

Microplásticos em Ambientes Aquáticos: Ocorrência, Riscos Ambientais, Técnicas Analíticas, Soluções e Perspectivas Futuras

Microplastics in Aquatic Environments: Occurrence, Environmental Risks, Analytical Techniques, Solutions and Future Perspectives

Nicoli Gomes de Moraes,^{a,*} Gláucia Peregrina Olivatto,^a Felipe Machado de O. Lourenço,^a Ana Laura A. Lourenço,^b Valdemar Luiz Tornisielo^a

^aUniversidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente, Laboratório de Ecotoxicologia, CEP 13400-970, Piracicaba-SP, Brasil
^bUniversidade de São Paulo, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Departamento de Ginecologia e Obstetrícia (Setor de Reprodução Humana), CEP 14040-900, Ribeirão Preto-SP, Brasil

*E-mail: nicoligm@usp.br

Recebido: 12 de Janeiro de 2024

Aceito: 2 de Abril de 2024

Publicado online: 18 de Abril de 2024

The occurrence of microplastics (MPs) in various environmental compartments is a global concern. Although the vast majority of studies already published have been conducted in aquatic ecosystems, there is still much to be investigated, especially in freshwater environments. MPs arrive in aquatic environments by several routes, and due to their physicochemical properties and small size, they interact with the biota and other pollutants present there. Sampling, identification, and quantification methodologies are not yet standardized, which makes it difficult to compare studies and understand the current scenario of MPs contamination in Brazil and worldwide. This article aims to offer an overview of the occurrence of MPs in aquatic environments, along with their sources, dynamics, potential risks to biota. It also intends to present the primary analytical methodologies for processing environmental samples, chemically identifying polymers, and analyzing organic pollutants sorbed to these particles. Additionally, the article presents potential strategies for combating MPs pollution, outlines the general framework of existing international policies, highlights major research gaps, and discusses future prospects for this area of study.

Keywords: Aquatic environment; organic pollutants; plastic pollution.

1. Introdução

O termo “plástico” refere-se à polímeros sintéticos e semi-sintéticos produzidos, principalmente, a partir da polimerização de monômeros de origem fóssil e que podem ser facilmente moldados pela ação da pressão e/ou calor.¹ Dentre os diversos polímeros plásticos existentes, o polipropileno (PP), polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e o polietileno tereftalato (PET) representam mais de 90% de todo o plástico já produzido mundialmente.² Neste contexto, considerando que o tempo estimado de decomposição desses polímeros pode variar entre 100 e 450 anos,² é possível que resíduos dos primeiros plásticos, desenvolvidos no início do século XX, ainda persistam no ambiente.³

A partir do ano de 1950 o plástico passou a ser produzido em grande escala, devido ao seu baixo custo de produção e às suas propriedades como leveza, alongamento, impermeabilidade, resistência, transparência, isolamento térmico e elétrico.² Atualmente, é difícil imaginar um mundo sem plástico, pois além de estar presente na composição e na embalagem de muitos produtos, pesquisas conduzidas nos últimos anos, revelaram que a sua presença também é marcante nas diferentes matrizes ambientais.⁴⁻⁶

Dificuldades na gestão e gerenciamento ao longo de todo o ciclo de vida do plástico vêm provocando consequências econômicas, sociais e ambientais,⁷ pois afetam o turismo, comprometem sistemas de drenagem urbana, poluem ecossistemas aquáticos e terrestres, reduzem a vida útil de aterros, oferecem riscos para a vida silvestre e para a saúde humana.^{8,9} Nesse contexto, surge também uma outra classe de resíduos plásticos, os microplásticos (MPs), que têm sido foco de estudo nos últimos anos.¹⁰

MPs são uma classe de contaminantes de preocupação emergente que contempla partículas sólidas sintéticas e matrizes poliméricas, com tamanho entre 1µm e 5 mm.¹¹ Em 1970, foram relatados pela primeira vez, durante coletas de plâncton na América do Norte, e desde então, já foram encontrados em todos os compartimentos ambientais, tais como solo, ar, ambientes marinhos, ambientes de água doce,¹²⁻¹⁵ e ainda em produtos destinados ao consumo humano.¹⁶

De acordo com a origem, os MPs podem ser classificados em primários e secundários.¹⁷ Os MPs primários incluem materiais já fabricados em escala microscópica para posterior

composição de produtos e embalagens, como *microbeads* e *pellets*.¹⁸ Os MPs secundários, por sua vez, são gerados a partir da contínua fragmentação de plásticos maiores, por meio da combinação de processos bióticos e abióticos, incluindo: radiação UV, hidrólise, ação mecânica de ondas e ventos, alterações de condições ambientais, além de interações com diferentes organismos.^{19,20} Na Figura 1, estão representados os MPs de origem primária e secundária.

O impacto da poluição plástica é inversamente proporcional à dimensão dos fragmentos, isso porque, quanto menores, eles podem ser mais facilmente transportados, têm sua área superficial específica aumentada, podem afetar todos os níveis tróficos da cadeia alimentar (inclusive organismos microscópicos que não seriam diretamente impactados com plásticos de tamanhos maiores) e, a remoção torna-se mais complexa.²¹

Considerando os impactos resultantes do uso excessivo e da má gestão dos resíduos plásticos, principalmente no que diz respeito a ambientes aquáticos, este trabalho teve por objetivo apresentar uma revisão da literatura abordando os seguintes temas: I) as principais fontes e a dinâmica de MPs em ambientes aquáticos; II) Os principais métodos para o processamento de amostras ambientais de microplásticos; III) Os métodos mais utilizados para a identificação de microplásticos; IV) Um panorama geral sobre a ocorrência de microplásticos em ambientes aquáticos; V) Os riscos dos microplásticos para a biota aquática; V) Os métodos analíticos utilizados para a análise de poluentes orgânicos em microplásticos; VI) As alternativas existentes que podem ser aplicadas para a resolução da poluição por microplásticos e resíduos plásticos, de modo geral; VII) Resumo da legislação atual voltada para resolver a poluição por plásticos; e VIII)

As principais lacunas e algumas perspectivas futuras em estudos com microplásticos.

2. Microplásticos em Ambientes Aquáticos: Fontes e Dinâmica

Por ser considerado o destino final dos MPs, a maioria das pesquisas existentes (cerca de 96%) foram realizadas em ecossistemas marinhos.²² Nos ecossistemas de água doce, os estudos são mais recentes e existem lacunas do conhecimento que precisam ser melhor investigadas, tais como o potencial tóxico dos MPs para organismos de diferentes níveis tróficos e a sua distribuição e dinâmica nos diversos tipos de corpos d'água (rios, lagos, pântanos, mangues, águas subterrâneas, e etc.).²³

De maneira geral, os MPs podem atingir os ambientes aquáticos de diferentes maneiras, por exemplo, pelo escoamento de águas pluviais, pelo descarte inadequado de embalagens que são fragmentadas sucessivamente, por meio de lixiviação de aterros controlados e lixões, através de perdas acidentais de *pellets* durante transporte, pelo escoamento superficial de áreas agrícolas contaminadas, pelo descarte de materiais pela indústria pesqueira (como redes e cordas), entre outros.^{24,25}

Segundo Tang *et al.*²⁶ as estações de tratamento de águas residuárias (ETARs) configuram uma outra fonte significativa de MPs, visto que elas não promovem uma efetiva remoção dessas partículas. Assim, as ETARs podem contribuir para a dispersão de MPs por duas vias: 1) águas residuais, que são reintroduzidas em rios após o tratamento; e 2) lodos, que são frequentemente destinados a aterros ou aplicados em solos agrícolas com a função de fertilizante.

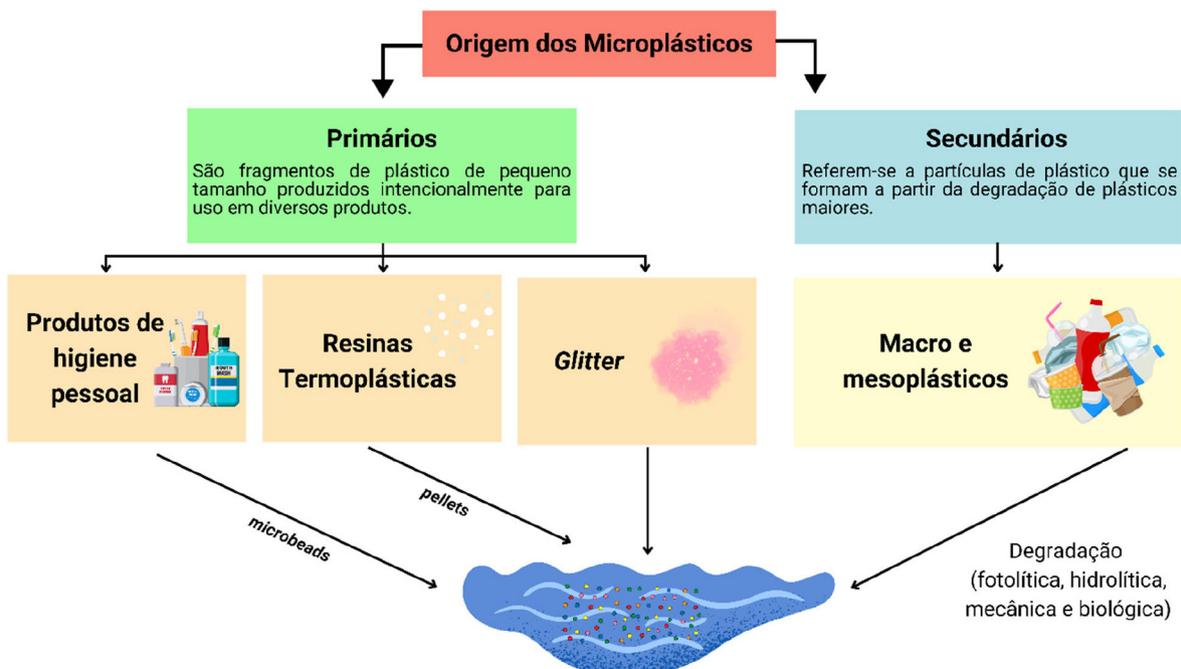


Figura 1. Representação dos microplásticos de origem primária e secundária

Embora essa última prática já esteja consolidada em diversas localidades, em alguns países, como o Brasil, ainda é limitada, haja visto os possíveis riscos de contaminação do solo por nitrato, metais e poluentes orgânicos tóxicos, além de microrganismos patogênicos.²⁷ As principais rotas e fontes dos MPs para os ambientes aquáticos foram esquematizadas na Figura 2.

O transporte e a distribuição dessas partículas dependem de diversos fatores como morfologia, densidade, tamanho e identidade química e ocorrem, principalmente, através de correntes oceânicas, ventos, escoamento superficial, lixiviação, fluxo dos rios e também por meio de animais.²⁸

Em ambientes aquáticos, os MPs de baixa densidade distribuem-se preferencialmente na superfície da coluna d'água, e os de alta densidade nas partes mais profundas.²⁹ A partir da formação de biofilmes e da incrustação de matéria orgânica, a densidade dos MPs pode aumentar e assim, sedimentar. Quando depositadas no fundo de corpos hídricos, as condições de baixa temperatura e de pouca iluminação permitem maior preservação dessas partículas, uma vez que são inibidos os principais mecanismos de degradação dos plásticos mais abundantemente relatados no ambiente, como PE e PP, a degradação termo e a foto-oxidativa.³⁰

3. Métodos de Processamento de Amostras Ambientais de Microplásticos

Durante análises ambientais, é fundamental que os MPs sejam corretamente discriminados de outras partículas (orgânicas e inorgânicas), viabilizando assim, a caracterização e a quantificação.³¹ Após a coleta, as amostras

são submetidas a uma série de etapas de processamento, as quais podem variar de acordo com o objeto de estudo (sedimento, água superficial doce, água superficial salgada, tecidos ou organismos, por exemplo), e da profundidade do local de amostragem.³²

O guia do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), intitulado “*Marine Debris Monitoring and Assessment: Recommendations for Monitoring and Assessing Marine Debris in the United States*” é uma das principais referências utilizadas na avaliação e no monitoramento de MPs em todo o mundo.³³ Neste guia são descritas metodologias simples e robustas para a análise de MPs em amostras de água, areia e sedimento, com detalhamento de todas as etapas envolvidas desde a coleta até a quantificação. Embora tenha sido proposto para analisar amostras coletadas no ambiente marinho, as metodologias propostas no guia do NOAA são aplicáveis para diversos tipos de amostras, requerendo, em alguns casos, poucas adaptações.

Usualmente, as principais etapas empregadas no processamento das amostras envolvem métodos físicos (peneiramento, filtração e separação por densidade) ou químicos (digestão de material biótico)³³ (Figura 3), e demandam cuidados específicos para garantir a recuperação e a representatividade das amostras.

Em amostras de água, o tratamento inicial de MPs envolve o peneiramento ou a filtração, utilizando peneiras e filtros de diferentes tamanhos de malha e de poros, respectivamente. Além de permitir uma triagem preliminar ao remover materiais fora da faixa de interesse, essa etapa possibilita que os MPs sejam separados por faixas de tamanho.³⁴ No guia do NOAA, a faixa de tamanho de malhas recomendada é entre 0,3 mm a 5,6 mm,³³ no entanto,

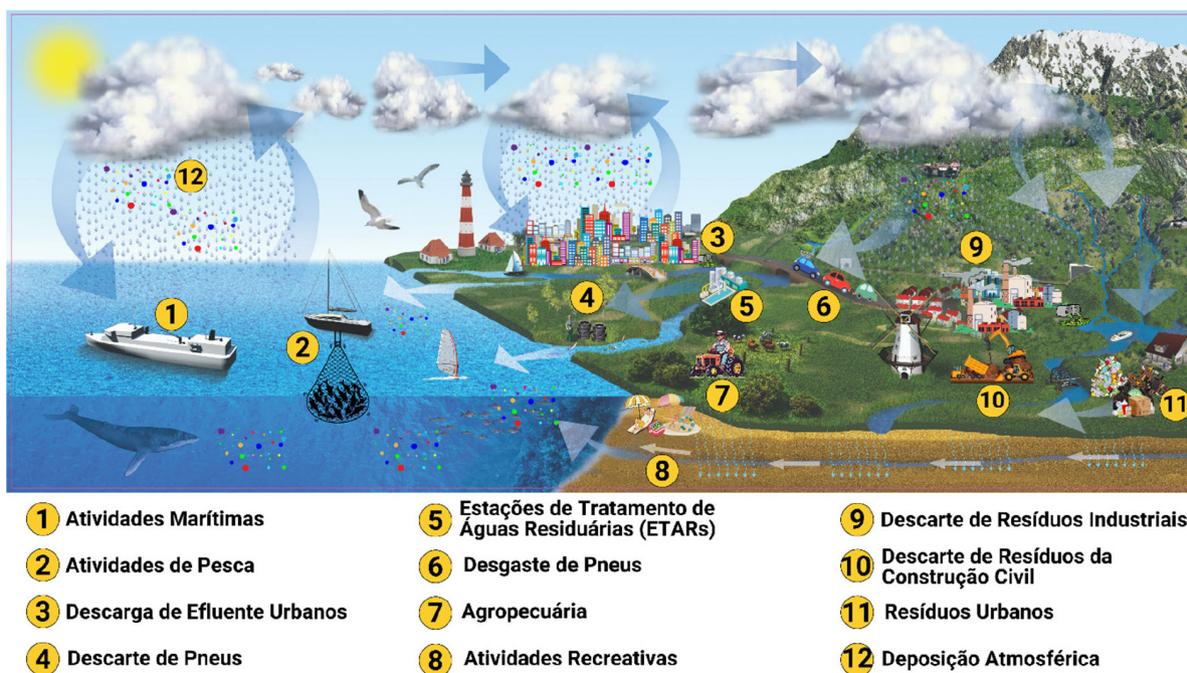


Figura 2. Principais fontes e rotas de microplásticos para o ambiente aquático

considerando estudos recentes que apontam uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de MPs e o tamanho de malha ou poro, e levando em consideração a definição atualmente mais aceita de MPs que inclui partículas com tamanho inicial de 1 μm ,¹¹ é recomendado que a amostragem e as etapas de processamento sejam adaptadas para abranger partículas com essa dimensão.

