

Meio Ambiente e Sustentabilidade: conceitos e aplicações

ISBN: 978-65-88884-17-1

Capítulo 01

Biopolímeros e Interação Ambiental: Uma Revisão de Literatura

Jailson de Araújo Santos

Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí,
Centro de Tecnologia, Teresina, Piauí.

*Autor correspondente: Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais, Rua engenheiro Eduardo de Almendra Freitas, 2137, Teresina-PI. j.santospi@hotmail.com.

Data de submissão: 19-02-2022

Data de aceite: 15-03-2022

Data de publicação: 20-05-2022



10.51161/editoraime/108/29



RESUMO

Introdução: A crescente preocupação ambiental com o descarte de embalagens plásticas tem levado à inovação de biopolímeros biodegradáveis. Materiais biodegradáveis com propriedades semelhantes aos polímeros convencionais estão sendo desenvolvidos na tentativa de substituir parcialmente estes últimos e, conseqüentemente, minimizar os impactos ao meio ambiente. **Objetivo:** Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre os principais avanços científicos relacionados à utilização de biopolímeros como matéria prima para o desenvolvimento de materiais com aplicações sustentáveis. **Material e Métodos:** A revisão de literatura consistiu na busca por artigos científicos e livros publicados nas bases de dados *Scielo*, *Scopus* e *Web of Science*. Na busca dos artigos e livros foram utilizados os descritores: “biopolímeros”, “sustentabilidade”, “meio ambiente”, e “polímeros biodegradáveis”, os quais foram utilizados isolados e/ou em combinações. Os artigos e livros foram selecionados de acordo com a relevância com o tema. **Resultados:** Após a prospecção, 24 artigos foram selecionados e analisados para verificar (1) Evolução anual, (2) Distribuição mundial e (3) Discussão dos artigos. A partir dos resultados apresentados é possível observar que a discussão sobre a utilização de biopolímeros aplicados à sustentabilidade aumentou nos últimos 10 anos e vem sendo crescentemente estudada atualmente. Em relação aos países que mais publicaram artigos sobre o tema nos últimos anos, a Índia foi a primeira colocada, com 7 artigos publicados, seguida do China e Espanha, com 3 artigos publicados cada. A análise dos artigos permitiu identificar diferentes biopolímeros como materiais promissores para a diminuição dos efeitos maléficos da ação humana para a saúde ambiental. **Conclusão:** A partir dos dados apresentados nesse estudo, é possível concluir que o número de pesquisas com biopolímeros vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos e diferentes países estão se preocupando cada vez mais com as questões ambientais; e assim buscando novas estratégias que possam colaborar para a manutenção do equilíbrio ambiental e redução dos impactos negativos das ações humanas no meio ambiente.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Polímeros naturais; Bioplástico; Biotecnologia;

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação ambiental com o descarte de embalagens plásticas tem levado à inovação de biopolímeros biodegradáveis. Enormes quantidades de produção e consumo de plástico colocaram em risco a vida na Terra devido ao seu acúmulo como um poluente persistente. Assim, plásticos biodegradáveis feitos de biopolímeros estão ganhando aceitação na agricultura e indústrias de embalagens de alimentos; no entanto, eles ocupam uma parcela bastante pequena do mercado de plástico (RAI *et al.*, 2021).

O termo biopolímero refere-se a moléculas de cadeia longa que ocorrem naturalmente, mas também a materiais derivados desses ou monômeros de base biológica (SONG *et al.*, 2009). Os biopolímeros surgiram como alternativas potenciais, alguns estão disponíveis comercialmente, enquanto outros permanecem sob pesquisa.

Um biopolímero feito a partir de recursos renováveis anualmente e biodegradável pode resolver os principais problemas associados aos plásticos. A matéria-prima não é mais de origem fóssil, melhorando assim a segurança dos recursos e no final de sua vida, o polímero é capaz de biodegradar para não deixar resíduos (YATES & BARLOW, 2013).

Materiais biodegradáveis com propriedades semelhantes aos polímeros convencionais estão sendo desenvolvidos na tentativa de substituir parcialmente estes últimos e, conseqüentemente, minimizar os impactos ao meio ambiente. Alguns desses novos polímeros não são apenas biodegradáveis, mas também compostáveis, o que permite descartá-los junto com os resíduos orgânicos para serem reciclados por compostagem em vez de serem descartados em aterros sanitários (TAIATELE JUNIOR *et al.*, 2020).

