaminantes bem como sua remediação natural.

6.2 Monitoramento e intervenções nas áreas de manguezais contaminados

Os manguezais são ecossistemas que se comportam como dreno de poluentes orgânicos e inorgânicos. Suas espécies arbóreas, bem como sua microbiota, são adaptadas a condições de elevada salinidade, valores de pH próximos à neutralidade e valores de potencial redox (Eh) próximos de zero ou negativos. Por estes motivos, as florestas de mangues são resilientes, uma vez que as condições naturais são capazes de controlar a contaminação. No entanto, o monitoramento ambiental deve ser realizado periodicamente.

Por exemplo, espécies arbóreas naturais da flora de mangue podem ser utilizadas para fitorremediação. No entanto a concentração do contaminante e a presença de toxinas devem estar dentro dos limites de tolerância da planta utilizada, para não comprometer o tratamento (KAMATH et al., 2004). Dessa forma, mesmo que a atenuação natural monitorada seja proposta como estratégia de recuperação, outra intervenção pode ser necessária, inclusive para aumentar a capacidade de autorregulação desse ecossistema. Isso porque para que a atenuação natural monitorada seja eficiente a escala de tempo em que ocorre deve ser inferior aquela referente ao aporte de contaminantes.

Para o monitoramento, a legislação brasileira não apresenta parâmetros ideais para manguezais. No entanto os valores de referência da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) podem ser utilizados (BANESHI et al., 2014).

Muitas vezes, o entorno da contaminação pode influenciar o sucesso ou o insucesso de uma iniciativa de recuperação. Birch et al. (2015) compararam o efeito da iniciativa de recuperação de um manguezal que se baseava na retirada de sedimento e vegetação contaminados, seguida de replantio, com áreas contaminadas que não foram alvo de qualquer iniciativa de recuperação. Os resultados do trabalho demonstraram que, uma vez que o entorno do estuário seguia contaminando, os ecossistemas locais onde houve retirada de sedimentos e replantio não foi eficaz, uma vez que os colóides em suspensão na coluna d'água se associaram aos contaminantes orgânicos e se depositaram no ecossistema de mangue após o desenvolvimento vegetativo. Dessa forma, houve localmente o que os autores chamaram de “recontaminação do estuário”. Isso destaca a necessidade de monitoramento das ações de recuperação de manguezais, de forma a acompanhar se a estratégia escolhida foi ou não efetiva, e mostra que o processo de recuperação desses ecossistemas é muito mais complexo do que em áreas não alagadas, uma vez que a influência dos arredores é mais evidente. Destaca-se, então, a importância da prevenção ao invés da remediação, nesses casos.

6.3 Relevância da abordagem holística dos manguezais

Os processos de remediação avaliados nos estudos deste trabalho foram, em sua maioria, realizados em escala de laboratório, com alteração de um parâmetro por vez e mantendo todos os outros parâmetros em níveis fixos. Como resultado, o impacto desse parâmetro particular no processo pôde ser avaliado. No entanto, não houve informações sobre as interações mútuas dos parâmetros.

É importante ressaltar que manguezais são ecossistemas complexos, com muitas variáveis ambientais envolvidas que se alteram sazonalmente e diariamente, com o movimento das marés. Exemplos dessas variáveis são salinidade, acidez e disponibilidade de oxigênio dissolvido. Essas variáveis também se alteram de um manguezal para outro, pois o desenho do estuário em que se encontra determinado mangue pode delimitar sua salinidade máxima, sua capacidade de exportação de material primário, dentre muitos outros aspectos. Essas condições afetam a microbiota presente no ambiente, bem como a mesofauna e a macrofauna, e também as espécies florísticas do mangue.

Além disso, manguezais são alvos de diversas formas de contaminação, como já foi ressaltado no texto. Estudá-las de maneira isolada dificilmente será suficiente para a proposição de uma estratégia competente de recuperação. O desenvolvimento de modelos e processos de remediação para aplicação em zonas de mangue afetadas pela presença de hidrocarbonetos de petróleo em conjunto com metais tornou-se um importante requisito tecnológico nos países costeiros, em regiões com forte indústria de petróleo, por exemplo, uma vez que os manguezais dessa região são simultaneamente atingidos por contaminantes de naturezas distintas (BOIS et al., 2013; GRATÃO et al., 2005).

