

# Inovação Sustentável: o papel do biocarvão na remediação de microplástico – uma visão bibliométrica

*Sustainable Innovation: the role of biochar in microplastic remediation – a bibliometric view*

Natália Soares de Oliveira<sup>1</sup>, Grace Ferreira Ghesti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

## Resumo

Os microplásticos são um risco ao ecossistema devido à sua capacidade de bioacumulação e de adsorção de compostos tóxicos. O biocarvão surge como alternativa para remoção por causa da alta porosidade. Este estudo apresenta uma análise bibliométrica, utilizando ProKnow-C para seleção de artigos na Web of Science, com o VOSviewer e o Orbit para patentes. As áreas mais recorrentes de pesquisa e tecnologia são Tecnologia Ambiental, Engenharia Química, Química e Biotecnologia. Os biocarvões são preparados a partir de biomassas lignocelulósicas de resíduos de madeira e da agropecuária para remoção, principalmente, de poliestireno e polietileno com diâmetros micrométricos. Há conexão dos artigos com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, sendo os mais recorrentes: Água Potável e Saneamento, Vida na Água, Cidades e Comunidades Sustentáveis e Consumo e Produção Sustentável. A China apresenta as instituições mais influentes, enquanto o Brasil ainda é muito incipiente, existindo espaço para o desenvolvimento de pesquisas e a criação de políticas públicas.

Palavras-chave: Microplástico; Poluente Emergente; Adsorção.

Áreas Tecnológicas: Prospecção Bibliométrica. Aplicação Tecnológica. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

## Abstract

Microplastics pose a risk to the ecosystem due to their ability to bioaccumulate and adsorb toxic compounds. Biochar has emerged as an alternative for removal due to its high porosity. This study presents a bibliometric analysis, using Proknow-C to select articles from the Web of Science, with VOSviewer and Orbit for patents. The most common areas of research and technology are Environmental Technology, Chemical Engineering, Chemistry, and Biotechnology. Biochars are prepared from lignocellulosic biomass from wood and agricultural waste to remove mainly polystyrene and polyethylene with micrometric diameters. The articles are connected to the Sustainable Development Goals, the most common of which are: Clean Water and Sanitation, Life Below Water, Sustainable Cities and Communities, and Sustainable Consumption and Production. China has the most influential institutions, while Brazil is still very incipient, with room for research development and creation of public policies.

Keywords: Microplastic; Emerging Pollutant; Adsorption.



## 1 Introdução

O plástico, criado no século XX a partir do petróleo, destacou-se por sua versatilidade e durabilidade, porém sua lenta decomposição tem causado acúmulo no meio ambiente, como em ambientes aquáticos e no solo (Thompson *et al.*, 2009), gerando preocupações quanto aos impactos à saúde humana e ambiental (Sajid *et al.*, 2023). A pandemia de Covid-19 intensificou esse problema ao aumentar o consumo de plásticos descartáveis, como Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e embalagens de entregas (Silva *et al.*, 2021).

Devido a atividades antropogênicas e naturais, como radiação ultravioleta e térmica e processos biológicos, pedaços de plástico são quebrados em minúsculas partículas de plástico, originando os microplásticos (Sajid *et al.*, 2023). Essas partículas possuem dimensões inferiores a 5 mm e podem ser classificadas em primárias, produzidas nessas dimensões, como fibras, *pellets*, microesferas, por indústrias, como a cosmética e têxtil; ou secundárias, que se originam da fragmentação de plásticos maiores devido a fatores físicos, químicos ou biológicos, como radiação UV, calor, umidade, oxigênio e ação de microrganismos ou agentes químicos (Thompson *et al.*, 2009; Ritchie; Samborska; Roser, 2018; Al-Thawadi, 2020).

Os microplásticos fazem parte da classe de poluentes emergentes, compostos com alta estabilidade e resistentes à degradação que, conseqüentemente, persistem no meio ambiente, sendo uma ameaça para a sustentabilidade dos ecossistemas (Montagner; Vidal; Acayaba, 2017). Além disso, os plásticos possuem a capacidade de bioacumulação e de adsorção de componentes tóxicos, como pesticidas, metais, medicamentos, devido à sua grande área superficial. Assim, torna-se necessário desenvolver estudos para diminuir seus impactos, capturar e remover esse poluente do meio ambiente, evitando maiores problemas para a saúde humana e ambiental. Foi realizada uma análise bibliométrica das tendências de filtração para remoção de microplástico em ambientes de água doce (Garfansa *et al.*, 2024).

Uma das alternativas é a utilização de biocarvão, material adsorvente derivado de biomassa renovável que vem sendo estudado como um adsorvente promissor para remoção de poluentes. Adsorventes à base de resíduos vegetais são vantajosos por serem de base orgânica, renováveis, abundantes, seletivos e de fácil regeneração (Sahay *et al.*, 2023).

Esse adsorvente destaca-se por sua estrutura porosa, pela presença de sítios ativos ajustáveis e pela facilidade de fabricação. Além disso, apresenta elevada flexibilidade,

capacidade de funcionalização e robustez, características que favorecem sua aplicação em diferentes contextos e processos (Wang *et al.*, 2021, Abuwatfa *et al.*, 2021). Apresenta características como abundância e alta porosidade, que o tornam versátil na remoção de diversos tipos de poluentes, como microplásticos.

O biocarvão apresenta várias funcionalidades de superfície que podem estar associadas ao processo de adsorção de microplástico. Os entendimentos recentes focam principalmente nas interações eletrostáticas. Além disso, várias observações experimentais sugerem também a presença do fenômeno de complexação no processo de remoção (Singh *et al.*, 2021). Devido às complexas interações envolvendo esses componentes, é importante o desenvolvimento de pesquisas englobando vários aspectos, desde a produção e a caracterização do biocarvão, teste de adsorção com diferentes tipos de microplástico, até a recuperação e reutilização desse biocarvão. Estudos bibliométricos investigaram a aplicação de biocarvão na agricultura, como fonte energética (Wu *et al.*, 2024) e método de limpeza verde (Ngaba *et al.*, 2025) para tratamento de águas residuais (Wang *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023). Além de bibliometrias específicas para remediação de antibióticos (Liu *et al.*, 2024) e metais tóxicos (Liu *et al.*, 2023).

Diante do aumento da quantidade de poluentes emergentes como o microplástico, além de ser fundamental o aumento de pesquisas com o objetivo de remediação, torna-se necessário investigar o cenário de patentes, já que este reflete a economia mundial nessa área. Ainda, são de extrema importância os planos de ação mundiais para promover um desenvolvimento mais sustentável. A utilização de biocarvão para remediação de microplásticos constitui uma linha de pesquisa emergente que conversa com os objetivos da Agenda 2030 (Nações Unidas Brasil, 2025), um plano de ação global estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) que estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com 169 metas. Tem o comprometimento dos 193 Estados-membros, incluindo o Brasil para ser alcançado até 2030 (Figura 1).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) visam erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas, além de promover a paz e a prosperidade para todas as pessoas, em todos os lugares. Para isso, fundamentam-se no equilíbrio entre as dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento sustentável (Nações Unidas Brasil, 2025). Nesse contexto, espera-se que as pesquisas científicas estejam alinhadas a pelo menos um dos ODS, contribuindo para a promoção do desenvolvimento sustentável e para o alcance das metas estabelecidas pela Agenda 2030.

