



T R A B A L H O 27

MICROPLÁSTICOS EM ESGOTOS E EFLUENTES: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA GLOBAL

Gustavo Reis Martins

Elton Jorge da Rocha Rodrigues

Maria Inês Bruno Tavares

RESUMO: Este trabalho apresenta uma revisão bibliométrica da produção científica global sobre microplásticos em esgotos e efluentes, com base em 1.941 artigos indexados na base Scopus. A análise, realizada utilizando a plataforma Biblioshiny, interface gráfica do Bibliometrix em R, evidenciou um crescimento médio anual de 43,5% nas publicações, com destaque para a China como principal produtora. Foram identificadas as revistas de maior impacto, os países e a internacionalização da produção científica, bem como os termos e métodos analíticos mais recorrentes. A análise da nuvem de palavras e dos clusters temáticos revelaram áreas consolidadas, como caracterização de contaminantes e eficiência de tratamento, e lacunas relacionadas à regulação, percepção pública e soluções sustentáveis. Os resultados fornecem *insights* para o avanço da pesquisa, formulação de políticas públicas e desenvolvimento de tecnologias voltadas à mitigação da poluição por microplásticos em sistemas de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: bibliometria; microplásticos; esgotos; efluentes; saneamento ambiental.

INTRODUÇÃO

A poluição por microplásticos é considerada uma das formas mais persistentes e silenciosas de degradação ambiental atualmente. Essas partículas plásticas com diâmetro inferior a 5 mm são classificadas como primárias quando produzidas intencionalmente para uso industrial e comercial, e como secundárias quando resultantes da fragmentação de resíduos plásticos maiores. Essas partículas têm sido detectadas em todos os compartimentos ambientais (oceanos, rios, solos e atmosfera) e até em tecidos humanos (pulmões, placenta e cérebro), evidenciando sua onipresença e o potencial risco à saúde pública (Freire et al., 2022).

No contexto do saneamento, os microplásticos impõem um desafio técnico e regulatório crescente. Estações de Tratamento de Esgoto, mesmo dotadas de tecnologias avançadas, não removem completamente essas partículas. Estudos demonstram que, mesmo após tratamentos terciários, uma parcela significativa de microplásticos é lançada nos efluentes tratados, contaminando corpos hídricos e perpetuando o ciclo de poluição (Santos, 2022). Essa limitação operacional evidencia a necessidade de inovação tecnológica urgente para aprimorar a eficiência dos processos convencionais.

Além dos impactos ambientais, os microplásticos acarretam implicações socioeconômicas profundas. Comunidades vulneráveis, especialmente aquelas que dependem diretamente de fontes hídricas para consumo e subsistência, são as mais afetadas. A ingestão de água contaminada pode provocar inflamações, desequilíbrios hormonais e bioacumulação de substâncias tóxicas, comprometendo a saúde humana (Silva, 2024). Esse cenário de desigualdade no acesso à água potável e ao saneamento básico configura também uma questão de justiça ambiental.

Paralelamente, a produção científica sobre microplásticos vem crescendo exponencialmente nas últimas décadas. A bibliometria, enquanto método quantitativo de análise da literatura, possibilita mapear essa evolução, identificar os países líderes em pesquisa, os métodos analíticos predominantes e as lacunas ainda existentes (Ramos & Stocco, 2024; Martins et al., 2025). No entanto, verifica-se uma concentração de publicações em países do Hemisfério Norte, ao passo que regiões tropicais e de alta biodiversidade permanecem sub-representadas, o que prejudica a elaboração de políticas públicas mais abrangentes. Esse descompasso ressalta a necessidade de ampliar o escopo geográfico das investigações.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e o Plano Nacional de Combate ao Lixo no Mar estabelecem diretrizes relevantes, mas ainda não contemplam especificamente o tema dos microplásticos. A carência de regulamentações voltadas a esses contaminantes emergentes dificulta o monitoramento e a gestão integrada de resíduos. A adoção de práticas como logística reversa, incentivo à economia circular e fiscalização mais efetiva configura-se como medida urgente para mitigar os impactos causados por essas partículas (Santos, 2023). Essas ações demandam articulação entre poder público, iniciativa privada e sociedade civil.

Do ponto de vista ecotoxicológico, os microplásticos atuam como vetores de diversos poluentes químicos, incluindo metais pesados, antibióticos e hormônios, ampliando seus efeitos nocivos (Martins et al., 2025). Quando ingeridos por organismos aquáticos, essas partículas podem causar obstruções físicas, alterações genéticas, estresse oxidativo e até mortalidade (Freire et al., 2022). A bioacumulação

desses contaminantes ao longo da cadeia trófica representa uma ameaça direta à biodiversidade e à segurança alimentar humana. Assim, é fundamental compreender esses mecanismos para desenvolver estratégias de mitigação mais eficazes.