Neste sentido, a fim de minimizar os impactos desse tipo de estudo, a maneira mais adequada de investigar tanto a contaminação quanto a remediação de manguezais seria por seu estudo *in situ*. Este aspecto do estudo de campo, que considera a abordagem holística do funcionamento do manguezal, é de extrema relevância para o avanço científico do tema, uma vez que, partindo do princípio que estes ecossistemas estão sujeitos a variadas fontes de contaminação, a eventual presença de metais (tais como Al, Fe, Pb, Cr, Cu, Zn e Ni) poderia afetar a capacidade de remediação dos contaminantes orgânicos identificados no mangue. Sendo assim, ao realizar o estudo em laboratório, por vezes não são consideradas variáveis que podem influenciar a efetividade dos mecanismos de descontaminação investigados.

Este aspecto evidencia que, para o desenvolvimento de um projeto de descontaminação de manguezais, assim como no desenvolvimento de estratégias de descontaminação de ambientes terrestres, tanto as fontes de contaminação quanto as características de cada bosque devem ser caracterizados caso a caso. Wang et al. (2014) estudaram os efeitos do exsudato de algumas espécies florísticas de manguezais na remoção de hidrocarbonetos dos solos de mangue e elegeram, dentre as espécies estudadas, a *Bruguiera gymnorhiza* como sendo a mais indicada para futuras tentativas de remediação. No entanto, um estudo anterior (WANG et al., 2012) acerca dessa mesma espécie havia apontado que, para o caso de contaminação por metais, esta pode ser negativamente afetada caso esteja no estágio inicial de seu desenvolvimento vegetativo. Dessa forma, é necessária a caracterização aprofundada das propriedades destes ambientes: uma mesma espécie com efeitos positivos para a descontaminação do ambiente por poluentes orgânicos pode não resistir a poluentes inorgânicos e, dada a heterogeneidade dos manguezais, bem como das fontes de poluição que os atingem, ambos os tipos de contaminantes podem estar presentes nesse ecossistema ao mesmo tempo, a depender do histórico de contaminação da região.

6.4 Considerações acerca dos artigos excluídos na etapa de seleção

Algumas observações gerais a respeito dos artigos excluídos na etapa de seleção da revisão sistemática chamaram a atenção. A primeira delas é que muitos dos artigos não diziam respeito a estratégias de mitigação, mas buscavam encontrar bioindicadores de contaminação nesses ecossistemas, ou ainda avaliar a extensão do stress causado por contaminantes nos diferentes compartimentos do ambiente. Esses trabalhos foram excluídos da análise bibliográfica por estarem fora do escopo da pesquisa. Entretanto, demonstram algumas tendências a respeito dos estudos envolvendo contaminações e o ecossistema manguezal.

A primeira tendência observada é de um detalhamento das formas de contaminação nesses ambientes, condições do meio que podem aumentar o risco de toxicidade apresentados por estes contaminantes, bem como um detalhamento acerca dos efeitos causados por estes contaminantes. Por exemplo, Wang et al. (2020), exploraram a variação do risco ao qual está exposta a população que possui contato direto com manguezais contaminados por metais, em adquirir qualquer tipo de intoxicação a depender da granulometria dos solos destes ambientes. Zabbey e Uyi (2021), por sua vez, tentaram encontrar efeitos de um derramamento de óleo na população bentônica dos manguezais do delta Niger, na Nigéria, bem como buscaram identificar espécies como bioindicadores de contaminação orgânica nos estuários da região.

Essa tendência de maior detalhamento e caracterização da contaminação aconteceu a partir do aumento recente dos interesses acerca destes ambientes, em decorrência do avanço científico que, nos últimos anos, demonstrou a variedade de Serviços Ecossistêmicos que os manguezais fornecem. Um dos principais serviços está relacionado à sua relevância em sequestrar e estocar carbono, o que fundamenta o aumento dos interesses de conservação e restauração dessas áreas (SANNIGRAHI et al., 2020).

