

Biorremediação: metodologia sustentável na remoção de xenobióticos da água

Bioremediation: sustainable methodology in the removal of xenobiotics from water

Biorremediación: metodología sostenible en la eliminación de xenobióticos del agua

Recebido: 20/06/2022 | Revisado: 29/06/2022 | Aceito: 30/06/2022 | Publicado: 10/07/2022

Camila Morizzo Copetti

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9822-5141>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: camilamcopetti@hotmail.com

Márcia Sostmeyer Jung

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-3622>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: sostmeyerjungm@gmail.com

José Antonio Gonzalez da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9335-2421>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: jose.gonzales@unijui.edu.br

Juliana Maria Fachinetto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0864-9643>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: juliana.fachinetto@unijui.edu.br

Rafael Schneider Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7379-7063>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: rafaelschneider85@gmail.com

Giulia Hoffmann de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3392>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: giuliahoffmann7@gmail.com

Denize da Rosa Fraga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8624>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: denise.fraga@unijui.edu.br

Júlia Sarturi Jung

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7105-4063>
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: julia.jung2002@gmail.com

Resumo

A água é essencial para a sustentabilidade da vida, sendo que apenas 2,5% do volume total é doce e disponível em reservas subterrâneas e superficiais, sendo responsáveis por fornecer água para abastecimento humano, desenvolvimento de atividades econômicas e manutenção da biodiversidade. O crescimento demográfico, a urbanização e a expansão das atividades econômicas agrícolas e industriais requerem a utilização cada vez maior de diferentes produtos químicos, que atingem os recursos hídricos por diferentes vias. Estas substâncias químicas, denominadas xenobióticos, são facilmente encontradas na água, comprometendo a qualidade e o seu fornecimento seguro. Além disso, tornou-se preocupação global por oferecer graves riscos para a saúde humana e manutenção da biodiversidade. O objetivo da pesquisa é verificar se a biorremediação é utilizada para tratamento de águas residuais e de abastecimento, visando fornecer subsídios para definir qual o melhor sistema de tratamento a ser utilizado de acordo com as características da água a ser tratada. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, descritiva, tipo revisão integrativa de literatura. Os artigos selecionados apontam a biorremediação como uma alternativa sustentável e econômica para remover xenobióticos da água, utilizando diferentes organismos (microalgas, fungos, cianobactérias). Além disso, a fitorremediação mostrou-se também uma excelente opção para determinados xenobióticos.

Palavras-chave: Saúde; Meio ambiente; Recursos hídricos; Contaminantes emergentes; Agenda 2030.

Abstract

Water is essential for the sustainability of life, and only 2.5% of the total volume is fresh and available in underground and surface reserves, being responsible for providing water for human supply, development of economic activities and maintenance of biodiversity. Population growth, urbanization and the expansion of agricultural and industrial economic activities require the increasing use of different chemical products, which reach water resources in different ways. These chemicals, called xenobiotics, are easily found in water, compromising its quality and safe supply. In

addition, it has become a global concern as it poses serious risks to human health and the maintenance of biodiversity. The objective of the research is to verify if bioremediation is used for the treatment of wastewater and supply, aiming to provide subsidies to define the best treatment system to be used according to the characteristics of the water to be treated. This is a qualitative, descriptive, integrative literature review type. The selected articles point to bioremediation as a sustainable and economical alternative to remove xenobiotics from water, using different organisms (microalgae, fungi and cyanobacteria). In addition, phytoremediation has also proved to be an excellent option for certain xenobiotics.

Keywords: Health; Environment; Water resources; Emerging contaminants; 2030 Agenda.

Resumen

El agua es fundamental para la sostenibilidad de la vida, siendo sólo el 2,5% del volumen total dulce y disponible en reservas subterráneas y superficiales, siendo responsable de proporcionar agua para el abastecimiento humano, el desarrollo de actividades económicas y el mantenimiento de la biodiversidad. El crecimiento de la población, la urbanización y la expansión de las actividades económicas agrícolas e industriales requieren el uso creciente de diferentes productos químicos, que llegan a los recursos hídricos de diferentes maneras. Estos químicos, llamados xenobióticos, se encuentran fácilmente en el agua, comprometiendo su calidad y suministro seguro. Además, se ha convertido en una preocupación mundial ya que plantea graves riesgos para la salud humana y el mantenimiento de la biodiversidad. El objetivo de la investigación es verificar si la biorremediación se utiliza para el tratamiento de aguas residuales y suministro, con el objetivo de proporcionar subsidios para definir el mejor sistema de tratamiento a utilizar de acuerdo con las características del agua a tratar. Se trata de una revisión de literatura cualitativa, descriptiva e integradora. Los artículos seleccionados apuntan a la biorremediación como una alternativa sostenible y económica para eliminar xenobióticos del agua, utilizando diferentes organismos (microalgas, hongos, cianobacterias). Además, la fitorremediación también ha demostrado ser una excelente opción para ciertos xenobióticos.

Palabras clave: Salud; Medio ambiente; Recursos hídricos; Contaminantes emergentes; Agenda 2030.

