

TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM SOLOS

Rodrigo da Silva Neu*

Ms. James Michael Silva*

Profª Drª Vanessa Nunes Alves*

Resumo: Os microplásticos (MP), são definidos como partículas de plástico com diâmetros menores que 5 mm, e têm se consolidado como uma preocupação ambiental crescente. Eles podem se originar tanto da fragmentação de resíduos plásticos maiores quanto da produção intencional em escala reduzida, e permanecem no ambiente devido à sua baixa taxa de degradação. Esses poluentes já foram detectados em ecossistemas marinhos, de água doce, terrestres e até mesmo na atmosfera. Enquanto a ocorrência de MP em ambientes aquáticos vem sendo investigada desde a década de 1970, o estudo de sua presença em solos só ganhou destaque a partir de 2012. A literatura científica tem demonstrado diversos impactos decorrentes dessa contaminação, incluindo alterações nas propriedades físico-químicas do solo, o transporte de substâncias tóxicas e a inserção dos MP na cadeia alimentar, com potenciais efeitos em plantas, animais e seres humanos. A principal entrada de MP nos solos ocorre pela deposição atmosférica, descarte de lixo, aplicação de lodo de esgoto, uso de filmes plásticos na agricultura e fertilizantes orgânicos. Para identificar e quantificar a presença de MP nos solos, diferentes técnicas analíticas vêm sendo aplicadas. Entre as mais utilizadas destacam-se a pirólise acoplada à cromatografia gasosa com detecção por espectrometria de massas (Py-GC/MS), considerada promissora por permitir análises em nível molecular, além das espectroscopias de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e Raman. Outros métodos, como a cromatografia líquida e a análise térmica, também são empregados, muitas vezes de forma complementar, para caracterizar os MP e os contaminantes a eles associados. Assim, neste trabalho será feita uma revisão bibliográfica a respeito das diferentes metodologias analíticas empregadas para a identificação e quantificação dos MP em solos, destacando as técnicas mais utilizadas e adequadas para este poluente.

Palavras-chave: Microplásticos; Poluentes emergentes; Análise qualitativa; Análise quantitativa.

* Instituto de Química – UFCAT: rsneu15@gmail.com, james.silva19@discente.ufcat.edu.br, vanessa.nunes@ufcat.edu.br

A INDÚSTRIA DOS PLÁSTICOS

Uma das descobertas mais importantes da indústria do plástico aconteceu em 1907 pelo químico e inventor belga Leo Hendrik Baekeland. Conhecido como o pai da indústria do plástico, ele criou e patenteou o processo de produção do primeiro polímero totalmente sintético e insolúvel, conhecido como baquelite, e obtido a partir de reações entre o fenol e formaldeído (ANDERSON, 1991). Uma de suas grandes conquistas foi transformar a palavra plástico de adjetivo em substantivo; seu significado original é derivado da palavra latina *plasticus* que significa moldável (ROTHMAN, RYAN, 2022). Desde então, o plástico passou a ser amplamente utilizado por diversos segmentos da indústria.

PRODUÇÃO DE PLÁSTICOS NO MUNDO

A partir da invenção dos plásticos, outros polímeros foram sendo descobertos e sua utilização e produção crescem a cada ano em escala comercial.

Os plásticos são materiais utilizados no setor industrial, agrícola e na vida diária graças às suas propriedades físicas e químicas, e ao baixo custo de produção (JUNHAO, XINING, *et al.*, 2021).

