

MICROPLÁSTICOS COMO VETORES DE CONTAMINANTES: MODELOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS DE ADSORÇÃO

Data de aceite: 01/08/2024

Gustavo Reis Martins

Instituto de Macromoléculas Professora
Eloisa Mano - IMA
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ
Rio de Janeiro – RJ – Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-9566-3760>

Elton Jorge da Rocha Rodrigues

Instituto de Macromoléculas Professora
Eloisa Mano - IMA
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ
Rio de Janeiro – RJ – Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-9348-3520>

Maria Inês Bruno Tavares

Instituto de Macromoléculas Professora
Eloisa Mano - IMA
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ
Rio de Janeiro – RJ – Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-9620-0319>

RESUMO: A poluição polimérica causada pela má administração dos resíduos vem resultando em um novo tipo de poluição: os microplásticos. Estes são definidos como partículas entre 1 μm e 5 mm, podendo ser primários ou secundários, com suas

características altamente dependentes do meio em que se encontram. Um estudo bibliométrico demonstrou um aumento significativo nas publicações sobre o tema, começando em 2014 até os dias de hoje, com destaque para os Estados Unidos e China. Esse aumento reflete a conscientização global sobre os impactos dos microplásticos e a importância da caracterização desse material. O principal foco de preocupação ambiental dos microplásticos é a poluição conjugada causada pela sua alta capacidade de adsorção, que os transforma em excelentes vetores para poluentes orgânicos e inorgânicos, gerando assim riscos significativos para a saúde ambiental e humana. Diversos modelos matemáticos de cinética e isotermas de adsorção, como os de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, e as isotermas de Langmuir e Freundlich, têm se mostrado eficazes para estudar os mecanismos de adsorção, fornecendo insights sobre a eficácia e as etapas limitantes do processo. Fatores como a área superficial dos microplásticos, a presença de grupos funcionais e as condições ambientais têm demonstrado uma influência crítica na adsorção. Além disso, o envelhecimento dos polímeros aumenta a rugosidade e a reatividade das

micropartículas. A poluição por microplásticos é um problema ambiental crítico que requer atenção contínua e esforços de mitigação. É essencial compreender os mecanismos de adsorção e os fatores contribuintes para desenvolver estratégias eficazes de gestão e remediação ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Microplástico, Bibliometria, Adsorção, Cinética, Isoterma

ABSTRACT: Plastic pollution caused by poor waste management has resulted in a new type of pollution: microplastics. These are defined as particles between 1 μm and 5 mm, which can be primary or secondary, with their characteristics highly dependent on the environment they are in. A bibliometric study has shown a significant increase in publications on the topic, starting in 2014 to the present day, with the United States and China standing out. This increase reflects global awareness of the impacts of microplastics and the importance of characterizing this material. The main environmental concern of microplastics is the combined pollution caused by their high adsorption capacity, which makes them excellent vectors for organic and inorganic pollutants, thus posing significant risks to environmental and human health. Various mathematical models of kinetics and adsorption isotherms, such as pseudo-first and pseudo-second order, and Langmuir and Freundlich isotherms, have proven effective in studying adsorption mechanisms, providing insights into the efficiency and limiting steps of the process. Factors such as the surface area of microplastics, the presence of functional groups, and environmental conditions have shown a critical influence on adsorption. Moreover, the aging of polymers increases the roughness and reactivity of the microparticles. Microplastic pollution is a critical environmental problem that requires continuous attention and mitigation efforts. It is essential to understand the adsorption mechanisms and contributing factors to develop effective environmental management and remediation strategies.

KEYWORDS: Microplastic, Bibliometrics, Adsorption, Kinetics, Isotherm

INTRODUÇÃO

Desde a era da industrialização dos polímeros até os dias de hoje, a produção polimérica vem crescendo aceleradamente (Adegbola *et al.*, 2021). Os materiais poliméricos são altamente versáteis e têm tido um impacto revolucionário em diversos cenários que fazem parte do cotidiano, como na moda, alimentação, embalagem, transporte e estilo de vida. Sua importância é tão significativa que se tornou inimaginável conceber a vida sem eles. Devido à sua ampla gama de aplicações, os polímeros são empregados em uma variedade de contextos, desde usos simples, como produtos descartáveis, até aplicações complexas, como aquelas encontradas na engenharia e na medicina. (Boucher e Friot, 2017).

A “Era dos Plásticos”, entretanto, está resultando em um significativo problema ambiental. A poluição causada pelos resíduos poliméricos está se tornando mais proeminente devido à cultura dos bens de consumo e da inadequada administração dos resíduos, especialmente em relação aos produtos conhecidos como de uso único (produtos descartáveis) (Erni-Cassola *et al.*, 2019).

Em 2020, a produção global de polímeros atingiu cerca de 400 milhões de toneladas. Deste total, apenas 3,5 milhões de toneladas são de materiais poliméricos biodegradáveis, representando 1% da produção total (Usachev & Solomin, 2021). Até 2017, a produção de materiais poliméricos já havia excedido nove bilhões de toneladas métricas. Aproximadamente sete bilhões de toneladas de resíduos plásticos foram gerados até então, dos quais cerca de 10% foram reciclados, 14% incinerados, e o restante, 76%, acumulado em aterros ou no ambiente natural, estando propícios a sofrer degradação causada por intemperismo. A partir da degradação, um novo tipo de poluente é gerado, o microplástico (Wagner e Lambert, 2018; Geyer, 2020).