Após essa etapa, as amostras são comumente submetidas a um processo de digestão com agentes químicos para remover o excesso de materiais bióticos interferentes. Na digestão podem ser empregados diversos reagentes, como ácidos (HCl e HNO₃), bases (NaOH e KOH), oxidantes (H₂O₂) e enzimas (celulases, lipases, quitinases, proteases e proteinase-K, por exemplo).³⁵⁻³⁸

Os métodos de digestão variam em termos de eficiência na degradação da matéria orgânica, no custo e, alguns apresentam risco de degradar certos tipos de polímeros presentes na amostra.³⁴ Por exemplo, ao mesmo tempo em que a digestão ácida com HNO₃ e HCl degrada a maioria dos compostos orgânicos, pode dissolver MPs feitos dos polímeros PS e PE e degradar a superfície de PVC e de PET.³⁷ Da mesma forma, a digestão alcalina com NaOH permite a degradação da maioria dos compostos orgânicos, mas, em contrapartida, degrada também polímeros como PC (policarbonato), AC (Acetato de celulose), PET e PVC.³⁹ Ainda com relação à digestão alcalina, o KOH é mais recomendado, pois, além de alta eficiência na degradação de material orgânico, a maioria dos polímeros é resistente à essa base.³⁹

Analogamente às técnicas de digestão anteriores, o uso de agentes oxidantes promove elevada degradação do material orgânico, no entanto, pode afetar a integridade das partículas e possui baixa recuperação das amostras, devido à

perda do material pela formação de espumas.³⁹ Ao contrário das digestões químicas, a digestão enzimática não degrada os polímeros tratados, contudo, a sua desvantagem está relacionada à demora nos tempos de reações e ao elevado custo das enzimas.³⁴

A separação por densidade é uma técnica utilizada para separar MPs de sedimentos ou de substâncias orgânicas que não foram degradadas completamente durante a etapa de digestão.³⁵ Para essa finalidade, a amostra é misturada a um óleo (óleo de canola ou azeite, por exemplo),⁴⁰ a um solvente ou a uma solução salina altamente concentrada ou saturada. Devido à menor densidade, a maioria dos MPs flutua e pode ser recuperada através de um funil de separação.³¹ Os sais mais frequentemente empregados nesta etapa são: NaCl (1,2 g cm⁻³), Na₂WO₄·2H₂O (1,4 g cm⁻³), NaI (1,4 g cm⁻³), ZnCl₂ (1,7 g cm⁻³), ZnBr₂ (1,71 g cm⁻³) e [Li₆(H₂W₁₂O₄₀)3H₂O] (1,62 g cm⁻³).³⁴

Após esses processos, as partículas são quantificadas, podendo ainda ser categorizadas de acordo com as suas características físicas (tamanho, morfologia e cor), e características químicas (tipo de polímero).⁴¹⁻⁴² De acordo com Frias *et al.*,³⁸ as classes morfológicas de MPs relacionadas com mais frequência são *pellets*, fragmentos, fibras, filmes, espuma e *microbeads*, (Figura 4). No próximo tópico, serão discutidos os principais métodos empregados para a identificação de MPs com base em suas características físicas e para a caracterização química dos MPs.

4. Métodos de Identificação de Microplásticos

Desde os primeiros trabalhos publicados, diversas técnicas já foram empregadas na identificação de MPs,

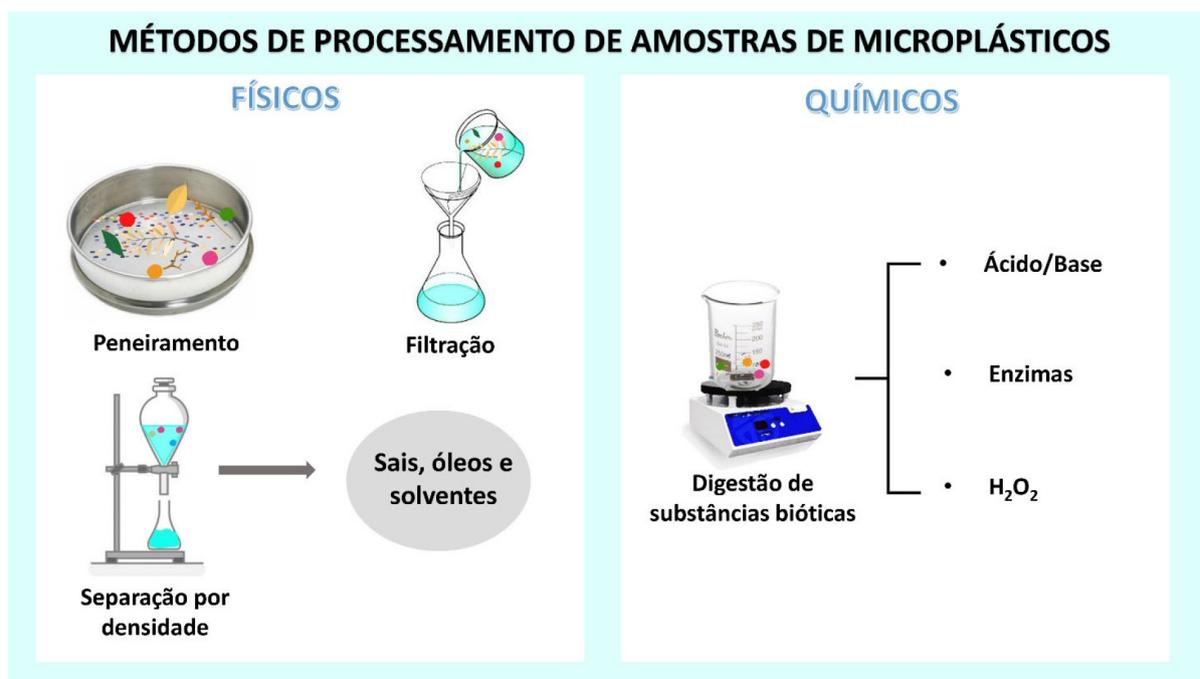


Figura 3. Classificação dos principais métodos envolvidos no processamento de amostras de microplásticos

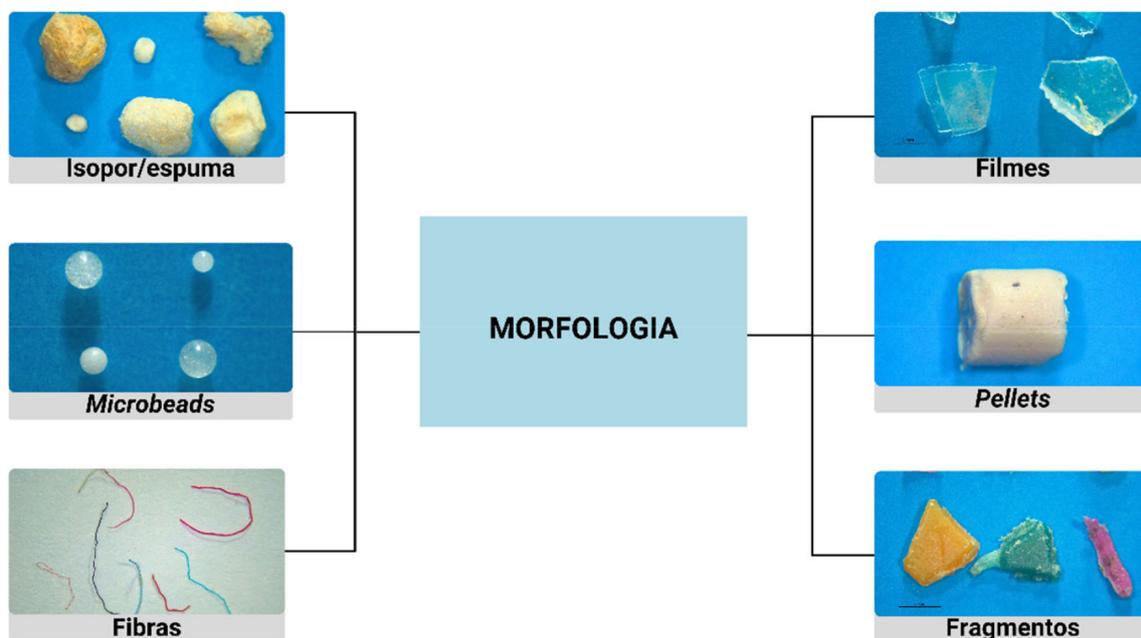


Figura 4. Exemplos das classes morfológicas de microplásticos mais reportadas na literatura. Fonte: Moraes (2022)⁴³

incluindo análises visuais, métodos termo analíticos e espectroscópicos.⁴⁴ Nos últimos anos, a combinação de diferentes técnicas analíticas tem se tornado uma tendência, pois possibilita a obtenção de resultados mais abrangentes e mais confiáveis.⁴⁵

A identificação visual a olho nu é uma das principais etapas envolvidas na classificação de MPs presentes em amostras ambientais, pois, através dos atributos físicos (cor e forma), permite identificar potenciais MPs.⁴⁶ Contudo, essa técnica apresenta algumas limitações relacionadas ao tamanho das partículas, à cor (partículas transparentes, pretas e brancas são mais difíceis de identificar do que as coloridas) e à subjetividade do analista, podendo resultar em uma grande taxa de erro e falsos positivos.⁴⁷

A microscopia é uma técnica bastante empregada para identificar MPs, devido, principalmente, à simplicidade e ao baixo custo da maioria dos equipamentos.⁴⁶ Geralmente, microscópios ópticos permitem visualizar tamanhos de partículas indetectáveis a olho nu até uma faixa limite de 0,4 a 0,7 μm , enquanto estereomicroscópios de dessecação permitem observar amostras de diferentes ângulos. No entanto, em ambos os métodos não é possível determinar a identidade química das amostras e a precisão de detecção é baixa, sendo limitada pelo tamanho das partículas.⁴⁸

Para reduzir falhas na detecção de determinados tipos de MPs, diversos trabalhos tem utilizado microscopia de fluorescência.^{49,50} Neste método, os MPs são corados com compostos fluorescentes, como o Vermelho de Nilo, tornando a sua identificação mais fácil e precisa.⁵¹ A adoção da microscopia de fluorescência exige que a etapa de digestão das amostras seja eficiente, pois a presença de matéria orgânica pode interferir no resultado. Como limitação, as fibras e MPs pouco hidrofóbicos como PC, PVC, Poliuretano (PUR) e PET podem apresentar baixa fluorescência.⁵²

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) também pode ser utilizada na detecção de MPs com tamanhos entre 1 μm a 1 mm.^{53,54} Através da interação entre a partícula e um feixe de elétrons de alta energia, são geradas imagens da estrutura superficial em alta resolução.⁵⁵ Apesar de requerer pequenas quantidades de amostras, é um método relativamente caro e requer tempos prolongados de preparo de amostra.⁵⁶

Considerando que, mesmo após as etapas de processamento das amostras ambientais, podem restar alguns materiais com características físicas semelhantes aos MPs, como madeira, tecidos foliares, papel, tinta e carvão, além das limitações já mencionadas acerca dos métodos de identificação visual e por microscopia, é necessário identificar a composição química das partículas para evitar interpretações errôneas.⁵⁵ No caso da MEV, a composição química das partículas pode ser avaliada ao acoplar o equipamento a um espectroscópio de energia dispersiva de raios X (EDS, em inglês Energy dispersive X-ray Spectroscopy).⁵⁷

Em geral, as técnicas mais frequentemente empregadas na identificação química dos MPs são as de espectroscopia vibracional, como Raman e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR, em inglês *Fourier-transform infrared spectroscopy*), devido à elevada confiabilidade dos resultados.⁴⁴ Nessas técnicas, a superfície da amostra interage com a radiação eletromagnética, resultando em um espectro que contém as transições vibracionais moleculares.⁵⁸ Tendo em vista que cada material possui um conjunto de transições vibracionais característicos, como uma espécie de impressão digital, a identificação dos MPs pode ser feita comparando-se os espectros das amostras com uma biblioteca espectral de polímeros.⁵⁹

O FTIR fornece informações sobre os grupos funcionais presentes em uma amostra, possibilitando assim, identificar os tipos de ligações químicas em um polímero. Ele pode ser utilizado em três modos para a análise de MPs, incluindo reflectância, transmissão e reflectância total atenuada (ATR, em inglês *Attenuated total reflectance*).⁴⁸ O modo de reflectância é útil no estudo de superfícies de partículas e para a análise não destrutiva das amostras. O modo de transmissão pode fornecer informações espectrais bem detalhadas das amostras, mas requer mais preparo da amostra. Por último, o modo ATR envolve pressionar a amostra contra um cristal com elevado índice de refração, gerando um espectro de absorvância da luz infravermelha em diferentes comprimentos de onda.⁴⁸

Com relação as limitações, os métodos convencionais de FTIR são capazes de detectar apenas MPs visíveis e demandam tempo para a geração de espectros individuais de cada amostra, no entanto, a análise de partículas menores, de até 10 µm, pode ser viabilizada pelo acoplamento do FTIR à microscopia (µFTIR).⁶⁰ Adicionalmente, o acoplamento do µFTIR a um detector de arranjo de plano focal (FPA, em inglês *Focal Plane Array*) permite analisar simultaneamente diversas amostras ambientais, gerando um conjunto de informações químicas e espaciais que podem ser interpretadas de maneira automatizada.⁶¹

Enquanto o FTIR é frequentemente utilizado para identificar grupos funcionais de moléculas, a espectrometria Raman fornece informações complementares, que podem ser utilizadas na identificação de estruturas principais.⁶² Algumas vibrações podem ser medidas pelos dois métodos, entretanto, com intensidades diferentes. Além permitir determinar a identidade química, ambos os métodos fornecem evidências do estágio de degradação dos MPs. No espectro FTIR, essa informação pode ser obtida através da intensidade da banda de carbonila (banda em torno de 1720 cm⁻¹), enquanto no Raman, o estágio de degradação pode ser inferido a partir de bandas relacionadas ao grau de cristalinidade.^{63,64}

De acordo com Araujo *et al.*,⁶⁵ o espalhamento Raman possui um sinal relativamente fraco, sendo um fator limitante na detecção de partículas muito pequenas. Outra desvantagem decorre da interferência de fluorescência em amostras de MPs, seja ela intrínseca à partícula ou de impurezas, como corantes, produtos de degradação e material biológico, que pode reduzir a faixa de detecção ao ofuscar o sinal Raman.⁶⁵ Por fim, quando acoplado à microscopia (µRaman), o espalhamento Raman pode ser utilizado para identificar partículas com tamanho de até 1 µm.⁶⁶

Outra abordagem frequentemente empregada para determinar a composição química de MPs é o uso de técnicas termo analíticas, incluindo a análise elementar de CHN (carbono, hidrogênio, nitrogênio) e a cromatografia gasosa de pirólise acoplada a espectrometria de massas (PyrGC-MS, em inglês *Pyrolysis-Gas Chromatography tandem Mass Spectrometry*).⁶⁷ Ressalta-se que a análise elementar de CHN deve ser empregada como técnica

complementar, uma vez que essa não é capaz de, por si só, auxiliar na identificação química do polímero.⁶⁸