1. Introdução

A água é essencial para a sustentabilidade da vida na terra, sendo que apenas 2,5% do volume total é doce e encontra-se disponível em reservas subterráneas e superficiais, sendo responsáveis por fornecer água para abastecimento humano, desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais e manutenção da biodiversidade (Oliveira, 2018; Xu et al., 2020; ANA, 2022). O crescimento demográfico, a urbanização e a expansão das atividades econômicas agrícolas e industriais demandam a utilização crescente de produtos químicos com diferentes finalidades. O resultado é a inserção de grandes quantidades de diferentes compostos químicos nos diversos compartimentos ambientais, com destaque para os recursos hídricos, provenientes de descargas industriais e agrícolas e de outras origens antrópicas (Almeida et. al., 2007; Montagner et. al., 2019). Neste sentido, a disponibilidade de água com qualidade aos múltiplos usuários é uma das grandes preocupações das autoridades mundiais em função da demanda crescente por água, do comprometimento da qualidade da água em escala mundial e das alterações climáticas que ameaçam o equilíbrio do ciclo hidrológico. Neste sentido, a ONU lançou a Agenda 2030 em 2015, composta por dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) com metas específicas que buscam melhorar a qualidade de vida para o planeta, tanto para seres humanos, como para o meio ambiente (Figura 1). O presente estudo está diretamente ligado aos ODS 3 que busca a saúde e o bem-estar e ODS 6 que visa água potável e saneamento a todos e todas (ONU, 2015).

Figura 1. 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).



Fonte: ONU (2015).

Os compostos químicos sintéticos são persistentes por natureza e são denominados de xenobióticos ou contaminantes emergentes, os quais em altas concentrações poluem o meio ambiente. Dentre eles, destacam-se os fármacos, compostos usados em produtos de higiene pessoal (ex: protetores solares), hormônios, alquilfenóis e seus derivados, drogas ilícitas, sucralose e outros adoçantes artificiais, pesticidas; subprodutos provenientes de processos de desinfecção de águas (DPB, do inglês, Desinfect by Products); retardantes de chama bromados; compostos perfluorados; siloxanos; benzotriazóis; ácidos naftênicos; percloratos; dioxinas; nanomateriais; líquidos iônicos e microplásticos. Além desses, alguns microorganismos e toxinas de algas também são considerados contaminantes emergentes (Richardson & Kimura, 2016). São substâncias com elevado potencial tóxico que vêm sendo utilizadas há muitas décadas como também novas substâncias decorrentes dos avanços tecnológicos, não estando incluídos em programas de monitoramento pelos órgãos do meio ambiente e saúde, por não estarem inseridos nas legislações de controle ambiental. O termo “emergente” é utilizado pela preocupação que há em torno destas substâncias em função dos resultados das pesquisas a respeito dos impactos reais e potenciais à saúde humana e ambiental (Montagner et al., 2017). Os xenobióticos são encontrados atualmente em todas as matrizes ambientais (água, solo e ar) como resultado da disposição final dos produtos que as contêm e dos processos de lixiviação e dispersão. Com relação à saúde pública, a poluição ambiental é uma das principais preocupações por oferecer risco gigantesco para seres humanos e para a manutenção da biodiversidade (Ai-Jawhari, 2018).

O debate a respeito da presença de contaminantes emergentes vem ganhando destaque por pesquisadores do mundo todo, pois centenas de compostos têm sido detectados na água, sendo eles tanto de origem antrópica presentes em efluentes domésticos, industriais, hospitalares e aqueles provenientes das atividades agrícola e pecuária, quanto de ocorrência natural (Montagner et al., 2017). Em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, um dos principais agravantes destes problemas é a falta de tratamento de esgoto, gerando impactos causados pelo despejo inadequado desse resíduo líquido no meio ambiente (Bárta et al., 2021). As tecnologias de tratamento mais difundidas não são totalmente eficazes para remover os xenobióticos encontrados no esgoto, dentre eles os fármacos encontrados em corpos d’água após as Estações de Tratamento (ETE). A maior carga desses produtos químicos é oriunda de áreas urbanas e atinge o meio aquático, preferencialmente via escoamento urbano e/ou por meio das águas residuárias domésticas e industriais (Américo-Pinheiro et al., 2018).

Dentre os efeitos nocivos devido à presença de xenobióticos nos ambientes aquáticos, destacam-se a carcinogenicidade e a mutagenicidade em humanos e animais, bem como a redução na biodiversidade aquática (Kaur & Maddela, 2021). O risco é intensificado em função de que muitos desses compostos ou seus metabólitos sofrem bioacumulação (Auriol et al., 2006; Castiglioni et al., 2006). Além disso, dificilmente são encontrados contaminantes emergentes isolados, mas sim a presença de misturas complexas de diferentes substâncias químicas que causam contaminação da água devido à sua

toxicidade grave, exposição prolongada e biodegradabilidade limitada (Rathore et al., 2022). A preocupação com relação à saúde pública é ainda maior porque no grupo dos contaminantes emergentes, uma grande parcela é denominada interferentes endócrinos. Estas substâncias químicas podem ser sintéticas ou naturais, que mesmo em pequenas quantidades, podem interferir no sistema endócrino de seres humanos e até mesmo de animais. São também conhecidas como desreguladores endócrinos, xenoestrogênios, fitoestrogênios, disruptores endócrinos e estrogênios ambientais (Ghiselli & Jardim, 2007).