A presença de microplásticos em efluentes também compromete a qualidade da água destinada ao consumo humano. Recentemente, foram identificadas partículas plásticas em amostras de água potável, tanto envasada quanto distribuída por sistemas públicos de abastecimento. A Organização Mundial da Saúde alerta que a redução da poluição plástica aliada ao aprimoramento dos processos de tratamento constitui a principal estratégia para minimizar esse problema (Freire et al., 2022). Esses achados reforçam a urgência de medidas integradas entre pesquisa, regulação e gestão do saneamento.

Além disso, a crise dos microplásticos reflete também uma crise de governança. A dificuldade de articulação entre a comunidade científica, o setor produtivo e os órgãos governamentais impedem a implementação de soluções eficazes e escalonáveis. Iniciativas como o projeto MicroMar, que mapeia a poluição microplástica em praias brasileiras, exemplificam a potencial contribuição de pesquisas aplicadas para subsidiar políticas públicas mais robustas (Silva, 2024). No entanto, a escassez de investimentos em inovação tecnológica direcionada ao saneamento limita o alcance dessas iniciativas.

A revisão bibliométrica proposta neste trabalho busca compreender a evolução da produção científica global sobre microplásticos em esgotos e efluentes, identificando tendências, lacunas e oportunidades. Ao analisar os principais métodos de detecção, os países mais produtivos e os temas recorrentes, será possível traçar um panorama crítico do estado da arte e propor caminhos para o avanço da pesquisa e da gestão ambiental.

Diante desse contexto, este estudo propõe uma revisão bibliométrica da produção científica global sobre microplásticos em esgotos e efluentes. O objetivo é identificar tendências de pesquisa, métodos analíticos utilizados, principais países produtores e lacunas existentes na literatura. Com base nessa análise, busca-se traçar um panorama crítico do estado da arte e propor diretrizes para o avanço da pesquisa e da gestão ambiental. Acredita-se que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento de estratégias integradas que promovam a preservação dos recursos hídricos, a equidade social e a resiliência dos sistemas de saneamento em face dos desafios contemporâneos.

OBJETIVO

Com base no panorama crítico apresentado na introdução, este estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliométrica da produção científica global sobre microplásticos em esgotos e efluentes. A análise abrange a identificação das principais tendências de pesquisa, incluindo a caracterização e o tratamento dessas partículas, bem como a avaliação dos métodos analíticos mais empregados na literatura recente.

Pretende-se ainda mapear os países mais produtivos, os periódicos de maior relevância e as lacunas temáticas existentes. Ao compreender o estado atual do conhecimento, o trabalho busca fornecer subsídios técnicos que orientem futuras investigações em saneamento ambiental, com foco na mitigação dos impactos dos microplásticos em sistemas de tratamento de águas residuárias.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu em uma abordagem bibliométrica, fundamentada na coleta e análise de dados bibliográficos provenientes da base de dados Scopus. A busca foi realizada utilizando os seguintes termos combinados com operadores booleanos: (“*micropastic**” OR “*micro-plastic**” OR “*microplastics pollution*”) AND (“*wastewater treatment*” OR “*sewage treatment*” OR “*effluent*” OR “*WWTP*” OR “*wastewater effluent*”), abrangendo artigos publicados sem restrição de período, coletando dados sobre os títulos, resumos e palavras-chave utilizada nas publicações.

Os dados obtidos foram tratados e analisados por meio da plataforma Biblioshiny, interface gráfica do pacote Bibliometrix em R, especializada em análises bibliométricas e estatísticas (Aria & Cuccurullo, 2017). Esse procedimento permitiu avaliar indicadores como a evolução anual de publicações, as fontes e os autores mais produtivos, as redes de colaboração nacionais e internacionais, além da frequência dos termos associados ao tema.

Para aprimorar a qualidade visual das representações gráficas, os dados foram refinados no software OriginPro 8.5, possibilitando a organização clara e precisa das informações, que serviram de base para a interpretação dos resultados obtidos. Essa abordagem metodológica viabilizou uma análise abrangente do campo de estudo, consolidando uma visão crítica sobre o desenvolvimento científico relacionado aos microplásticos em sistemas de esgoto e tratamento de efluentes.

RESULTADOS

A busca bibliográfica na base de dados Scopus resultou em 1.941 artigos sobre microplásticos em esgotos e efluentes, conforme ilustrado na Figura 1. Foram considerados exclusivamente artigos originais, assegurando o foco em produções acadêmicas primárias e metodologicamente consolidadas.

Figura 1 – Resultado da busca na base Scopus.

TITLE-ABS-KEY (("microplastic*" OR "micro-plastic*" OR "microplastics pollution") AND ("wastewater treatment" OR "sewage treatment" OR "effluent" OR "WWTP" OR "wastewater effluent")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))

Show less |

Edit in advanced search

Beta

Documents Preprints Secondary documents Research data ↗

1,941 documents found

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse volume expressivo de publicações evidencia o crescente interesse da comunidade científica internacional em compreender as implicações ambientais e tecnológicas dos microplásticos no contexto do saneamento. A utilização de termos específicos combinados por operadores booleanos permitiu delimitar com precisão o escopo temático da revisão, concentrando-se em estudos sobre ocorrência, caracterização e tratamento de microplásticos em sistemas de esgoto, estações de tratamento (WWTPs) e efluentes líquidos.