De acordo com a U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Arthur, Baker e Bamford, 2009), os microplásticos são microestruturas poliméricas, sem forma definida, medindo entre 1 μm e 5 mm. Podem ser produzidos nestes tamanhos ou gerados a partir da degradação ou do desprendimento de materiais poliméricos maiores. Alguns exemplos de microplásticos presentes no cotidiano são advindos do desprendimento de partículas de material termorrígido originário de pneus, produtos de cuidados pessoais, fibras sintéticas liberadas durante a lavagem de roupas, tintas acrílicas na descamação e materiais plásticos quando expostos por muitos dias ao sol (Boucher e Friot, 2017)

Os microplásticos podem ser subdivididos em duas classes: microplásticos primários e secundários. Os primários podem ser pellets oriundos dos processos de transformação dos polímeros ou produtos do desprendimento de materiais que contenham polímeros. Na Figura 1 podemos ver alguns exemplos de microplásticos primários. A sua chegada no meio ambiente pode ocorrer de forma voluntária (através do descarte desses produtos) ou de forma involuntária, a partir da abrasão de itens poliméricos. Já os microplásticos secundários são aqueles advindos da degradação de materiais poliméricos, descartados inadequadamente, quer seja pelo uso doméstico ou industrial. Quando no meio ambiente, a fotodegradação e os intemperismos são os agentes de degradação que mais afetam os polímeros (Lv *et al.*, 2015; Ter Halle *et al.*, 2016; Toapanta *et al.*, 2021).

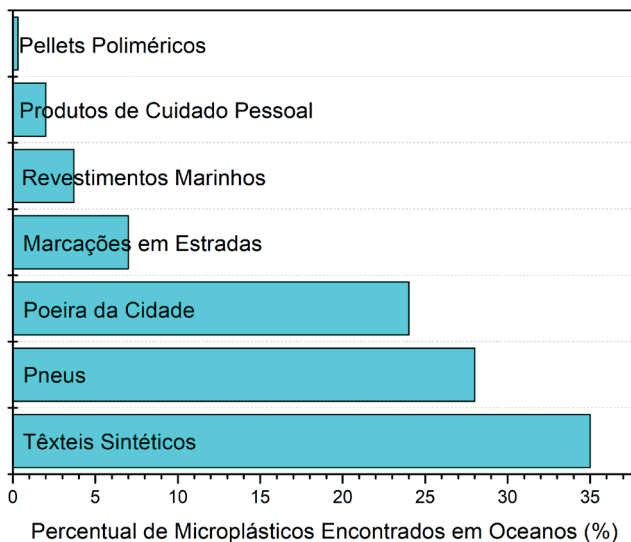


Figura 1 – Percentual de descarte global de microplásticos primários nos oceanos.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Boucher e Friot (2017 p. 21).

Recentemente, a literatura também se concentrou nos potenciais efeitos tóxicos dos microplásticos em ecossistemas aquáticos globais. (Lee e Hur, 2020; Larue et al., 2021). Por demonstrarem facilidade em adsorver e acumular poluentes do ambiente aquático circundante (Yang *et al.*, 2019), os microplásticos vêm se tornando um dos principais substratos adsorventes no ambiente aquático próximo ao ponto de descarga de poluentes. Além disso, também podem servir como vetor desses poluentes, tornando possível a ingestão por organismos aquáticos, podendo trazer riscos à saúde humana em escala de cadeia alimentar (Fu *et al.*, 2023).

O ambiente no qual os materiais poliméricos se encontram define não só a formação dos microplásticos, mas também como a degradação do material vai ocorrer. A forma, tamanho, rugosidade e reatividade são parâmetros altamente dependentes de como a degradação se dá no material polimérico, influenciando totalmente no comportamento e capacidade de adsorção dos microplásticos (Ter Halle *et al.*, 2016; Mammo *et al.*, 2020).

ANALISE BIBLIOMÉTRICA

A fim de analisar o percurso das publicações e estudar o estado da arte sobre o tema, neste capítulo foi utilizado recursos computacionais e ferramentas de bibliometria para estudar o conteúdo de diversos artigos publicados e disponíveis no banco de dados da Scopus. Programas como Vosviewer® e Voyant® foram utilizados para a obtenção de dados quantitativos sobre os artigos. Tais dados foram refinados e tratados usando programas escritos em linguagem Python pelos autores e o software OriginLab®.

A análise bibliométrica é uma técnica que permite estudar a produção científica de um determinado campo do conhecimento, através de indicadores quantitativos e qualitativos. Aplicamos a análise bibliométrica para investigar e identificar as tendências, o estado da arte, as lacunas e o impacto da pesquisa nessa área. Para isso, foi realizada uma busca na base de dados Scopus, usando os termos “TITLE-ABS-KEY (*microplastic** AND *adsorption**) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE , “re”)) “; que resultou em 1882 documentos. O operador * (asterisco) serve para que o banco de dados pesquise todas as variações do termo aplicado.

Utilizando a base de dados Scopus, analisou-se a evolução e distribuição temporal das publicações sobre adsorção em microplásticos. A Figura 2 ilustra o aumento do interesse científico na capacidade de adsorção dos microplásticos, com um início marcante em 2014 e um crescimento contínuo até o presente. Este fenômeno reflete a emergência de um campo de estudo com vasto potencial para discussões e investigações futuras.