Neste sentido, há uma grande preocupação com relação às tecnologias de tratamento de água e de águas residuárias, pois estudos comprovam níveis alarmantes de xenobióticos na água potável gerando insegurança aos consumidores. Os poluentes podem ser removidos por métodos físicos, químicos e biológicos de tratamento, minimizando os efeitos na saúde humana e ambientais. No entanto, essas metodologias possuem algumas limitações para degradar a mistura complexa de xenobióticos presentes nas águas superficiais e subterrâneas, bem como nas águas residuais nas estações de tratamento. Além disso, não são rentáveis, causam interferência na composição dos corpos hídricos naturais e também levam a diferentes toxinas e outros compostos no ecossistema. A utilização de microrganismos para a biorremediação de poluentes xenobióticos tem despontado como uma ferramenta eficiente, ecológica e valiosa de tratamento de água e águas residuais por ser um método econômico e por não gerar resíduos tóxicos. Essas abordagens biológicas empregam microrganismos potenciais, como bactérias, algas e fungos em condições aeróbicas ou anaeróbicas (Daronco et al., 2020). A remoção dos xenobióticos da água inclui métodos como a biossorção, acúmulo, precipitação, solubilização, redução e também fitorremediação com o auxílio de raízes de plantas (Ai-Jawhari, 2018; Rathore et al., 2022).

Diante do cenário se justificam estudos que buscam reunir informações sobre sistemas eficientes na remoção de xenobióticos presentes nos recursos hídricos garantindo água potável e segura à população. A pesquisa tem por objetivo verificar se a biorremediação é utilizada para tratamento de águas residuais e de abastecimento, visando fornecer subsídios para definir qual o melhor sistema de tratamento a ser utilizado de acordo com as características da água a ser tratada.

2. Metodologia

Trata-se de uma pesquisa qualitativa, descritiva, tipo revisão integrativa de literatura que permite a busca, a avaliação crítica e a síntese das evidências sobre a temática investigada (Souza, Silva & Carvalho, 2010; Pereira et al., 2018). O estudo foi realizado de abril a maio de 2022. Para a elaboração da revisão integrativa foram seguidos os seguintes passos de execução: escolha do tema e construção da questão norteadora; investigação bibliográfica sistematizada; avaliação crítica e categorização dos estudos selecionados; interpretação dos resultados; e síntese do conhecimento obtido. O estudo foi orientado pela seguinte pergunta: Métodos de tratamento com biorremediação estão sendo utilizados no tratamento de águas residuais e de abastecimento para remover os xenobióticos?

Foram estabelecidos os seguintes critérios de inclusão: somente artigos científicos; artigos publicados entre janeiro de 2018 e maio de 2022; apenas em Português e Inglês; revisado por pares. E os seguintes critérios de exclusão: teses, dissertações, monografias, livros, e-books e informes técnicos; artigos sem relação com a temática; repetidos em bases de dados diferentes; publicados em outros idiomas; e quando não estão disponíveis para leitura na íntegra.

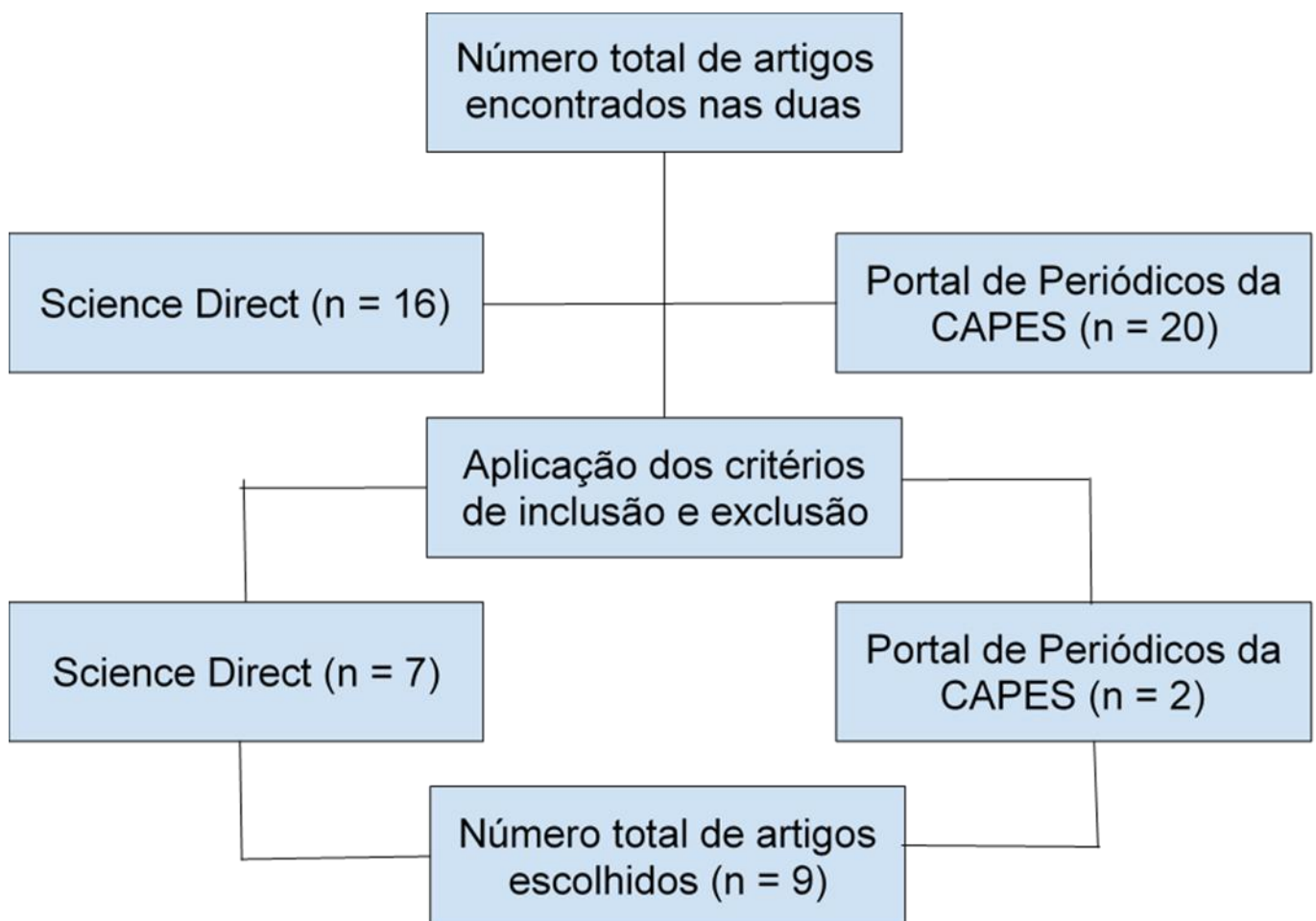
O levantamento das publicações foi realizado em duas bases de dados: 1. Science Direct e 2. Portal de Periódicos da CAPES. Foram abordadas as seguintes combinações de palavras: xenobiotics “and” drinking water “and” sewer “and” treatment methods with bioremediation. Para a pesquisa no Portal de Periódicos da CAPES, foi necessária uma adequação no último termo para bioremediation treatment.