Em contrapartida, os materiais plásticos poliméricos, por exemplo, são amplamente utilizados para embalagens devido à sua flexibilidade de moldagem, baixo custo, boa rentabilidade e boa resistência a diversos fatores ambientais e mecânicos. No entanto, esses materiais de embalagem representam um fardo para o meio ambiente, pois levam anos para se degradar e apresentam risco de liberação de produtos químicos que podem prejudicar a qualidade dos alimentos (BHARGAVA *et al.*, 2020).

Como alternativa sustentável para o problema do plástico utilizado para produzir embalagens, pesquisas vêm sendo realizadas, com o objetivo de desenvolvimento de algumas embalagens biodegradáveis, utilizando matérias-primas de recursos renováveis (biopolímeros) como amido, celulose, quitosana, gelatina, poli(álcool vinílico) (PVA), poli(ácido láctico) (PLA), poli(succinato de butileno) (PBS), etc., o que os torna ainda mais amigos do ambiente devido aos seus ciclos de vida mais curtos em comparação com os de recursos não renováveis (TAIATELE JUNIOR *et al.*, 2020).

Assim posto além da aplicação dos materiais biopolímeros biodegradáveis utilizados para embalagens sustentáveis, inúmeros outros exemplos de aplicações de biopolímeros podem ser encontrados na literatura com os mais diversos tipos de biopolímeros e aplicações voltadas para o desenvolvimento sustentável.

Dessa forma, esse capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre os principais avanços científicos relacionados à utilização de biopolímeros como matéria prima para o desenvolvimento de biomateriais com aplicações sustentáveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A revisão sistemática de literatura, segundo Okoli (2019) também chamada de revisão sistemática, consistiu na busca por artigos científicos publicados nas bases de dados Scielo, Scopus e Web of Science.

A pesquisa foi realizada nos meses de fevereiro e março de 2022. Na prospecção dos artigos buscou-se identificar quais são os principais biopolímeros que vêm sendo utilizados em aplicações voltadas para a preservação ambiental. Utilizou-se os descritores: “biopolímeros”, “sustentabilidade”, “meio ambiente”, e “polímeros biodegradáveis”, os quais foram utilizados isolados e/ou em combinações.

Na busca, especificou-se os artigos publicados em inglês e no intervalo de publicação para os últimos 10 anos. Além disso, livros e artigos incompletos foram deixados de fora das pesquisas. Inicialmente foi realizada a leitura dos títulos dos artigos, em seguida o resumo e, finalmente, 24 artigos foram selecionados de acordo com a relevância com o tema.

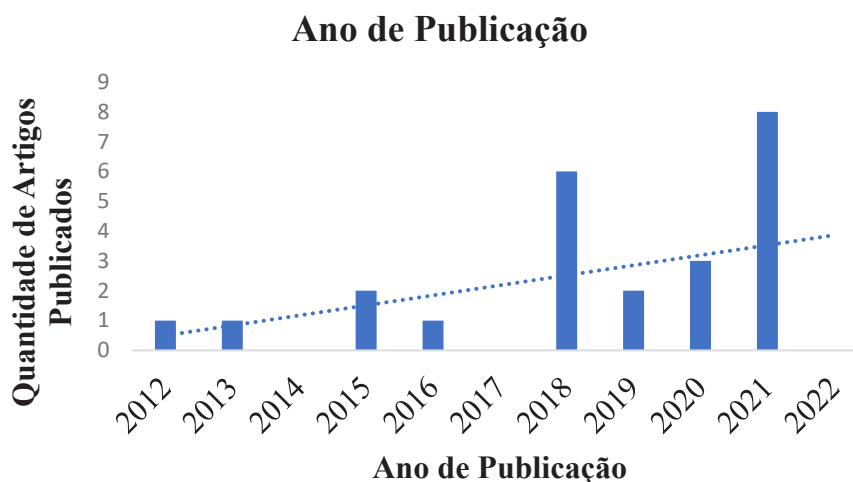
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos artigos encontrados, 24 foram selecionados e analisados para verificar (1) Evolução anual, (2) Distribuição mundial e (3) Discussão dos artigos. Os artigos selecionados continham em seus títulos as palavras “biopolímeros” e/ou “meio ambiente” e foram escolhidos considerando o objetivo do estudo e o tema desse capítulo.