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: Nações Unidas Brasil (2025)

Para definir adequadamente um objetivo de pesquisa, é fundamental que o pesquisador compreenda o estágio atual do conhecimento na área científica de seu interesse. Nesse sentido, a realização de uma revisão da literatura e de um estudo prospectivo torna-se essencial para identificar tendências, lacunas e oportunidades de investigação.

Assim, este artigo tem como objetivo apresentar um processo de seleção de referências bibliográficas sobre o tema remediação de microplásticos com biocarvão, bem como realizar análises bibliométricas dos artigos científicos e sua comparação com documentos de patentes.

Para tanto, foram investigados aspectos como organizações envolvidas, referências utilizadas, número de citações, palavras-chave, origem dos estudos, ano de publicação, aplicações tecnológicas, tipos de biocarvão e microplásticos empregados, além dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) mais proeminentes nessa temática.

## 2 Metodologia

A metodologia aplicada para elaboração desta pesquisa foi uma abordagem quali-quantitativa (Bogdan; Biklen, 1994, Gatti, 2004), caracterizada por uma revisão bibliométrica com mapeamento científico da temática “Utilização de Biocarvão para Remediação de Microplásticos”. Os dados foram coletados no período de abril a maio de 2025 utilizando os termos-chave “biochar\$” e “microplastic\$” separados pelo operador booleano AND. As publicações científicas foram obtidas por meio da base Web of Science (WoS) com os filtros artigo e artigo

de revisão para tipos de documentos, e as patentes foram investigadas por meio da ferramenta Orbit da Questel.

A análise bibliométrica é uma técnica da ciência da informação que aplica métodos quantitativos e estatísticos para examinar a produção, a disseminação e o uso do conhecimento registrado em documentos acadêmicos, como artigos, patentes, teses, dissertações e livros. Essa abordagem possibilita a identificação de padrões de publicação, tendências de pesquisa e desenvolvimento de áreas do saber, sendo útil para uma melhor compreensão da produção científica (Costa *et al.*, 2012). Com base em um portfólio de artigos, foram analisados parâmetros como referências, autores, organizações, número de citações e periódicos relevantes. Além disso, estudos bibliométricos também complementam revisões de literatura ao oferecer uma visão mais objetiva e visual de um campo científico por meio de estatísticas e de técnicas de visualização de dados.

Esta pesquisa adotou o processo denominado ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*) (Lacerda; Ensslin; Ensslin, 2012), com a utilização do *software* Microsoft Excel (versão 2503), que consiste em várias etapas para seleção de artigos a fim de conhecer o “estado da arte” de um tema. Os dados bibliográficos foram exportados, na forma de arquivo metadados, e tratados com a utilização do *software* VOSviewer (versão 1.6.20) com objetivo de realizar processamento e análise por coautoria, concorrência e cocitação por meio de grafos representando redes de correlação. Ainda foi realizado um estudo para identificação das principais biomassas na produção de biocarvão e os principais tipos e tamanhos de microplásticos adsorvidos.

### 3 Resultados e Discussão

Nesta seção, serão apresentados os resultados da revisão bibliométrica e do mapeamento científico da temática da pesquisa. A seção está dividida em quatro partes: na primeira, realiza-se o processo ProKnow-C para seleção dos artigos; na segunda, os artigos são tratados no *software* VOSviewer, buscando correlações entre organizações, palavras-chave, países e cocitações, em comparação com os dados de patentes obtidos no Orbit; na terceira, são identificadas as biomassas utilizadas para produção de biocarvão e os tipos e tamanhos de microplásticos aplicados nas pesquisas; na quarta, os artigos são analisados de acordo com os ODS.

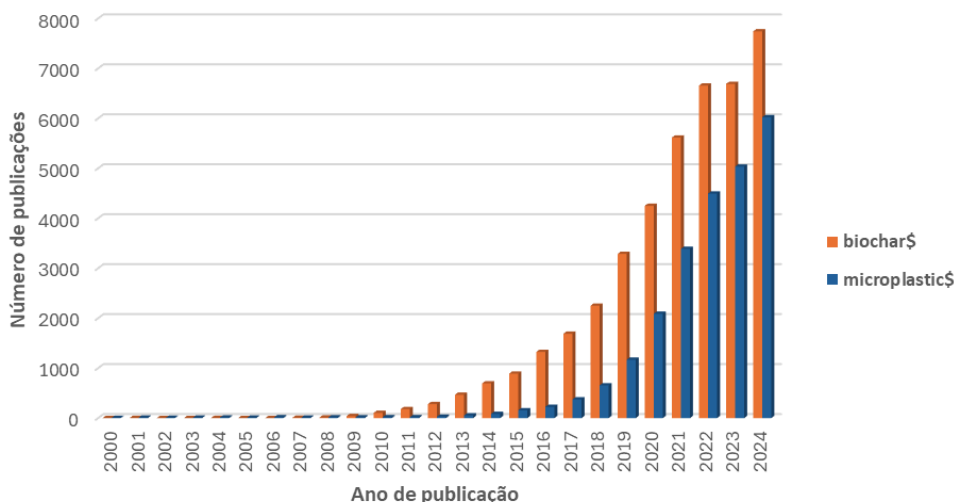
Inicialmente, foi realizada uma investigação dos termos-chave que constituem a temática da pesquisa de forma separada dos últimos 25 anos. De 2000 a 2024, foram publicados 42.192 artigos contendo a palavra-chave “biochar”, em que 1.259 artigos contêm autores brasileiros.

Já para a palavra-chave “microplastic” encontrou-se 23.916 artigos, sendo 684 de autores brasileiros. Na Figura 2, observa-se que até 2009 a pesquisa sobre biocarvão era bastante incipiente e, a partir do ano seguinte, começou um crescimento exponencial, sendo publicado 7.742 artigos em 2024. A pesquisa sobre microplástico apresenta uma curva de crescimento similar mais tardia, a partir de 2014, sendo publicados 6.023 artigos em 2024.