3. Resultados

Nas bases de dados pesquisadas foram encontrados um total de 36 artigos, a partir do cruzamento dos descritores.

Sendo que 16 artigos foram encontrados na Science Direct e 20 no Portal de Periódicos da CAPES. Na primeira etapa do estudo, foi realizada a leitura do título, das palavras-chaves e dos resumos para a seleção dos artigos que atendiam ou não aos critérios de estudo, ou seja, que respondiam à pergunta norteadora da pesquisa. Os demais artigos foram excluídos. A partir da análise, a amostra final totalizou 9 artigos que corresponderam ao objetivo da pesquisa. Na segunda etapa do estudo, a leitura na íntegra dos artigos selecionados, possibilitou extrair as seguintes informações pertinentes a cada um dos estudos: título, autores, ano de publicação, objetivo e método utilizado de biorremediação para tratamento de água e/ou esgoto (Quadro 1). A Figura 2 apresenta o fluxograma com a ordem do desenvolvimento do estudo.

Figura 2. Fluxograma com a ordem de desenvolvimento.



Fonte: Autores.

O Quadro 1 contém uma síntese dos artigos selecionados neste trabalho de revisão, constando o título do artigo, os autores, ano de publicação, base de dados, objetivo e método utilizado de biorremediação para tratamento de água e águas residuais.

Quadro 1. Síntese dos artigos selecionados.

Título	Autores	Ano	Base de dados	Objetivo	Método utilizado
Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater.	Ananya Shah, Manan Shah	2020	Science Direct	Caracterizar o PIWW, comparar e contrastar os vários métodos de tratamento com foco nas técnicas de biorremediação	Tratamento de águas residuais de indústrias farmacêuticas com biorremediação (bacteriana, lodo ativado, biorreatores de membrana, reatores em lote de sequência, reator de estágio anaeróbio de fluxo ascendente, fitorremediação, biorremediação de fungos e cianobactérias)
Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development.	Anbalagan Saravanan, P. Senthil Kumar, Sathasivam Jeevanantham, Suresh Babu Karishma, B. Tajsabreen, Ponnambalam Ragini Yaashikaa, B. Resma	2021	Science Direct	Descrever o desenvolvimento de pesquisas recentes sobre tratamento de efluentes e seus respectivos benefícios/aplicações em escala de campo foram discutidos.	Métodos de tratamento de águas residuais utilizando metodologias químicas, físicas e biológicas. A biorremediação é indicada como ferramenta biológica.
Bioelectrochemical systems for environmental remediation of estrogens: A review and way forward.	Zainab Syed, Monika Sogani, Aman Dongre, Anu Kumar, Kumar Sonu, Gopesh Sharma, Akhilendra Bhushan Gupta	2021	Science Direct	Examinar criticamente as várias tecnologias de tratamento existentes para a degradação efetiva do estrogênio.	Métodos de tratamento de águas residuais com estrogênio, sendo indicada a biorremediação com a tecnologia dos sistemas bio eletroquímicos (BESs).
Occurrence, environmental fate, ecological issues, and redefining of endocrine disruptive estrogens in water resources.	Muhammad Bilal, Damià Barceló, Hafiz MN Iqbal	2021	Science Direct	Avaliar criticamente a literatura existente sobre estrogênios desreguladores endócrinos baseados em esteróides.	Métodos de tratamento de recursos hídricos com estrogênio, sendo indicado a biorremediação usando o tratamento biocatalítico.
Progress in microalgal mediated bioremediation systems for the removal of antibiotics and pharmaceuticals from wastewater.	Neha Chandel, Vishal Ahuja, Ranjit Gurav, Vinod Kumar, Vinay Kumar Tyagi, Arivalagan Pugazhendhi, Gopalakrishnan Kumar, Deepak Kumar, Yung-Hun Yang, Shashi Kant Bhatia	2022	Science Direct	A remoção de antibióticos e farmacêuticos de águas residuais usando tecnologias mediadas por microalgas.	Métodos de tratamento de águas residuais de indústrias farmacêuticas e de antibióticos, sendo indicado a biorremediação utilizando o sistemas de microalgas.
Application of phytotechnology in alleviating pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater: Source, impacts, treatment, mechanisms, fate, and SWOT analysis.	Israa Abdulwahab Al-Baldawi, Ahmed A. Mohammed, Zahraa Hasan Mutar, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Salwa Shamran Jasim, Asia Fadhile Almansoori, Nur 'Izzati Ismail	2021	Science Direct	Discussão sobre as oportunidades para eliminar os efeitos ecológicos negativos da poluição PPCP e como proteger de forma sustentável o meio ambiente.	Métodos de tratamento de águas residuais de indústrias farmacêuticas, sendo indicado a fitorremediação.

Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects.	S. Jeevanantham, A. Saravanan, R. V. Hemavathy, P. Senthil Kumar, P. R. Yaashikaa, D. Yuvaraj	2019	Science Direct	Fortalecer o sistema de inovação, melhorar a resiliência e a proteção contra contaminantes tóxicos e o impacto da aplicação da fitorremediação	Métodos de tratamento de recursos hídricos com metais pesados e corantes, sendo indicado a fitorremediação.
Xenobiotics —Division and Methods of Detection: A Review	Chá Štefanac, Dijana Grgas, Tibela Landeka Dragičević	2021	Portal de Periódicos da CAPES	Divisão dos xenobióticos e seus métodos de detecção ou criação de compostos mais nocivos.	Métodos de tratamento de águas residuais, sendo indicados os métodos de biotransformação, biorremediação, fitorremediação, adsorção, processos de oxidação avançada, áreas úmidas construídas e processos de membrana.
Bioremediation of 27 Micropollutants by Symbiotic Microorganisms of Wetland Macrophytes	Hana Brunhoferova, Silvia Venditti, Cédric C. Laczny, Laura Lebrun, Joachim Hansen	2022	Portal de Periódicos da CAPES	Estudo focado em 27 micropoluentes por biorremediação	Métodos de tratamento de recursos hídricos com micropoluentes, sendo indicado a biorremediação utilizando macrófitas.

Fonte: Autores.

4. Discussão

Com a realização da pesquisa, nove artigos responderam à pergunta norteadora e obteve-se os seguintes resultados. De acordo com Shah et al. (2020), o efluente da Indústria Farmacêutica (PIWW) é o produto do processo de desenvolvimento de medicamentos e formulações, e seu descarte seguro após o tratamento é essencial, porém, são poucos os estudos que refletem sobre a natureza destes efluentes. Para selecionar um processo de tratamento bem-sucedido e eficaz, é fundamental conhecer as características e componentes da água afluente.

Esta revisão visa analisar de forma abrangente as características dos efluentes farmacêuticos para fornecer uma melhor visão sobre as opções de tratamento preferíveis. Fazendo comparações entre métodos físico-químico, oxidação e biorremediação avançadas, em que a biorremediação surge como a opção mais sustentável e economicamente viável. Os autores concluíram que as técnicas de biorremediação com sua plasticidade e imenso potencial podem servir como meio de gestão sustentável de efluentes da indústria farmacêutica para mitigar seus impactos ecotoxicológicos.

Segundo Saravanan et al. (2021), a liberação de poluentes devido às atividades antropogênicas têm um efeito visível no meio ambiente, fontes diversas como metais pesados, corantes, compostos patogênicos e orgânicos levam à deterioração da qualidade da água, por esse motivo, a demanda por água livre de poluentes criou uma grande preocupação nas empresas de tecnologias de tratamento de água. O estudo apresentou as pesquisas recentes sobre tratamento de efluentes e seus respectivos benefícios/aplicações em escala de campo. A recuperação de água a partir do tratamento de efluentes requer inúmeras medidas para limitar as ameaças ambientais relacionadas com as diferentes aplicações de reutilização. Avanços contínuos foram feitos na ciência relacionada ao processo de tratamento, juntamente com a inovação utilizada para o processo. O estudo apresentou as principais metodologias de tratamento de águas residuais para remover contaminantes tóxicos na água, bem como as vantagens e desvantagens das diferentes metodologias. Com relação aos métodos biológicos, a biorremediação foi apontada por apresentar as vantagens de ser um processo natural e econômico, permitir o tratamento no local e por possibilitar a destruição completa. Como desvantagens foi pontuado por ser um processo lento, não são expulsos os metais pesados, o local de biorremediação precisa ter um solo com alta penetrabilidade e que existem lacunas consideráveis no ambiente microbiano.