A análise detalhada do gráfico revela que, após um período inicial de estagnação, houve um salto significativo na quantidade de artigos e revisões publicados, passando de quase nenhum antes de 2014 para cerca de 600 em 2023, indicando uma crescente conscientização sobre os impactos ambientais dos microplásticos e a necessidade de compreender melhor sua dinâmica de adsorção.

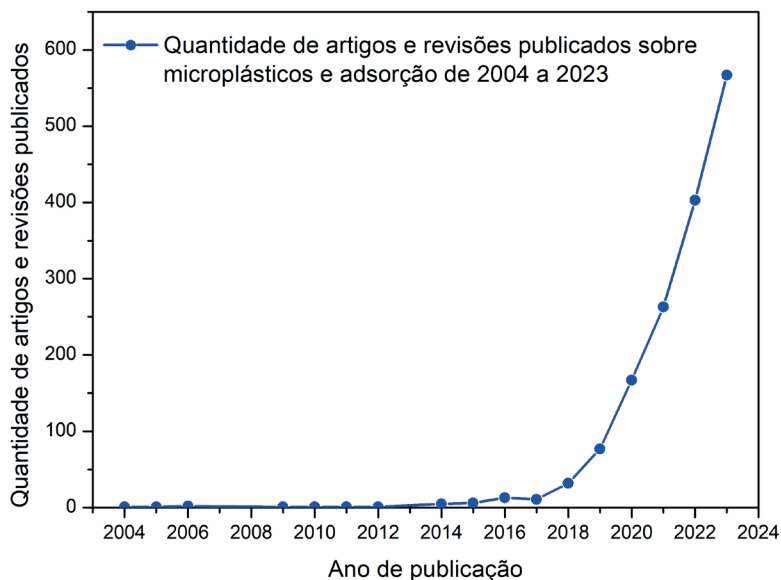


Figura 2 – Quantidade de artigos e revisões publicados sobre microplásticos e adsorção de 2004 a 2023.

Fonte – Elaborado pelo autor a partir de dados retirados da plataforma Scopus.

Por meio da ferramenta de análise de resultados da plataforma Scopus, identificamos as revistas mais proeminentes na publicação de estudos sobre adsorção em microplásticos. A Figura 3 destaca as 10 principais revistas no período de 2014 a 2023, com a ‘*Science Of The Total Environment*’ liderando o número de publicações, seguida por ‘*Chemosphere*’ e ‘*Journal Of Hazardous Materials*’. Essas publicações nesse período são responsáveis por mais de 200 artigos científicos versando sobre o tema, refletindo sua relevância como campo de estudo acadêmico.

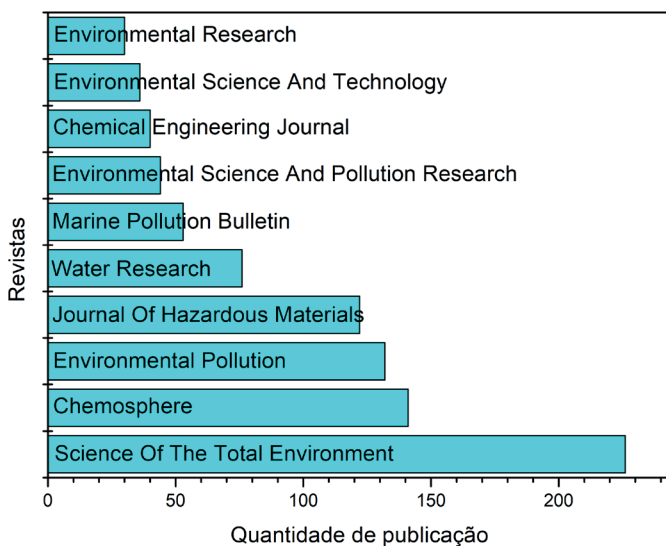


Figura 3 - As 10 revistas que mais publicaram sobre adsorção em microplásticos de 2014 a 2023.

Fonte – Elaborado pelo autor a partir de dados retirados da plataforma Scopus.

De maneira análoga, a plataforma Scopus foi empregada para discernir os países mais ativos no estudo e divulgação de pesquisas sobre a adsorção de microplásticos. A Figura 4 exhibe um panorama dos países que lideram em publicações no campo, de 2014 a 2021. Os Estados Unidos e a China se destacam no topo da lista, seguidos pela Índia e Coreia do Sul, evidenciando um engajamento significativo dessas nações na pesquisa ambiental. A Alemanha, Austrália, Reino Unido, Canadá, Espanha e Brasil também contribuem expressivamente, com uma quantidade de publicações que reflete o crescente interesse global na compreensão dos efeitos dos microplásticos nos ecossistemas e na saúde pública.

Através dos dados obtidos na plataforma Scopus, gerou-se uma nuvem de palavras que destaca os termos mais recorrentes nos títulos e resumos dos documentos indexados. A Figura 5 revela que “*microplastics*” é o termo central e mais frequente, sublinhando a importância e a prevalência deste tópico na literatura científica atual.

Palavras como “*adsorption*”, “*water*” e “*environment*” também são proeminentes, refletindo as áreas focais e as preocupações ambientais associadas aos estudos de microplásticos. Esta visualização enfatiza não só os temas mais discutidos mas também a necessidade de abordagens interdisciplinares para abarcar a complexidade do impacto dos microplásticos nos ecossistemas aquáticos e terrestres.