#### 3.1 Processo ProKnow-C

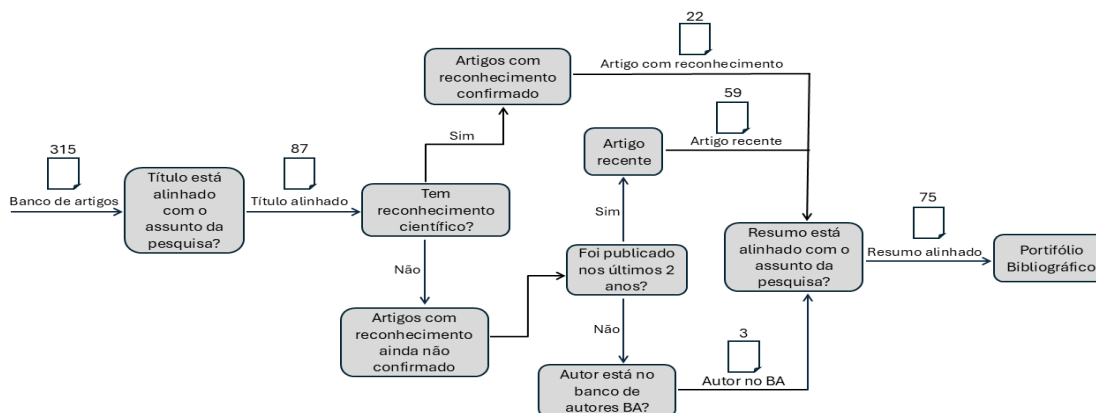
A quantidade de artigos e o crescimento no número de publicações dessas duas temáticas evidenciam um interesse do meio científico. No entanto, ao combinar os termos “biochar” e “microplastic”, foram encontrados apenas 315 artigos e 178 patentes, sendo o primeiro de 2017 para artigos e de 2015 para patentes. Esses dois termos começam a ser relacionados quando já há um grande desenvolvimento de cada um deles, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Evolução das publicações sobre Biocarvão e Microplástico



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

Figura 3 – Processo ProKnow-C para seleção de artigos



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

É necessário investigar e selecionar os trabalhos que realmente utilizam o biocarvão para remediação de microplástico, já que esses dois termos podem estar relacionados de outras formas. Assim, foi realizado o processo ProKnow-C, segundo a Figura 3, para seleção de artigos constituintes do portfólio da pesquisa, a fim de conhecer o “estado da arte” da temática “Utilização de Biocarvão para Remediação de Microplásticos”.

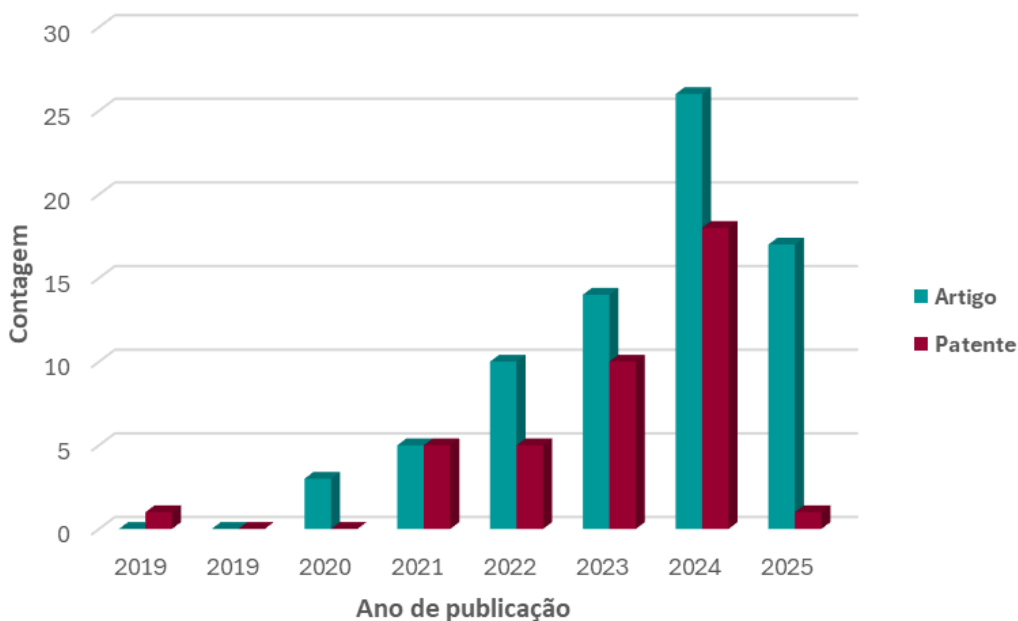
Realizou-se a leitura dos títulos dos 315 artigos encontrados, dos quais apenas 87 apresentaram título alinhado. Entre os motivos para a exclusão de grande parte dos trabalhos, encontram-se: o foco central do artigo não ser biocarvão ou microplástico, havendo apenas uma pequena citação dessas palavras; o plástico ser utilizado para a produção do biocarvão e não ocorrer a remoção de microplástico; e o microplástico estar presente no meio de aplicação do biocarvão, mas o estudo estar centrado na remoção de outro poluente ou na investigação de parâmetros de crescimento de plantas ou microrganismos.

A próxima etapa é baseada no princípio de Pareto que considera 80% dos resultados gerados por 20% das causas. Dessa forma, o valor de corte representa a seleção dos artigos mais citados até que a soma percentual de suas citações represente um valor superior a 80% de todas as citações obtidas pelos 87 artigos com título alinhado. Esse

valor de corte foi 32 citações, já que os 22 artigos com esse número ou mais representam 81,05% de todas as citações. Os artigos menos citados passam por um processo de análise considerando o ano de publicação, selecionando os mais recentes. Foram considerados os artigos de 2025 a 2023, já que ainda não ocorreu um terço de 2025. Portanto, 59 artigos foram publicados nesse período. Ainda há uma repescagem dos artigos restantes por meio da consulta ao banco de autores BA formado pelos autores dos 22 artigos com maior reconhecimento científico. Dos cinco artigos restantes, três apresentaram pelo menos um autor do BA. A última análise consiste em ler os resumos e selecionar apenas os alinhados com a temática da pesquisa. Assim, 75 artigos apresentaram resumo alinhado, formando o portfólio da pesquisa a ser tratado com apoio do software VOSviewer.

Para as patentes, fez-se a leitura de todos os títulos e, quando necessário, os resumos, objetivando o alinhamento com a temática de interesse, assim, chegou-se em 40 patentes. Os motivos de exclusão das patentes foram os mesmos citados para os artigos como também a falta de informações suficientes para o real entendimento da função da patente. Os artigos e as patentes são dos últimos oito anos e é possível observar um crescimento exponencial no número de publicações a cada ano (Figura 4).

Figura 4 – Evolução das publicações do portfólio bibliográfico



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

Em 2022 e 2023, o número de artigos e patentes, respectivamente, dobra, o que pode estar relacionado com o grande aumento na produção e consumo de EPIs e embalagens descartáveis durante a pandemia de Covid-19, aumentando a contaminação por microplásticos e seus impactos, tornando-se necessário maior estudo, pesquisa e inovação nessa área. O meio acadêmico está mais desenvolvido do que o meio tecnológico, ainda havendo espaço para essas duas frentes de investigação. O estabelecimento dos 17 ODS em 2015 pela ONU contribui para o desenvolvimento de pesquisas e de tecnologias voltadas para a recuperação e a preservação do meio ambiente, como esta temática de estudo.

### 3.2 Tratamento com *Software* VOSviewer e Ferramenta Orbit

Ao analisar, por meio do *software* VOSviewer, os dados relacionados aos 75 artigos selecionados pelo processo ProKnow-C, extraiu-se uma gama de informações referentes aos autores mais influentes na área, às palavras-chave com maior número de ocorrências, aos países com maior quantidade de artigos e à posição do Brasil nessa área. O VOSviewer funciona como uma ferramenta de quantificação e análise da literatura científica já que possibilita a construção e a visualização de mapas baseados em redes bibliométricas e tabelas com valores.