Syed et al. (2021) afirma que, os poluentes estrogênicos globais são motivo de preocupação em águas residuais e corpos d'água devido à sua alta atividade de desregulação endócrina, levando a impactos extremamente negativos em humanos

e outros organismos, mesmo em concentrações ambientais muito baixa. A biorremediação de estrogênios tem sido estudada extensivamente e uma tecnologia que surgiu com capacidades promissoras são os Sistemas Bioeletroquímicos (BESs).

Esta revisão examina as várias tecnologias de tratamento existentes para a degradação efetiva do estrogênio, com foco principal nas BESs para as aplicações de campo reais, juntamente com sua integração com os sistemas existentes e sistemas de tratamento de efluentes.

Conclui-se que o esquema de tratamento centrado na BES pode ser uma opção promissora, tecnicamente viável e economicamente favorável para a remoção de macro e micropoluentes, desde que haja mais estudos e testes desta técnica.

A crescente poluição com estrogênicos nos recursos hídricos é uma preocupação muito atual devido às suas atividades desreguladoras endócrinas e consequências perigosas sobre as matrizes ambientais, ecologia e saúde humana, mesmo que em baixa concentração, afirma Bilal et al. (2021). A biorremediação de estrogênios esteróides usando sistema biocatalítico baseado em enzimas surgiu recentemente como uma alternativa promissora para remover e biotransformar estrogênios de sistemas aquosos. A revisão realiza uma avaliação crítica da literatura existente sobre estrogênios desreguladores endócrinos baseados em esteróides, enfatizando a remoção de estrogênios em recursos hídricos. No entanto, enfatiza que são necessárias pesquisas mais aprofundadas para tornar os processos mais limpos e mais eficazes e, a possibilidade de técnicas baseadas em enzimas como uma opção para o tratamento de efluentes, o que pode contribuir para garantir a sustentabilidade ambiental.

Nos últimos tempos, a importância das microalgas na remoção de micropoluentes tem sido amplamente divulgada, pois são muito vantajosos. Seu cultivo não requer nutrientes adicionais, eles podem recuperar recursos de águas residuais e degradar antibióticos e poluentes farmacêuticos simultaneamente. Bioabsorção, degradação e acúmulo são os principais mecanismos envolvidos na remoção de poluentes por microalgas, diz Chandel et al. (2022). O estudo do seu grupo de trabalho resumiu o cenário atual de remoção de antibióticos e farmacêuticos de águas residuais usando tecnologias mediadas por microalgas. Sendo assim, concluiu-se que os processos mediados por microalgas estão ganhando atenção devido à sua capacidade de remover vários micropoluentes e, o uso de consórcios algas-bactérias e algas-fúngicos e a junção com outras tecnologias de tratamento, como fotodegradação e degradação química tem o potencial de tornar o processo de tratamento de efluentes mais econômico e eficiente.

Al-Baldawi et al. (2021) relata inicialmente que nos países em desenvolvimento cerca de 80% do esgoto doméstico é lançado diretamente em corpos de água superficial sem tratamento prévio, acumulando altas concentrações de poluentes dentre eles os micropoluentes (produtos farmacêuticos, surfactantes, produtos de cuidados pessoais, pesticidas e produtos químicos industriais). As funções ecossistêmicas desses recursos hídricos poluídos são gravemente comprometidas, com destaque para o abastecimento de água. A baixa qualidade da água é responsável por doenças em todo o mundo, sendo que a segurança da água potável está intimamente ligada à existência cumulativa de diversos micropoluentes em fontes de água. Além da ocorrência, a dificuldade da remoção destas substâncias tornou-se uma questão crítica para a segurança da água potável pelos seus efeitos adversos à saúde, que podem ir até mesmo à neurotoxicidade, toxicidade do desenvolvimento e reprodução e interferência metabólica. Esse estudo de revisão apresenta de forma resumida e comparativa os métodos disponíveis e atuais da tecnologia convencional de tratamento de águas residuais com relação à fitotecnologia. O foco da revisão são os produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais (PPCPs) consumidos diariamente e transportados por diferentes vias, incluindo águas residuais municipais e industriais para o ambiente aquático. Além disso, é debatida a eficiência da fitorremediação na remoção de PPCPs de águas residuais, bem como os parâmetros operacionais que interferem no tratamento e o mecanismo vegetal de remoção de PPCPs em áreas úmidas construídas (CWs). Os CWs tornaram-se uma metodologia mais significativa em função do baixo custo e por ser uma prática ambientalmente correta apresentaram uma eficiência de remoção moderada a alta para a remoção de vários PPCPs.

A fitorremediação é uma tecnologia que apresenta como pontos fortes a sustentabilidade e impactos ecológicos,

enquanto apresenta como pontos fracos a necessidade de grandes áreas de terra e mais tempo para o tratamento. As fraquezas podem ser superadas através de um design apropriado, apresentando-se como uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais de instalações médicas. O futuro do tratamento de águas residuais está se voltando para soluções sustentáveis e ambientalmente corretas, utilizando ferramentas biológicas, como plantas e microrganismos, que podem ser empregadas para desempenhar o papel principal na restauração dos ecossistemas.