3.1 Evolução anual

Fez-se o estudo da evolução anual de publicações no intervalo de 2006 a 2017, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Evolução anual de número de artigos publicados



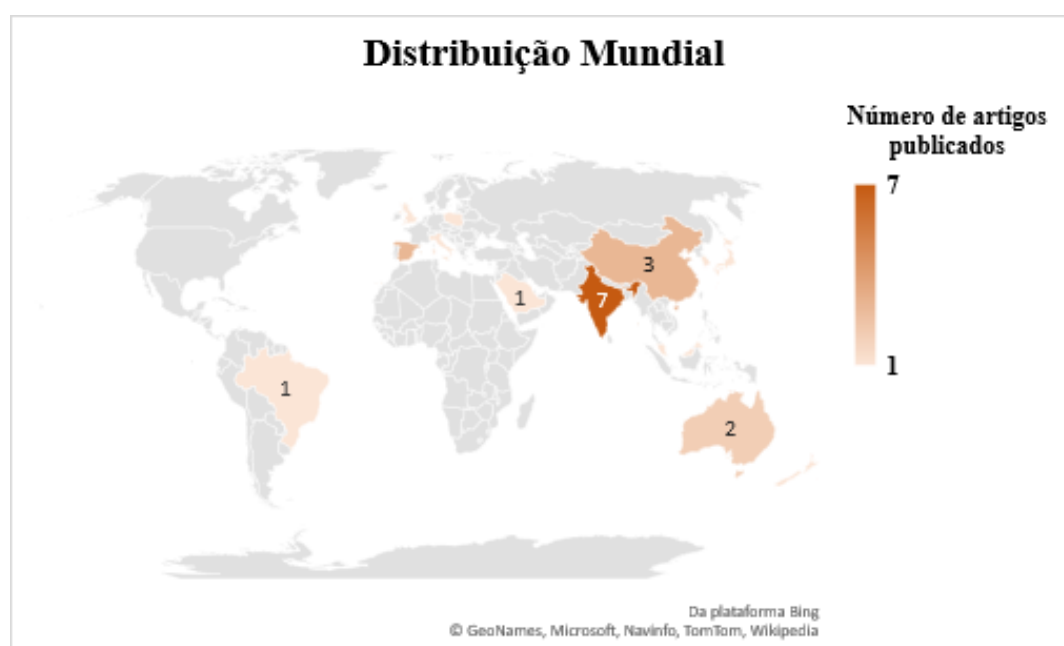
Fonte: autoria própria, 2022.

A partir dos resultados apresentados é possível observar que a discussão sobre a utilização de biopolímeros aplicados à sustentabilidade aumentou nos últimos 10 anos e vem sendo crescentemente estudada atualmente, sendo que o ano 2021 apresentou a maior quantidade de publicações sobre o conteúdo.

3.2 Distribuição mundial

Em relação aos países que mais publicaram artigos sobre o tema nos últimos anos, a Figura 2 apresenta a relação dos países e mostra que a Índia foi a primeira colocada, com 7 artigos publicados, seguida do China e Espanha, com 3 artigos publicados cada.

Figura 2: Países que mais publicaram artigos entre 2012 e 2022



Em relação ao resultado obtido, este pode ser atribuído ao fato de que na Índia, o lixo, descartes não gerenciados, a falta de biodegradação, o uso de recursos desperdiçados, as ameaças à integridade corporal e à ordem natural e desonra nacional estão todos associados à “poluição plástica” (PATHAK, 2020). Ou seja, o problema da poluição por plástico na Índia é um problema sério que provavelmente resulta em pesquisas que buscam práticas sustentáveis como por exemplo o uso de biopolímeros sustentáveis.

3.3 Discussão dos artigos

Os 24 artigos descrevem diferentes abordagens e uso de biopolímeros como ferramentas sustentáveis de interação com o meio ambiente. A análise dos artigos permitiu identificar esses materiais como promissores para a diminuição dos efeitos maléficos dos plásticos para a saúde ambiental.

A Tabela 3 apresenta alguns dos principais artigos selecionados nesse estudo com as principais aplicações dos biopolímeros estudados.