Além disso, esses ecossistemas também são alvos de contaminações de variadas naturezas, tanto de origem orgânica quanto inorgânica, e alguns contaminantes descritos nos artigos estudados são ainda pouco estudados nos manguezais do mundo todo. É, o caso dos elementos terras raras, cuja extensão da gravidade de contaminação bem como os caminhos biogeoquímicos para sua ecotoxicidade, ainda são muito incipientes, principalmente em se tratando de estudos em manguezais (MANDAL et al, 2019; WU et al., 2019). Os terras-raras, no entanto, devem, futuramente, ser alvos de trabalhos de pesquisa sobre prevenção e remediação, principalmente em razão da sua não biodegradabilidade, persistência e bioacumulação no meio ambiente (DE FREITAS et al., 2021; WU et al., 2019). Neste sentido,

os artigos revelados pela pesquisa deste trabalho que reportam os elementos terras-raras em mangues se pautam na caracterização desta contaminação e na descrição do fenômeno observado (SHEN et al., 2021), não contendo qualquer indicação de possibilidade de restauração, e por este motivo sendo excluído da etapa de seleção do presente trabalho.

Essa variação de contaminantes ocorre principalmente em decorrência de sua localização de vulnerabilidade no encontro do rio com o mar, de forma que tanto contaminantes oriundos do continente chegam nesses ecossistemas estuarinos quando lançados nos corpos d'água, quanto contaminantes despejados nos oceanos acabam por atingir esses locais em decorrência dos movimentos de marés.

Outro fator que deve ser observado a partir desses estudos é que, além de serem incipientes os conhecimentos acerca das magnitudes e das variadas formas de contaminação dos manguezais, há outros ecossistemas diretamente relacionados a estes, como o ecossistema marinho, por exemplo, que pode ser diretamente afetado pelas contaminações em zonas de estuário. Assim, muitos trabalhos buscavam compreender e caracterizar a forma como se dá a contaminação nos manguezais e qual a extensão dessa contaminação para os demais ecossistemas aos quais estão interligados. Ivorra et al. (2021) ressaltaram em seu trabalho de revisão a importância da manutenção das florestas de mangue como reguladores dos ecossistemas que os circundam. Isso ocorre em decorrência da capacidade deste ecossistema em se comportar como um sumidouro de poluentes, caracterizando-se como uma unidade de remediação para os ecossistemas adjacentes, demonstrando que solos e plantas dos manguezais podem reter elementos traço ou substâncias orgânicas. No caso do estudo de Ivorra et al. (2021), foi investigado o potencial desse ecossistema em remediar contaminações por pesticidas, muito comuns nos corpos d'água do continente, por meio de uma análise integrada de todos os compartimentos de um manguezal (água, solo e biota). Este artigo de revisão, por ser material secundário, não foi selecionado para a presente revisão.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apontou que estudos com contaminações de manguezais ainda estão em fase incipiente, tanto na caracterização da amplitude da contaminação quanto com relação à capacidade desses ecossistemas em desenvolver uma atenuação natural destes poluentes. No entanto, ficou evidente que o conhecimento acerca dos mecanismos biogeoquímicos que moldam essa capacidade de auto regulação dos manguezais caracteriza processos de *Nature*

Based Solutions, que podem ser a solução para contaminações ambientais nestes e em outros ecossistemas.

Justamente por ser uma fase ainda exploratória do estado da arte da produção acadêmica com relação a ameaças e potenciais dos manguezais, as incitativas de recuperação e os mecanismos propostos devem ser periodicamente monitorados. Neste sentido, há uma demanda normativa para o estabelecimento de parâmetros adequados para esse tipo de ecossistema.

A investigação de uma série de trabalhos que se referem ao mesmo tema permite perceber que a complexidade deste ecossistema coloca ao pesquisador a demanda de fazer uma abordagem detalhada, mas holística, tanto da contaminação de cada área quanto da proposição de mecanismos de recuperação, de forma que o estudo dos manguezais deve ser feito caso a caso e, preferencialmente, em campo. Frente à complexidade do tema e à falta de normativa acerca da temática da contaminação de manguezais, seria de grande valia o desenvolvimento de um guia de gerenciamento de manguezais. Este poderia ser um texto acadêmico com fundamentação teórica sólida, e continuamente desenvolvido, sem a necessidade de se estabelecer como uma normativa uma vez que o tema segue em estágio incipiente de investigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSOUR, Mona SM. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. **Egyptian journal of petroleum**, v. 25, n. 1, p. 107-123, 2016.

ALI, Waqar et al. Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries. **Journal of hazardous materials**, v. 397, p. 122720, 2020.

ASSESSMENT, Millennium Ecosystem. Millennium ecosystem assessment. Millennium Ecosystem Assessment, 2001.