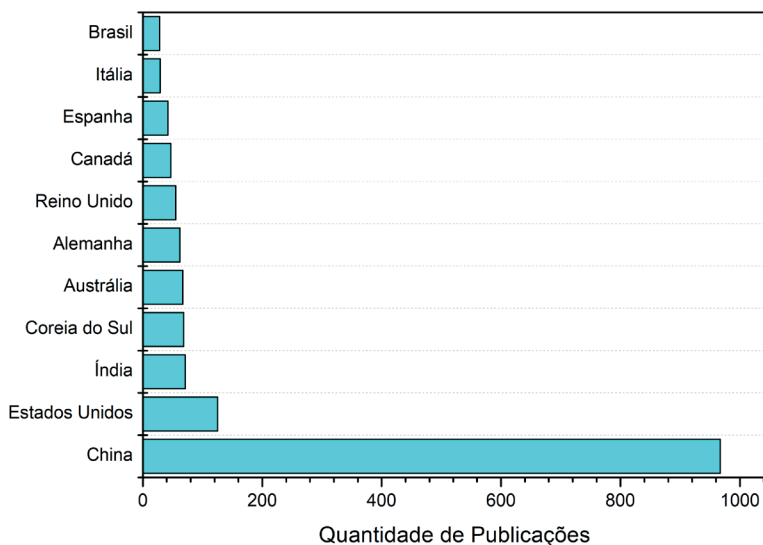


Figura 4 - Os 11 países que lideram o quadro de países que mais publicaram sobre adsorção em microplásticos de 2014 a 2023.

Fonte – Elaborado pelo autor a partir de dados retirados da plataforma Scopus.

Também é possível observar, na Figura 5, alguns nomes de polímeros relacionados à poluição por microplásticos e sua capacidade de adsorção de poluentes, como “pe” referente ao polietileno, “ps” referente ao poliestireno e “pvc” referente ao poli(cloreto de vinila). Esses estão entre os polímeros mais produzidos no mundo, sendo conseqüentemente mais descartados e encontrados como poluentes em ambientes terrestres e marítimos (Zhang *et al.*, 2011; He *et al.*, 2015).

Estudos indicam que microplásticos de PE, PS e PVC têm uma significativa capacidade de adsorver vários tipos de poluentes orgânicos e inorgânicos. Por exemplo, o PE tem mostrado alta capacidade de adsorção para poluentes orgânicos como o triclosan (Sheng *et al.*, 2021). Além disso, a presença de surfactantes pode aumentar drasticamente a capacidade de adsorção de poluentes dos microplásticos, como demonstrado para o PVC, que pode ter sua capacidade de adsorção aumentada em até 26 vezes (Xia *et al.*, 2020). Esses microplásticos não apenas transportam poluentes através dos ecossistemas, mas também podem aumentar a toxicidade desses poluentes para organismos aquáticos (Avio *et al.*, 2015).

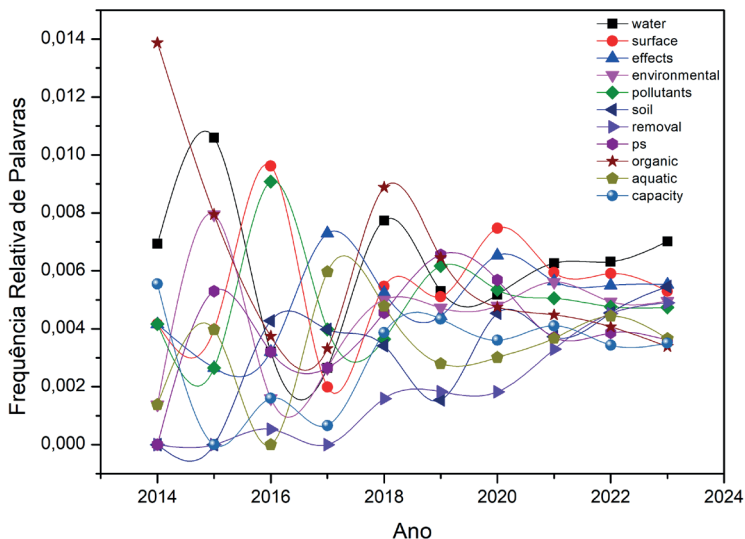


Figura 6 - Gráfico de frequência relativa de palavras.

Fonte – Elaborado pelo autor a partir de dados retirados da plataforma Scopus.

Essas tendências fornecem uma visão real sobre como os tópicos de pesquisa evoluíram e se diversificaram ao longo da última década, destacando as áreas de maior interesse e as mudanças nas prioridades de pesquisa. A análise dessas variações pode auxiliar na compreensão dos direcionamentos futuros e das lacunas existentes no campo de estudo.

ADSORÇÃO

O fenômeno de adsorção refere-se à interação de moléculas presentes em um fluido com a superfície de um sólido. Diversos estudos (Turner, Holmes e Thompson, 2014; Li *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2019) destacam a capacidade dos microplásticos em adsorver uma variedade de poluentes orgânicos e inorgânicos, incluindo antibióticos, metais pesados, óleos, bifenilos policlorados (PCB) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH). Esses poluentes, ao serem adsorvidos, contribuem para a bioacumulação em espécies marinhas

Fu *et al.* (2021) apresentam um organograma que reúne dados da literatura sobre os fatores que influenciam a adsorção de matéria orgânica em microplásticos. A Tabela 1 destaca tanto os fatores que afetam essa adsorção quanto os respectivos efeitos, indicando se a capacidade de adsorção é aumentada ou diminuída.