Nos analisadores elementares, os MPs são submetidos a um processo de combustão e os gases gerados são analisados por meio de um detector de condutividade térmica (TCD, em inglês *Thermal Conductivity Detector*), que mensura a quantidade de hidrogênio, carbono e oxigênio de cada amostra.⁶⁹ Para a identificação, os percentuais de cada elemento da amostra são comparados com os percentuais elementares de polímeros virgens.⁷⁰ Por sua vez, na PyrGC-MS, o processo de degradação térmica dos MPs resulta em moléculas menores. Essas moléculas são separadas no GC e detectadas no MS, gerando um espectro dos produtos de degradação da amostra.⁷¹ Para a determinação do tipo de polímero, o espectro amostral pode ser comparado com espectros de referência da literatura.⁷²

A escolha da técnica analítica para a identificação de MPs, deve ser baseada em uma série de aspectos, como o limite de detecção das partículas (tamanho mínimo), a confiabilidade dos resultados, a demanda de tempo, os custos de análise, a preservação das amostras, e a matriz ambiental, por exemplo.³¹

5. Ocorrência de Microplásticos em Ambientes Aquáticos

A presença de MPs em ecossistemas aquáticos tem despertado preocupações da comunidade científica em escala mundial em razão dos potenciais impactos ambientais e à saúde humana. Inúmeras pesquisas tratam da ocorrência dessas partículas em distintos corpos hídricos (rios, lagos, mares, água subterrânea, estuários), possibilitando uma compreensão holística da extensão dessa problemática ambiental.⁷³⁻⁷⁷

A quantificação da abundância de MPs pode ser expressa por diversas unidades (mg m⁻³ ou itens m⁻³ ou itens L⁻¹ ou ou itens km²), possibilitando uma análise precisa da presença dessas partículas no ambiente aquático. Ademais, vale ressaltar que a pesquisa sobre ocorrência de MPs não se limita somente a análise da água, assim como pode incluir a análise de organismos aquáticos e sedimentos.^{76,78}

Os estudos da ocorrência de MPs demonstram diferentes níveis de contaminação, os quais são influenciados por fatores ambientais (como sazonalidade), geográficos (padrões de uso da terra) e antropogênicos (como densidade populacional, atividades industriais e agrícolas).⁷⁹⁻⁸¹ A diferença na distribuição espacial e na abundância evidencia a complexidade da contaminação por MPs em ambientes aquáticos e a ação das atividades humanas nesse fenômeno.⁸²

Mercy *et al.*⁸³ estudaram a abundância e as características dos MPs nos principais lagos urbanos de Dhaka, Bangladesh, revelando concentrações significativas em águas superficiais (36 itens L⁻¹), sedimentos (67 itens kg⁻¹) e peixes (17 itens indivíduo⁻¹). O tipo mais prevalente de MPs foi o filme, tanto na água quanto nos sedimentos, enquanto pellets e

espumas predominaram nas amostras de peixes. A análise por FTIR identificou polímeros dominantes, incluindo polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), etileno acetato de vinila (EVA), PVC, PC, acetato de celulose (AC) e PP. Os resultados indicam uma contaminação generalizada por MPs em todas as matrizes analisadas, levantando preocupações sobre os potenciais impactos na saúde humana.

A partir de uma caracterização em larga escala, Rico *et al.*⁸⁴ verificaram a ocorrência de MPs em 40 localidades fluviais na Amazônia brasileira. MPs foram detectados em todas as amostras, com concentrações variando de 5 a 74.550 itens m⁻³. A maioria (cerca de 90%) era composta por fibras de PS e fragmentos de PP e PE. Os potenciais riscos crônicos associados aos MPs foram avaliados considerando a polidispersidade e bioacessibilidade das partículas. Concluiu-se que há potenciais riscos ecológicos em pequenos rios e riachos próximos a áreas urbanas, destacando a relevância do monitoramento e da avaliação de riscos associados à presença de MPs no Rio Amazonas, Brasil.

Por sua vez, o estudo realizado por Ikenoue *et al.*⁸⁵ revelou que o recente aumento de MPs no Oceano Ártico, especificamente no Mar de Chukchi, pode intensificar o estresse ambiental no ecossistema marinho do Ártico ocidental, já impactado pela perda significativa de gelo marinho devido ao aquecimento global. Os resultados indicam que o Mar de Chukchi apresenta uma ocorrência média de 5.236 ± 6.127 itens km⁻². Os resultados fornecem *insights* sobre a distribuição e acumulação de microplásticos na região do Ártico ocidental.

Por fim, Cha *et al.*⁸⁶ realizaram um estudo das águas subterrâneas na Coreia onde verificaram a variação sazonal da ocorrência de MPs, com concentrações de 0,02 a 3,48 itens L⁻¹. Os principais polímeros encontrados foram PP, PE e PVC, predominantemente na forma de fragmentos. Os resultados revelaram que houve forte correlação positiva entre as concentrações de MPs e o uso de águas subterrâneas durante a estação chuvosa, indicando potenciais fontes sazonais de contaminação.

Nota-se também que a distribuição espacial dos MPs altera em conformidade com os diferentes usos da terra. Huang *et al.*⁸⁷ verificaram que em áreas comerciais, públicas, recreativas, residenciais e industriais a abundância de MPs era maior em comparação com áreas naturais. Isso indica que a presença de MPs tem forte correlação com as atividades humanas, em que as áreas mais impactadas apresentam maior abundância. A Tabela 1 exibe dados de algumas pesquisas que analisaram a presença de MPs em distintos sistemas aquáticos em diferentes regiões do mundo.

A heterogeneidade nos tipos, tamanho e formas das partículas evidencia a complexidade da contaminação por MPs em ambientes aquáticos. No entanto, é importante destacar que a adoção de diferentes faixas de tamanho dificulta a comparação entre os resultados e, sobretudo, reflete a necessidade da padronização das metodologias de

amostragem, processamento e quantificação de amostras ambientais de MPs.

Esses estudos não apenas evidenciam a importância constante da pesquisa, mas também, a urgência de medidas eficientes para atenuar a contaminação por MPs em ambientes aquáticos. Diante disso, investigações futuras devem dedicar-se ao entendimento dos impactos levando em consideração a distribuição temporal e espacial dos MPs, com a finalidade de entender os padrões de contaminação e propor soluções eficientes para combater a poluição por plásticos em todas as suas formas.

6. Riscos dos Microplásticos para a Biota Aquática

Devido ao seu tamanho reduzido, os MPs encontram-se disponíveis para uma diversidade de organismos,⁹⁷ podendo ser ingeridos de forma intencional, quando confundidos com alimentos, ou acidental, quando presentes no interior de presas.⁹⁸ Os MPs podem também ser acidentalmente absorvidos através de guelras e brânquias.⁹⁹ Quanto menores e mais coloridas, maiores são as chances dessas partículas serem ingeridas.¹⁰⁰

Os MPs interagem e podem ser ingeridos por espécies aquáticas de todos os níveis tróficos,¹⁰¹ entretanto, devido a fatores como diferenças de habitats, de tamanhos e capacidades regulatórias, a magnitude dos impactos não é a mesma para todos os organismos.¹⁰² Quando ingeridos, eles podem ocasionar obstrução do trato gastrointestinal, lesões internas e redução da ingestão de alimentos, o que, conseqüentemente, afeta o ganho energético e outras funções fisiológicas.²³ Pesquisas recentes mostraram que, em alguns organismos, como invertebrados aquáticos e peixes, MPs de tamanho inferior a 10 µm são capazes de translocar do trato intestinal para o sistema circulatório ou para tecidos circundantes.^{103,104}

A exposição de organismos aos MPs pode gerar efeitos ecotoxicológicos, como inibição de crescimento, redução de atividade fotossintética em produtores primários, efeitos neurotóxicos e reprodutivos, alterações no sistema antioxidante, estresse oxidativo, entre outros.¹⁰⁵⁻¹⁰⁷ Por exemplo, em estudos realizados por Lagarde *et al.*¹⁰⁸ e por Mao *et al.*,¹⁰⁹ foi observado que a exposição de microalgas de água doce a concentrações de MPs ambientalmente relevantes, é capaz de causar danos físicos, estresse oxidativo nas células, e afetar a expressão de genes envolvidos em algumas vias metabólicas.

De acordo com Klein *et al.*¹¹⁰ os MPs podem servir como substrato para microrganismos, incluindo bactérias, cianobactérias, fungos, algas, entre outros. Assim, por serem capazes de percorrer longas distâncias, eles podem contribuir com a transferência geográfica de organismos, inclusive de espécies invasoras e de patógenos.¹¹¹

Os MPs representam potenciais fontes de monômeros residuais da fabricação dos polímeros e de aditivos químicos

Tabela 1. Principais estudos em diferentes regiões do mundo sobre a ocorrência de MPs em ambientes aquáticos

Área de Estudo	Sistema Aquático	Abundância Média	Tamanho	Forma	Principais Polímeros	Ref.
Rio Vaal, África do Sul	Rio	463,28 ± 284,08 itens kg ⁻¹	≤ 5 mm (31,75%) 0,5-1 mm (23,84%) 1-2 mm (26,56%) 2-5 mm (17,85%)	Fragmentos (63%) Fibras (35%) Pellets (2%)	PE, PP, PEVA, PES, PU e PEH	88
Rio Jhelum, Himalaia, Índia	Rio	1.474 ± 1.026 itens m ⁻³	75 µm-300 µm (34%) 300 µm-5 mm (66%)	Flocos/Filmes (91,2%) Filamentos (5,7%) Fragmentos (2,1%) microbeads (1%)	PE, PVC e PP	89
Flandres, Bélgica	Rio	0,48 ± 0,94 itens L ⁻¹	25 – 5000 µm	n.d.	PP (49%) PS (49%) PVC (2%)	90
Estuário subtropical de Meghna, Bangladesh	Estuário	128,89 ± 67,94 itens m ⁻³	0,3 – 5 mm	Fibras (87%) Fragmentos (6%) Espuma (4%) Filmes (3%)	PP, PVC, PET, e PS	91
Lago Veeranam, Tamil Nadu, Índia	Lago	28 itens km ⁻²	10 – 1.500 µm	Fibras, Fragmentos, Espumas e Pellets	Náilon (39%) PE (23%) PS (19%) PP (15%) PVC (4%)	92
Mar Amarelo, China	Mar	0,63 ± 0,57 itens m ⁻³	<0,5 mm (48%) 1 – 2 mm (36%) >2 mm (16%)	Espuma, Linha e Fragmentos	PP (38%) PE (22%) PET (22%) outros (18%)	93
Estreito de Taiwan	Mar	84 a 389 itens m ⁻³	44 µm-5000 µm	Fragmentos (72%), Fibras (14%), Filmes (13%) e Espuma (1%)	Rayon (44%) PET (37%) Náilon (6%) PP (6%) PE (4%) outros (3%)	94
Ilha Dawanshan, Mar da China Meridional	Águas subterrâneas	47,5 itens L ⁻¹	< 2 mm (80%)	Fibras (96,7%) e Filmes (3,3%)	PES (80%) outros (20%)	95
Bacchus Marsh, Victoria, Austrália	Águas subterrâneas	38 ± 8 itens L ⁻¹	18-491 µm	Fragmentos e Fibras	PE, PP, PS e PVC	96

PE: Polietileno, PP: Polipropileno, PEVA: Polietileno co-acetato de vinila, PES: Poliéster, PU: Espuma de poliuretano, PEH: Polietileno/hexeno-1-copolímero, PVC: Cloreto de Polivinila, PS: Poliestireno, PET: Tereftalato de polietileno. n.d. : não descrito

tóxicos (como bisfenol A - BPA, ftalatos, plastificantes e retardantes de chama) para o meio ambiente.¹¹² Além disso, devido a sua superfície hidrofóbica e grande área superficial específica, eles são capazes de adsorver/absorver metais e poluentes orgânicos e atuar como possíveis vetores desses contaminantes para a biota.¹¹³ Quando inseridos no interior de organismos, os MPs podem liberar esses poluentes por meio da ação de fluidos gástricos,¹¹⁴ todavia, ainda restam dúvidas se a biodisponibilidade dessas substâncias é afetada significativamente.¹¹⁵

A sorção está relacionada com a transferência de espécies químicas presentes em uma fase fluída (ar, água) para uma fase sólida, por meio de dois processos diferentes (que podem ocorrer simultaneamente): a absorção e a adsorção.¹¹⁶ Na absorção, os compostos penetram e se incorporam na matriz do sorvente, por meio de interações relativamente fracas como as forças de van der Waals.¹¹⁷ Na adsorção, os compostos permanecem na interface

entre o sorvente e o fluído, sendo esse processo governado por diferentes interações como ligações iônicas, ligações covalentes, forças de van der Waals e efeitos estéricos.¹¹⁸

Conforme pode ser observado na Figura 5, o comportamento de sorção entre os MPs e outros poluentes químicos é influenciado por uma série de fatores, que incluem as propriedades dos MPs, fatores ambientais e as propriedades químicas dos poluentes.¹¹⁹ Por exemplo, a matéria orgânica dissolvida (MOD) no meio aquoso pode interferir na sorção de poluentes químicos por MPs, uma vez que compete por meio de interações hidrofóbicas com essas partículas.¹²⁰ Ao comparar o comportamento de sorção entre MPs virgens e envelhecidos, Li *et al.* (2019)¹²¹ verificaram que as partículas mais envelhecidas possuem maior capacidade de adsorção de contaminantes orgânicos.

Na literatura, os poluentes orgânicos encontrados com maior frequência associados à MPs são: pesticidas

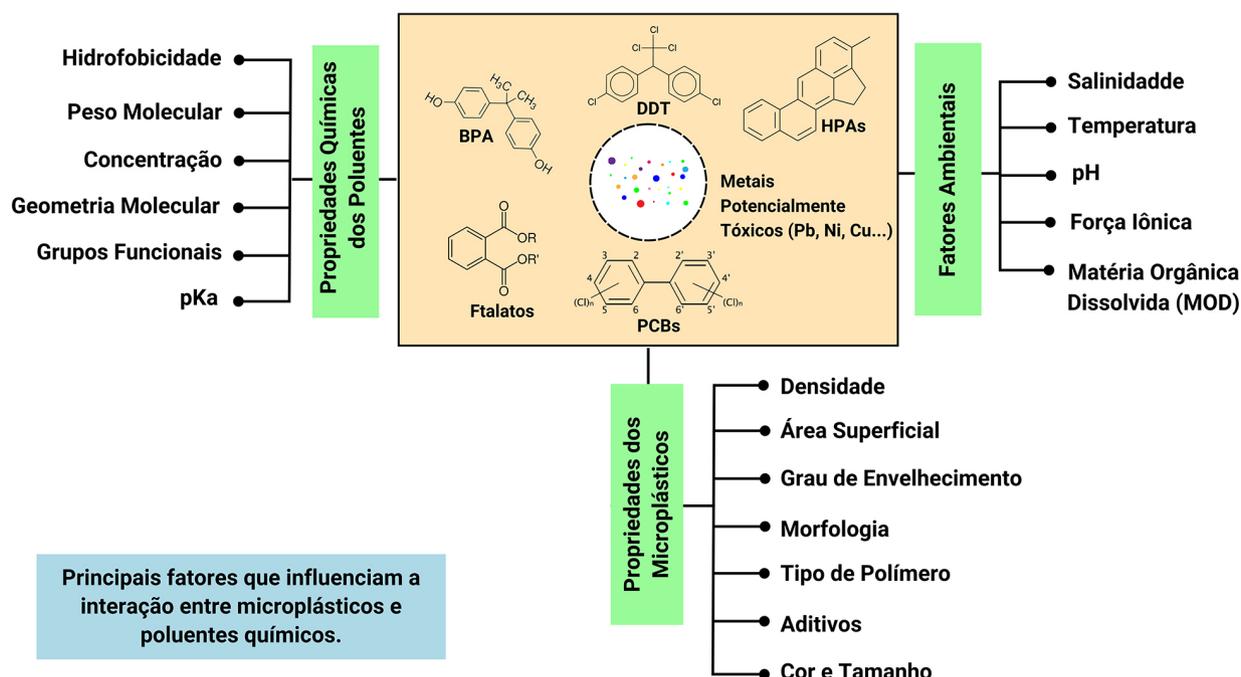


Figura 5. Síntese dos principais fatores que influenciam a interação entre microplásticos e poluentes químicos no ambiente aquático

organoclorados, hexaclorociclohexanos (HCHs) bifenilas policloradas (PCBs, em inglês *Polychlorinated Biphenyls*), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs, em inglês *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*), compostos perfluorados, éteres difenílicos polibromatos (em inglês, *Polybrominated Diphenyl Ethers* -PBDEs), entre outros.^{122,123} Sozinhos, esses contaminantes são capazes de oferecer riscos a biota mesmo em baixas concentrações,¹²⁴ contudo, ainda carecem de estudos para compreender os potenciais efeitos da associação entre MPs-poluentes orgânicos e os seus mecanismos de interação biológica.¹⁰¹