Prosseguindo com a análise dos dados obtidos, o processamento via plataforma Biblioshiny gerou um painel estatístico consolidando os principais indicadores bibliométricos relacionados ao tema (Figura 2).

A Figura 2 apresenta uma visão geral dos 1.941 artigos publicados entre 2011 e 2025. Os dados indicam um crescimento anual de 43,47% nas publicações, refletindo o interesse crescente da comunidade científica. A média de idade dos documentos, de apenas 2,54 anos, revela a atualidade e o dinamismo do campo.²⁷

Figura 2 – Painel que sumariza os dados dos artigos da base Scopus.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando biblioshiny.

A colaboração entre autores é significativa: apenas 24 publicações são de autoria única, com média de 5,61 coautores por artigo e 25,86% de coautoria internacional. Esses indicadores evidenciam o caráter multidisciplinar e transnacional da produção científica sobre o tema, enriquecendo a diversidade metodológica e interpretativa.

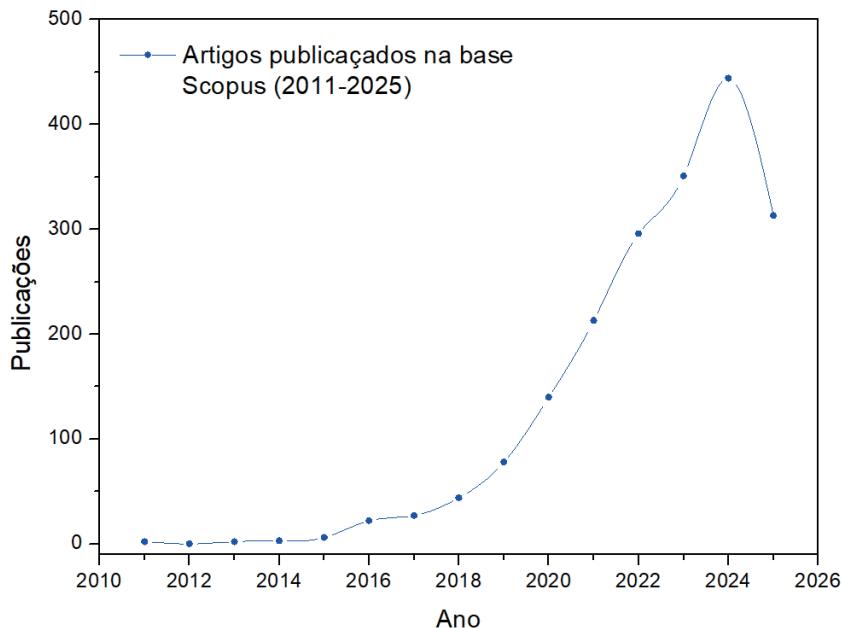
A relevância das publicações é confirmada por uma média de 55,27 citações por artigo e um total de 85.613 referências citadas. A amplitude de fontes (341 periódicos e conferências) e o envolvimento de 8.092 autores refletem o alcance e a densidade bibliográfica do campo. Adicionalmente, a presença de 4.385 palavras-chave fornecidas pelos autores potencializa a indexação dos estudos, facilitando sua recuperação e análise.

Esses indicadores atestam a robustez e a dinamicidade da produção científica, oferecendo uma base sólida para as análises subsequentes. A partir desses dados, exploram-se aspectos como a evolução anual das publicações, os países mais produtivos, os periódicos de maior impacto, redes de colaboração e palavras-chave recorrentes, entre outros.

Essas informações constituem a base para compreender o desenvolvimento científico sobre microplásticos no contexto do saneamento e identificar oportunidades para inovação tecnológica e avanço regulatório.

A análise temporal, conforme apresentado na Figura 3, revela crescimento consistente do interesse científico ao longo dos últimos quatorze anos. Entre 2011 e 2017, o número de publicações aumentou gradualmente. A partir de 2018, verifica-se uma inflexão na curva, culminando em cerca de 450 publicações em 2024. A queda projetada para 2025, em torno de 300 publicações, decorre do fato de o ano ainda não ter sido concluído, não indicando necessariamente uma retração real na produção científica.