AYANGBENRO, Ayansina Segun; BABALOLA, Olubukola Oluranti. A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. **International journal of environmental research and public health**, v. 14, n. 1, p. 94, 2017.

BANESHI, Mohammad Mehdi et al. Effect of bioaugmentation to enhance phytoremediation for removal of phenanthrene and pyrene from soil with Sorghum and Onobrychis sativa. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 1-7, 2014

BIRCH, Gavin; NATH, Bibhash; CHAUDHURI, Punarbasu. Effectiveness of remediation of metal-contaminated mangrove sediments (Sydney estuary, Australia). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 8, p. 6185-6197, 2015.

BOIS, Paul et al. Herbicide mitigation in microcosms simulating stormwater basins subject to polluted water inputs. **Water research**, v. 47, n. 3, p. 1123-1135, 2013.

BOURGEOIS, Carine et al. Sedimentary and elemental dynamics as a function of the elevation

profile in a semi-arid mangrove toposequence. **Catena**, v. 173, p. 289-301, 2019.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 102, 28 maio 2012. Seção 1, p.1. Disponível em <<http://portal.in.gov.br/>>.

CARDOSO, Elke Jurandy Bran Nogueira e ANDREOTE, Fernando Dini. Microbiologia do Solo 1° Edição. Piracicaba, ESALQ, 2016.

CHANG, Bea-Ven; CHANG, I-Ta; YUAN, Shaw Ying. Anaerobic degradation of phenanthrene and pyrene in mangrove sediment. **Bulletin of environmental contamination and toxicology**, v. 80, n. 2, p. 145-149, 2008.

CHAUDHURI, Punarbasu; NATH, Bibhash; BIRCH, Gavin. Accumulation of trace metals in grey mangrove *Avicennia marina* fine nutritive roots: the role of rhizosphere processes. **Marine pollution bulletin**, v. 79, n. 1-2, p. 284-292, 2014.

CHOUDHURY, Tasrina Rabia et al. Heavy metals contamination of river water and sediments in the mangrove forest ecosystems in Bangladesh: A consequence of oil spill incident. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 16, p. 100484, 2021.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006. Resolução nº 369, de 28 de março de 2006. Ministério do Meio Ambiente. Março, 2005

COSTANZA, Robert et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253-260, 1997.

COSTANZA, Robert et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global environmental change**, v. 26, p. 152-158, 2014.

DAHMANI-MULLER, H. et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. **Environmental pollution**, v. 109, n. 2, p. 231-238, 2000.

DE FREITAS, Tácia O. P.; PEDREIRA, Rodrigo M. A.; HATJE, Vanessa. Distribution and fractionation of rare earth elements in sediments and mangrove soil profiles across an estuarine gradient. **Chemosphere**, v. 264, p. 128431, 2021.

ESSIEN, Joseph et al. Activities of hydrocarbon-utilizing and diazotrophic bacteria in crude oil impacted mangrove sediments of the Qua Iboe Estuary, Nigeria. **Geosystem Engineering**, v. 16, n. 2, p. 165-174, 2013.

FASANELLA, Cristiane Cipola et al. The selection exerted by oil contamination on mangrove fungal communities. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 223, n. 7, p. 4233-4243, 2012.

GIRI, Chandra et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154-159, 2011.

GHOZALI, Ali A. et al. Oil contamination in mangrove ecosystems: Impacts and rehabilitations. **Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation**, v. 10, n. 6, p. 1711-1721, 2017.

GRATÃO, Priscila Lupino et al. Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 53-64, 2005.

HARBISON, P. A. T. Mangrove muds—a sink and a source for trace metals. **Marine Pollution Bulletin**, v. 17, n. 6, p. 246-250, 1986.

HE, Xinran et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from Guan River Estuary, China. **Marine pollution bulletin**, v. 80, n. 1-2, p. 52-58, 2014.