7. Metodologias Analíticas para a Análise de Poluentes Orgânicos em Microplásticos

Tendo em vista a complexidade e heterogeneidade das amostras ambientais de MPs (tamanhos, morfologia, cor e composição), ainda não há na literatura uma metodologia padronizada para a análise de poluentes orgânicos adsorvidos à essas partículas.¹²⁵ Em geral, as metodologias existentes envolvem etapas de preparação, extração, *clean up*, separação e detecção.¹²⁶

A escolha dos métodos analíticos depende, principalmente, das propriedades físico-químicas do poluente a ser analisado (volatilidade, polaridade e solubilidade, por exemplo) e da composição da amostra, contudo, pode levar em consideração outros aspectos como disponibilidade e sensibilidade do equipamento, recuperação analítica, demanda de solvente, custos e tempo de análise.¹²⁷ Outro fator importante para a escolha dos métodos é a quantidade de amostra.¹²⁸ Devido a leveza dos polímeros plásticos, é difícil amostrar grande quantidade

em massa de MPs (mesmo em locais com alta concentração dessas partículas), por esse motivo, a quantidade de amostra frequentemente considerada para as análises é baixa, entre 0,5 a 4 g.¹²⁵

A maioria dos estudos existentes na literatura envolvem os seguintes métodos de extração: Soxhlet, extração assistida por ultrassom (UAE, do inglês *Ultrasound-Assisted Extraction*), e extração acelerada por solvente (ASE, em inglês *Accelerated Solvent Extraction*).¹²⁶ Apesar da alta demanda de tempo e de solventes, o Soxhlet têm sido o principal método aplicado na extração de poluentes orgânicos de MPs, provavelmente pelo fato de apresentar boas taxas de recuperação (entre 70 a 120%) e por já ser bastante consolidado.¹²⁹

A UAE apresenta vantagens quando comparada com o Soxhlet, visto que reduz consideravelmente o tempo de extração e o volume de solventes utilizados.¹³⁰ Essa técnica emprega radiação ultrassônica com ondas de frequência > 20 kHz para aumentar a transferência de massa dos analitos entre a amostra e o solvente,¹³¹ proporcionando assim, recuperações entre 50 e 127% em estudos com MPs.^{132,133}

Com redução ainda maior de tempo, a ASE é um método mais recente, que foi desenvolvido para a extração de compostos orgânicos em matrizes sólidas e semissólidas.¹³⁴ Em síntese, a ASE aprimora a solubilidade do solvente extrator pelo aumento simultâneo da temperatura e da pressão, permitindo maior penetração na matriz da amostra e, conseqüentemente, maior rapidez e eficiência de extração.¹³⁵ Por exemplo, Antunes *et al.*¹³⁶ utilizaram ASE na análise de PAHs, PCBs e DDT em MPs encontrados em praias portuguesas, no entanto, assim como em outros estudos utilizando essa mesma técnica,^{137,138} não foram reportados as recuperações e o volume de solventes.

Após a etapa de extração, é comum o uso de métodos de *clean up* para a remoção de impurezas e redução de eventuais interferentes da matriz.¹²⁵ O principal método de *clean up* utilizado é o fracionamento de coluna contendo diferentes fases estacionárias, como sílica, florisil®, alumina e a mistura desses adsorventes.¹³⁹⁻¹⁴²

As técnicas de detecção de poluentes orgânicos em MPs podem ser classificadas em diretas e indiretas. Em geral, as técnicas diretas não são destrutivas e não exigem etapas de limpeza e extração, contudo, possuem como desvantagem, menores sensibilidades.¹²⁷ Alguns exemplos de técnicas diretas utilizadas na análise de compostos orgânicos incluem espectroscopia no infravermelho, espectrometria Raman e espectrometria de massa (MS, do inglês *Mass Spectrometry*).¹⁴³

A cromatografia líquida (LC, do inglês *Liquid Chromatography*) e, principalmente, a cromatografia gasosa (GC, do inglês *Gas Chromatography*) são as técnicas indiretas mais frequentemente utilizadas em análises de poluentes associados a MPs, visto que permitem a separação simultânea de espécies químicas em um curto período de tempo.¹²⁷ Para a análise de poluentes orgânicos voláteis e semivoláteis, a cromatografia gasosa (GC, do inglês *Gas Chromatography*) acoplada a diferentes detectores é a técnica mais indicada.¹²⁶

Especificamente para a etapa de detecção, a espectrometria de massas (MS, do inglês *Mass Spectrometry*) têm sido a técnica mais escolhida.¹⁴⁴⁻¹⁴⁶ Embora detectores de captura de elétrons (ECD, do inglês *Electron Capture Detector*) possuam menor seletividade quando comparados aos MS, eles também têm sido frequentemente utilizados na análise de compostos halogenados associados a MPs.^{147,148}

8. Como Resolver a Poluição por Microplásticos

No ambiente, os MPs já se encontram muito dispersos, o que eleva os custos de tratamento e dificulta a sua remoção por meio das tecnologias existentes.¹⁴⁹ Diante disso, é interessante que os esforços sejam concentrados, principalmente, no controle das fontes de geração dessas partículas.¹⁵⁰

A maioria dos MPs é gerada em decorrência da má gestão de resíduos plásticos maiores, que, quando expostos às intempéries, se fragmentam sucessivamente em partículas diminutas.¹⁵¹ Com a separação e a coleta adequada desses resíduos, a geração de MPs pode ser reduzida.¹⁵² Tais medidas necessitam da conscientização da sociedade e de esforços coletivos entre órgãos públicos, empresas e agências reguladoras.¹⁵³

A mídia de massa e as mídias sociais desempenham importante papel para a formação da opinião pública e para a mobilização social em determinado assunto, através da opinião de jornalistas, de influenciadores digitais, ou por meio de jogos, filmes, comerciais, propagandas, e

etc. Assim, é crucial que tópicos acerca de conservação ambiental sejam abordados com maior frequência e que informações científicas de fontes confiáveis sejam passadas em linguagem mais acessível para o público.¹⁵⁴

Campanhas e ações de educação ambiental regulares são imprescindíveis para conscientizar e aumentar a percepção da sociedade sobre a responsabilidade individual no combate à poluição plástica.¹⁵⁵ As intervenções educativas devem ser realizadas em escolas, em universidades e em espaços não formais de educação para alcançar públicos diversos. Por exemplo, ações de despoluição de corpos d'água, de praias e de outras áreas degradadas por plásticos, permitem a participação ativa da comunidade e são capazes de gerar grandes mudanças de hábitos.¹⁵⁵

A opinião pública é um importante motor para impulsionar a adoção de práticas mais sustentáveis por parte das empresas. Possui ainda, influência para exigir e eleger políticos com maior responsabilidade ambiental, que atuem na elaboração de leis, políticas públicas e regulamentos voltados à redução da geração de resíduos plásticos e MPs.¹⁵⁶ Um exemplo disso foi a criação da “Estratégia Europeia para o Plástico numa Economia Circular”, em 2018, que tem por finalidade reduzir o consumo de plásticos, aumentar a possibilidade de reciclagem, a reutilização e a durabilidade de embalagens plásticas.¹⁵⁷

A reciclagem de materiais plásticos é apontada como um dos meios mais sustentáveis para a redução de plásticos e MPs no ambiente,¹⁵⁸ contudo, trata-se de um processo complexo e depende de diversos aspectos para que seja viável técnica e economicamente, como estruturas adequadas de coleta e triagem, tributação e incentivos para as partes envolvidas.¹⁵⁹ Na reciclagem, os resíduos plásticos são recuperados e reprocessados, gerando um novo produto. Existem quatro tipos de reciclagem: I) Reciclagem interna ou reextrusão; II) Reciclagem mecânica; III) Reciclagem química; e IV) Recuperação energética.¹⁶⁰

A reciclagem interna consiste na reincorporação de resíduos plásticos pós-industriais (aparas, componentes de precipitação, entre outros) nos processos de produção.¹⁵⁹ A reciclagem mecânica, por sua vez, envolve a transformação de plásticos pós-consumo em pequenos grânulos que podem ser empregados na confecção de novos materiais. Embora seja o método mais comum, os produtos obtidos a partir da reciclagem mecânica acabam tendo qualidade inferior aos polímeros virgens, devido à misturas de materiais e aditivos químicos.¹⁶¹ Na reciclagem química, os resíduos plásticos são transformados em insumos petroquímicos básicos (oligômeros e monômeros), permitindo assim, a produção de novos polímeros ou de combustíveis alternativos.¹⁶² Por fim, na recuperação energética os resíduos plásticos são incinerados, gerando energia térmica e elétrica.¹⁶³

Para incentivar a reciclagem e gerar mudança de hábitos sociais, alguns países têm tomado iniciativas inovadoras.¹⁶¹ Em algumas regiões da Romênia, por exemplo, os habitantes podem trocar materiais recicláveis por passagens de ônibus.¹⁶⁴ No Brasil, diversas Startups atuam na logística

reversa de materiais plásticos por meio de incentivos aos participantes, oferecendo descontos nos valores de passagens de ônibus, pontos para a obtenção de alimentos, redução no valor da conta de energia elétrica e até mesmo, dinheiro em conta.^{162,163}

Uma alternativa ecológica e ainda pouco explorada para a reciclagem de polímeros plásticos é a despolimerização biocatalítica.¹⁶⁵ Recentemente, diversas comunidades de microrganismos vêm sendo exploradas quanto ao seu potencial para a degradação de plásticos.¹⁶⁶ Em 2016, pesquisadores do Japão descobriram uma nova espécie de bactéria, *Ideonella sakaiensis*, capaz de degradar o PET e utilizá-lo como principal fonte de carbono e energia.¹⁶⁷ A engenharia de proteínas têm sido empregada para otimizar e modificar a atividade catalítica de enzimas naturalmente degradantes de plástico, permitindo que diferentes polímeros sintéticos possam ser degradados em pouco tempo. Já existem progressos significativos, mais esforços e pesquisas são necessários para viabilizar a aplicação da técnica em escala industrial.¹⁶⁸

Ainda que a reciclagem seja fundamental para reduzir o cenário da poluição plástica, deve-se priorizar a redução, a reutilização de itens plásticos e a substituição de plásticos de uso único por alternativas mais sustentáveis.¹⁶⁹ Alguns materiais alternativos incluem: bambu, fibra de coco, papel, vidro, metal e polímeros biodegradáveis.¹⁷⁰

A sustentabilidade corporativa é outra iniciativa capaz de contribuir para a redução do uso de plásticos e, conseqüentemente, para a redução de MPs no ambiente.¹⁷¹ Nas empresas, a sustentabilidade pode ser alcançada através da adoção de processos mais eficientes, pelo uso de matérias-primas de fonte renovável, adoção de embalagens biodegradáveis e mais duráveis, além de incentivos para que os consumidores participem e colaborem com os princípios de economia circular.¹⁷² Nesse sentido, é importante que fabricantes de produtos plásticos, em particular, padronizem seus produtos, reduzam a aditivação e as misturas de polímeros em um mesmo item e desenvolvam rótulos adequados para facilitar a separação e a reciclagem.

A substituição de plásticos convencionais por plásticos biodegradáveis é uma estratégia que vem ganhando bastante destaque nos últimos anos. Como vantagens, os polímeros biodegradáveis possuem menor persistência ambiental e podem ser sintetizados a partir de fontes renováveis de origem natural ou sintética, como amido, lignina, polissacarídeos e celulose, por exemplo.¹⁷³ Contudo, apresentam custos mais elevados de produção e nem todas as opções existentes possuem propriedades mecânicas e funcionais semelhantes aos plásticos de origem fóssil, fazendo com que sejam menos atraentes para as empresas e para o consumidor.¹⁷⁴ Para reduzir os custos de produção, algumas pesquisas têm investigado o uso de resíduos da agroindústria, de resíduos domésticos, e até mesmo de esgoto como fontes de matéria-prima alternativa.¹⁷⁵

O potencial de degradação de MPs presentes em ambientes aquáticos vêm sendo explorado por meio

de processos oxidativos avançados (POAs), como fotodegradação direta, oxidação fotocatalítica e oxidação eletroquímica.¹⁷⁶ Embora os estudos nessa área ainda sejam escassos,¹⁷⁷⁻¹⁷⁹ resultados razoáveis já foram obtidos, indicando um caminho a ser melhor explorado para o controle da poluição por MPs.¹⁸⁰

As ETARs constituem uma fonte importante de MPs para o ambiente aquático, visto que as tecnologias convencionais não são eficientes em sua remoção. Segundo Priya *et al.*,¹⁸¹ é necessário explorar novas ferramentas para o tratamento de águas residuárias, como biorreatores de membrana com microfiltração, eletrodeposição e osmose reversa, buscando um melhor custo benefício. Além disso, é importante investigar maneiras de eliminar os MPs, pois transferí-los para o lodo permitirá que eles retornem ao ambiente por duas vias: i) se o lodo for aplicado no solo, e II) se o lodo for depositado em aterros sanitários ou lixões.¹⁸²

Yu e Hu sugerem o aprendizado de máquina com base em *big data* para acelerar o reconhecimento e o controle da poluição por MPs.¹⁸³ Por meio de dados de abundância, fatores climáticos e geográficos como velocidade do vento, precipitação, correntes marinhas e cobertura do solo, o aprendizado de máquina poderá ser capaz de mapear a distribuição e o transporte global dessas partículas, fornecendo informações relevantes em grande escala para o controle de MPs e suas fontes.¹⁸⁴ No entanto, para que previsões precisas e realistas sejam obtidas, é necessário que haja a padronização de protocolos de análise e melhor distribuição de dados sobre a abundância de MPs em todas as regiões do globo.¹⁸³

A poluição por MPs é altamente complexa e atinge proporções globais. Para controlar esse problema, é necessária a adoção de diferentes ferramentas e a atuação simultânea de agentes em escala local, regional e internacional.¹⁵⁷ Além disso, é importante que sejam estabelecidas políticas públicas visando o controle de todo o ciclo de vida do plástico, de maneira que a gestão seja eficiente na redução da geração de resíduos, e, conseqüentemente, na geração de MPs.

9. Legislação Atual Voltada para o Combate da Poluição por Plásticos

Em resposta à crescente preocupação do público causada pelos impactos do lixo plástico nos últimos anos, têm sido propostas uma série de políticas, resoluções e tratados que visam prevenir a poluição plástica a nível local, regional, nacional, e global,¹⁸⁵ a partir do uso de diferentes instrumentos e ferramentas.