	Fatores que influenciam	Efeito	Capacidade de adsorção
Propriedades Físico-Químicas dos Microplásticos	Área Superficial Específica	Sítios de Adsorção	Aumenta
	Tamanho de Partícula	Área Superficial Específica	Aumenta
		Aglomeración	Diminui
	Envelhecimento	Área Superficial Específica	Aumenta
		Hidrofobicidade	Diminui
	Cristalinidade	Volume Livre	Diminui
Grupos Funcionais	Interações II-II Ligações de Hidrogênio Ligações de Halogênio	Aumenta	
	Polaridade	Hidrofobicidade	Aumenta
Propriedades dos Poluentes Orgânicos	Hidrofobicidade	Interações hidrofóbicas	Aumenta
	Propriedades Iônicas	Atração eletrostática	Aumenta
		Repulsão eletrostática	Diminui
Fatores Ambientais	pH	Dissociação	Diminui
		Polaridade Hidrofobicidade	
	Temperatura	Tensão superficial Forças de Van der Waals	Diminui
Força Iônica	Adsorção competitiva "Salting out"	Diminui	
		Aumenta	

Legenda:

Aumento	Diminuição
---------	------------

Nota: "↑" indica aumento e "↓" indica redução; "+" indica um efeito positivo e "-" indica um efeito negativo.

Tabela 1 - Fatores que afetam a capacidade de adsorção em microplásticos.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Fu *et al.* (2021).

A degradação dos materiais poliméricos altera suas características físico-químicas e morfológicas, tornando-os mais suscetíveis a se ligarem a outros materiais. Mao *et al.* (2020) também demonstram que diversas condições ambientais podem influenciar os mecanismos de envelhecimento dos polímeros, afetando tanto a produção de microplásticos quanto sua capacidade de adsorver matéria. Nesse contexto, eles estudaram como os mecanismos de envelhecimento do PS alteram a adsorção de metais pesados nos microplásticos formados por esse material.

Mao *et al.* (2020) observaram que o grau de envelhecimento do PS é acelerado pela irradiação UV em diferentes condições (ar > água do mar > água pura). Foi também

constatado que o envelhecimento influenciou a adsorção de vários metais pesados testados, com maior acúmulo desses metais no microplástico de PS quanto maior o grau de envelhecimento. Mao *et al.* (2020) concluíram que esse aumento na adsorção pode ser atribuído ao aumento da rugosidade e à presença de grupos contendo oxigênio na superfície do microplástico de PS.

Estudos como o de Zhang *et al.* (2018) afirmam que o processo de envelhecimento dos microplásticos é intermitente e que, com o passar do tempo, a adsorção de poluentes nesses materiais se torna mais complexa. Mao *et al.* (2020) também verificam que a carga superficial, rugosidade, porosidade, polaridade e hidrofobicidade dos microplásticos aumentam sob os efeitos de turbulência, salinidade e radiação UV. Todas essas características influenciam a capacidade de sorção dos microplásticos.

Liu *et al.* (2021) apresentam em seu trabalho os fatores que influenciam a adsorção de metais pesados em microplásticos no ambiente marinho. Embora confirmem que a carreamento de metais pesados por microplásticos ocorre e representa uma ameaça significativa, eles reiteram que o mecanismo ainda é pouco compreendido e destacam a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

Devido ao pequeno tamanho e à grande área superficial dos microplásticos, eles atuam como ímãs para poluentes tóxicos, aumentando a concentração desses contaminantes. Além da adsorção normal por interações eletrostáticas e fracas, a adsorção de metais pesados pode ser intensificada quando microorganismos formam biofilmes na superfície dos microplásticos (LIU *et al.*, 2021).

Liu *et al.* (2021) também mencionam os agentes de envelhecimento, como a radiação UV emitida pelo sol. Eles afirmam que o aumento da adsorção causado pelo envelhecimento do polímero é devido à fragmentação, que, por sua vez, aumenta a área superficial do material. Além disso, a fotodegradação pode gerar grupos funcionais contendo oxigênio após esse envelhecimento. Em comparação com poli(tereftalato de etileno) (PET) não envelhecido, novos grupos cetônicos foram encontrados na superfície do PET envelhecido por UV. A fotodegradação na presença de oxigênio também pode quebrar ligações na superfície dos microplásticos e formar novos grupos carboxílicos. Grupos contendo oxigênio podem aumentar a polaridade dos microplásticos, tornando sua superfície mais reativa e aumentando a capacidade de adsorção de metais iônicos e outros poluentes.

Martins *et al.* (2024) apontaram que o envelhecimento por radiação UV sobre amostras de microplásticos de polipropileno (PP) após 62 dias de exposição provoca o aparecimento de grupos oxigenados (como hidroxilas e carbonilas), o ligeiro aumento da hidrofiliabilidade, e o agravamento de microfissuras superficiais nos materiais. Essas mudanças nos materiais são marcadores importante de potencial de adsorção de substâncias inorgânicas e orgânicas.