Tabela 3: Biopolímeros aplicados a sustentabilidade ambiental

Tipo de Biopolímero	Aplicação	Referência
Microalgas	Tratamento de água	Abdel-Raouf <i>et al.</i> , 2012
Microalgas	Tratamento de água	Abinandan <i>et al.</i> , 2018
Nanopartículas de prata mediadas por lignina	Sensor seletivo e sua remoção catalítica de compostos nitro tóxicos aromáticos	Lee <i>et al.</i> , 2021
Poli(3-hidroxiobutirato)	Mudança na comunidade bacteriana na água do rio	Kadoya <i>et al.</i> , 2020
Celulose bacteriana	Descontaminação de água	Hu <i>et al.</i> , 2019
Nanocelulose e seixos nano-incorporados de prata	Remoção completa de corantes, metais pesados e carga microbiana da água	Suman <i>et al.</i> , 2014
Complexo derivado de grafeno dual-2D para poli (ácido láctico)	Supressão de fumaça e baixa produção de CO ₂	Wei <i>et al.</i> , 2021
Oleogéis à base de lignocelulose	Sustentabilidade	Eajardo <i>et al.</i> , 2021
Espuma de quitosana incorporada em filtros	Adsorção de poluentes da aquicultura	Zadileno <i>et al.</i> , 2018
Precipitados de ferro biogênico	Sorção em lote e contínua de cromato e zinco de efluentes de galvanoplastia	Castro <i>et al.</i> , 2021
Fibras de nanocelulose	Biossorção de cádmio, níquel e íons de chumbo a partir de solução aquosa	Kardam <i>et al.</i> , 2013

Fonte: autoria própria, 2022.

Abdel-Raouf *et al.*, (2012) destacam o papel das microalgas no tratamento de águas residuais. Os autores discutem que o cultivo de microalgas oferece uma etapa interessante para o tratamento de efluentes, pois proporciona um biotratamento terciário aliado à produção de biomassa potencialmente valiosa, que pode ser utilizada para diversos fins. As culturas de microalgas oferecem uma solução elegante para tratamentos terciários, porém incertos devido à capacidade das microalgas de usar nitrogênio inorgânico e fósforo para seu crescimento. Além disso, por sua capacidade de remover metais pesados, bem como alguns compostos orgânicos tóxicos, não acarreta poluição secundária.

Abinandan *et al.*, (2018) discutem os méritos e deméritos das estratégias de cultivo de microalgas recentemente desenvolvidas para a remoção máxima de poluentes, bem como a produtividade de biomassa. Além disso, os autores destacam o potencial da tecnologia de biofilme de algas na remoção de poluentes e na colheita da biomassa de microalgas usando diferentes técnicas. Finalmente, eles fazem uma avaliação econômica dos métodos atualmente disponíveis para validar o cultivo de microalgas em águas residuais em nível comercial.

Lee *et al.* (2021) apresentam uma síntese ecologicamente correta de nanopartículas de prata mediadas por lignina como um sensor seletivo e sua remoção catalítica de compostos nitro tóxicos aromáticos. A capacidade de detecção seletiva das nanopartículas de prata sintetizadas foi examinada para a detecção de peróxido de hidrogênio e íons de mercúrio em

um ambiente aquoso. Além disso, o desempenho catalítico superior das nanopartículas foi demonstrado pela rápida conversão de 4-nitrofenol e nitrobenzeno tóxicos como poluentes direcionados para os compostos amino correspondentes. Assim, os autores propuseram um mecanismo plausível de redução catalítica para a remoção de poluentes nitro-orgânicos tóxicos.

Kodoya *et al.*, (2020) aplicaram a análise de metagenoma para entender melhor a mudança na biodiversidade de microorganismos não cultiváveis em 4 amostras de rios usando poli (3-hidroxi-butirato) [P(3HB)], um polímero biodegradável bem estudado. Uma relação inversa entre o número de microrganismos e o peso de P(3HB) foi observada para todas as amostras do rio, enquanto nenhuma alteração foi observada para o polietileno não degradável. Com base na análise estatística (índice Chao1), os consórcios microbianos exibiram diversidade reduzida e tenderam a convergir para comunidades microbianas semelhantes entre três das amostras do rio.