- HU, Yongxia et al. Polybrominated diphenyl ethers and alternative halogenated flame retardants in mangrove plants from Futian National Nature Reserve of Shenzhen City, South China. **Environmental Pollution**, v. 260, p. 114087, 2020.
- HUANG, Lin et al. Improving ecological conservation and restoration through payment for ecosystem services in Northeastern Tibetan Plateau, China. **Ecosystem Services**, v. 31, p. 181-193, 2018
- IVORRA, Lucia et al. Can mangroves work as an effective phytoremediation tool for pesticide contamination? An interlinked analysis between surface water, sediments and biota. **Journal of Cleaner Production**, p. 126334, 2021.
- JIANG, Ning-Jun et al. Microbial induced carbonate precipitation for immobilizing Pb contaminants: Toxic effects on bacterial activity and immobilization efficiency. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 722-731, 2019.
- KAMATH, R. et al. Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and applications. In: Studies in surface science and catalysis. **Elsevier**, 2004. p. 447-478.
- KELLEWAY, Jeffrey J. et al. Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. **Global Change Biology**, v. 23, n. 10, p. 3967-3983, 2017.
- KHAN, Abdul Latif et al. Mangrove's rhizospheric engineering with bacterial inoculation improve degradation of diesel contamination. **Journal of Hazardous Materials**, p. 127046, 2021.
- KITCHENHAM, Barbara. Procedures for performing systematic reviews. Keele, UK, Keele University, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.
- LI, Chun-Hua et al. Anaerobic biodegradation of PAHs in mangrove sediment with amendment of NaHCO₃. **Journal of Environmental Sciences**, v. 30, p. 148-156, 2015.
- LUSTOSA, Mayara A. et al. Petroleum hydrocarbon degradation by isolated mangrove bacteria. **Revista peruana de biología**, v. 25, n. 4, p. 453-456, 2018.
- MACRAE, Jean D.; HALL, Kenneth J. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in marine sediment under denitrifying conditions. **Water science and technology**, v. 38, n. 11, p. 177-185, 1998.
- MANDAL, Sanjay K. et al. State of rare earth elements in the sediment and their bioaccumulation by mangroves: a case study in pristine islands of Indian Sundarban. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 9, p. 9146-9160, 2019.
- MARCHAND, Cyril; FERNANDEZ, J.-M.; MORETON, B. Trace metal geochemistry in mangrove sediments and their transfer to mangrove plants (New Caledonia). **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 216-227, 2016.
- MARTINI, Aline Fachin et al. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104751, 2020.
- MATZEK, Virginia; WILSON, Kerrie A.; KRAGT, Marit. Mainstreaming of ecosystem services as a rationale for ecological restoration in Australia. **Ecosystem services**, v. 35, p. 79-86, 2019.

- MENG, Shanshan et al. Interactions between heavy metals and bacteria in mangroves. **Marine Pollution Bulletin**, v. 172, p. 112846, 2021.
- MISHRA, Manisha; MOHAN, Devendra. Bioremediation of contaminated soils: an overview. **Adaptive Soil Management: From Theory to Practices**, p. 323-337, 2017.
- MOGHADAM, Mohsen Shahriari et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterial consortium enriched from mangrove sediments. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 1-9, 2014.
- MOREIRA, Ícaro et al. Strategies of bioremediation for the degradation of petroleum hydrocarbons in the presence of metals in mangrove simulated. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 44, n. 6, p. 631-637, 2016.
- MOREL, François; PRICE, Neil M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. **Science**, v. 300, n. 5621, p. 944-947, 2003.
- NESSHÖVER, Carsten et al. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. **Science of the total environment**, v. 579, p. 1215-1227, 2017.
- NIEMAN, Karl C. et al. Fate of pyrene in contaminated soil amended with alternate electron acceptors. **Chemosphere**, v. 44, n. 5, p. 1265-1271, 2001.
- NÓBREGA, Gabriel Nuto et al. Iron and sulfur geochemistry in semi-arid mangrove soils (Ceará, Brazil) in relation to seasonal changes and shrimp farming effluents. **Environmental monitoring and assessment**, v. 185, n. 9, p. 7393-7407, 2013.
- NUALLA-ONG, Aekkaraj; PHONGDARA, Amornrat; BUAPET, Pimchanok. Copper and zinc differentially affect root glutathione accumulation and phytochelatin synthase gene expression of *Rhizophora mucronata* seedlings: Implications for mechanisms underlying trace metal tolerance. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 205, p. 111175, 2020.
- PRIMAVERA, Jurgenne et al. The mangrove ecosystem. *World Seas: an Environmental Evaluation*, p. 1-34, 2019.
- QUEIROZ, Hermano Melo et al. Are acid volatile sulfides (AVS) important trace metals sinks in semi-arid mangroves?. **Marine pollution bulletin**, v. 126, p. 318-322, 2018.
- REID, Walter V. *Millennium ecosystem assessment*. 2005.
- REZAEI, Marzieh et al. Heavy metals concentration in mangrove tissues and associated sediments and seawater from the north coast of Persian Gulf, Iran: Ecological and health risk assessment. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 15, p. 100456, 2021.
- SANNIGRAHI, Srikanta et al. Responses of ecosystem services to natural and anthropogenic forcings: A spatial regression based assessment in the world's largest mangrove ecosystem. **Science of the Total Environment**, v. 715, p. 137004, 2020.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Yara et al. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health & Management**, v. 3, n. 4, p. 561-570, 2000.
- SHEN, Xiaoxue et al. Occurrence and Contamination of Rare Earth Elements in Urban Mangroves of Shenzhen, South China. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2503, 2021.