Outros autores, como Yu *et al.* (2019), demonstram que fatores como salinidade, pH, matéria orgânica dissolvida e matéria particulada têm grande influência na adsorção e na cinética de adsorção dos microplásticos.

Estudos sobre a cinética de adsorção também foram realizados para descrever e entender os mecanismos de adsorção. Para isso, foram utilizados modelos matemáticos como os de pseudo-primeira e segunda ordem, o modelo de difusão intrapartículas, o modelo de Boyd, o modelo de Weber-Morris e o modelo de difusão de canais de Bangham. As isotermas de Langmuir e Freundlich também foram empregadas para descrever a distribuição de poluentes entre as fases sólidas e líquidas no estado de equilíbrio da adsorção, bem como os mecanismos de ligação e interação (Gossuin, Vuong, 2018; Yu *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2021).

CINÉTICA E ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Modelos matemáticos são ferramentas importantes para entender melhor o comportamento de adsorção de substâncias em microplásticos. Segundo Fu *et al.* (2021), o estudo da cinética e das isotermas de adsorção é comumente utilizado para determinar, de forma teórica, os mecanismos de adsorção de poluentes orgânicos e inorgânicos em microplásticos.

Os modelos cinéticos de adsorção são aplicados para estimar a eficácia e as etapas limitantes da taxa de adsorção de poluentes em microplásticos, além de investigar os mecanismos envolvidos na adsorção (Liu *et al.*, 2021, apud Fu *et al.*, 2021).

Segundo Ho e Mckay, (1999), a cinética de adsorção é geralmente dividida em quatro etapas: transporte de massa (que ocorre rapidamente), difusão do filme (lenta), difusão intrapartículas (lenta) e adesão por adsorção (rápida). No entanto, nem todos os mecanismos de adsorção incluem todas essas etapas (Liu *et al.*, 2021, apud Fu *et al.*, 2021).

A literatura menciona quatro modelos cinéticos matemáticos complementares: pseudo-primeira ordem (PFO) (Lagergren, 1898) e pseudo-segunda ordem (PSO) (Ho e McKay, 1999), utilizados para avaliar todo o processo de adsorção. Os outros dois modelos são empregados para descrever as etapas limitantes: o modelo de difusão intrapartículas (ID) (Weber e Morris, 1963) e o modelo de difusão em filmes (FD) (Reichenberg, 1953).

De acordo com Dong *et al.* (2019), esses modelos podem ser representados pelas Equações 1-4.

$$PFO: \ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (1)$$

$$PSO: t/Q_t = 1/(k_2 Q_e^2) + t/Q_e \quad (2)$$

$$ID: Q_t = k_p t^{1/2} + x_i \quad (3)$$

$$FD: B_t = - \ln(\pi^2 / 6) - \ln(1 - Q_t/Q_e) \quad (4)$$

Onde Q_e ($mg \cdot g^{-1}$) é a quantidade adsorvida no equilíbrio, Q_t ($mg \cdot g^{-1}$) é a quantidade adsorvida no tempo de contato t (min); k_1 (min^{-1}), K_2 ($g \cdot mg^{-1} \cdot min$) e k_p ($g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-0.5}$) são as constantes de taxa de difusão de primeira ordem, segunda ordem e intrapartículas, respectivamente; x_i é o valor associado à espessura da interface e B_p , segundo da Silva *et al.* (2018), é a constante de Boyd, onde $Bt = (\pi^2 D) / d^2$; D é o coeficiente de difusão ($cm^2 \cdot min^{-1}$) e d é o diâmetro médio das partículas centímetros.

Segundo da Silva *et al.* (2018), o modelo de pseudo-primeira-ordem pode ser utilizado para avaliar se a cinética de adsorção, como no caso de íons metálicos, é governada pela difusão externa e independente da concentração do adsorbato. Por outro lado, o modelo de pseudo-segunda-ordem demonstra se a taxa de adsorção depende da quantidade da espécie química adsorvida na superfície do adsorvente e da quantidade adsorvida no estudo de equilíbrio.

Conforme Fu *et al.* (2021), o modelo de difusão intrapartículas pressupõe que os adsorbatos se difundem pelos poros de um material adsorvente durante o processo de adsorção. Já o modelo de difusão em filmes é impulsionado por interações físico-químicas, tais como interações hidrofóbicas e ligações covalentes, entre outras.

Para o estudo de equilíbrio da adsorção, são utilizados modelos isotérmicos que, de acordo com da Silva *et al.* (2018), permitem determinar o efeito da concentração de espécies químicas na capacidade de adsorção para uma massa constante do adsorvente. Nesse contexto, dois modelos são frequentemente empregados: a isoterma de Langmuir e a isoterma de Freundlich.

O modelo de Langmuir propõe que a superfície de um adsorvente é uniforme, não há interação entre as moléculas adsorvidas, e a adsorção ocorre exclusivamente na superfície externa do adsorvente, caracterizando-se como uma adsorção em monocamada. Este modelo pode ser representado pela equação não linear (5) (da Silva *et al.*, 2018; Fu *et al.*, 2021).

$$Q_e = (Q_{max} \cdot k_f \cdot C_e) / (1 + k_f \cdot C_e) \quad (5)$$

Onde C_e ($mg \cdot L^{-1}$) é a concentração de massa no equilíbrio do adsorvente, Q_{max} ($mg \cdot g^{-1}$) é a quantidade máxima do metal adsorvido por unidade de massa de adsorvente e k_f é a constante de equilíbrio de adsorção de Langmuir.