Foi possível identificar diferentes grupos de pesquisa atuando na temática analisada. Entre os autores com maior número de publicações no portfólio selecionado destacam-se Li, Chen, Ganie e Darbha, cada um com quatro artigos publicados. Os dois primeiros estão vinculados à Escola de Ciências Ambientais e Engenharia da Universidade de

Yangzhou, na China, enquanto os dois últimos pertencem ao Instituto Indiano de Educação e Pesquisa Científica de Calcutá, na Índia.

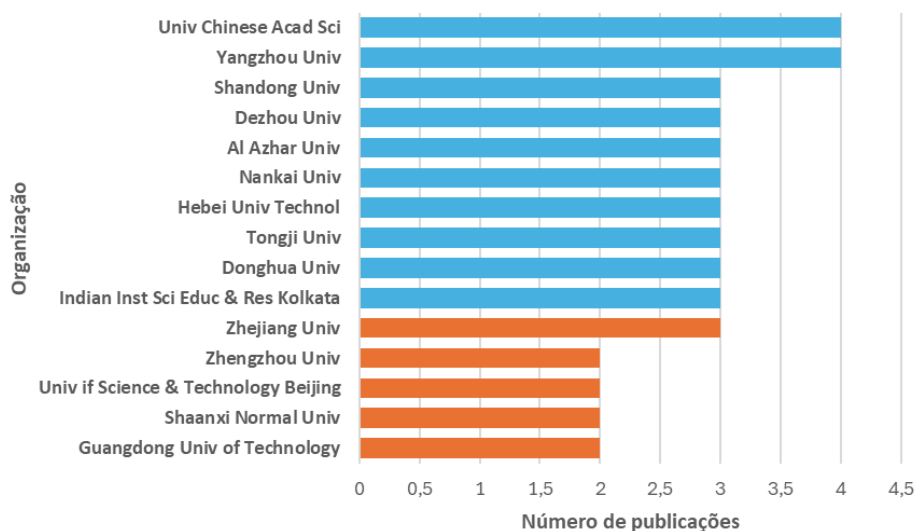
Em relação ao impacto científico, os autores Wang, Lea-Langton, e Sedighi apresentam o maior número de citações, totalizando 254 citações. Todos esses pesquisadores são afiliados à Universidade de Manchester, na Inglaterra.

Como a conexão entre biocarvão e microplástico é recente dos últimos seis anos, percebe-se que ainda não existe um pesquisador muito mais destacado do que os outros, havendo a possibilidade de prospecção nessa área. Na Figura 5, são apresentadas as organizações mais influentes na área, tanto em artigos, em azul, quanto em patentes, em laranja, entre os 75 artigos e as 40 patentes.

Das 40 patentes alinhadas com a temática de interesse, apenas três foram revogadas, podendo haver motivos como falta de novidade, de inventividade ou falta de exploração. Já estão garantidas 14 patentes, sendo de direito exclusivo do inventor ou detentor. As outras 23 patentes ainda estão pendentes, justificadas pelo longo tempo de espera desde o depósito do pedido até a garantia, além dos depósitos serem recentes.

Embora a análise da autoria dos artigos não revele a existência de pesquisadores amplamente dominantes na área, o mesmo não ocorre quando se observa a distribuição das pesquisas por país. Nesse contexto, a China destaca-se de forma expressiva em relação às demais nações quanto à produção científica e ao desenvolvimento tecnológico. Entre as 15 instituições mais influentes identificadas, 13 são chinesas, sendo as únicas exceções a Universidade Al-Azhar, no Egito, e o Instituto Indiano de Educação e Pesquisa Científica de Calcutá, na Índia.

Figura 5 – Gráfico das Instituições mais influentes na área



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

Além disso, foram identificados 45 artigos com pelo menos um autor vinculado a uma instituição chinesa, evidenciando a forte presença e liderança do país nesse campo de pesquisa. Esses resultados demonstram o expressivo protagonismo da China na área estudada, superando significativamente a participação dos demais países (Figura 6).

Esse domínio chinês na pesquisa e nas patentes relacionadas ao uso de biocarvão para adsorção de microplástico advém de políticas de Estado em ciência e tecnologia, com foco em áreas como remediação ambiental, gestão de resíduos e tecnologias verdes, além de incentivos governamentais para depósito de patentes com políticas de bonificação acadêmica. Isso é motivado pelo enfrentamento de sérios desafios com a poluição plástica e por microplásticos em seus ecossistemas aquáticos, além da enorme disponibilidade de resíduos agrícolas, como palha de arroz, bagaço de cana e casca de amendoim, matéria-prima fundamental para a produção de biocarvão (Fürst; Feng, 2022).

Logo atrás, encontram-se Índia com 11 artigos e Canadá com sete artigos. O Brasil possui dois artigos, um com pesquisadores da Universidade Federal Fluminense e outro com um participante da Universidade Federal do Mato

Grosso, o que mostra a existência de bastante espaço para pesquisa nessa área no país. Ainda não existem políticas específicas para remediação de microplástico ou produção de biocarvão no Brasil. No entanto, o Projeto de Lei n. 260/2024 propõe a introdução de diretrizes específicas e a implementação de sistemas de tratamento para remoção de microplásticos, poluentes orgânicos persistentes, desreguladores endócrinos de águas residuais e potável (Agência Senado, 2024). Ressalta-se que a utilização de biocarvão está relacionada a políticas ambientais e de bioeconomia incentivadoras do uso sustentável de recursos e do desenvolvimento de tecnologias para melhoria da qualidade ambiental e para a correção de danos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que objetiva a redução da geração de resíduos e a promoção da reutilização, reciclagem e tratamento adequado e a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) que estabelece os princípios e objetivos da gestão ambiental no Brasil, incluindo a proteção da água e dos solos (Tera Ambiental, 2025; Vertown, 2025).

Apesar de se notar um imenso domínio chinês, esta pesquisa contou com artigos de 31 países diferentes, apresentando representantes dos cinco continentes Ásia, África, América, Europa e Oceania (Quadro 1).

Figura 6 – Grafo dos países com mais artigos



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo no VOSviewer (2025)

Quadro 1 – Representantes dos Continentes

| CONTINENTE | PAÍS  |
|------------|---|
| Ásia       | China; Índia; Coreia do Sul; Indonésia; Malásia; Arábia Saudita; Bangladesh; Líbano; Oman; Singapura; Sri Lanka; Taiwan; Tailândia; Emirados Árabes |
| África     | Egito; Argélia; Nigéria   |
| América    | Canadá; EUA; Brasil   |
| Europa     | Inglaterra; Finlândia; Alemanha; Itália; Países Baixos; Dinamarca; Polónia; Escócia; Suécia; País de Gales  |
| Oceania    | Austrália   |

Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

A fim de identificar as correlações entre as palavras-chave dos artigos, a Figura 7 apresenta as 24 palavras-chave mais recorrentes, com pelo menos cinco ocorrências.