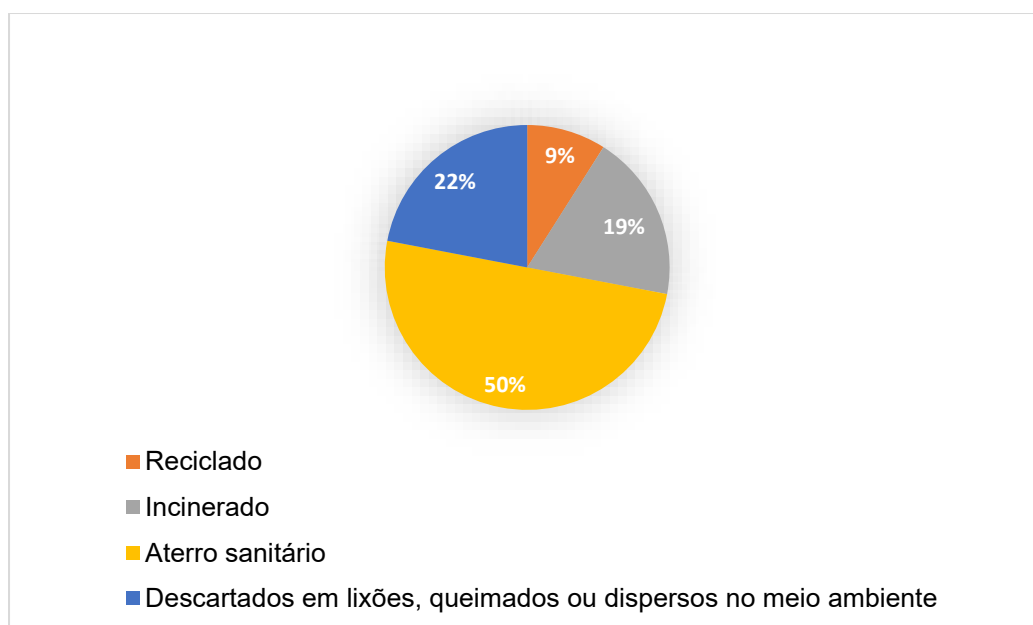
A utilização global anual de plásticos, incluindo fibras e aditivos, tem crescido continuamente, atingindo uma produção de 400,3 milhões de toneladas (Mt) em 2022, onde 90,6% dos plásticos são provenientes de fontes fósseis. Os plásticos em embalagens, construção e transporte representam, em conjunto, mais de 60% em peso da utilização de plásticos.

Mais de 80% dos plásticos produzidos atualmente são de quatro tipos: poliolefinas como o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno de alta densidade (PEAD), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) e politereftalato de etileno (PET), todos provenientes do petróleo, uma fonte fóssil (ROTHMAN, RYAN, 2022). Estima-se que a produção de plásticos triplique até 2060 (OECD, 2022, PLASTICS EUROPE, 2023).

DESTINO E DESCARTE DOS PLÁSTICOS

Apesar da alta produção mundial de plásticos e a alta demanda de uso que crescem continuamente, surge a preocupação pelo descarte inadequado e consequente poluição do ambiente. Segundo um estudo feito pela OECD (2022), em 2019, de 460 Mt de plásticos produzidos mundialmente, foram gerados 353 Mt de resíduos plásticos. Desse resíduo, apenas 55 Mt foram coletados para reciclagem, mas 22 Mt acabaram como resíduo de reciclagem submetido a outras formas de descarte, conforme mostrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Destino dos resíduos plásticos produzidos em 2019.



Fonte: OECD (2022)

Dos 22 Mt de resíduos plásticos liberados no meio ambiente, a maior parte é composta por macrolásticos (19,4 Mt), principalmente devido à coleta e ao descarte inadequados (82%). Também contribuem o descarte ilegal ou despejo de entulho (5%) e as atividades marítimas (1%). Os microplásticos, que correspondem a 12% do total, apresentam como principais fontes o desgaste de pneus e de marcações rodoviárias, além da perda de pellets industriais e da fragmentação de fibras têxteis sintéticas (OECD, 2022).