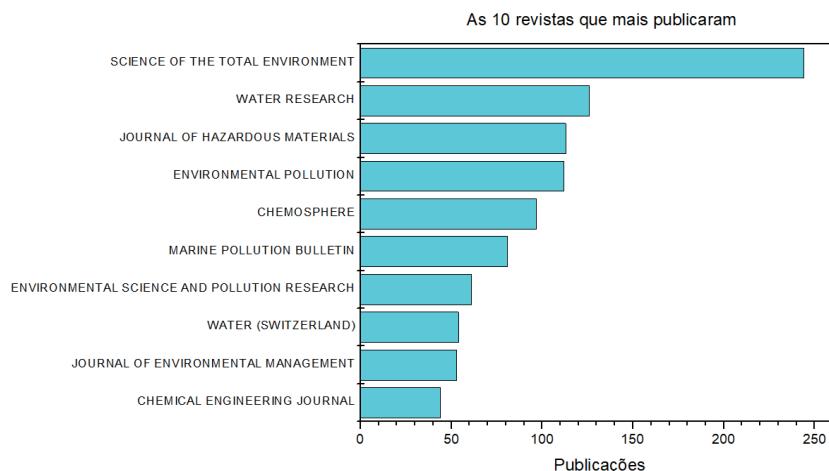
Figura 3 – Progresso das publicações por ano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4 exibe os dez periódicos que mais publicaram sobre o tema. Destaca-se a revista *Science of the Total Environment*, com aproximadamente 250 artigos, seguida por *Water Research*, com mais de 100 publicações. *Journal of Hazardous Materials* e *Environmental Pollution* ocupam a terceira e quarta posições, respectivamente, enquanto periódicos como *Chemosphere*, *Marine Pollution Bulletin*, *Environmental Science and Pollution Research*, *Water (Switzerland)*, *Journal of Environmental Management* e *Chemical Engineering Journal* completam o ranking.

Figura 4 – Distribuição das 10 revistas que mais publicaram sobre o tema.



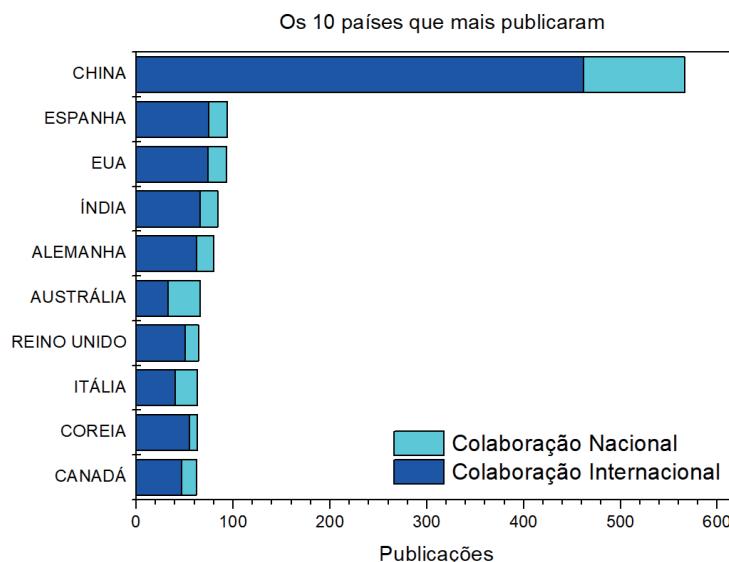
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa distribuição evidencia não apenas os veículos com maior concentração de estudos, mas também orienta pesquisadores na seleção de periódicos para submissão de novos trabalhos. A liderança de revistas multidisciplinares reforça a transversalidade do tema, que envolve química, biologia, engenharia e políticas públicas.

Na Figura 5, observa-se que a China lidera de forma expressiva o conjunto de publicações sobre microplásticos em esgotos e efluentes, com 566 trabalhos, dos quais 462 resultam de colaboração nacional e 104 de parcerias internacionais (aproximadamente 82 % e 18 %, respectivamente). Em seguida, Espanha e Estados Unidos aparecem praticamente empatados, com 94 e 93 artigos, apresentando proporções semelhantes de colaborações nacionais (cerca de 80 %) e internacionais (aproximadamente 20 %). Índia e Alemanha ocupam o quarto e o quinto lugares, com 84 e 80 publicações, respectivamente, mantendo forte base interna de pesquisa, superior a 75 % em ambos os casos, sem, contudo, desconsiderar as cooperações além de suas fronteiras.

No grupo subsequente destacam-se a Austrália, com 66 publicações repartidas igualmente entre colaborações nacionais e internacionais, e o Reino Unido, que contabiliza 64 estudos (78 % nacionais e 22 % internacionais). Itália e Coreia do Sul apresentam totais idênticos de 63 trabalhos, mas perfis distintos: enquanto a Itália registra maior percentual de coautoria estrangeiras (36 %), a Coreia concentra 87 % das pesquisas em equipes locais. O Canadá, por fim, completa o top 10 com 62 artigos e participação internacional de 24 %. Esses resultados evidenciam a consolidação de potências científicas capazes de aliar elevado volume de produção interna a redes globais de colaboração, e apontam o papel estratégico de nações de menor porte em buscar parcerias externas para ampliação de visibilidade.

Figura 5 – Os 10 países que mais publicaram, com cooperação nacional e internacional.