Um levantamento feito em 2021 por Diana *et al.*¹⁸⁵ compilou 291 políticas públicas voltadas para a poluição plástica, considerando nível nacional, subnacional e internacional. O estudo revelou um aumento significativo do número total de políticas adotadas anualmente, passando de 2 em 2000 para 32 em 2018. Ao avaliar o conteúdo das

políticas, os instrumentos identificados foram divididos em quatro principais categorias:

- 1) Instrumentos regulatórios afirmativos - relacionados a práticas, processos ou produtos novos ou aprimorados, acordos ou programas de ação, uso de tecnologias e intervenções para captura pós vazamento, além de práticas de gestão de resíduos focadas na minimização do vazamento de plástico.
- 2) Instrumentos regulatórios proibitivos – relacionados ao banimento total ou parcial de algum tipo específico de plástico, à proibição de práticas inadequadas de gestão de resíduo, e a limitações em quantidades de itens plásticos permitidos.
- 3) Instrumentos econômicos – relacionados ao desincentivo ao consumidor através de taxas e impostos, a troca de resíduos plásticos por dinheiro, a subvenção para ajudar uma empresa considerada vantajosa ao público, e a redução de impostos frente a ações responsáveis no uso do plástico.
- 4) Instrumentos de Informação – relacionados ao ensino, divulgação e conscientização do público sobre a problemática do plástico, visando mudar o comportamento do consumidor, ou ações de pesquisa e coleta de dados para gestão ou disseminação de informações relacionadas ao plástico.

A partir do inventário, foi possível identificar que os principais instrumentos aplicados para controlar a poluição

plástica adotados em políticas nacionais e internacionais foram do tipo regulatório, seguido por instrumentos informativos e econômicos.¹⁸⁶ Tal análise é muito útil, pois pode revelar padrões e tendências das respostas governamentais frente a problemática dos plásticos, e ainda permite identificar lacunas que precisam de maior atenção.

Alguns países vêm tomando medidas pontuais para a redução do uso de plásticos, principalmente no que diz respeito ao uso de partículas produzidas intencionalmente em escala microscópica.¹⁸⁷ Por exemplo, os Estados Unidos, a França e o Reino Unido, proibiram que MPs do tipo *microbeads* sejam aplicados em produtos de higiene pessoal, optando por substitutos alternativos e economicamente viáveis.¹⁸⁸ Outras exemplos de políticas públicas em escala nacional incluem a redução do uso de sacolas plásticas,¹⁸⁹ o incentivo ao uso de sacolas reutilizáveis e à diminuição no consumo de garrafas plásticas, e a proibição do uso de canudinhos em estabelecimentos comerciais.^{190,191}

Considerando que a abrangência do ciclo de vida e da poluição plástica ultrapassa as fronteiras de jurisdições nacionais, uma solução para a poluição carece de cooperação internacional para que seja mais eficaz.¹⁹² A nível global, existem alguns esforços políticos importantes para a prevenção, para a redução da geração e dos impactos dos resíduos plásticos.¹⁸⁵ Os principais instrumentos internacionais de combate à poluição plástica existentes estão listados na Tabela 2.

Tabela 2. Principais instrumentos internacionais em vigor envolvidos no combate à poluição plástica

Instrumento	Ano de Criação	Atuação Geral	Contribuição para a Redução da Poluição Plástica	Ref.
Convenção de Londres e seu Protocolo	1972 (Convenção); 1996 (Protocolo)	Prevenção da poluição marinha por despejo de resíduos e outros materiais.	Proibição do despejo de plásticos no Ambiente marinho.	193
Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL)	1973	Prevenção da poluição por navios no oceano.	Anexo V – Prevenir a poluição por lixo e proibir descargas de plástico no oceano.	194
Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM)	1982	Estabelece princípios gerais da exploração dos recursos naturais do mar.	Reduzir poluição marinha de fontes terrestres e oceânicas. Artigos 194 e 207 abordam plásticos.	195
Convenção de Basileia	1989	Controle de Movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e sua eliminação.	Gestão ambientalmente saudável de resíduos plásticos, de acordo com classificações de periculosidade.	196
Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUAC)	1992	Estabilização da concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera.	Reduzir emissões de carbono na indústria de produção de plástico.	197
Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB)	1992	Proteção e uso da diversidade biológica em cada país signatário.	Permite introduzir disposições adequadas, notificações, troca de informações e consultas para reduzir os impactos. adversos do plástico na biodiversidade.	198
Convenção de Rotterdam	1998	Procedimento de prévia informação e consentimento para determinados produtos químicos e pesticidas perigosos no comércio internacional.	Relaciona a produção de plásticos contendo produtos químicos perigosos e atua no procedimento de consentimento prévio informado.	192
Convenção de Estocolmo	2001	Eliminar a produção e o uso de algumas substâncias tóxicas produzidas pelo homem.	Regulamenta resíduos plásticos feitos com pops ou contaminados por eles.	199

Embora os instrumentos listados na Tabela 2 apresentem contribuições relevantes para o controle da poluição plástica, o foco principal não é esse.²⁰⁰ Adicionalmente, é possível observar uma lacuna no que se refere à poluição plástica proveniente de fontes terrestres, visto que os instrumentos existentes estão majoritariamente focados em combater a poluição plástica proveniente de fontes marinhas.¹⁹²

De forma geral, o atual quadro jurídico internacional não rege adequadamente todos os processos transfronteiriços envolvidos no ciclo de vida dos produtos plásticos.¹⁹⁹ Diante disso, durante a reunião da Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEA) do programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) que ocorreu no dia 28 de fevereiro a 2 de março de 2022, chefes de estado de 175 países aprovaram uma resolução (5/14 do PNUMA) voltada para a criação de um processo legislativo internacional focado em combater a poluição plástica global.¹⁹²

Essa resolução reconheceu a poluição plástica como um grave problema ambiental de proporções globais, e, a partir dela, foi formado um comitê de negociação internacional (INC, em inglês *International Negotiating Committee*). O seu principal objetivo é desenvolver um instrumento juridicamente vinculativo, destinado a criar um quadro regulamentar para reduzir e prevenir a poluição plástica até o final de 2024. A resolução 5/14 do PNUMA estabelece um conjunto de disposições fundamentais para o futuro instrumento, abrangendo metas, alternativas de produção sustentável e consumo de plásticos, gestão de resíduos, planos de ação e de gestão nacionais, relatórios e monitoramento. Além disso, ela reconhece o papel desse instrumento na colaboração entre convenções e organizações regionais e internacionais.²⁰¹

O novo instrumento será guiado pelos princípios da responsabilidade alargada do produtor (EPR, em inglês *Extended Producer Responsibility*) e das responsabilidades comuns mas diferenciadas (CBDR, em inglês *Common but Differentiated responsibilities*). Nele, a poluição plástica será abordada como uma parte integrada de todas as categorias de poluição, incluindo a poluição do solo, do ar e do ambiente marinho e das águas interiores.²⁰¹ Apesar dos muitos desafios relacionados à poluição plástica, a criação deste instrumento representa um avanço histórico, visto que ele buscará abranger todas as classes de poluentes plásticos, incluindo NPs, MPs, meso e macropolásticos. Isso será alcançado por meio da adoção de uma abordagem de ciclo de vida completo dos plásticos, reconhecendo a sua característica transfronteiriça e os seus múltiplos impactos no ambiente e nas atividades humanas.²⁰²

10. Lacunas e Perspectivas Futuras em Estudos com Microplásticos

Apesar do grande número de trabalhos acerca de MPs que podem ser encontrados na literatura,¹⁵² ainda existem

muitas lacunas de estudos nessa área. Nesse tópico será apresentada uma breve análise das tendências e direções futuras sobre os estudos de MPs em ambientes aquáticos.

De acordo com Ali *et al.*,²⁰³ as metodologias empregadas de amostragem, identificação e quantificação não são padronizadas, dificultando a comparação entre os resultados. Diante disso, a padronização de metodologias é um dos pontos principais nos estudos de MPs e poderá permitir um melhor entendimento do cenário de contaminação por MPs em todas as matrizes ambientais. Ainda, programas de monitoramento em escala global são necessários para obter informações abrangentes da distribuição de MPs em todas as regiões do planeta.

A maioria dos estudos acerca do comportamento e dos potenciais efeitos de MPs foi realizada no ambiente marinho, assim, carecem de muitas informações sobre a dinâmica e implicações da exposição desses contaminantes para os organismos de todos os níveis tróficos em diferentes ambientes de água doce, como rios, lagos, água subterrânea, entre outros.²⁰⁴

Os efeitos e a ocorrência de MPs em organismos aquáticos foram avaliados em apenas algumas classes de organismos, principalmente, em peixes e mexilhões. Bai *et al.*²⁰⁵ pontuam a necessidade de investigar os efeitos de MPs em organismos aquáticos de todos os níveis da cadeia alimentar, além de determinar a capacidade e os mecanismos de transporte através de interações tróficas.

Outro tópico relevante e ainda em debate, é o potencial de MPs atuarem como vetores de contaminantes orgânicos e metais para a biota.²⁰⁶ Nesse sentido, estudos futuros devem avaliar se os poluentes adsorvidos em MPs são desorvidos no interior de organismos, se a concentração desorvida é significativa e os potenciais efeitos adversos em organismos de níveis tróficos distintos.

A relação entre as propriedades físico-químicas das diferentes categorias de MPs e os seus efeitos toxicológicos ainda precisa ser melhor explorada, buscando avaliar os efeitos do tamanho, dos tipos morfológicos, da porosidade, da composição química e do grau de cristalinidade desses contaminantes sobre os organismos.²⁰⁷ Por fim, é importante identificar e caracterizar as fontes, os mecanismos físicos e biológicos de transporte, e os destinos finais de MPs em corpos d'água,²⁰⁸ visando estabelecer melhores ferramentas de controle, monitoramento e mitigação dos impactos.

11. Considerações Finais

Os MPs são contaminantes de preocupação emergente, gerados a partir do uso excessivo e da má gestão de produtos plásticos maiores. Em ambientes aquáticos, as concentrações são muito variáveis, podendo ser influenciada por fatores ambientais, geográficos e antropogênicos.

Após a coleta, a análise de MPs envolve uma série de etapas. Nesta revisão, foram descritos os principais métodos envolvidos no processamento das amostras de MPs, que

podem ser físicos (Peneiramento, filtração e separação por densidade) ou químicos (digestão do material biótico). Apesar da existência de guias de coleta e de processamento de amostras, como o guia proposto pelo NOAA, os estudos com MPs ainda não são padronizados, dificultando a consistência e a comparação entre os resultados.

A identificação química das partículas de MPs é uma etapa fundamental nos estudos ambientais. Ela pode ser feita por meio de diferentes métodos analíticos, tais como análise visual, microscopia, espectroscopia, além de métodos termo analíticos. Na literatura, os métodos mais utilizados para a caracterização química dos MPs são os de espectroscopia vibracional, como FTIR e Raman, devido à confiabilidade dos resultados gerados e à possibilidade de inferir o estágio de degradação das partículas.

A gestão da poluição por MPs é complexa devido à diversos aspectos, incluindo a existência de uma ampla gama de polímeros plásticos e a interação diferencial com outros poluentes. Além disso, os MPs apresentam diversidade de fontes de poluição, oferecem múltiplos impactos à biota, são amplamente distribuídos em todos os ecossistemas e possuem difícil remoção. Diante disso, foram levantados os principais métodos e abordagens voltados para solucionar a poluição por MPs, que envolvem ações de conscientização, de sustentabilidade corporativa, reciclagem, uso de plásticos biodegradáveis e despolimerização biocatalítica, por exemplo. Neste contexto, destaca-se ainda atuação governamental na formulação de políticas públicas e em ações de monitoramento.

O quadro internacional de políticas públicas em vigor para o combate da poluição plástica é ainda muito limitado, pois além de não abordar a contaminação por plásticos em todas as suas formas (nanoplásticos, MPs, meso e macroplásticos), foca majoritariamente na poluição plástica em ambientes marinhos, sem considerar os outros ecossistemas. Outra deficiência é o fato de que os atuais instrumentos não consideram a natureza transfronteiriça da poluição por plásticos, o que, conseqüentemente, evidencia a necessidade de cooperação internacional. Diante disso, em 2022 foi aprovada a resolução 5/14 do PNUMA, com o objetivo de criar um instrumento destinado ao combate da poluição plástica global. O novo instrumento está previsto para o final de 2024, e, além de atender às limitações dos instrumentos existentes, considera uma abordagem de ciclo de vida completa dos plásticos para solucionar o problema da poluição.

Tendo em vista as implicações dos MPs para o equilíbrio dos ecossistemas, é urgente que essa classe de contaminantes seja regulamentada e que sejam desenvolvidas metodologias eficientes de controle e de remoção. A combinação de estratégias que promovam a redução, a reutilização e a reciclagem de materiais plásticos, bem como a atuação de políticas públicas de abrangência em todos os níveis, pode auxiliar na redução da contaminação por MPs nos ambientes aquáticos, e assim, promover a preservação desses ecossistemas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) – Brasil, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade de São Paulo por todo apoio acadêmico e financeiro.

Referências Bibliográficas

- Costa, M. M. E. da; Gouveia Filho, M. D.; Deus, E. P. de; *70º Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, Brasil, 2015. [\[Crossref\]](#)
- Andrady, A. L.; Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* **2011**, *62*, 1596. [\[Crossref\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L.; Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* **2017**, *3*, e1700782 [\[Crossref\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Kasavan, S.; Yusoff, S.; Rahmat Fakri, M. F.; Siron, R.; Plastic pollution in water ecosystems: a bibliometric analysis from 2000 to 2020. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *313*, 127946. [\[Crossref\]](#)
- Qin, F.; Du, J.; Gao, J.; Liu, G.; Song, Y.; Yang, A.; Wang, H.; Ding, Y.; Wang, Q.; Bibliometric profile of global microplastics research from 2004 to 2019. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2020**, *17*, 5639. [\[Crossref\]](#)
- Cable, R. N.; Beletsky, D.; Beletsky, R.; Wigginton, K.; Locke, B. W.; Duhaime, M. B.; Distribution and Modeled transport of plastic pollution in the great lakes, the world's largest freshwater resource. *Frontiers in Environmental Science* **2017**, *5*, 45. [\[Crossref\]](#)
- Kedzierski, M.; Frère, D.; Le, G.; Bruzard, S.; Why is there plastic packaging in the natural environment ? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours. *Science of the Total Environment* **2020**, *740*, 139985. [\[Crossref\]](#)
- Chen, Y.; Kumar, A.; Wei, F.; Tan, Q.; Li, J.; Single-use plastics: production, usage, disposal, and adverse impacts. *Science of the Total Environment* **2021**, *752*, 141772. [\[Crossref\]](#)
- Piccardo, M.; Provenza, F.; Grazioli, E.; Cavallo, A.; Terlizzi, A.; Renzi, M.; PET microplastics toxicity on marine key species is influenced by pH, particle size and food variations. *Science of the Total Environment* **2020**, *715*, 136947. [\[Crossref\]](#)
- Pellini, G.; Gomiero, A.; Fortibuoni, T.; Ferrà, C.; Grati, F.; Tassetti, A. N.; Polidori, P.; Fabi, G.; Scarcella, G.; Characterization of microplastic litter in the gastrointestinal tract of *Solea solea* from the Adriatic Sea. *Environmental Pollution* **2018**, *234*, 943. [\[Crossref\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Frias, J. P. G. L.; Nash, R.; Microplastics: finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin* **2019**, *138*, 145. [\[Crossref\]](#)
- Coe, J. M.; Rogers, D. *Marine debris: Sources, impacts and solutions*, 1a ed., Springer: New York, 1997.