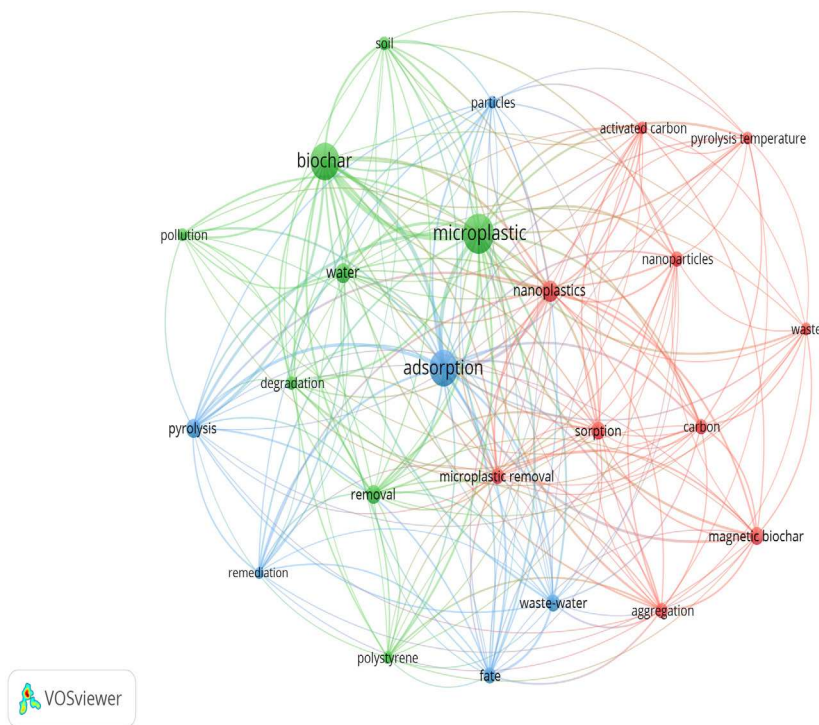
Entre os termos mais recorrentes, a palavra “microplástico” se destacou ao se repetir 48 vezes, seguida por “biocarvão”, com 42 repetições, e “adsorção”, com 41 repetições. O que evidencia a propriedade de adsorvidade do biocarvão para interação com o poluente emergente. Destaca-se a ocorrência das palavras “água”, “águas residuais” e “solo”, com 13, 10 e sete repetições, respectivamente. Indicando os ambientes mais estudados e mais relevantes para a remediação de microplástico com biocarvão. Ainda, as palavras “pirólise” e “temperatura de pirólise” ocorrem 12 e seis vezes, respectivamente, sendo a pirólise, processo termoquímico de decomposição de materiais orgânicos com restrição de oxigênio, uma das técnicas mais utilizadas para produção de biocarvão. Além desses termos, nota-se a ocorrência das palavras “remoção”, “degradação” e “remediação” com 12, sete e cinco repetições, respectivamente, diretamente relacionadas com ações para resolver a problemática do microplástico. Na Figura 8, são apresentadas as aplicações e tecnologias relacionadas às patentes, sendo possível correlacioná-las com as palavras-chave.

Destacam-se as palavras corpo d’água, águas residuais, solo e esgoto, que, assim como nos artigos,

mostram os ambientes de aplicação dos biocarvões. Há também a ocorrência de várias palavras relacionadas aos impactos do microplástico como poluente, contaminante e desreguladores endócrinos. Ainda, as palavras pirólise, biomassa, adsorvente, reciclagem, centrifugação e remoção de microplástico estão diretamente relacionadas com o processo de produção e aplicação do biocarvão, desde a escolha da matéria-prima até a reutilização do material após a adsorção do microplástico. As aplicações das patentes se organizam em três categorias de maior destaque, relacionadas com a adsorção para remoção de microplástico em corpo d’água, reciclagem de biomassa para formação de biocarvão com capacidade de adsorção e interação de moléculas e microrganismos com microplástico.

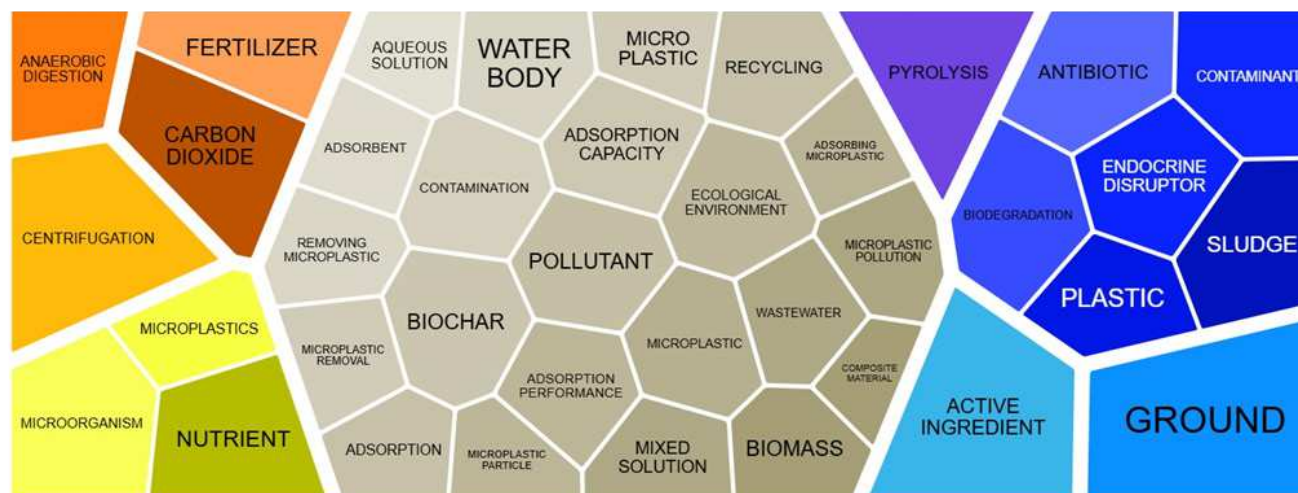
As tecnologias relacionadas com essas aplicações das patentes são agrupadas em cinco categorias, envolvendo adsorvente poroso magnético para microplástico; material de carbono magnético para retirada de toxinas; tratamento com biocarvão como fertilizante em solo contaminado com microplástico; degradação de microplástico em tanque de adsorção; e biocarvão magnético em plantas aquáticas e rios. Essas aplicações das patentes estão relacionadas com diversas áreas, sendo as principais Tecnologia Ambiental e Engenharia Química, como também Química de Materiais e Biotecnologia. Há uma correlação direta com as áreas de pesquisa dos artigos (Figura 9).