De acordo com os dados do estudo feito pelo Fundo Mundial para a Natureza, o Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico do mundo, atrás apenas de Estados Unidos, China e Índia. O Brasil é um dos países que menos recicla no mundo, bem abaixo da média mundial que é de 9%. Dentre os maiores produtos de lixo plástico, apenas 1,2% é reciclado, ou seja, 145.043 toneladas (KAZA, YAO, *et al.*, 2018). Esse baixo índice se deve ao fato de que muitos desses materiais são plásticos descartáveis, o que dificulta o processo de reciclagem, representando uma parcela significativa da poluição plástica global. Os impactos do ponto de vista ecológico e ambiental, aliados aos prejuízos estéticos e econômicos causados pelo descarte inadequado desses resíduos, tornaram a poluição plástica alvo de ações e pesquisas nas mais diferentes áreas em âmbito mundial (MONTAGNER, DIAS, *et al.*, 2021).

POLUIÇÃO PLÁSTICA

Os plásticos feitos a partir de fontes fósseis têm um pouco mais de um século. Sendo que, a produção e o desenvolvimento de milhares de novos produtos plásticos aceleraram após a Segunda Guerra Mundial, transformando de tal forma a era moderna que a vida sem plásticos seria hoje irreconhecível (PARKER, 2019). Estima-se que 8,3 bilhões de toneladas métricas de plástico tenham sido produzidas desde a década de 1950, com aproximadamente 60% sendo descartadas em aterros sanitários ou no meio ambiente (RANGEL-BUITRAGO, BEN-HADDAD, *et al.*, 2024). Em razão de um baixo volume de reciclagem e de uma gestão ineficiente no descarte dos resíduos plásticos, a poluição gerada a partir do acúmulo no meio ambiente de grandes quantidades deste material, tem se tornado uma ameaça em todo o mundo (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021, OKOFFO, RIBEIRO, *et al.*, 2020).

A poluição plástica é uma questão ambiental preocupante ao mesmo nível de outras ameaças ambientais como as mudanças climáticas e as invasões biológicas. O lixo plástico se tornou uma pauta importante nas discussões ambientais que levou a esforços para redigir um tratado global negociado pelas Nações Unidas (PARKER, 2019, PEGADO, ANDRADES, *et al.*, 2024).

A maioria dos plásticos de consumo são projetados para uso único, com reciclabilidade limitada. Muitos destes produtos, como sacos de plástico e embalagens de alimentos, presentes no dia-a-dia da sociedade têm uma vida útil de apenas alguns

minutos a horas, mas podem persistir no ambiente durante centenas de anos. Apesar dos inúmeros benefícios que a sociedade dispõe pela utilização dos plásticos, a baixa degradação destes materiais combinada com a alta produção e descarte inadequado, torna a poluição plástica uma grave ameaça aos ecossistemas naturais, à saúde humana e à sustentabilidade (PEGADO, ANDRADES, *et al.*, 2024, WALKER, FEQUET, 2023).

Os resíduos plásticos são descartados no solo, em mares e ambientes aquáticos de água doce, sendo degradados e acumulados no meio ambiente (LA NASA, BIALE, *et al.*, 2021, STEINMETZ, KINTZI, *et al.*, 2020). Contudo, os sistemas fluviais são importantes receptores de resíduos plásticos, tornando-se um dos principais meios de transferência da terra para os oceanos. A durabilidade dos materiais plásticos permite que eles persistam no meio ambiente por longos períodos. Uma das consequências dessa poluição plástica é a decomposição gradual em pequenos fragmentos através da exposição a fatores ambientais, como abrasão física e radiação UV. Estas pequenas partículas de plástico são conhecidas como microplásticos (MP) (HE, LU, *et al.*, 2024).

DEFINIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS

O termo “microplástico” surge pela primeira vez no trabalho de Thompson e colaboradores (2004) onde detritos plásticos microscópicos foram encontrados em sedimentos coletados das praias, plânctons e colunas de água desde o Reino Unido até a Islândia (THOMPSON, OLSEN, *et al.*, 2004).