13. Willis, K.; Maureaud, C.; Wilcox, C.; Hardesty, B. D.; How successful are waste abatement campaigns and government policies at reducing plastic waste into the marine environment? *Marine Policy* **2018**, *96*, 243. [[Crossref](#)]
14. Wu, P.; Huang, J.; Zheng, Y.; Yang, Y.; Zhang, Y.; He, F.; Chen, H.; Quan, G.; Yan, J.; Li, T.; Gao, B.; Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2019**, *184*, 109612. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
15. Silva, A. B.; Bastos, A. S.; Justino, C. I. L.; da Costa, J. P.; Duarte, A. C.; Rocha-Santos, T. A. P.; Microplastics in the environment: challenges in analytical chemistry - a review. *Analytica Chimica Acta* **2018**, *1017*, 1. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
16. Udovicki, B.; Andjelkovic, M.; Cirkovic-Velickovic, T.; Rajkovic, A.; Microplastics in food: scoping review on health effects, occurrence, and human exposure. *International Journal of Food Contamination* **2022**, *9*, 7. [[Crossref](#)]
17. Jaikumar, G.; Brun, N. R.; Vijver, M. G.; Bosker, T.; Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three *cladocerans* during chronic exposure. *Environmental Pollution* **2019**, *249*, 638. [[Crossref](#)]
18. Lehtiniemi, M.; Hartikainen, S.; Näkki, P.; Engström-Öst, J.; Koistinen, A.; Setälä, O.; Size matters more than shape: ingestion of primary and secondary microplastics by small predators. *Food Webs* **2018**, *17*, e00097. [[Crossref](#)]
19. Paço, A.; Duarte, K.; Costa, J. P.; Santos, P. S. M.; Pereira, R.; Pereira, M. E.; Freitas, A. C.; Duarte, A. C.; Rocha-Santos, T. A. P.; Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *The Science of the Total Environment* **2017**, *586*, 10. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
20. Cole, M.; Lindeque, P.; Halsband, C.; Galloway, T. S.; Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin* **2011**, *62*, 2588. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
21. Sarkar, B.; Dissanayake, P. D.; Bolan, N. S.; Dar, J. Y.; Kumar, M.; Haque, M. N.; Mukhopadhyay, R.; Ramanayaka, S.; Biswas, J. K.; Tsang, D. C. W.; Rinklebe, J.; Ok, Y. S.; Challenges and opportunities in sustainable management of microplastics and nanoplastics in the environment. *Environmental Research* **2022**, *207*, 112179. [[Crossref](#)]
22. Li, J.; Liu, H.; Paul Chen, J.; Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research* **2018**, *137*, 362. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
23. Duis, K.; Coors, A.; Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe* **2016**, *28*, 2 [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
24. Li, Y.; Zhang, H.; Tang, C.; A review of possible pathways of marine microplastics transport in the ocean. *Anthropocene Coasts* **2020**, *3*, 6 [[Crossref](#)]
25. Zhang, Y.; Pu, S.; Lv, X.; Gao, Y.; Ge, L.; Global trends and prospects in microplastics research: A bibliometric analysis. *Journal of Hazardous Materials* **2020**, *400*, 123110. [[Crossref](#)]
26. Tang, Y.; Liu, Y.; Chen, Y.; Zhang, W.; Zhao, J.; He, S.; Yang, C.; Zhang, T.; Tang, C.; Zhang, C.; Yang, Z.; A review: research progress on microplastic pollutants in aquatic environments. *Science of the Total Environment* **2021**, *766*, 142572. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
27. Bittencourt, S.; Aisse, M. M.; Serrat, B. M.; Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* **2017**, *22*, 1129. [[Crossref](#)]
28. Koutnik, V. S.; Leonard, J.; Alkidim, S.; DePrima, F. J.; Ravi, S.; Hoek, E. M. V.; Mohanty, S. K.; Distribution of microplastics in soil and freshwater environments: global analysis and framework for transport modeling. *Environmental Pollution* **2021**, *274*, 116552. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
29. Olivatto, G. P.; Carreira, R.; Tornisiello, V. L.; Montagner, C. C.; Microplastics: Contaminants of global concern in the Anthropocene. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1968. [[Crossref](#)]
30. Bartnikowski, M.; Dargaville, T. R.; Ivanovski, S.; Huttmacher, D. W.; Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment. *Progress in Polymer Science* **2019**, *96*, 1. [[Crossref](#)]
31. Löder, M. G. J.; Gerdts, G.; Em *Marine Anthropogenic Litter*; Bergmann, M.; Gutow, L.; Klages, M., orgs.; Springer International Publishing: Cham, 2015, cap. 8.
32. Prata, J. C.; Costa, J. P.; Duarte, A. C.; Rocha-Santos, T.; Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *110*, 150. [[Crossref](#)]
33. Masura, J.; Baker, J.; Foster, G.; Arthur, C.; *Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment*, NOAA Marine Debris Division: Silver Spring, MD, 2015. [[Crossref](#)]
34. Tirkey, A.; Upadhyay, L. S. B.; Microplastics: an overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Marine Pollution Bulletin* **2021**, *170*, 112604. [[Crossref](#)]
35. Stock, F.; Kochleus, C.; Bansch-Baltruschat, B.; Brennholt, N.; Reifferscheid, G.; Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – a review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *113*, 84. [[Crossref](#)]
36. Karlsson, T. M.; Vethaak, A. D.; Almroth, B. C.; Ariese, F.; van Velzen, M.; Hassellöv, M.; Leslie, H. A.; Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: method development and microplastic accumulation. *Marine Pollution Bulletin* **2017**, *122*, 403. [[Crossref](#)]
37. Karami, A.; Golieskardi, A.; Choo, C. K.; Romano, N.; Ho, Y. B.; Salamatinia, B.; A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish. *Science of The Total Environment* **2017**, *578*, 485. [[Crossref](#)]
38. Frias, J.; Pagter, E.; Nash, R.; O'Connor, I.; *Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments*, JPI-Oceans BASEMAN project: Bremerhaven, 2018. [[Crossref](#)]
39. Hurley, R. R.; Lusher, A. L.; Olsen, M.; Nizzetto, L.; Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. *Environmental Science & Technology* **2018**, *52*, 7409. [[Crossref](#)]
40. Scopetani, C.; Chelazzi, D.; Mikola, J.; Leiniö, V.; Heikkinen, R.; Cincinelli, A.; Pellinen, J.; Olive oil-based method for the

- extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples. *Science of The Total Environment* **2020**, *733*, 139338. [[Crossref](#)]
41. Ainali, N. M.; Kalaronis, D.; Kontogiannis, A.; Evgenidou, E.; Kyzas, G. Z.; Yang, X.; Bikiaris, D. N.; Lambropoulou, D. A.; Microplastics in the environment: Sampling, pretreatment, analysis and occurrence based on current and newly-exploited chromatographic approaches. *Science of The Total Environment* **2021**, *794*, 148725. [[Crossref](#)]
 42. Expósito, N.; Rovira, J.; Sierra, J.; Folch, J.; Schuhmacher, M.; Microplastics levels, size, morphology and composition in marine water, sediments and sand beaches. Case study of Tarragona coast (western Mediterranean). *Science of The Total Environment* **2021**, *786*, 147453. [[Crossref](#)]
 43. Moraes, N. G. de; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, 2022. [[Link](#)]
 44. Shim, W. J.; Hong, S. H.; Eo, S. E.; Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical Methods* **2017**, *9*, 1384. [[Crossref](#)]
 45. Wirnkor, V. A.; Ebere, E. C.; Ngozi, V. E.; Microplastics, an emerging concern: a review of analytical techniques for detecting and quantifying microplastics. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal* **2019**, *2*, 13. [[Crossref](#)]
 46. Cabernard, L.; Roscher, L.; Lorenz, C.; Gerdtts, G.; Primpke, S.; Comparison of raman and fourier transform infrared spectroscopy for the quantification of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology* **2018**, *52*, 13279. [[Crossref](#)]
 47. Dekiff, J. H.; Remy, D.; Klasmeier, J.; Fries, E.; Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney. *Environmental Pollution* **2014**, *186*, 248. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 48. Singh, B.; Kumar, A.; Advances in microplastics detection: a comprehensive review of methodologies and their effectiveness. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2024**, *170*, 117440. [[Crossref](#)]
 49. Liu, S.; Shang, E.; Liu, J.; Wang, Y.; Bolan, N.; Kirkham, M. B.; Li, Y.; What have we known so far for fluorescence staining and quantification of microplastics: a tutorial review. *Frontiers of Environmental Science and Engineering* **2022**, *16*, 8 [[Crossref](#)]
 50. Scircle, A.; Cizdziel, J. V.; Detecting and quantifying microplastics in bottled water using fluorescence microscopy: a new experiment for instrumental analysis and environmental chemistry courses. *Journal of Chemical Education* **2020**, *97*, 234. [[Crossref](#)]
 51. Prata, J. C.; da Costa, J. P.; Fernandes, A. J. S.; da Costa, F. M.; Duarte, A. C.; Rocha-Santos, T.; Selection of microplastics by Nile Red staining increases environmental sample throughput by micro-Raman spectroscopy. *The Science of the Total Environment* **2021**, *783*, 146979. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 52. Erni-Cassola, G.; Gibson, M. I.; Thompson, R. C.; Christie-Oleza, J. A.; Lost, but found with Nile Red: a novel method for detecting and quantifying small microplastics (1 mm to 20 µm) in environmental samples. *Environmental Science & Technology* **2017**, *51*, 13641. [[Crossref](#)]
 53. Naji, A.; Nuri, M.; Amiri, P.; Niyogi, S.; Small microplastic particles (S-MPPs) in sediments of mangrove ecosystem on the northern coast of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* **2019**, *146*, 305. [[Crossref](#)]
 54. Neto, J. G. B.; Rodrigues, F. L.; Ortega, I.; Rodrigues, L. dos S.; Lacerda, A. L. d. F.; Coletto, J. L.; Kessler, F.; Cardoso, L. G.; Madureira, L.; Proietti, M. C.; Ingestion of plastic debris by commercially important marine fish in southeast-south Brazil. *Environmental Pollution* **2020**, *267*, 115508. [[Crossref](#)]
 55. Tammina, S. K.; Khan, A.; Rhim, J.-W.; Advances and prospects of carbon dots for microplastic analysis. *Chemosphere* **2023**, *313*, 137433. [[Crossref](#)]
 56. Adhikari, S.; Kelkar, V.; Kumar, R.; Halden, R. U.; Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini-review. *Polymer International* **2022**, *71*, 543. [[Crossref](#)]
 57. Wang, Z.-M.; Wagner, J.; Ghosal, S.; Bedi, G.; Wall, S.; SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Science of The Total Environment* **2017**, *603–604*, 616. [[Crossref](#)]
 58. Loparo, J. J.; Roberts, S. T.; Tokmakoff, A.; Multidimensional infrared spectroscopy of water. I. Vibrational dynamics in two-dimensional IR line shapes. *The Journal of Chemical Physics* **2006**, *125*, 194521. [[Crossref](#)]
 59. Lee, J.; Chae, K. J.; A systematic protocol of microplastics analysis from their identification to quantification in water environment: a comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials* **2021**, *403*, 124049. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 60. Löder, M. G. J.; Kuczera, M.; Mintenig, S.; Lorenz, C.; Gerdtts, G.; Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples. *Environmental Chemistry* **2015**, *12*, 563. [[Crossref](#)]
 61. Moses, S. R.; Roscher, L.; Primpke, S.; Hufnagl, B.; Löder, M. G. J.; Gerdtts, G.; Laforsch, C.; Comparison of two rapid automated analysis tools for large FTIR microplastic datasets. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **2023**, *415*, 2975. [[Crossref](#)]
 62. Ivleva, N. P.; Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: challenges, advanced methods, and perspectives. *Chemical Reviews* **2021**, *121*, 11886. [[Crossref](#)]
 63. Rytelewska, S.; D browska, A.; The Raman spectroscopy approach to different freshwater microplastics and quantitative characterization of polyethylene aged in the environment. *Microplastics* **2022**, *1*, 263. [[Crossref](#)]
 64. Fischer, J.; Wallner, G. M.; Pieber, A.; Spectroscopical investigation of ski base materials. *Macromolecular Symposia* **2008**, *265*, 28. [[Crossref](#)]
 65. Araujo, C. F.; Nolasco, M. M.; Ribeiro, A. M. P.; Ribeiro-Claro, P. J. A.; Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research* **2018**, *142*, 426. [[Crossref](#)]
 66. Wright, S. L.; Levermore, J. M.; Kelly, F. J.; Raman spectral imaging for the detection of inhalable microplastics in ambient particulate matter samples. *Environmental Science & Technology* **2019**, *53*, 8947. [[Crossref](#)]
 67. Zarfl, C.; Promising techniques and open challenges for microplastic identification and quantification in environmental matrices. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **2019**, *411*, 3743. [[Crossref](#)]