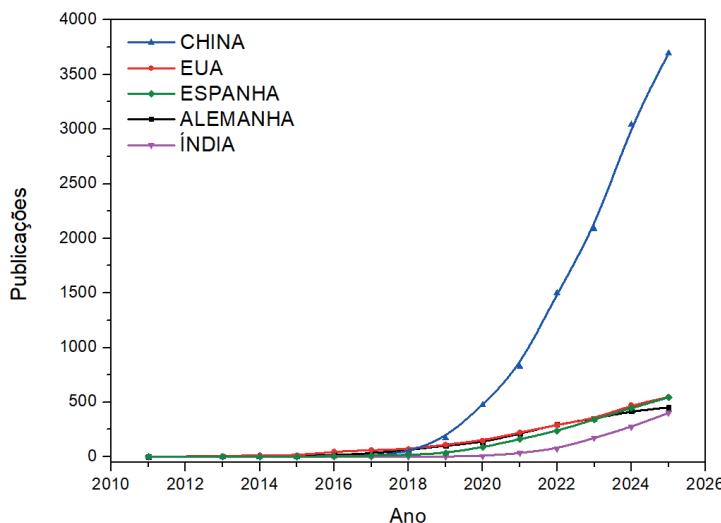
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise desse perfil de colaboração permite mapear redes de expertise, identificar potenciais parceiros e orientar estratégias de cooperação, sobretudo em contextos de recursos limitados e impactos críticos no saneamento, reforçando a necessidade de ampliar a internacionalização em nações em desenvolvimento.

Em conjunto com a Figura 5, a Figura 6 detalha a evolução temporal das publicações nos cinco países mais produtivos. A distribuição temporal das publicações revela que, até meados da última década, os cinco países analisados mantinham

produção incipiente em estudos sobre microplásticos em esgotos e efluentes, com valores reunindo menos de 20 artigos anuais em 2015. A partir de 2016, todos os casos mostraram aceleração, mas foi a China que experimentou o crescimento mais abrupto: partindo de apenas 6 artigos em 2016, sua produção saltou para 474 em 2020 e atingiu quase 3 700 em 2025, conferindo-lhe liderança incontestável. Os Estados Unidos também apresentaram incremento contínuo, passando de 47 estudos em 2016 para cerca de 550 em 2025, enquanto a Alemanha evoluiu de 15 para 450 artigos no mesmo período, reforçando o papel dessas nações como polos consolidados de pesquisa.

Figura 6 – Distribuição temporal das publicações dos 5 países colocados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Paralelamente, países que começaram com fluxos menores demonstraram ritmo de expansão notável. A Espanha, praticamente ausente até 2015, alcançou 446 publicações em 2024 e 544 em 2025, refletindo forte mobilização de grupos acadêmicos no tema. A Índia, embora tenha iniciado com apenas um artigo em 2016, apresentou crescimento acentuado a partir de 2021, totalizando mais de 400 trabalhos em 2025. Essas trajetórias ilustram a transição de um escoamento bibliográfico pontual para uma dinâmica robusta e global, apontando para a crescente prioridade dada ao saneamento ambiental e à poluição por microplásticos em diferentes contextos nacionais.

Uma possível explicação para o expressivo aumento da produção chinesa demonstrado, tanto na Figura 5 quanto na Figura 6, reside no rápido reconhecimento, por parte de autoridades e meio acadêmico, dos impactos advindos do uso intensivo de materiais poliméricos em fazendas agrícolas. Fernandes, Ribeiro e Cardoso (2022), atribuem ao descarte desordenado desse material, amplamente empregado para manter temperatura e umidade do solo, a intensa contaminação de solos e ambientes aquáticos do país, o que impulsionou a criação de linhas de pesquisa voltadas ao monitoramento, caracterização e remoção de partículas plásticas emergentes. Adicionalmente, relatórios como o do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2022) destacaram o acúmulo alarmante de microplásticos em campos agrícolas, reforçando a urgência de investigações multidisciplinares sobre fontes, destino e efeitos dessas partículas em ecossistemas cultivados e em potencial risco à segurança alimentar.

Em paralelo a esse cenário de problematização ambiental, agências de fomento nacionais, em especial a *National Natural Science Foundation of China*, passaram a priorizar chamadas temáticas voltadas a microplásticos, oferecendo financiamento substancial para projetos que abordassem desde métodos analíticos até estratégias de remediação. Soma-se a isso a publicação, em 2019, de planos de ação governamentais para a prevenção e controle da poluição plástica, que institucionalizaram o estudo de microplásticos como componente-chave nas políticas ambientais chinesas. Essas iniciativas conjuntas criaram um ambiente favorável ao aumento acelerado de trabalhos científicos, consolidando a China como epicentro global na produção de conhecimento sobre microplásticos em águas residuárias.

Figura 7 sintetiza os termos mais frequentes nas publicações, servindo como um indicativo das prioridades temáticas. Essa representação gráfica sintetiza, por meio da frequência de termos, os conceitos mais abordados pelos autores ao longo dos anos, funcionando como um indicativo da relevância e das prioridades temáticas dentro da área de pesquisa.