Dessa forma, Kodoya *et al.*, (2020) sugerem uma estreita relação entre a biodegradação do P(3HB) e a estrutura do consórcio bacteriano nos ambientes fluviais. Curiosamente, foram detectadas sequências metagenômicas correspondentes a bactérias que já foram identificadas como degradadoras de P(3HB) cultiváveis, sugerindo uma estreita relação entre a comunidade não cultivável e a comunidade cultivável. A análise metagenômica nos forneceu informações úteis sobre as mudanças dinâmicas na comunidade microbiana nas amostras de rios e é aplicável a várias combinações de ambientes e biopolímeros.

Hu *et al.*, (2019) descreveram um projeto de purificador multifuncional semelhante a papel, que tem estrutura à base de biomassa enxertando compostos de amônio quaternário derivados de polietilenimina em substrato de celulose bacteriana tridimensional. Em comparação com materiais semelhantes relatados anteriormente, o produto exibiu capacidades de adsorção surpreendentemente mais altas para vários íons metálicos, incluindo Pb^{2+} , Cu^{2+} e Cr^{6+} , corantes orgânicos aniônicos, incluindo vermelho congo, laranja de metila e vermelho de metila, e excelente eficiência de desinfecção contra bactérias Gram-negativas e Gram-positivas. Notavelmente, este purificador também demonstrou a remoção efetiva das três espécies contaminantes de água poluída.

Suman *et al.*, (2014) propuseram um material compósito à base de seixos embebidos em nanocelulose (NC)-prata (AgNPs) como um novo dispositivo de purificação de água reutilizável e econômico para a remoção completa de corantes, metais pesados e micróbios. NC foi preparado usando hidrólise ácida de celulose. O purificador de água exibiu não apenas excelente capacidade de adsorção de corantes e metais pesados, mas também atividade antibacteriana de longo prazo contra cepas bacterianas patogênicas e não patogênicas. A adsorção ocorreu principalmente através da interação eletrostática e a difusão dos poros também contribuiu para o processo. A alta capacidade de adsorção e reutilização, com a remoção completa de corantes, metais pesados e *Escherichia coli* da água contaminada simulada do material compósito, proporcionará novas oportunidades para desenvolver um purificador de água econômico e ecologicamente correto.

Wei *et al.*, (2021) desenvolveram uma estratégia viável para projetar um complexo derivado de grafeno de duas dimensões (2D) como um retardador de chama benigno para o meio ambiente e modificador de interface para materiais de Poli (ácido láctico) PLA. O complexo derivado de grafeno 2D duplo pode aumentar o retardo de chama com a taxa de

liberação de calor reduzida em 50% e 29% para compósitos modificados com poli(carbonato de propilideno) e succinato de polibutileno. A taxa de produção de fumaça, a produção total de fumaça e a taxa de produção de CO₂ dos compósitos binários de PLA também foram reduzidas significativamente, o que poderia beneficiar a proteção do meio ambiente. A estratégia desenvolvida de retardante de chamas ecologicamente correto derivado de grafeno 2D duplo não apenas forneceu uma nova visão sobre como modificar as matrizes poliméricas frágeis para a exploração funcional, mas também um processo mais limpo para compósitos biodegradáveis com supressão de fumaça excepcional e emissão reduzida de dióxido de carbono.

Fajardo *et al.*, (2021) avaliaram a biodegradabilidade e ecotoxicidade de novos oleogéis formulados obtidos a partir de resíduos agrícolas fermentados com *Streptomyces*, anteriormente relatados por apresentarem características reológicas e tribológicas melhoradas em comparação com lubrificantes minerais comerciais. Ambos os novos oleogéis exibiram taxas de biodegradação mais altas do que a graxa comercial. Bioensaios ecotoxicológicos clássicos usando organismos eucarióticos (*Lactuca sativa*, *Caenorhabditis elegans*) mostraram que o impacto tóxico dos biolubrificantes produzidos foi quase insignificante e comparável ao da graxa comercial para os organismos alvo. Além disso, técnicas moleculares de alto rendimento usando tecnologias emergentes de sequenciamento de DNA (NGS) de última geração foram aplicadas para estudar as mudanças estruturais de populações microbianas expostas a lubrificantes de um solo padrão.