68. Olivatto, G. P.; Martins, M. C. T.; Montagner, C. C.; Henry, T. B.; Carreira, R. S.; Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Pollution bulletin* **2019**, *139*, 157. [[Crossref](#)]
69. Krotz, L.; Giazzi, G.; *Characterization of lubricants and oils by the thermo scientific FLASH 2000 elemental analyzer*, Brechbühler: Schlieren, 2000.
70. Morét-Ferguson, S.; Law, K. L.; Proskurowski, G.; Murphy, E. K.; Peacock, E. E.; Reddy, C. M.; The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin* **2010**, *60*, 1873. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
71. Charles, L.; Wesdemiotis, C.; Mass spectrometry of synthetic polymers. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **2020**, *34*, e8827 [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
72. Hendrickson, E.; Minor, E. C.; Schreiner, K.; Microplastic Abundance and Composition in Western Lake Superior As Determined via Microscopy, Pyr-GC/MS, and FTIR. *Environmental Science and Technology* **2018**, *52*, 1787. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
73. Bulbul, M.; Kumar, S.; Ajay, K.; Anoop, A.; Spatial distribution and characteristics of microplastics and associated contaminants from mid-altitude lake in NW Himalaya. *Chemosphere* **2023**, *326*, 138415. [[Crossref](#)]
74. Jabeen, K.; Xu, J.; Liu, K.; Zhu, L.; Li, D.; Monthly variation and transport of microplastics from the Soan River into the Indus River. *Science of The Total Environment* **2023**, *905*, 166877. [[Crossref](#)]
75. Tan, Y.; Dai, J.; Xiao, S.; Tang, Z.; Zhang, J.; Wu, S.; Wu, X.; Deng, Y.; Occurrence of microplastic pollution in rivers globally: Driving factors of distribution and ecological risk assessment. *Science of The Total Environment* **2023**, *904*, 165979. [[Crossref](#)]
76. Wang, Q.; Huang, K.; Li, Y.; Zhang, Y.; Yan, L.; Xu, K.; Huang, S.; Junaid, M.; Wang, J.; Microplastics abundance, distribution, and composition in freshwater and sediments from the largest Xijin Wetland Park, Nanning, South China. *Gondwana Research* **2022**, *108*, 13. [[Crossref](#)]
77. Yan, M.; Yang, J.; Sun, H.; Liu, C.; Wang, L.; Occurrence and distribution of microplastics in sediments of a man-made lake receiving reclaimed water. *Science of The Total Environment* **2022**, *813*, 152430. [[Crossref](#)]
78. Zhang, L.; Xie, Y.; Zhong, S.; Liu, J.; Qin, Y.; Gao, P.; Microplastics in freshwater and wild fishes from Lijiang River in Guangxi, Southwest China. *Science of The Total Environment* **2021**, *755*, 142428. [[Crossref](#)]
79. de Carvalho, A. R.; Riem-Galliano, L.; ter Halle, A.; Cucherousset, J.; Interactive effect of urbanization and flood in modulating microplastic pollution in rivers. *Environmental Pollution* **2022**, *309*, 119760. [[Crossref](#)]
80. Huang, C.-W.; Li, Y.-L.; Lin, C.; Bui, X.-T.; Vo, T.-D.-H.; Ngo, H. H.; Seasonal influence on pollution index and risk of multiple compositions of microplastics in an urban river. *Science of The Total Environment* **2023**, *859*, 160021. [[Crossref](#)]
81. Li, S.; Wang, H.; He, Y.; Liang, D.; Shen, Y.; Gu, Q.; Zeng, Y.; How microplastic loads relate to natural conditions and anthropogenic activities in the Yangtze river basin. *Chemosphere* **2023**, *342*, 140146. [[Crossref](#)]
82. Laju, R. L.; Jayanthi, M.; Jeyasanta, K. I.; Patterson, J.; Asir, N. G. G.; Sathish, M. N.; Edward, J. K. P.; Spatial and vertical distribution of microplastics and their ecological risk in an Indian freshwater lake ecosystem. *Science of The Total Environment* **2022**, *820*, 153337. [[Crossref](#)]
83. Mercy, F. T.; Alam, A. K. M. R.; Akbor, M. A.; Abundance and characteristics of microplastics in major urban lakes of Dhaka, Bangladesh. *Heliyon* **2023**, *9*, e14587. [[Crossref](#)]
84. Rico, A.; Redondo-Hasselerharm, P. E.; Vighi, M.; Waichman, A. V.; Nunes, G. S. de S.; de Oliveira, R.; Singdahl-Larsen, C.; Hurley, R.; Nizzetto, L.; Schell, T.; Large-scale monitoring and risk assessment of microplastics in the Amazon River. *Water Research* **2023**, *232*, 119707. [[Crossref](#)]
85. Ikenoue, T.; Nakajima, R.; Fujiwara, A.; Onodera, J.; Itoh, M.; Toyoshima, J.; Watanabe, E.; Murata, A.; Nishino, S.; Kikuchi, T.; Horizontal distribution of surface microplastic concentrations and water-column microplastic inventories in the Chukchi Sea, western Arctic Ocean. *Science of The Total Environment* **2023**, *855*, 159564. [[Crossref](#)]
86. Cha, J.; Lee, J.-Y.; Chia, R. W.; Microplastics contamination and characteristics of agricultural groundwater in Hae-an Basin of Korea. *Science of The Total Environment* **2023**, *864*, 161027. [[Crossref](#)]
87. Huang, D.; Li, X.; Ouyang, Z.; Zhao, X.; Wu, R.; Zhang, C.; Lin, C.; Li, Y.; Guo, X.; The occurrence and abundance of microplastics in surface water and sediment of the West River downstream, in the south of China. *Science of The Total Environment* **2021**, *756*, 143857. [[Crossref](#)]
88. Saad, D.; Ndlovu, M.; Ramaremsa, G.; Tutu, H.; Microplastics in freshwater environment: the first evaluation in sediment of the Vaal River, South Africa. *Heliyon* **2022**, *8*, e11118. [[Crossref](#)]
89. Farooq, M.; Nisa, F. U.; Manzoor, Z.; Tripathi, S.; Thulasiraman, A. V.; Khan, M. I.; Khan, M. Y. A.; Gani, K. M.; Abundance and characteristics of microplastics in a freshwater river in northwestern Himalayas, India - Scenario of riverbank solid waste disposal sites. *Science of The Total Environment* **2023**, *886*, 164027. [[Crossref](#)]
90. Semmouri, I.; Vercauteren, M.; Van Acker, E.; Pequeur, E.; Asselman, J.; Janssen, C.; Distribution of microplastics in freshwater systems in an urbanized region: a case study in Flanders (Belgium). *Science of The Total Environment* **2023**, *872*, 162192. [[Crossref](#)]
91. Hossain, M. B.; Yu, J.; Ujjaman Nur, A.-A.; Banik, P.; Jolly, Y. N.; Mamun, M. A.; Arai, T.; Albeshr, M. F.; Microplastics in surface water from a mighty subtropical estuary: first observations on occurrence, characterization, and contamination assessment. *Environmental Research* **2023**, *226*, 115594. [[Crossref](#)]
92. Rodrigues, M. O.; Abrantes, N.; Gonçalves, F. J. M.; Nogueira, H.; Marques, J. C.; Gonçalves, A. M. M.; Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). *The Science of the Total Environment* **2018**, *633*, 1549. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
93. Bharath, K. M.; Srinivasalu, S.; Natesan, U.; Ayyamperumal, R.; Kalam, S. N.; Anbalagan, S.; Sujatha, K.; Alagarasan, C.; Microplastics as an emerging threat to the freshwater ecosystems of Veeranam lake in south India: a multidimensional approach. *Chemosphere* **2021**, *264*, 128502. [[Crossref](#)]

94. Zhang, W.; Zhang, S.; Qu, L.; Ju, M.; Huo, C.; Wang, J.; Seasonal distribution of microplastics in the surface waters of the Yellow Sea, China. *Marine Pollution Bulletin* **2023**, *193*, 115051. [[Crossref](#)]
95. Qi, H.; Liu, M.; Ye, J.; Wang, J.; Cui, Y.; Zhou, Y.; Chen, P.; Ke, H.; Wang, C.; Cai, M.; Microplastics in the Taiwan Strait and adjacent sea: spatial variations and lateral transport. *Marine Environmental Research* **2023**, *191*, 106182. [[Crossref](#)]
96. Gong, X.; Tian, L.; Wang, P.; Wang, Z.; Zeng, L.; Hu, J.; Microplastic pollution in the groundwater under a bedrock island in the South China sea. *Environmental Research* **2023**, *239*, 117277. [[Crossref](#)]
97. Kumar, R.; Sharma, P.; Manna, C.; Jain, M.; Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: a review. *Science of the Total Environment* **2021**, *782*, 146695. [[Crossref](#)]
98. Yu, Y.; Zhou, D.; Li, Z.; Zhu, C.; Advancement and Challenges of Microplastic Pollution in the Aquatic Environment: a Review. *Water Air Soil Pollut* **2018**, *229*, 140. [[Crossref](#)]
99. von Moos, N.; Burkhardt-Holm, P.; Köhler, A.; Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environmental Science and Technology* **2012**, *46*, 11327. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)].
100. Remy, F.; Collard, F.; Gilbert, B.; Compère, P.; Eppe, G.; Lepoint, G.; When microplastic is not plastic: the ingestion of artificial cellulose fibers by macrofauna living in seagrass macrophytodebris. *Environmental Science and Technology* **2015**, *49*, 11158. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
101. Huang, W.; Song, B.; Liang, J.; Niu, Q.; Zeng, G.; Shen, M.; Deng, J.; Luo, Y.; Wen, X.; Zhang, Y.; Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: a review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials* **2021**, *405*, 124187. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
102. Du, J.; Xu, S.; Zhou, Q.; Li, H.; Fu, L.; Tang, J.; Wang, Y.; Peng, X.; Xu, Y.; Du, X.; A review of microplastics in the aquatic environment: distribution, transport, ecotoxicology, and toxicological mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research* **2020**, *27*, 11494. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
103. Manzoor, S.; Naqash, N.; Rashid, G.; Singh, R.; Plastic material degradation and formation of microplastic in the environment: a review. *Materials Today: Proceedings* **2021**, *56*, 3254. [[Crossref](#)]
104. Browne, M. A.; Dissanayake, A.; Galloway, T. S.; Lowe, D. M.; Thompson, R. C.; Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science and Technology* **2008**, *42*, 5026. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
105. Lei, L.; Wu, S.; Lu, S.; Liu, M.; Song, Y.; Fu, Z.; Shi, H.; Raley-Susman, K. M.; He, D.; Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Science of the Total Environment* **2018**, *619–620*, 1. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
106. Zhang, C.; Chen, X.; Wang, J.; Tan, L.; Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae. *Environmental Pollution* **2017**, *220*, 1282. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
107. Sjollema, S. B.; Redondo-Hasselerharm, P.; Leslie, H. A.; Kraak, M. H. S.; Vethaak, A. D.; Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? *Aquatic Toxicology* **2016**, *170*, 259. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
108. Lagarde, F.; Olivier, O.; Zanella, M.; Daniel, P.; Hiard, S.; Caruso, A.; Microplastic interactions with freshwater microalgae: hetero-aggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type. *Environmental Pollution* **2016**, *215*, 331. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
109. Mao, Y.; Ai, H.; Chen, Y.; Zhang, Z.; Zeng, P.; Kang, L.; Li, W.; Gu, W.; He, Q.; Li, H.; Phytoplankton response to polystyrene microplastics: perspective from an entire growth period. *Chemosphere* **2018**, *208*, 59. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
110. Klein, S.; Dimzon, I. K.; Eubeler, J.; Knepper, T. P.; *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?*; Wagner, M.; Lambert, S., eds.; Springer Cham: New York, 2018, cap. 3. [[Crossref](#)]
111. Kaur, K.; Reddy, S.; Barathe, P.; Oak, U.; Shriram, V.; Kharat, S. S.; Govarthanan, M.; Kumar, V.; Microplastic-associated pathogens and antimicrobial resistance in environment. *Chemosphere* **2022**, *291*, 133005. [[Crossref](#)]
112. Vo, H. C.; Pham, M. H.; Ecotoxicological effects of microplastics on aquatic organisms: a review. *Environmental Science and Pollution Research* **2021**, *28*, 44716. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
113. Hahladakis, J. N.; Velis, C. A.; Weber, R.; Iacovidou, E.; Purnell, P.; An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* **2018**, *344*, 179. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
114. Ding, J.; Zhang, S.; Razanajatovo, M.; Zou, H.; Zhu, W.; Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Pollution* **2018**, *238*, 1. [[Crossref](#)]
115. Lohmann, R.; Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans-but should microplastics be considered POPs themselves? *Integrated Environmental Assessment and Management* **2017**, *13*, 460. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
116. Tourinho, P. S.; Kočí, V.; Loureiro, S.; van Gestel, C. A. M.; Partitioning of chemical contaminants to microplastics: sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation. *Environmental Pollution* **2019**, *252*, 1246. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
117. Cao, Y.; Zhao, M.; Ma, X.; Song, Y.; Zuo, S.; Li, H.; Deng, W.; A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans. *Science of the Total Environment* **2021**, *788*, 147620. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
118. Fred-Ahmadu, O. H.; Bhagwat, G.; Oluyoye, I.; Benson, N. U.; Ayejuyo, O. O.; Palanisami, T.; Interaction of chemical contaminants with microplastics: principles and perspectives. *Science of the Total Environment* **2020**, *706*, 135978. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
119. Menéndez-Pedriza, A.; Jaumot, J.; Interaction of environmental pollutants with microplastics: a critical review of sorption

- factors, bioaccumulation and ecotoxicological effects. *Toxics* **2020**, *8*, 40. [Crossref]
120. Wang, T.; Wang, L.; Chen, Q.; Kalogerakis, N.; Ji, R.; Ma, Y.; Interactions between microplastics and organic pollutants: effects on toxicity, bioaccumulation, degradation, and transport. *Science of the Total Environment* **2020**, *748*, 142427. [Crossref] [PubMed]
 121. Liu, G.; Zhu, Z.; Yang, Y.; Sun, Y.; Yu, F.; Ma, J.; Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater. *Environmental Pollution* **2019**, *246*, 26. [Crossref] [PubMed]
 122. Yu, Y.; Mo, W. Y.; Luukkonen, T.; Adsorption behaviour and interaction of organic micropollutants with nano and microplastics: a review. *Science of the Total Environment* **2021**, *797*, 149140. [Crossref] [PubMed]
 123. Rodrigues, J. P.; Duarte, A. C.; Santos-Echeandía, J.; Rocha-Santos, T.; Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: a critical overview. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *111*, 252. [Crossref]
 124. Alharbi, O. M. L.; Basheer, A. A.; Khattab, R. A.; Ali, I.; Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids* **2018**, *263*, 442. [Crossref]
 125. Jiménez-Skrzypek, G.; Hernández-Sánchez, C.; Ortega-Zamora, C.; González-Sálamo, J.; González-Curbelo, M. Á.; Hernández-Borges, J.; Microplastic-adsorbed organic contaminants: analytical methods and occurrence. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* **2021**, *136*, 116186. [Crossref]
 126. Santana-Viera, S.; Montesdeoca-Esponda, S.; Guedes-Alonso, R.; Sosa-Ferrera, Z.; Santana-Rodríguez, J. J.; Organic pollutants adsorbed on microplastics: analytical methodologies and occurrence in oceans. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* **2021**, *29*, e00114. [Crossref]
 127. Hong, S. H.; Shim, W. J.; Hong, L.; Methods of analysing chemicals associated with microplastics: a review. *Analytical Methods* **2017**, *9*, 1361. [Crossref]
 128. Zhang, S.; Wang, J.; Liu, X.; Qu, F.; Wang, X.; Wang, X.; Li, Y.; Sun, Y.; Microplastics in the environment: a review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *111*, 62. [Crossref]
 129. Rios Mendoza, L. M.; Balcer, M.; Em *Handbook of microplastics in the environment*; Rocha-Santos, T.; Costa, M.; Mouneyrac, C., orgs.; Springer International Publishing: Cham, 2020.
 130. Mohammadpour, H.; Sadrameli, S. M.; Eslami, F.; Asoodeh, A.; Optimization of ultrasound-assisted extraction of *Moringa peregrina* oil with response surface methodology and comparison with Soxhlet method. *Industrial Crops and Products* **2019**, *131*, 106. [Crossref]
 131. Albero, B.; Tadeo, J. L.; Pérez, R. A.; Ultrasound-assisted extraction of organic contaminants. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* **2019**, *118*, 739. [Crossref]
 132. Llorca, M.; Farré, M.; Karapanagioti, H. K.; Barceló, D.; Levels and fate of perfluoroalkyl substances in beached plastic pellets and sediments collected from Greece. *Marine Pollution Bulletin* **2014**, *87*, 286. [Crossref] [PubMed]
 133. Mai, L.; Bao, L. J.; Shi, L.; Liu, L. Y.; Zeng, E. Y.; Polycyclic aromatic hydrocarbons affiliated with microplastics in surface waters of Bohai and Huanghai Seas, China. *Environmental Pollution* **2018**, *241*, 834. [Crossref] [PubMed]
 134. Thomas, D.; Schütze, B.; Heinze, W. M.; Steinmetz, Z.; Sample preparation techniques for the analysis of microplastics in soil: a review. *Sustainability (Switzerland)* **2020**, *12*, 9074. [Crossref]
 135. Szulejko, J. E.; Kim, K. H.; Brown, R. J. C.; Bae, M. S.; Review of progress in solvent-extraction techniques for the determination of polyaromatic hydrocarbons as airborne pollutants. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* **2014**, *61*, 40. [Crossref]
 136. Antunes, J. C.; Frias, J. G. L.; Micaelo, A. C.; Sobral, P.; Resin pellets from beaches of the Portuguese coast and adsorbed persistent organic pollutants. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2013**, *130*, 62. [Crossref]
 137. Kleinteich, J.; Seidensticker, S.; Marggrander, N.; Zarf, C.; Microplastics reduce short-term effects of environmental contaminants. part II: Polyethylene particles decrease the effect of polycyclic aromatic hydrocarbons on microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2018**, *15*, 287. [Crossref] [PubMed]
 138. Frias, J. P. G. L.; Sobral, P.; Ferreira, A. M.; Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin* **2010**, *60*, 1988. [Crossref]
 139. Rodríguez, C.; Fossatti, M.; Carrizo, D.; Sánchez-García, L.; Teixeira de Mello, F.; Weinstein, F.; Lozoya, J. P.; Mesoplastics and large microplastics along a use gradient on the Uruguay Atlantic coast: types, sources, fates, and chemical loads. *Science of the Total Environment* **2020**, *721*, 137734. [Crossref] [PubMed]
 140. Tang, G.; Liu, M.; Zhou, Q.; He, H.; Chen, K.; Zhang, H.; Hu, J.; Huang, Q.; Luo, Y.; Ke, H.; Chen, B.; Xu, X.; Cai, M.; Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: implications for anthropogenic impacts. *Science of the Total Environment* **2018**, *634*, 811. [Crossref] [PubMed]
 141. Yeo, B. G.; Takada, H.; Yamashita, R.; Okazaki, Y.; Uchida, K.; Tokai, T.; Tanaka, K.; Trenholm, N.; PCBs and PBDEs in microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of Japan. *Marine Pollution Bulletin* **2020**, *151*, 110806. [Crossref] [PubMed]
 142. Zhang, W.; Ma, X.; Zhang, Z.; Wang, Y.; Wang, J.; Wang, J.; Ma, D.; Persistent organic pollutants carried on plastic resin pellets from two beaches in China. *Marine Pollution Bulletin* **2015**, *99*, 28. [Crossref] [PubMed]
 143. GESAMP; Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment, 2015. Disponível em: <www.imo.org>. Acesso em: 01 dezembro 2023.
 144. Camacho, M.; Herrera, A.; Gómez, M.; Acosta-Dacal, A.; Martínez, I.; Henríquez-Hernández, L. A.; Luzardo, O. P.; Organic pollutants in marine plastic debris from Canary Islands beaches. *Science of the Total Environment* **2019**, *662*, 22. [Crossref] [PubMed]
 145. Tan, X.; Yu, X.; Cai, L.; Wang, J.; Peng, J.; Microplastics and associated PAHs in surface water from the Feilaixia Reservoir in the Beijiang River, China. *Chemosphere* **2019**, *221*, 834. [Crossref] [PubMed]