A importância desse tipo de visualização reside no fato de ela oferecer uma leitura rápida e intuitiva sobre os focos predominantes na produção científica, possibilitando a identificação de tendências consolidadas e lacunas de estudo. A centralidade do termo “*microplastics*”, seguido por expressões como “*wastewater treatment*”, “*plastic*” e “*water pollutant*”, evidencia que os esforços acadêmicos se concentram majoritariamente na caracterização dos contaminantes plásticos e na busca por tecnologias que promovam a mitigação de seus impactos em corpos hídricos e infraestruturas de saneamento.

Termos técnicos recorrentes como “*polymer*”, “*adsorption*”, “*effluent*” e “*toxicity*”, bem como nomes de materiais específicos com “*polyethylene*”, “*polystyrene*” e “*polypropylene*”, indicam um aprofundamento nas composições e propriedades físico-

químicas desses poluentes. Além disso, o destaque para metodologias avançadas como *"fourier transform infrared spectroscopy"* e *"scanning electron microscopy"* sugere o emprego sistemático de ferramentas analíticas sofisticadas no estudo do tema.

Figura 7 – Nuvem dos termos mais frequentes dos artigos publicados.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando biblioshiny.

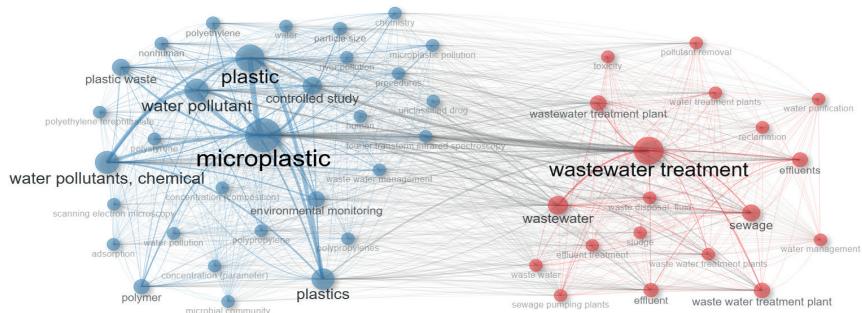
A inclusão de termos que remetem à gestão pública e infraestrutura, como "waste water management", "sewage pumping plants" e "sludge", reforça o envolvimento de múltiplos setores no enfrentamento do problema, evidenciando seu caráter interdisciplinar e sistêmico. A recorrência de palavras como "human", "nonhuman" e "microbial community" amplia ainda mais o escopo, ao apontar preocupações com os impactos ecotoxicológicos e potenciais riscos à saúde humana.

Entretanto, algumas lacunas podem ser inferidas a partir da ausência ou baixa frequência de termos associados à avaliação normativa, à percepção pública, e aos impactos socioeconômicos da poluição por microplásticos. Também são pouco recorrentes expressões ligadas ao desenvolvimento de materiais alternativos e soluções tecnológicas sustentáveis, como biopolímeros ou estratégias de economia circular, o que sugere uma oportunidade de aprofundamento em áreas ainda pouco exploradas. A escassez relativa de termos relacionados à modelagem de dispersão ambiental e à avaliação de risco integrado reforça a necessidade de abordagens mais preditivas e sistêmicas nos estudos futuros.

Em síntese, essa representação gráfica atua como um recurso estratégico que não apenas orienta pesquisadores na definição de linhas de investigação promissoras, como também subsidia tomadores de decisão no desenvolvimento de políticas ambientais mais eficazes. Trata-se, portanto, de uma ferramenta valiosa para o alinhamento da ciência às demandas sociais e ambientais contemporâneas.

A Figura 8 apresenta o mapa de coocorrência de palavras-chave, estruturada a partir de medidas de centralidade, intermediação e ranqueamento de influência entre as palavras-chave extraídas dos estudos sobre micropolásticos e tratamento de águas residuais. Cada ponto (nó) representa um termo específico, enquanto as cores indicam dois clusters temáticos distintos: um focado em processos de tratamento de efluentes (cluster vermelho) e outro centrado em micropolásticos e poluição (cluster azul). A disposição dos nós no gráfico reflete seu grau de interconexão e relevância: termos com maior talhe ocupam posições de destaque, denotando alta frequência e impacto na rede de pesquisa.

Figura 8 – Mapa de co-ocorrência das palavras-chave presentes nos artigos.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando biblioshiny.

A análise dessa rede é importante porque permite visualizar de forma integrada como os principais conceitos se articulam, revelando o núcleo conceitual da literatura e as pontes que conectam diferentes subáreas de investigação. No cluster relacionado a tratamento de águas residuais, observa-se que termos como *"wastewater treatment"*, *"wastewater"* e *"sewage"* apresentam altos talhe, indicando que esses processos operacionais são centrais e amplamente referenciados nos estudos. Já no cluster vinculado a micropolásticos, palavras como *"microplastic"*, *"plastic"* e *"water pollutant"* destacam-se pelos maiores talhes no seu cluster, sinalizando sua preeminência na discussão sobre contaminação e monitoramento ambiental.