Portanto, os resultados obtidos por Fajardo *et al.*, (2021) mostraram que o descarte de lubrificantes à base de biomassa no ambiente do solo não modificou substancialmente a estrutura e composição filogenética do microbioma. Esses resultados apontam para a viabilidade e sustentabilidade, em termos de biodegradabilidade e ecossegurança, dos novos biolubrificantes em comparação com as graxas minerais comerciais. Esta tecnologia representa uma estratégia biológica promissora para substituir matérias-primas fósseis e não renováveis, bem como obter biopolímeros úteis a partir de resíduos agrícolas com potencial para aplicações em larga escala.

Zadinelo *et al.*, (2018) descrevem um estudo no qual a espuma de quitosana foi incorporada aos filtros e avaliada como adsorvente de poluentes da aquicultura, agregando valor ao material e ao mesmo tempo proporcionando um aproveitamento para resíduos industriais. A espuma foi usada para remover amônia, nitrito, ortofosfato e turbidez dos efluentes da aquicultura. Este biopolímero produzido é biodegradável, e quando saturado com compostos orgânicos provenientes da aquicultura, e não mais adequado para reaproveitamento como material filtrante, pode ser empregado como fertilizante, fechando assim o ciclo de sustentabilidade da cadeia produtiva da aquicultura.

No estudo de Castro *et al.*, (2021), precipitados de ferro biogênico foram utilizados como adsorventes para cromato e zinco. Além disso, os precipitados de ferro foram incorporados em grânulos de alginato para remoção de metal em colunas de leito fixo, e seu desempenho foi avaliado em um sistema contínuo variando diferentes parâmetros operacionais, como vazão, altura do leito e sistema de alimentação. A influência de diferentes variáveis de adsorção no tempo de saturação, na quantidade de metais potencialmente tóxicos adsorvidos e no desempenho da coluna foi investigada, e a forma das curvas de ruptura foi analisada. O desempenho ideal da coluna foi alcançado aumentando a altura do leito e di-

minuindo a vazão de alimentação e a concentração de metal de entrada. O sistema de fluxo ascendente melhorou significativamente a absorção de metal, evitando os canais de fluxo preferenciais.

Finalmente, no estudo de Kardam *et al.*, (2013), fibras de nanocelulose foram preparadas a partir do tratamento físico-químico de palha de arroz, caracterizadas e exploradas para a remediação de alguns metais tóxicos de águas residuais. As fibras de nanocelulose preparadas mostraram eficiência de remoção de 9,7 mg/g Cd (II), 9,42 mg/g Pb(II) e 8,55 mg/g de íons Ni (II) de 25 mg/l de solução metálica. Os estudos de regeneração indicaram que as fibras de nanocelulose podem ser usadas sucessivamente até três ciclos de regeneração. O reforço de nanotecnologia para celulose nativa melhorou significativamente a eficiência de remoção de metal em comparação com palha de arroz e fibras de celulose, o que fornece novos caminhos como remediação verde econômica e ecológica ou pode ser usado como uma etapa de pré-tratamento antes dos métodos de descontaminação química para metais tóxicos.

4 CONCLUSÃO

Dessa forma, o presente estudo discute resultados importantes sobre o uso de biopolímeros em processos sustentáveis que visam a manutenção do meio ambiente saudável. A partir dos dados apresentados nesse estudo, é possível concluir que o número de pesquisas com biopolímeros vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos e diferentes países estão se preocupando cada vez mais com as questões ambientais. Além disso, observou-se uma variedade significativa de estudos com biopolímeros e materiais biodegradáveis com diferentes finalidades e aplicações.

Os principais biopolímeros e matérias biodegradáveis investigados foram microalgas, celulose, celulose bacteriana, lignocelulose e quitosana. Estes foram utilizados com aplicações sustentáveis principalmente objetivando o tratamento de água e remoção de partículas poluentes de efluentes.

Portanto, essa revisão sistemática aponta que novas pesquisas estão sendo realizadas em busca de novas estratégias que possam colaborar para a manutenção do equilíbrio ambiental e redução dos impactos negativos das ações humanas no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A. A.; IBRAHEEM, I. B. M. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences* (2012) 19, 257–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>.

ABINANDAN, S.; SUBASHCHANDRABOSE, S. R.; VENKATESWARLU, K.; MEGHARAJ, M. Nutrient removal and biomass production: advances in microalgal biotechnology for wastewater treatment. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2018, Vol. 38, n. 8, 1244–1260. <https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1472066>

CASTRO, L.; ROCHA, F.; MUÑOZ, J. A.; GONZÁLEZ, F.; BLÁZQUEZ, M. L. Batch and Continuous Chromate and Zinc Sorption from Electroplating Effluents Using Biogenic Iron Precipitates. **Minerals** 2021, 11, 349. <https://doi.org/10.3390/min11040349>.