146. Van, A.; Rochman, C. M.; Flores, E. M.; Hill, K. L.; Vargas, E.; Vargas, S. A.; Hoh, E.; Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California. *Chemosphere* **2012**, *86*, 258. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
147. Xu, P.; Ge, W.; Chai, C.; Zhang, Y.; Jiang, T.; Xia, B.; Sorption of polybrominated diphenyl ethers by microplastics. *Marine Pollution Bulletin* **2019**, *145*, 260. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
148. Lee, H.; Byun, D. E.; Kim, J. M.; Kwon, J. H.; Desorption of hydrophobic organic chemicals from fragment-type microplastics. *Ocean Science Journal* **2018**, *53*, 631. [[Crossref](#)]
149. Peng, J.; Wang, J.; Cai, L.; Current understanding of microplastics in the environment: Occurrence, fate, risks, and what we should do. *Integrated Environmental Assessment and Management* **2017**, *13*, 476. [[Crossref](#)]
150. Bilal, M.; Iqbal, H. M. N.; Transportation fate and removal of microplastic pollution: a perspective on environmental pollution. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* **2020**, *2*, 100015. [[Crossref](#)]
151. Stark, M.; Letter to the editor regarding “Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris”. *Environmental Science & Technology* **2019**, *53*, 4677. [[Crossref](#)]
152. Meng, Y.; Kelly, F. J.; Wright, S. L.; Advances and challenges of microplastic pollution in freshwater ecosystems: A UK perspective. *Environmental Pollution* **2020**, *256*, 113445. [[Crossref](#)]
153. Vivekanand, A. C.; Mohapatra, S.; Tyagi, V. K.; Microplastics in aquatic environment: Challenges and perspectives. *Chemosphere* **2021**, *282*, 131151. [[Crossref](#)]
154. Mitrano, D. M.; Wohlleben, W.; Microplastic regulation should be more precise to incentivize both innovation and environmental safety. *Nature Communications* **2020**, *11*, 5324 [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
155. Hammami, M. B. A.; Mohammed, E. Q.; Hashem, A. M.; Al-Khafaji, M. A.; Alqahtani, F.; Alzaabi, S.; Dash, N.; Survey on awareness and attitudes of secondary school students regarding plastic pollution: implications for environmental education and public health in Sharjah city, UAE. *Environmental Science and Pollution Research* **2017**, *24*, 20626. [[Crossref](#)]
156. Wong, K.; Environmental awareness, governance and public participation: public perception perspectives. *International Journal of Environmental Studies* **2010**, *67*, 169. [[Crossref](#)]
157. Matthews, C.; Moran, F.; Jaiswal, A. K.; A review on European Union’s strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *283*, 125263. [[Crossref](#)]
158. Sardon, H.; Dove, A. P.; Plastics recycling with a difference. *Science* **2018**, *360*, 380. [[Crossref](#)]
159. Hahladakis, J. N.; Iacovidou, E.; An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): focus on recycling. *Journal of Hazardous Materials* **2019**, *380*, 120887. [[Crossref](#)]
160. Wong, S. L.; Ngadi, N.; Abdullah, T. A. T.; Inuwa, I. M.; Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *50*, 1167. [[Crossref](#)]
161. Dijkstra, H.; van Beukering, P.; Brouwer, R.; Business models and sustainable plastic management: A systematic review of the literature. *Journal of Cleaner Production* **2020**, *258*, 120967. [[Crossref](#)]
162. Resnitzky, M. H. C.; Grander, G.; da Silva, L. F.; Gonzalez, E. D. R. S.; Innovation projects of packaging recycling to a circular economy. *Sustainable Operations and Computers* **2021**, *2*, 115. [[Crossref](#)]
163. Sehnem, S.; Bispo, D. S.; João, J. O.; de Souza, M. A. L.; Bertoglio, O.; Ciotti, R.; Deon, S. M.; Upscaling circular economy in foodtechs businesses in emergent countries: towards sustainable development through natural resource based view. *Sustainable Development* **2022**, *30*, 1200 [[Crossref](#)]
164. Roche Cerasi, I.; Sánchez, F. V.; Gallardo, I.; Górriz, M. Á.; Torrijos, P.; Aliaga, C.; Franco, J.; Household plastic waste habits and attitudes: A pilot study in the city of Valencia. *Waste Management & Research* **2021**, *39*, 629. [[Crossref](#)]
165. Zhu, B.; Wang, D.; Wei, N.; Enzyme discovery and engineering for sustainable plastic recycling. *Trends in Biotechnology* **2022**, *40*, 22. [[Crossref](#)]
166. Urbanek, A. K.; Miroczuk, A. M.; García-Martín, A.; Saborido, A.; de la Mata, I.; Arroyo, M.; Biochemical properties and biotechnological applications of microbial enzymes involved in the degradation of polyester-type plastics. *Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics* **2020**, *1868*, 140315. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
167. Yoshida, S.; Hiraga, K.; Takehana, T.; Taniguchi, I.; Yamaji, H.; Maeda, Y.; Toyohara, K.; Miyamoto, K.; Kimura, Y.; Oda, K.; A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* **2016**, *353*, 759. [[PubMed](#)]
168. Wei, R.; Tiso, T.; Bertling, J.; O’Connor, K.; Blank, L. M.; Bornscheuer, U. T.; Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. *Nature Catalysis* **2020**, *3*, 867. [[Crossref](#)]
169. Fakirov, S.; A new approach to plastic recycling via the concept of microfibrillar composites. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* **2021**, *4*, 187. [[Crossref](#)]
170. Lam, S. S.; Xia, C.; Sonne, C.; Plastic crisis underscores need for alternative sustainable-renewable materials. *Journal of Bioresources and Bioproducts* **2022**, *7*, 145. [[Crossref](#)]
171. Montiel, I.; Delgado-Ceballos, J.; Defining and measuring corporate sustainability: are we there yet? *Organization and Environment* **2014**, *27*, 113. [[Crossref](#)]
172. Meuer, J.; Koelbel, J.; Hoffmann, V. H.; On the nature of corporate sustainability. *Organization and Environment* **2020**, *33*, 319. [[Crossref](#)]
173. Zhou, Y.; Kumar, M.; Sarsaiya, S.; Sirohi, R.; Awasthi, S. K.; Sindhu, R.; Binod, P.; Pandey, A.; Bolan, N. S.; Zhang, Z.; Singh, L.; Kumar, S.; Awasthi, M. K.; Challenges and opportunities in bioremediation of micro-nano plastics: a review. *Science of The Total Environment* **2022**, *802*, 149823. [[Crossref](#)]
174. Picó, Y.; Barceló, D.; Analysis and prevention of microplastics pollution in water: current perspectives and future directions. *ACS Omega* **2019**, *4*, 6709. [[Crossref](#)]
175. Ferreira, D. C. M.; Molina, G.; Pelissari, F. M.; Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial

- residues. *Composites Part B: Engineering* **2020**, *183*, 107682. [Crossref]
176. Silva, A. B.; Costa, M. F.; Duarte, A. C.; Biotechnology advances for dealing with environmental pollution by micro(nano)plastics: lessons on theory and practices. *Current Opinion in Environmental Science & Health* **2018**, *1*, 30. [Crossref]
177. Kamalian, P.; Khorasani, S. N.; Abdolmaleki, A.; Karevan, M.; Khalili, S.; Shirani, M.; Neisiany, R. E.; Toward the development of polyethylene photocatalytic degradation. *Journal of Polymer Engineering* **2020**, *40*, 181. [Crossref]
178. Venkataramana, C.; Botsa, S. M.; Shyamala, P.; Muralikrishna, R.; Photocatalytic degradation of polyethylene plastics by NiAl₂O₄ spinels-synthesis and characterization. *Chemosphere* **2021**, *265*, 129021. [Crossref]
179. Nabi, I.; Bacha, A.-U.-R.; Li, K.; Cheng, H.; Wang, T.; Liu, Y.; Ajmal, S.; Yang, Y.; Feng, Y.; Zhang, L.; Complete photocatalytic mineralization of microplastic on TiO₂ nanoparticle film. *iScience* **2020**, *23*, 101326. [Crossref]
180. Du, H.; Xie, Y.; Wang, J.; Microplastic degradation methods and corresponding degradation mechanism: Research status and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials* **2021**, *418*, 126377. [Crossref]
181. Priya, A.; Anusha, G.; Thanigaivel, S.; Karthick, A.; Mohanavel, V.; Velmurugan, P.; Balasubramanian, B.; Ravichandran, M.; Kamyab, H.; Kirpichnikova, I. M.; Chelliapan, S.; Removing microplastics from wastewater using leading-edge treatment technologies: a solution to microplastic pollution: a review. *Bioprocess and Biosystems Engineering* **2022**, *46*, 309. [Crossref]
182. Sun, J.; Dai, X.; Wang, Q.; van Loosdrecht, M. C. M.; Ni, B.-J.; Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research* **2019**, *152*, 21. [Crossref]
183. Yu, F.; Hu, X.; Machine learning may accelerate the recognition and control of microplastic pollution: future prospects. *Journal of Hazardous Materials* **2022**, *432*, 128730. [Crossref]
184. Vidal, C.; Pasquini, C.; A comprehensive and fast microplastics identification based on near-infrared hyperspectral imaging (HSI-NIR) and chemometrics. *Environmental Pollution* **2021**, *285*, 117251. [Crossref] [PubMed]
185. O'Meara, N.; Human rights and the global plastics treaty to protect health, ocean ecosystems and our climate. *The International Journal of Marine and Coastal Law* **2023**, *38*, 480. [Crossref]
186. Diana, Z.; Vegh, T.; Karasik, R.; Bering, J.; D. Llano Caldas, J.; Pickle, A.; Rittschof, D.; Lau, W.; Viridin, J.; The evolving global plastics policy landscape: an inventory and effectiveness review. *Environmental Science & Policy* **2022**, *134*, 34. [Crossref]
187. Knoblauch, D.; Mederake, L.; Government policies combatting plastic pollution. *Current Opinion in Toxicology* **2021**, *28*, 87. [Crossref]
188. Xanthos, D.; Walker, T. R.; International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Marine Pollution Bulletin* **2017**, *118*, 17. [Crossref]
189. Homonoff, T. A.; Can small incentives have large effects? the impact of taxes versus bonuses on Disposable Bag Use. *American Economic Journal: Economic Policy* **2018**, *10*, 177. [Crossref]
190. Ren, J.; Yu, P.; Xu, X.; Straw utilization in China - status and recommendations. *Sustainability* **2019**, *11*, 1762. [Crossref]
191. Berck, P.; Moe-Lange, J.; Stevens, A.; Villas-Boas, S.; Measuring Consumer Responses to a Bottled Water Tax Policy. *American Journal of Agricultural Economics* **2016**, *98*, 981. [Crossref]
192. Wang, S.; International law-making process of combating plastic pollution: Status Quo, debates and prospects. *Marine Policy* **2023**, *147*, 105376. [Crossref]
193. Ferraro, G.; Failler, P.; Governing plastic pollution in the oceans: Institutional challenges and areas for action. *Environmental Science & Policy* **2020**, *112*, 453. [Crossref]
194. Hussain, N.; Khan, A.; Shumaila; Memon, S.; Addressing Marine Pollution: An analysis of MARPOL 73/78 regulations and global implementation efforts. *Journal of Social Sciences Review* **2023**, *3*, 572. [Crossref]
195. Mendenhall, E.; Making the most of what we already have: activating UNCLOS to combat marine plastic pollution. *Marine Policy* **2023**, *155*, 105786. [Crossref]
196. Van Der Marel, E. R.; Trading plastic waste in a global economy: soundly regulated by the basel convention? *Journal of Environmental Law* **2022**, *34*, 477. [Crossref]
197. Cortat Simonetti Gonçalves, L.; The effects of plastics on climate change: an analysis of the potential responses within the Nationally Determined Contributions (NDCs). *Yearbook of International Environmental Law* **2019**, *30*, 165. [Crossref]
198. Vince, J.; Hardesty, B. D.; Plastic pollution challenges in marine and coastal environments: from local to global governance. *Restoration Ecology* **2017**, *25*, 123. [Crossref]
199. Raubenheimer, K.; McIlgorm, A.; Can the Basel and Stockholm Conventions provide a global framework to reduce the impact of marine plastic litter? *Marine Policy* **2018**, *96*, 285. [Crossref]
200. Wu, H.-H.; A study on transnational regulatory governance for marine plastic debris: Trends, challenges, and prospect. *Marine Policy* **2022**, *136*, 103988. [Crossref]
201. UNEP; End plastic pollution: towards an international legally binding instrument; 2022. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38522/k2200647_unep-ea-5-I-23-rev-1_advance.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 dezembro 2023.
202. Stöfen-O'Brien, A.; The prospects of an international treaty on plastic pollution. *The International Journal of Marine and Coastal Law* **2022**, *37*, 727. [Crossref]
203. Ali, M. U.; Lin, S.; Yousaf, B.; Abbas, Q.; Munir, M. A. M.; Ali, M. U.; Rasihd, A.; Zheng, C.; Kuang, X.; Wong, M. H.; Environmental emission, fate and transformation of microplastics in biotic and abiotic compartments: global status, recent advances and future perspectives. *Science of The Total Environment* **2021**, *791*, 148422. [Crossref]
204. Elizalde-Velázquez, G. A.; Gómez-Oliván, L. M.; Microplastics in aquatic environments: a review on occurrence, distribution, toxic effects, and implications for human health. *Science of The Total Environment* **2021**, *780*, 146551. [Crossref]

205. Bai, C.-L.; Liu, L.-Y.; Hu, Y.-B.; Zeng, E. Y.; Guo, Y.; Microplastics: A review of analytical methods, occurrence and characteristics in food, and potential toxicities to biota. *Science of The Total Environment* **2022**, *806*, 150263. [[Crossref](#)]
206. Tang, K. H. D.; Interactions of microplastics with persistent organic pollutants and the ecotoxicological effects: a review. *Tropical Aquatic and Soil Pollution* **2021**, *1*, 24. [[Crossref](#)]
207. He, S.; Jia, M.; Xiang, Y.; Song, B.; Xiong, W.; Cao, J.; Peng, H.; Yang, Y.; Wang, W.; Yang, Z.; Zeng, G.; Biofilm on microplastics in aqueous environment: physicochemical properties and environmental implications. *Journal of Hazardous Materials* **2022**, *424*, 127286. [[Crossref](#)]
208. Du, S.; Zhu, R.; Cai, Y.; Xu, N.; Yap, P. S.; Zhang, Y.; He, Y.; Zhang, Y.; Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: a review. *RSC Advances* **2021**, *11*, 15762. [[Crossref](#)]