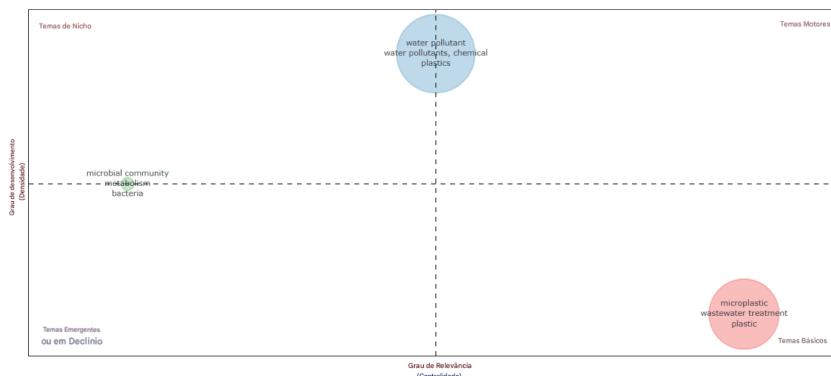
Essa visualização não apenas facilita a identificação dos temas mais consolidados na área, mas também aponta potenciais lacunas: a presença de termos com baixa interconectividade sugere a existência de conceitos ainda pouco explorados, que podem representar oportunidades para pesquisa interdisciplinar. Ademais, ao evidenciar as pontes conceituais, o gráfico orienta a formulação de estudos que integrem processos de tratamento e avaliação de impactos, contribuindo para um avanço mais articulado no desenvolvimento de soluções para micropolásticos em sistemas de saneamento.

Em suma, a rede de coocorrência fornece um panorama estratégico para pesquisadores e formuladores de políticas, permitindo a priorização de temas cruciais, a identificação de áreas emergentes e o fortalecimento de conexões entre diferentes domínios do conhecimento.

De forma relacionável, a Figura 9 apresenta um mapa temático construído a partir da centralidade e da densidade dos temas extraídos das publicações sobre microplásticos em esgotos e efluentes. Essa ferramenta visual organiza o campo de estudo em quatro quadrantes, permitindo identificar áreas consolidadas, ainda em desenvolvimento e potenciais lacunas de pesquisa. Sua importância reside na capacidade de sintetizar, de forma imediata, onde se concentram os esforços científicos e quais tópicos merecem maior atenção.

No quadrante superior direito (temas motores), agrupam-se termos como "water pollutant", "water pollutants, chemical" e "plastics", que apresentam alta densidade e alta centralidade. Esses temas são tanto bem estabelecidos quanto estruturantes para a rede de conhecimento, refletindo os núcleos intelectuais consolidados em torno da caracterização e do impacto de poluentes plásticos na água. Já no quadrante inferior direito (Temas básicos) encontram-se "microplastic", "wastewater treatment" e "plastic", com alta centralidade, porém densidade ainda em evolução. Esses conceitos são fundamentais por conectar diferentes linhas de investigação, mas demandam aprofundamento metodológico e maior diversificação de estudos.

Figura 9 – Mapa temático.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando biblioshiny.

O quadrante inferior esquerdo (temas emergentes ou em declínio) reúne temas como "microbial community", "metabolism" e "bacteria", caracterizados por baixa centralidade e baixa densidade. Sua posição sugere que esses tópicos estão

emergindo ou, alternativamente, declinando em atenção, indicando oportunidades para investigações que integrem microbiologia e ecotoxicologia na análise de microplásticos. A ausência de temas no quadrante superior esquerdo (temas de nicho) aponta que não há, no momento, áreas muito desenvolvidas, mas de caráter pontual ou periférico.

Em suma, o mapa temático não só orienta pesquisadores sobre quais temas já estão maduros e demandam refinamento, como também destaca teses emergentes ou subexploradas, subsidiando decisões estratégicas de alocação de recursos, definição de agendas de pesquisa e articulação de parcerias interdisciplinares. Essa visão panorâmica fortalece a coerência metodológica e acelera o avanço do conhecimento no enfrentamento da poluição por microplásticos em sistemas de saneamento.

De forma integrada, os dados apresentados demonstram a consolidação da pesquisa sobre microplásticos em esgotos e efluentes como um campo científico dinâmico, multidisciplinar e em franca expansão. A expressiva quantidade de publicações, a diversidade de países envolvidos, os periódicos especializados e as redes internacionais de colaboração reforçam a centralidade do tema no debate ambiental contemporâneo. As análises de coocorrência e de núcleos temáticos mostraram que a produção está fortemente orientada para a caracterização físico-química dos microplásticos e para a avaliação da eficiência de tecnologias de tratamento, embora ainda existam lacunas em dimensões normativas, sociais e de inovação sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma revisão bibliométrica sistemática da produção científica global sobre microplásticos em esgotos e efluentes, com base em 1.941 artigos indexados na base Scopus entre 2011 e 2025. A análise revelou um crescimento anual médio de 43,5%, sustentado por colaborações multidisciplinares e transnacionais, consolidando a China como principal centro de produção científica sobre o tema, seguida por Estados Unidos, Espanha, Índia e Alemanha.