O modelo de Freundlich é empregado para descrever o mecanismo de adsorção em superfícies não uniformes e para modelar tanto a adsorção em monocamada quanto em multicamada, considerando que a adsorção ocorre com diferentes energias. Esse modelo é expresso pela equação (6).

$$Q_e = k_F \cdot C_e^{1/n} \quad (6)$$

Onde k_f é a constante de equilíbrio de adsorção de Freundlich, n é o coeficiente de afinidade e C_e ($mg.L^{-1}$) é a concentração de equilíbrio do adsorbato.

Diversos artigos (da Silva *et al.*, 2018; Dong *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2021) têm utilizado esses modelos como ferramentas eficazes para determinar os processos e mecanismos de adsorção de íons metálicos em microplásticos. Por exemplo, o grupo de Tang *et al.* (2020) observou que a adsorção de íons de chumbo foi significativamente influenciada pela concentração de NaCl, pH inicial da solução e concentração de ácido fúlvico. Foi possível estudar o mecanismo e as influências utilizando modelos de cinética de adsorção de pseudo-segunda ordem, a equação de Elovich e o modelo de difusão intrapartícula. Esses estudos demonstram a aplicabilidade e reprodutibilidade desses modelos na investigação desse tipo de poluição conjugada que afeta o ambiente marinho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente acúmulo de microplásticos no meio ambiente, devido à produção massiva de polímeros e à inadequada gestão de resíduos, representa um desafio ambiental significativo. Esses materiais, ao adsorverem poluentes, não só transportam substâncias tóxicas através dos ecossistemas, mas também potencializam a toxicidade desses contaminantes, afetando a saúde dos organismos aquáticos, terrestres e, potencialmente, a saúde humana.

A análise bibliométrica revelou uma intensificação das pesquisas sobre microplásticos e adsorção de poluentes nos últimos anos, com os Estados Unidos e a China liderando as publicações científicas. A nuvem de palavras e frequência relativa de palavras proporcionaram uma visão abrangente sobre a diversificação e evolução dos tópicos de pesquisa ao longo da última década, destacando as áreas de maior interesse e as mudanças nas prioridades de pesquisa.

Os modelos cinéticos e isotérmicos empregados para estudar a adsorção de poluentes por microplásticos fornecem insights valiosos sobre os mecanismos envolvidos e a eficácia desses processos. Modelos como os de pseudo-primeira e segunda ordem ajudam a entender as etapas limitantes da adsorção, enquanto as isotermas de Langmuir e Freundlich são utilizadas para prever a capacidade máxima de adsorção e a natureza das interações entre poluentes e adsorventes.

A diversidade de fatores que influenciam a adsorção, incluindo a área superficial dos microplásticos, a presença de grupos funcionais e as condições ambientais, destacam a complexidade desse fenômeno. Além disso, o envelhecimento dos polímeros, provocado por fatores como radiação UV e intemperismo, aumenta a reatividade das partículas, intensificando a capacidade de adsorção.

Em conclusão, a poluição por microplásticos é um problema ambiental crítico que requer atenção contínua e esforços de mitigação. A compreensão detalhada dos mecanismos de adsorção e a identificação das principais fontes e fatores contribuintes são fundamentais para desenvolver estratégias eficazes de gestão e remediação ambiental. O avanço das pesquisas nessa área é crucial para proteger os ecossistemas aquáticos e terrestre e garantir a saúde ambiental a longo prazo.

REFERÊNCIAS

- Adegbola, T., Agboola, O., & Fayomi, O. (2021). Trends in Polymer Development: Effects and Consolidation Processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012108>.
- Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris, September 9-11., 2009. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2509>
- Avio, C., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d'Errico, G., Pauletto, M., Bargelloni, L., & Regoli, F. (2015). Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels.. *Environmental pollution*, 198, 211-22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.021>.
- Boucher, J., & Friot, D. Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. IUCN International Union for Conservation of Nature, 2017. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
- Dong, Y., Gao, M., Song, Z., & Qiu, W. Adsorption mechanism of As(III) on polytetrafluoroethylene particles of different size. *Environmental Pollution*, 254., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.118>
- Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Gibson, M. I., & Christie-Oleza, J. A. Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 691–698., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.067>
- Fu, L., Li, J., Wang, G., Luan, Y., & Dai, W. Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112207., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112207>
- Fu, L.; Li, J.; Wang, G.; Luan, Y.; Dai, W. Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Pequim, China, v. 217, p. 112207, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112207.
- Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. , 13-32. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817880-5.00002-5>.
- Gossuin, Y., & Vuong, Q. L. NMR relaxometry for adsorption studies: Proof of concept with copper adsorption on activated alumina. *Separation and Purification Technology*, 202, 138–143., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.051>
- He, Z., Li, G., Chen, J., Huang, Y., An, T., & Zhang, C. (2015). Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops.. *Environment international*, 77, 85-94 . <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.01.004>.

Ho, Y. S., & McKay, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465., 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions. *Marine Chemistry*, 167, 25–32., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.06.001>

LAGERGREN, S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24, 1–39., 1898. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572824501080908544.bib?lang=ja>

Larue, C.; Sarret, G.; Castillo Michel, H.; Pradas Del Real, A. E. A critical review on the impacts of nanoplastics and microplastics on aquatic and terrestrial photosynthetic organisms. *Small*, [s.l.], v. 17, p. 2005834, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/smll.202005834>.