FAJARDO, C.; BLÁNQUEZ, A.; DOMÍNGUEZ, G.; BORRERO-LÓPEZ, A. M.; VALENCIA, C.; HERNÁNDEZ, M.; ARIAS, M. E.; RODRÍGUEZ, J. Assessment of Sustainability of Bio Treated Lignocellulose-Based Oleogels. **Polymers** 2021, 13, 267. <https://doi.org/10.3390/polym13020267>.

HU, Y.; LIU, F.; SUN, Y.; XU, X.; CHEN, X.; PAN, B.; SUN, D.; QIAN, J. Bacterial cellulose derived paper-like purifier with multifunctionality for water decontamination. **Chemical Engineering Journal** 371 (2019) 730–737. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.091>.

KADOYA, R.; TANAKA, N.; FUJITA, N.; SHIWA, Y.; TAGUCHI, S. Changed bacterial community in the river water samples upon introduction of biodegradable poly(3-hydroxybutyrate). **Polymer Degradation and Stability** 176 (2020) 109144. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109144>.

KARDAM, A.; RAJ, K. R.; SRIVASTAVA, S.; SRIVASTAVA, M. M. Nanocellulose fibers for biosorption of cadmium, nickel, and lead ions from aqueous solution. **Clean Technologies and Environmental Policy** 16, 385–393(2014). <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0634-2>.

LEE, S. J.; BEGILDAYEVA, T.; YEON, S.; NAIK, S. S.; RYU, H.; KIM, T. H.; CHOI, M. Y. Eco-friendly synthesis of lignin mediated silver nanoparticles as a selective sensor and their catalytic removal of aromatic toxic nitro compounds. **Environmental Pollution** 269 (2021) 116174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116174>.

OKOLI, C. Guia Para Realizar uma Revisão Sistemática da Literatura. Tradução de David Wesley Amado Duarte; Revisão técnica e introdução de João Mattar. **EaD em Foco**, 2019;9 (1): e748. DOI: <https://doi.org/10.18264/eadf.v9i1.748>

PATHAK, G. Plastic Pollution' and Plastics as Pollution in Mumbai, India. **Journal of Anthropology**. 2020. <https://doi.org/10.1080/00141844.2020.1839116>.

RAI, P.; MEHROTRA, S.; PRIYA, S.; GNANSOUNOU, E.; SHARMA, S. K. Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. **Bioresource Technology** 325 (2021) 124739. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124739>.

SONG, J. H.; MURPHY, R. J.; NARAYAN, R.; DAVIES, G. B. H. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** 2009;364:2127–39. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>.

Suman.; Abhishek K.; Gera, M.; Jain, V. K. A novel reusable nanocomposite for complete removal of dyes, heavy metals and microbial load from water based on nanocellulose and silver

nano-embedded pebbles. *Environmental Technology*. Volume 36, 2015 - Issue 6. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.959066>.

TAIATELE JUNIOR, I.; DAL BOSCO, T. C.; BERTOZZI, J.; MICHELS, R. N.; MALI, S. (2020). Biodegradability assessment of starch/glycerol foam and poly(butylene adipate-co-terephthalate)/starch film by respirometric tests. **Brazilian Journal of Food Technology**, 23, e2018248. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.24818>.

WEI, Z.; CAI, C.; HUANG, Y.; WANG, P.; SONG, J.; DENG, L.; FU, Y. Eco-friendly strategy to a dual-2D graphene-derived complex for poly (lactic acid) with exceptional smoke suppression and low CO₂ production. **Journal of Cleaner Production** 280 (2021) 124433. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124433>.

YATES, M. R.; BARLOW, C. Y. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review. **Resources, Conservation and Recycling** 78 (2013) 54– 66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.010>.

ZADINELO, I. V.; SANTOS, L. D.; CAGOL, L.; MUNIZ, G. I. B.; ELLENDERSEN, L. S. N.; ALVES, H. J.; BOMBARDELLI, R. A. Adsorption of aquaculture pollutants using a sustainable biopolymer. **Environmental Science and Pollution Research** (2018) 25:4361–4370. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0794-4>.