Figura 7 – Grafo de relação de palavras-chave encontradas nos trabalhos



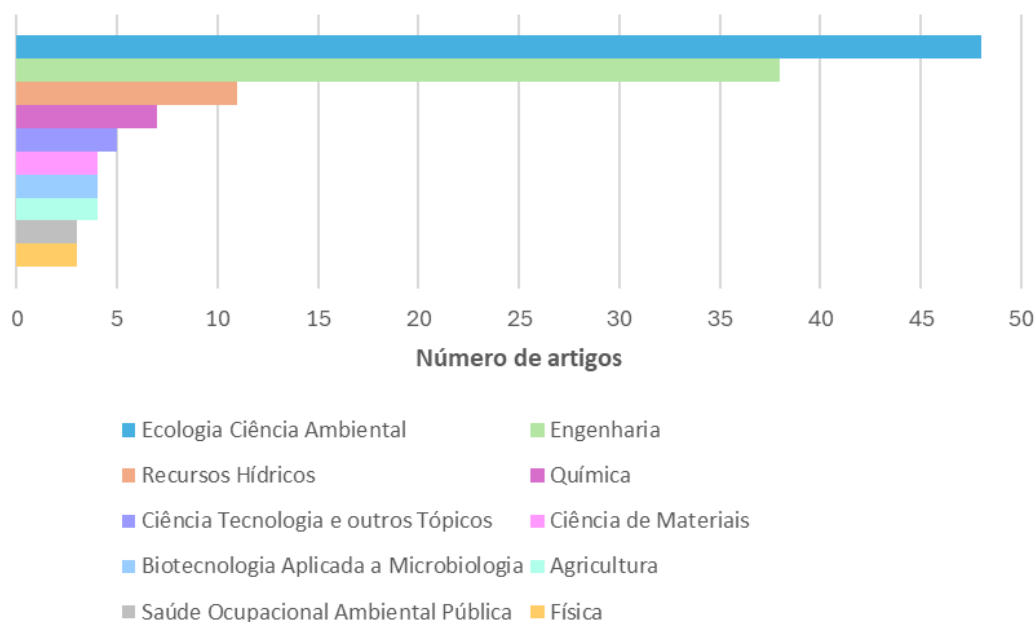
Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo no VOSviewer (2025)

Figura 8 – Aplicações e Tecnologias das Patentes



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo no Orbit (2025)

Figura 9 – Áreas de Pesquisa



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

As áreas de pesquisa mais recorrentes relacionadas à temática são Ecologia e Ciências Ambientais, Engenharia, Recursos Hídricos, Química, Ciência e Tecnologia, Agricultura, Biotecnologia Aplicada à Microbiologia e Ciência dos Materiais. Destaca-se a forte presença da Engenharia, área diretamente associada ao desenvolvimento de pesquisas aplicadas voltadas para a produção e a utilização do biocarvão. Essas pesquisas frequentemente demandam o emprego de equipamentos de maior porte e complexidade, como fornos tubulares e moinhos, essenciais para os processos de produção, caracterização e aplicação do biocarvão. Percebe-se que a química, a engenharia

e o meio ambiente estão fortemente conectados, sendo fundamental o conhecimento científico e tecnológico dessas duas áreas para a recuperação e a correção de danos ambientais, sempre alinhados com os ODS.

### 3.3 Biocarvão e Microplástico

Além de investigar as principais aplicações e áreas de pesquisas dos trabalhos, é importante identificar os tipos de biomassas utilizados para a produção de biocarvão e os tipos e tamanhos de microplásticos adsorvidos com o intuito

de identificar possibilidades ainda pouco ou não exploradas como oportunidades de futuras pesquisas. Dessa forma, por meio da leitura dos resumos e, quando necessário, da seção de Materiais e Métodos dos artigos, construiu-se o Quadro 2 com todas as biomassas utilizadas pelos trabalhos.

Há uma grande quantidade de trabalhos que utilizam derivados de madeira, arroz, milho, cana-de-açúcar e castanhas. Essas biomassas estão relacionadas com a extração de madeira e a produção agropecuária, que se conectam a grandes indústrias de alimentos, combustíveis e papel. A maioria das biomassas é lignocelulósica, pois é constituída de lignina, celulose e hemicelulose (Syguła; Ciolkosz; Białowiec, 2024). Assim, há falta de pesquisas com exploração de biomassas proteicas, como insetos, bem como de biomassas derivadas de plantas nativas dos países, por exemplo, açaí, cacau e cupuaçu, como no caso do Norte e Nordeste brasileiros. Em adição, a Figura 10 apresenta as estruturas químicas dos principais tipos de microplásticos removidos pelos biocarvões.

Observa-se que todos os plásticos são polímeros, no entanto, eles apresentam estruturas muito diferentes, como a poliamida (PA) e o politereftalato de etileno (PET), ou então mais parecidas, como no caso do polipropileno (PP), polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC) e poliestireno (PS). Essas diferentes estruturas influenciam os mecanismos e a intensidade das interações entre o biocarvão e o adsorvato (microplástico), tornando necessária uma investigação mais aprofundada por meio de análises de caracterização e da aplicação de modelos teóricos e experimentais. Entre os microplásticos avaliados, o poliestireno (PS) foi o mais utilizado, estando presente

em 33 estudos. Em seguida, destaca-se o polietileno (PE), empregado em 13 pesquisas. Ambos figuram entre os tipos de plásticos mais abundantes no ambiente, o que justifica o interesse recorrente em sua investigação (Alimi *et al.*, 2018). Não ocorre especificação se o PE utilizado é polietileno de alta densidade (PEAD) ou polietileno de baixa densidade (PEBD). Além dos seis plásticos apresentados na Figura 10, ainda houve pesquisas com polimetilmetacrilato (PMMA), poliuretano (PU), poliarilamida (PARA) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Dessa forma, ainda há muito espaço para a investigação dos vários tipos de plásticos.

Em relação ao tamanho dos microplásticos, grande parte dos artigos trabalha com tamanhos na faixa de micrômetros, desde 1 até 500. Vários artigos investigam a adsorção de tamanhos entre 30 e 800 nanômetros e poucos utilizam microplásticos de 1 a 5 milímetros. Ainda é um desafio o desenvolvimento de biocarvões com alta eficiência para remoção de microplásticos de diâmetro de poucos nanômetros. Conhecer os tipos de biomassas e microplásticos envolvidos nas pesquisas facilita a compreensão da conexão com os ODS.

### 3.4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

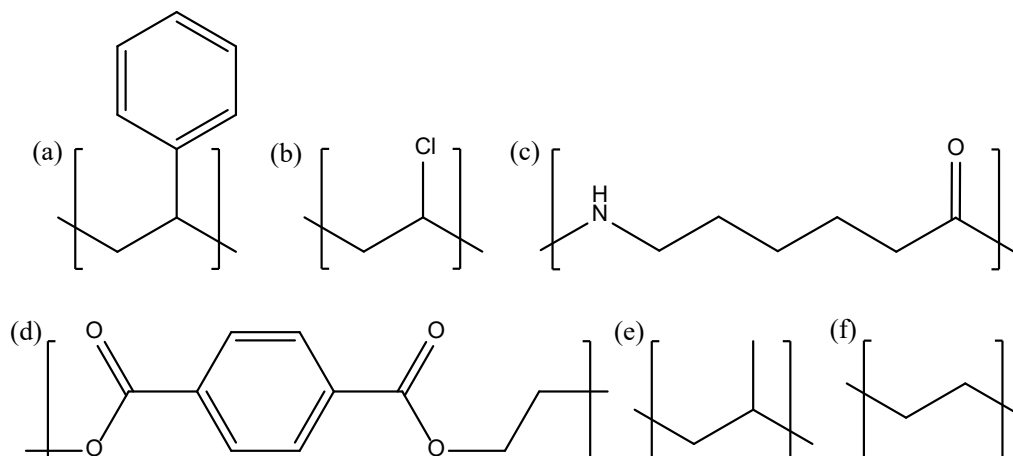
Uma das análises disponibilizadas pela plataforma Web of Science consiste na correlação das publicações com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nesse contexto, a Figura 11 apresenta os nove ODS identificados nas publicações analisadas. Cada barra corresponde ao número de artigos relacionados ao respectivo objetivo, sendo contabilizado pela leitura do eixo x do gráfico.