SHETE, Akshayya; GUNALE, Venkat.; PANDIT, Gauri Girish. Organochlorine pesticides in *Avicennia marina* from the Mumbai mangroves, India. **Chemosphere**, v. 76, n. 11, p. 1483-1485, 2009.

SILVA, Carlos Augusto; LACERDA, Luiz; REZENDE, Carlos. Metals reservoir in a red mangrove forest. **Biotropica**, p. 339-345, 1990.

SUKHDEV, Pavan; WITTMER, Heidi. The economics of ecosystems and biodiversity. na, 2008.

USMAN, Adel Rabie Ahmed; ALKREDAA, Raed; AL-WABEL, Mohammad. Heavy metal contamination in sediments and mangroves from the coast of Red Sea: *Avicennia marina* as potential metal bioaccumulator. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 97, p. 263-270, 2013.

VERÂNE, Jéssica et al. Phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mangrove sediments using *Rhizophora mangle*. **Marine Pollution Bulletin**, v. 160, p. 111687, 2020.

WANG, Yutao et al. Heavy metal contamination in a vulnerable mangrove swamp in South China. **Environmental monitoring and assessment**, v. 185, n. 7, p. 5775-5787, 2013.

WANG, Weilong et al. A combined experimental and simulation study on charging process of Erythritol–HTO direct-blending based energy storage system. **Energy conversion and management**, v. 83, p. 306-313, 2014.a

WANG, Yuanyuan et al. Effects of low molecular-weight organic acids and dehydrogenase activity in rhizosphere sediments of mangrove plants on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Chemosphere**, v. 99, p. 152-159, 2014.b

WANG, Qiang et al. Health risk assessment of heavy metal and its mitigation by glomalin-related soil protein in sediments along the South China coast. **Environmental Pollution**, v. 263, p. 114565, 2020.

What are POPs?. United Nation environment programme, 2019. Disponível em <<http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOP>>, Acesso em 08 de janeiro de 2022

WU, Yu-Ling et al. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater from the Western Taiwan Strait, China. **Marine Pollution Bulletin**, v. 63, n. 5-12, p. 459-463, 2011.

WU, Jun et al. Distribution, pollution, and ecological risks of rare earth elements in soil of the northeastern Qinghai–Tibet Plateau. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 25, n. 7, p. 1816-1831, 2019.

WU, Guirong et al. Effects of sulfur on arsenic accumulation in seedlings of the mangrove *Aegiceras conrriculatum*. **Australian Journal of Botany**, v. 63, n. 8, p. 664-668, 2015.

YADAV, Abhinav et al. A Holistic Study on Impact of Anthropogenic Activities over the Mangrove Ecosystem and Their Conservation Strategies. In: **Coastal Ecosystems**. Springer, Cham, 2022. p. 265-284.

YU, Changxun et al. Biogeochemical cycling of iron (hydr-) oxides and its impact on organic carbon turnover in coastal wetlands: A global synthesis and perspective. **Earth-Science Reviews**, p. 103658, 2021.

ZABBEY, Nenibarini; UYI, Hanson. Community responses of intertidal soft-bottom macrozoobenthos to oil pollution in a tropical mangrove ecosystem, Niger Delta, Nigeria. **Marine pollution bulletin**, v. 82, n. 1-2, p. 167-174, 2014.

ZHANG, Ting et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990–2010. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 189-197, 2012.

ZHAO, Bo; ZHOU, Yan-wu; CHEN, Gui-zhu. The effect of mangrove reforestation on the accumulation of PCBs in sediment from different habitats in Guangdong, China. **Marine pollution bulletin**, v. 64, n. 8, p. 1614-1619, 2012.