O mapeamento dos periódicos de maior impacto, das redes de coautoria e das palavras-chave mais frequentes possibilitou delinear o perfil intelectual da área, destacando as principais técnicas analíticas empregadas e os materiais poliméricos mais estudados, como polietileno, poliestireno e polipropileno. Esses elementos revelam não apenas o avanço metodológico, mas também o amadurecimento das investigações sobre contaminação e mitigação em sistemas de saneamento.

A análise dos clusters temáticos e do mapa de densidade e centralidade indicou os eixos consolidados da literatura, como caracterização de microplásticos e eficiência de estações de tratamento de águas residuais, e expôs lacunas importantes. Dentre elas,

destacam-se as relacionadas a aspectos normativos, socioeconômicos e à aplicação de soluções sustentáveis, como biopolímeros e estratégias de economia circular. A baixa integração entre subáreas, evidenciada pelas métricas de intermediação e conectividade, aponta oportunidades para estudos interdisciplinares que unam modelagem preditiva, avaliação de risco e impactos à saúde humana.

Esses resultados oferecem implicações relevantes para a academia e para a formulação de políticas públicas. A escolha estratégica de periódicos e regiões de estudo, o incentivo à formação de consórcios internacionais e o fomento à ciência aberta são medidas que podem acelerar a geração de conhecimento e viabilizar a implementação de tecnologias de remoção mais eficazes.

Adicionalmente, a compreensão das tendências de publicação e das redes de colaboração fornece subsídios valiosos para agências de fomento e gestores de políticas ambientais. A identificação de lacunas também pode orientar investimentos direcionados a temas subexplorados, fortalecendo a governança e a capacidade de resposta frente à poluição plástica emergente.

Como desdobramento futuro, recomenda-se expandir a análise para outras bases de dados, como a Web of Science, a fim de permitir comparações robustas e mitigar possíveis vieses de cobertura regional. Além disso, a incorporação de métodos qualitativos, como a análise de conteúdo de políticas públicas e entrevistas com operadores de estações de tratamento, poderá enriquecer a compreensão dos desafios técnicos, institucionais e sociais relacionados à presença de microplásticos em sistemas de saneamento.

Em síntese, esta revisão bibliométrica oferece um panorama crítico e abrangente da produção científica sobre microplásticos em esgotos e efluentes. Ao destacar avanços, identificar lacunas e propor caminhos para a pesquisa aplicada, o trabalho contribui para o fortalecimento de estratégias integradas que visem à proteção dos recursos hídricos, à saúde ambiental e à promoção da equidade no acesso ao saneamento de qualidade.

REFERENCIAS

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

FERNANDES, Emilia Mori Sarti; RIBEIRO, Valéria Lopes; CARDOSO, Fernanda Graziella. Microplásticos, desenvolvimento e saúde: China [versão final]. [S.I.]: SEP, 2022. Disponível em: https://enep.sep.org.br/uploads/3004_1710630055_Micropl%C3%A1sticos_desenvolvimento_e_sa%C3%BAde_China_vers%C3%A3ofinal_pdf_ide.pdf.

FREIRE, R. C. et al. Microplástico: contaminantes emergentes presente em efluentes domésticos e sua influência na qualidade da água para consumo humano. Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade, v. 9, n. 2, p. 45–60, 2022. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/221>.

Martins, G. R., Rodrigues, E. J. R., & Tavares, M. I. B. (2025). The invisible world of nanoplastics: bibliometric analysis on nanoplastics and study of their adsorption capacity. Anais Da Academia Brasileira De Ciências, 97(suppl 3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240922>

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Plastics and the environment: state of knowledge and research needs. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/report/plastics-environment-state-knowledge-and-research-needs>>.

RAMOS, I. A.; STOCCHI, J. L. R. Desafios na Identificação e Caracterização de Microplásticos em Ambientes Aquáticos: Uma Revisão Bibliográfica. Instituto Federal do Espírito Santo, 2024. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/5641/TCC_Micropl%C3%A1stico_Revis%C3%A3o_Bibliogr%C3%A1fica.pdf.

SANTOS, M. O. Análise sistemática da remoção de microplásticos em estações de tratamento de águas residuárias. Universidade Federal de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/server/api/core/bitstreams/b113965a-3f24-4364-8e76-4922ee66c353/content>.

SANTOS, R. D. Ocorrência de microplásticos em estações de tratamento de esgoto. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2022. Trabalho apresentado no Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP. Disponível em: <https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2022P19510A3686604734.pdf>.

SILVA, A. C. Poluição por microplásticos em corpos hídricos: uma avaliação das emissões pós-tratamento de efluentes no Brasil. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/c00702b5-4183-4ffe-9494-f9071c6ee097/content>.