Jeevanantham et al. (2019) iniciam sua pesquisa manifestando a preocupação com os efluentes lançados por indústrias de corantes, usinas, refinarias, minas e indústrias farmacêuticas. As águas residuais contêm íons metálicos tóxicos e não tóxicos e outros componentes que são despejados diretamente nos recursos hídricos e que levam à poluição da água e causa muitos efeitos à saúde em humanos, bem como nas plantas. O presente estudo de revisão com foco na remoção de poluentes na água contaminada por meio de processo de fitorremediação e diferentes fontes deste processo são explicados detalhadamente. A fitorremediação é apontada como a melhor alternativa para a remoção de poluentes, pois é uma prática naturalmente econômica e ecológica, utilizando a capacidade característica de inúmeras plantas com capacidade para absorver os contaminantes tóxicos presentes nas diferentes matrizes ambientais contaminadas (ar, solo e água). O estudo concluiu que a fitorremediação é um método mais barato, eficiente e comumente utilizado em comparação com outros métodos tradicionais, no entanto, leva mais tempo para ocorrer a remoção e produz menor concentração de biomassa. Os autores concluíram que são necessários mais estudos e pesquisas para a utilização de diferentes espécies vegetais que têm a capacidade de remover os contaminantes do meio ambiente.

Stefanac et al. (2021) focaram sua pesquisa nos xenobióticos, que são compostos de origem sintética, quase sempre utilizados para fins domésticos, agrícolas e industriais, no meio ambiente, estão presentes em concentrações altas. Dentre eles, encontram-se os pesticidas aplicados diretamente ao solo e transportados pela chuva para rios e águas subterrâneas e os PPCPs que são consumidos por humanos. Após a excreção, acabam em estações de tratamento de esgoto e, eventualmente, em rios, lagos, oceanos, solo, águas subterrâneas em função que muitas vezes não são eficientes na remoção dos xenobióticos. Estes poluentes são absorvidos por plantas e organismos aquáticos e entram na cadeia alimentar. Nesta revisão, foi apresentada a divisão dos xenobióticos e seus métodos de detecção ou criação de compostos mais nocivos, os métodos de detecção, a diversidade e a mistura de compostos presentes no ambiente. São destacados como metodologias para a remoção de xenobióticos, a biotransformação, biorremediação, fitorremediação, adsorção, processos de oxidação avançada, áreas úmidas construídas e processos de membrana. A fim de minimizar os efeitos negativos dos xenobióticos e reduzir seu uso, organizações em todo o mundo aprovaram diretrizes e regulamentos para monitorá-los.

Brunhoferova et al. (2022) consideram que a presença de micropoluentes em corpos d'água representa um grande desafio pela sua difícil remoção para assegurar água potável segura. O foco do estudo foi a remoção de 27 micropoluentes por biorremediação utilizando as macrófitas *Phragmites australis*, *Iris pseudacorus* e *Lythrum salicaria* retiradas de zonas úmidas estabelecidas (CWs) e uma configuração experimental projetada especialmente para o estudo.

O *Iris pseudacorus* foi o sistema de biorremediação de maior sucesso, pois removeu 22 compostos, incluindo os persistentes, com mais de 80% de eficiência. Os gêneros mais abundantes que contribuíram para a remoção de micropoluentes foram *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Variovorax*, *Metilotenera*, *Reyranella*, *Amaricoccus* e *Hydrogenophaga*. *Iris pseudacorus* apresentou a maior taxa de colonização (56%). Os autores concluíram que os experimentos demonstraram o impacto positivo dos microrganismos da rizosfera na remoção de micropoluentes.

5. Conclusões

Os sistemas tradicionais de tratamento de águas residuais e de abastecimento com o emprego de métodos físicos, químicos e microbiológicos não apresentam eficiência na remoção dos xenobióticos. A permanência dessas substâncias no

ambiente compromete a qualidade da água causando sérios problemas para a saúde humana e manutenção da biodiversidade.

A biorremediação se apresenta como um sistema de tratamento sustentável e econômico para a remoção dos xenobióticos presentes na água e nas águas residuais. São indicados diferentes organismos de acordo com a natureza das substâncias químicas presentes. Além disso, a fitorremediação que utiliza plantas com capacidade de adsorção são utilizadas para a remoção de diferentes xenobióticos. Esta revisão discute as alternativas utilizando a biorremediação para eliminar os efeitos negativos da poluição por contaminantes emergentes, protegendo de forma sustentável a saúde humana e ambiental.

Em função da presença cada vez mais intensa de xenobióticos nas águas residuais e de abastecimento e as suas implicações, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias de tratamento de águas residuais utilizando a biorremediação, para aplicação em larga escala em sistemas de saneamento básico, bem como a avaliação da sua eficiência, na garantia da saúde pública e da manutenção da biodiversidade.