**Quadro 2** – Matérias-primas utilizadas na produção de biocarvão

| TIPO    | BIOMASSA   |
|---------|--|
| Casca   | Arroz, Coco, Nozes, Amendoim, Macadâmia, Carvão de palma |
| Palha   | Arroz, Trigo, Colza                                      |
| Bagaço  | Cana-de-açúcar   |
| Espiga  | Milho  |
| Borra   | Café   |
| Madeira | Casca, Serragem  |
| Lodo    | Esgoto   |
| Esterco | Vaca, Galinha, Porco                                     |

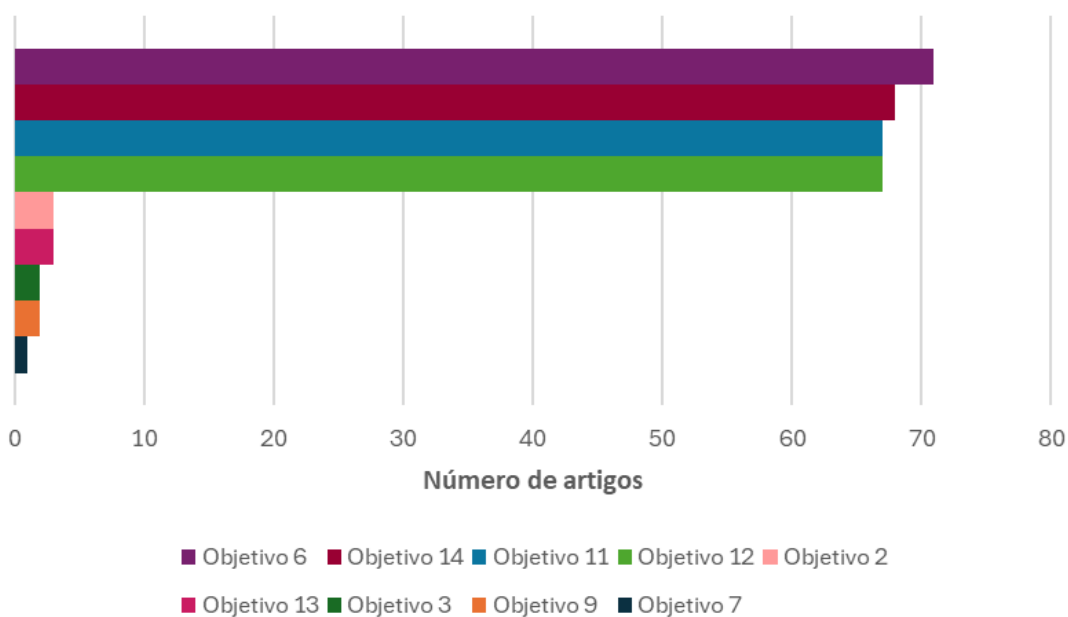
Fonte: Elaborado pelas autoras deste artigo (2025)

**Figura 10** – Principais tipos de microplástico: (a) PS; (b) PVC; (c) PA; (d) PET; (e) PP; (f) PE



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo no ChemDraw (2025)

**Figura 11** – Mapa de árvore Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Elaborada pelas autoras deste artigo (2025)

Os ODS com mais aparições são 6 – Água Potável e Saneamento, 14 – Vida na Água, 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis e 12 – Consumo e Produção Sustentáveis em 71, 68, 67 e 67 artigos, respectivamente. Os artigos estão relacionados com o desenvolvimento de melhoria nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e remediação de microplástico em meios aquáticos e em solo a fim de promover meios mais sustentáveis. De acordo com a ONU, o Objetivo 6 busca garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e o saneamento para todo mundo, o Objetivo 11 pretende transformar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, resilientes, seguros e sustentáveis, o Objetivo 12 propõe padrões de produção

e de consumo sustentáveis e o Objetivo 14 busca preservar e usar sustentavelmente os mares, os oceanos e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável (Nações Unidas Brasil, 2025). Além deles, também há conexões com outros cinco objetivos: 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável; 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima; 3 – Saúde e Bem-Estar; 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura; 7 – Energia Limpa e Acessível, conectados em três, três, dois, dois e um artigos, respectivamente. Essa forte conexão da temática com os ODS reforça a necessidade de mais pesquisas que busquem formas de remediar microplástico para um desenvolvimento mais sustentável.

## 4 Considerações Finais

A realização do processo ProKnow-C possibilitou a seleção de 75 artigos para a formação do portfólio da pesquisa, além de 40 patentes alinhadas. Os dados refletem um crescimento significativo na produção científica e tecnológica nos últimos oito anos, com destaque para o dobro de artigos e patentes nos anos de 2022 e 2023, respectivamente, o que pode estar associado à contaminação do meio ambiente por microplásticos devido ao aumento na produção e no consumo de materiais à base de plástico durante a pandemia de Covid-19.

As instituições chinesas são referências nessa área de pesquisa, em comparação com o resto do mundo. Esse domínio advém de incentivos às universidades para depósito de patentes e da implementação de políticas voltadas para tecnologias verdes, remediação ambiental e gerenciamento de resíduos, devido à poluição por microplásticos em ambientes aquáticos e à grande disponibilidade de resíduos agrícolas.

O Brasil ainda se encontra em estágio muito incipiente nessa temática de remediação de microplásticos com biocarvão, apesar de apresentar uma quantidade significativa de artigos tanto sobre microplásticos quanto sobre biocarvão. Dessa forma, há grande espaço para pesquisa nessa área, com a possibilidade de aproveitamento de tecnologias brasileiras de biocarvão já existentes para aplicação em microplásticos, em consonância com a PNRS e a PNMA. Ainda existe a necessidade de implementação de estratégias específicas, como o Projeto de Lei n. 260/2024, a fim de fomentar a pesquisa e colocar o país em destaque mundial nessa vertente do desenvolvimento sustentável.