Lee, Y.k.; Hur, J. Adsorption of microplastic-derived organic matter onto minerals. *Water Research*, [s.l.] v. 187, p. 116426, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116426.

Li, X., Mei, Q., Chen, L., Zhang, H., Dong, B., Dai, X., He, C., & Zhou, J. Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process. *Water Research*, 157, 228–237., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.069>

Liu, S., Shi, J., Wang, J., Dai, Y., Li, H., Li, J., Liu, X., Chen, X., Wang, Z., & Zhang, P. Interactions Between Microplastics and Heavy Metals in Aquatic Environments: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 12., 2021. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.652520>

Lv, Y., Huang, Y., Yang, J., Kong, M., Yang, H., Zhao, J., & Li, G. Outdoor and accelerated laboratory weathering of polypropylene: A comparison and correlation study. *Polymer Degradation and Stability*, 112, 145–159., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.023>

Mammo, F. K.; Amoah, I. D.; Gani, K. M.; Pillay, L.; Ratha, S. K.; Bux, F.; Kumari, S. Microplastics in the environment: Interactions with microbes and chemical contaminants. *Science of The Total Environment*, Durban, África do Sul, v. 743, n. 140518., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140518>.

Mao, R., Lang, M., Yu, X., Wu, R., Yang, X., & Guo, X. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122515., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122515>

Martins, G. R., Da Rocha Rodrigues, E. J., Neto, R. P. C., & Tavares, M. I. B. (2024). Study of the surface, rheological and morphological characteristics of isotactic polypropylene microplastics aged in a photothermal oxidation chamber. *Polymer Degradation and Stability*, 223, 110728. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110728>

Reichenberg, D. Properties of Ion-Exchange Resins in Relation to their Structure. III. Kinetics of Exchange. *Journal of the American Chemical Society*, 75(3), 589–597., 1953. <https://doi.org/10.1021/ja01099a022>

Sheng, C., Zhang, S., & Zhang, Y. (2021). The influence of different polymer types of microplastics on adsorption, accumulation, and toxicity of triclosan in zebrafish.. *Journal of hazardous materials*, 402, 123733 . <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123733>.

Silva da E. J., I. L. Rodrigues, F., N. Pacífico, S., F. Santiago, L., R. Muniz, C., D. Saraiva, G., F. do Nascimento, R., & de O. Sousa Neto, V. Study of Kinetics and Adsorption Equilibrium Employing Chemically Modified Coconut Shell for the Removal of Pb(II) from Synthetic Bath. *Revista Virtual de Química*, 10(5), 1248–1262., 2018. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180086>

Tang, S., Lin, L., Wang, X., Feng, A., & Yu, A. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: Interaction mechanism and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*, 386, 121960., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121960>

Ter Halle, A., Ladirat, L., Gendre, X., Goudouneche, D., Pusineri, C., Routaboul, C., Tenailleau, C., Duployer, B., & Perez, E. Understanding the Fragmentation Pattern of Marine Plastic Debris. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5668–5675., 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00594>

Toapanta, T., Okoffo, E. D., Ede, S., O'Brien, S., Burrows, S. D., Ribeiro, F., Gallen, M., Colwell, J., Whittaker, A. K., Kaserzon, S., & Thomas, K. v. Influence of surface oxidation on the quantification of polypropylene microplastics by pyrolysis gas chromatography mass spectrometry. *Science of The Total Environment*, 796, 148835., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148835>

Usachev, I., & Solomin, D. (2021). GLOBAL TRENDS IN BIODEGRADABLE POLYMERS. *GEOLINKS Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.32008/geolinks2021/b2/v3/35>.

Wagner, M., & Lambert, S. *Freshwater Microplastics* (M. Wagner & S. Lambert, Eds.; Vol. 58). Springer International Publishing. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5>

Weber, W. J., & Morris, J. C. Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–59., 1963. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>

Xia, Y., Zhou, J., Gong, Y., Li, Z., & Zeng, E. (2020). Strong influence of surfactants on virgin hydrophobic microplastics adsorbing ionic organic pollutants.. *Environmental pollution*, 265 Pt B, 115061 . <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115061>.

Yang, Y.; Liu, G.; Song, W.; Ye, C.; Lin, H.; Li, Z.; Liu, W. Plastics in the marine environment are reservoirs for antibiotic and metal resistance genes. *Environmental International* , Hangzhou, China, v. 123, p. 79-86, 2019. DOI: 10.1016/j.envint.2018.11.061.

Yu, F., Yang, C., Zhu, Z., Bai, X., & Ma, J. Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment. *Science of The Total Environment*, 694, 133643., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133643>

Zhang, H., Wang, J., Zhou, B., Zhou, Y., Dai, Z., Zhou, Q., Christie, P., & Luo, Y. Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: Kinetics, isotherms and influencing factors. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 243(Pt B), 1550–1557., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.122>

Zhang, J., Liu, N., Li, W., & Dai, B. (2011). Progress on cleaner production of vinyl chloride monomers over non-mercury catalysts. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 5, 514-520. <https://doi.org/10.1007/S11705-011-1114-Z>.