Referências

- Ai-Jawhari, I. F. H. (2018). Metais Pesados, Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs), Materiais Radioativos, Xenobióticos, Pesticidas, Produtos Químicos Perigosos e Biorremediação de Corantes. *Phytobionte e Restituição Ecológica*. Springer, Cingapura, 215-229. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1187-1_11.
- Al-Baldawi, I. A., et al. (2021). Application of phytotechnology in alleviating pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater: source, impacts, treatment, mechanisms, fate, and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128584>.
- Almeida, F. V., et al. (2007). Substâncias Tóxicas Persistentes (STP) no Brasil. *Rev. Quim. Nova*, 30, 1976-1985. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800033>.
- Américo-Pinheiro, J. H. P., et al. (2018). Presença de fármacos em estações de tratamento de esgoto, persistência em efluentes e técnicas de remoção. https://www.researchgate.net/publication/341804330_Capitulo_4_PRESENCIA_DE_FARMACOS_EM_ESTACOES_DE_TRATAMENTO_DE_ESGOTO_PERSISTENCIA_EM_EFLUENTES_E_TECNICAS_DE_REMOCAO?enrichId=rgreq-87e7cf8266f3542c2b7cca32bfa4b501-XXX&enrichSource=Y292ZZXJQYWdIOzM0MTgwNDMzMdBUzo4OTc3MTQwNjk5NzA5NDRAMTU5MTA0MzEyMTUzNA%3D%3D&el=1_x_2&_e_sc=publicationCoverPdf.
- Ana Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2022). *Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2021*. <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/>.
- Auriol, M., et al. (2006). Endocrine disrupting compounds removal from wastewater, a new challenge. *Process Biochemistry*, 41, 525-539. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.09.017>.
- Bárta, R. L., et al. (2021). Qualidade da água para consumo humano no Brasil: revisão integrativa da literatura. *Revista Visa em debate*, 9 (4), 74-85. <https://doi.org/10.22239/2317-269x.01822>.
- Bilal, M., Barcelo, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Occurrence, environmental fate, ecological issues, and redefining of endocrine disruptive estrogens in water resources. *Science of the Total Environment*, 800, 149635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149635>.
- Brunhoferova, H., et al. (2022). Bioremediation of 27 Micropollutants by Symbiotic Microorganisms of Wetland Macrophytes. *Sustainability*, 14, 3944. <https://doi.org/10.3390/su14073944>.
- Castiglioni, S., et al. (2006) Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy. *Environmental Science & Technology*, 40 (1), 357-363. <https://doi.org/10.1021/es050991m>.
- Chandel, N., et al. (2022). Progress in microalgal mediated bioremediation systems for the removal of antibiotics and pharmaceuticals from wastewater. *Science of the Total Environment*, 825, 153895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153895>.
- Daronco, C. R., et al. (2020). Bioindicadores alternativos da qualidade da água para consumo humano. *Research, Society and Development*, 9 (9), e51996824. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.6824>.
- Ghiselli, G., & Jardim, W. F. (2007). Interferentes Endócrinos no Ambiente. *Quim. Nova*, 30, 695-706. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000300032>.
- Jeevanantham, S., et al. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: a survey on application and future prospects. *Environmental technology & innovation*, 13, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>.
- Kaur, J., & Maddela, N. R. (2021). Biorremediação microbiana: uma tecnologia de ponta para remoção xenobiótica. In: Maddela, N.R., García Cruzatty, L.C., Chakraborty, S. (eds) *Advances in the Domain of Environmental Biotechnology. Biotecnologia Ambiental e Microbiana*. Springer, Cingapura, 417-453. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8999-7_16.
- Montagner, C. C., Vidal, C., & Acayaba, R. D. (2017). Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Quim. Nova*, 40, 1094-1110. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>.
- Montagner, C. C., et al. (2019). Ten Years-Snapshot of the Occurrence of Emerging Contaminants in Drinking, Surface and Ground Waters and Wastewaters from São Paulo State, Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.*, 30 (3), 614-632. <http://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20180232>.

Oliveira, L. R. (2018). Caracterização das nascentes da sub-bacia hidrográfica do rio Gaviãozinho, Bahia. *Dissertação (Mestrado em Agricultura orgânica)*. Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 139. Caracterizacaodasnascentesdasubbbacia.orient.EduardoCampello.pdf (embrapa.br).

Pereira, A. S., *et al.* (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Rathore, S., *et al.* (2022). Uma abordagem inovadora da biorremediação na degradação enzimática dos xenobióticos. *Biotecnologia e Engenharia Genética*, 38, 1-32. <https://doi.org/10.1080/02648725.2022.2027628>.

Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2016). Water analysis: emerging contaminants and current issues. *Analytical chemistry*, 88(1), 546-582. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04493>.

Saravanan, A., *et al.* (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>.

Souza, M. T, Silva, M. D. & Carvalho, R. (2010). Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein*, 8(1), 102-106. <https://doi.org/10.1590/s1679-45082010rw1134>.

Shah, A., & Shah, M. (2020). Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100383>.

Štefanac, T., Grgas, D., & Landeka Dragičević, T. (2021). Xenobiotics—Division and Methods of Detection: A Review. *J. Xenobiot*, 11 (4), 130-141. <https://doi.org/10.3390/jox11040009>.

Syed, Z., *et al.* (2021). Bioelectrochemical systems for environmental remediation of estrogens: A review and way forward. *Science of the Total Environment*, 780, 146544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146544>.

Xu, D., *et al.* (2020). Water treatment residual: A critical review of its applications on pollutant removal from stormwater runoff and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 259, 109649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109649>.