As palavras-chave mais recorrentes destacam o processo de produção de biocarvão e sua interação com microplásticos por meio da adsorção, com vistas à resolução dessa problemática, que apresenta diversos impactos ambientais. Além disso, evidenciam os ambientes mais estudados e mais relevantes para a aplicação de biocarvão na remoção de microplásticos, como meios aquáticos, águas residuais e solos. As principais áreas dos artigos e das patentes relacionadas à temática são Tecnologia Ambiental, Engenharia Química, Química e Biotecnologia, em razão do desenvolvimento de pesquisas aplicadas, do conhecimento científico avançado e da utilização de equipamentos robustos.

A maioria dos artigos utiliza biomassas derivadas do setor agropecuário e madeireiro para a produção de biocarvão, com enfoque principalmente na remoção dos microplásticos PS e PE, em tamanhos micrométricos. A definição dos ODS, em 2015, contribuiu para o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias focadas na remoção de poluentes do meio ambiente. Assim, há uma conexão direta dos artigos com esses objetivos, sendo os

de maior destaque: ODS 6 – Água Potável e Saneamento; ODS 14 – Vida na Água; ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis; e ODS 12 – Consumo e Produção Sustentável, todos relacionados à preservação dos ambientes aquáticos e terrestres.

## 5 Perspectivas Futuras

Esse estudo indicou a necessidade e a importância de mais investimentos e políticas públicas para implementação de biocarvão para remoção de microplástico, principalmente no Brasil, a fim de proporcionar tanto um avanço científico como tecnológico na área alinhados a metas de desenvolvimento sustentável.

Nesse sentido, com auxílio deste trabalho, espera-se que, futuramente, surjam novos estudos de análises de produções científicas e patentárias. Ainda, devido à formação do portfólio bibliográfico, posteriormente, almeja-se a elaboração de um artigo de revisão por meio de uma leitura minuciosa dos artigos, analisando diversos tópicos como tipos de ambientes, tipos de biocarvão, eficiência de adsorção do biocarvão, parâmetros de pirólise, tipos de microplásticos, dentre outros. Assim, é possível identificar a composição e os parâmetros mais adequados para otimizar a preparação e caracterização de um biocarvão eficiente na adsorção de microplásticos. Para, em sequência, produzir e aplicar diferentes biocarvões em vários tipos de microplásticos e realizar uma avaliação do ciclo de vida de todas as etapas de produção do material, a fim de identificar os principais impactos ambientais e propor mudanças com intuito de diminuir os impactos e melhorar o processo.

## Referências

ABUWATFA, W. H. *et al.* Insights into the removal of microplastics from water using biochar in the era of COVID-19: A mini review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, 2021.

AGÊNCIA SENADO. **Projeto prevê metas para remoção de microplásticos de água potável e residual**. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/06/24/projeto-preve-metas-para-remocao-de-microplasticos-de-agua-potavel-e-residual>. Acesso em: 25 maio 2025.

ALIMI, O. S. *et al.* Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. **Environ. Sci. Technol.**, v. 52, p. 1704-1724, 2018.

AL-THAWADI, S. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Challenges and Threats to Aquatic Organisms. **Arab J Sci Eng**, v. 45, p. 4419-4440, 2020.

BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Investigação qualitativa em educação**: uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto Editora, 1994.

COSTA, T. *et al.* **A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica**: indicadores e ferramentas – A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica. Lisboa: Associação Portuguesa de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas, 2012.

FÜRST, K.; FENG, Y. China's regulatory response to plastic pollution: Trends and trajectories. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, 2022.

GARFANSA, M. P. *et al.* Research and Trends of Filtration for Removing Microplastics in Freshwater Environments. *Environmental Quality Management*, Special Issue: **Environmental Management and Resource Sustainability**, 2024.

GATTI, Bernardete A. Estudos quantitativos em educação. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 11-30, 2004.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 59-78, 2012.

LI, C. *et al.* The Removal of Pollutants from Wastewater Using Magnetic Biochar: A Scientometric and Visualization Analysis. **Molecules**, v. 28, n. 5.840, 2023.

LIU, X. *et al.* Knowledge graph and development hotspots of biochar as an emerging aquatic antibiotic remediator: A scientometric exploration based on VOSviewer and CiteSpace. **Journal of Environmental Management**, v. 360, 2024.

LIU, K. *et al.* Global perspectives for biochar application in the remediation of heavy metal-contaminated soil: a bibliometric analysis over the past three decades. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 8, p. 1.052-1.066, 2023.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1.097-1.110, 2017.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [2025]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/298029-relat%C3%B3rio-dos-objetivos-de-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel-2025>. Acesso em: 28 abr. 2025.

NGABA, M. J. Y. *et al.* Biochar application as a green clean-up method: bibliometric analysis of current trends and future perspectives. **Biochar**, v. 7, n. 83, 2025.

RITCHIE, H., SAMBORSKA, V., ROSER, M. **Plastic Pollution**. Our World in Data (2018). Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. Acesso em: 19 jan. 2025.

SAHAY, P. *et al.* Removal of the emergent pollutants (hormones and antibiotics) from wastewater using different kinds of biosorbent – a review. **Emergent Materials**, v. 6, p. 373-404, 2023.

SAJID, M. *et al.* Nanomaterials-based adsorbents for remediation of microplastics and nanoplastics in aqueous media: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 305, 2023.

SILVA, A. L. P. *et al.* Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: challenges and recommendations. **Chemical Engineering Journal**, v. 405, 2021.

SINGH, N. *et al.* Eco-friendly magnetic biochar: An effective trap for nanoplastics of varying surface functionality and size in the aqueous environment. **Chem Eng Journal**, v. 418, 2021.

SYGULA, E.; CIOLKOSZ, D.; BIAŁOWIEC, A. The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar - a review. **Wood Science and Technology**, v. 58, p. 859-886, 2024.

TERA AMBIENTAL. **Legislação ambiental: 4 políticas nacionais para preservação do meio ambiente**. 2025. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/legislacao-ambiental-politicas-preservacao-meio-ambiente>. Acesso em: 25/05/2025.

THOMPSON, R.C. *et al.* Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. **Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.** v. 364, n. 1526, p. 2153-2166, 2009.

VERTOWN. **7 principais leis ambientais do Brasil e suas particularidades**. 2025. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/7-principais-leis-ambientais-do-brasil-e-suas-particularidades/>. Acesso em: 25/05/2025.

WANG, J. *et al.* Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 2021.

WANG, Y. *et al.* Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. **Environmental Sciences Europe**, v. 36, n.25, 2024.

WU, P. *et al.* Analyzing the trends and hotspots of biochar's applications in agriculture, environment, and energy: a bibliometrics study for 2022 and 2023. **Biochar**, v. 6, n. 78, 2024.

## Sobre as Autoras

---

### Natália Soares de Oliveira

*E-mail:* nataliaso2000@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4294-712X>

Licenciada em Química pela Universidade de Brasília em 2025.

Endereço profissional: Universidade de Brasília, Instituto de Química, Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis (LaBCCERva), Brasília, DF. CEP: 70910-900.

---

### Grace Ferreira Ghesti

*E-mail:* ghesti.grace@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1043-5748>

Doutora em Química pela Universidade de Brasília em 2009.

Endereço profissional: Universidade de Brasília, Instituto de Química, Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis (LaBCCERva), Brasília, DF. CEP: 70910-900.