O primeiro relato envolvendo a presença dos MP no meio ambiente foi publicado em 1972, quando partículas de poliestireno (PS) entre 0,1 a 2 mm foram encontradas em redes de plâncton, em águas costeiras na região da Nova Inglaterra, nos Estados Unidos (CARPENTER, ANDERSON, *et al.*, 1972). No Brasil, neste mesmo ano, também foram registradas e identificadas a presença de partículas de polietileno (PE) e PS no litoral do Rio Grande do Sul. Uma vez que a problemática da poluição pelos MP foi reconhecida pela primeira vez neste período, devido à ingestão por organismos marinhos, os estudos dos impactos à biota marinha também se tornaram crescentes no meio científico (SCHNEIDER, MAFFESSONI, 2024).

Embora não haja um consenso científico ou regulatório para definir o tamanho destes materiais, são considerados MP as partículas com tamanhos menores que 5 mm (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021). Essa definição foi proposta em 2009 pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e, desde então, a maioria das publicações tem adotado como referência (MONTAGNER, DIAS, *et al.*, 2021). Já outros autores definem os MP a partir do tamanho entre 1 a 1000 μm (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021, STEINMETZ, KINTZI, *et al.*, 2020).

Já os nanoplásticos (NP) são as partículas menores que 1 μm (1000 nm) (STEINMETZ, KINTZI, *et al.*, 2020). Enquanto alguns trabalhos consideram o tamanho de NP com um valor máximo de 1000 nm, outros utilizam um valor máximo de 100 nm (JUNHAO, XINING, *et al.*, 2021) e inclusive entre 0,001 a 1 μm ou 1 a 1000 nm (WAHL, LE JUGE, *et al.*, 2021). Também há autores que não definem NP, onde incluem as partículas em que estejam entre 100 a 1000 nm como MP (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021). Neste trabalho, será utilizada a definição proposta pela NOAA.

Os MP podem ser classificados, conforme a sua origem, em primários e secundários (SONG, WANG, *et al.*, 2024). Os processos de produção e as respectivas formas de utilização dessas duas categorias são mostrados na Figura 1.

Figura 1 – Produção e utilização de microplásticos primários e secundários.



Fonte: AHMED, RAHMAN, *et al.* (2021); KRAUSKOPF, HEMMERICH, *et al.*, (2020)

Estes poluentes podem apresentar algum risco ao ecossistema e não estão incluídos nos programas de monitoramento de rotina, ou seja, não são legislados. Por isso são definidos como contaminantes emergentes (MONTAGNER, VIDAL, *et al.*, 2017).

Atualmente, a ocorrência dos MP está documentada na literatura em ambientes terrestres e aquáticos, como ecossistemas marinhos e de água doce, fundo do mar, áreas urbanas, organismos vivos e no ar (GASPERI, WRIGHT, *et al.*, 2018, GOMIERO, ØYSAED, *et al.*, 2021, OKOFFO, RIBEIRO, *et al.*, 2020). Trabalhos na literatura documentaram a presença deste poluente em locais remotos no planeta terra. Para citar alguns, há o relato da ocorrência de MP em organismos marinhos provenientes da Fossa das Marianas, o local mais profundo da Terra já registrado (JAMIESON, BROOKS, *et al.*, 2019), MP detectados em águas que formam as nuvens sob altas altitudes (1300 a 3776 m) do Monte Fuji e Monte Oyama no Japão (WANG, OKOCHI, *et al.*, 2023) e em um dos pontos mais altos do planeta, onde MP foram encontrados na neve e água de riachos a 8440 m de altitude no Monte Everest (NAPPER, DAVIES, *et al.*, 2020).

Os MP tem sido uma preocupação, pois devido ao seu tamanho, podem entrar na cadeia alimentar em ecossistemas terrestres e aquáticos oferecendo riscos à biota e aos humanos (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021, DA COSTA, 2018, OKOFFO, RIBEIRO, *et al.*, 2020). Outra preocupação da presença de MP consiste na capacidade de absorverem, transportarem e liberarem substâncias tóxicas para o meio ambiente.

Quando entram em contato com outros poluentes orgânicos como aditivos, plastificantes patogênicos, produtos farmacêuticos, de cuidado pessoal e metais, (especialmente metais tóxicos como As, Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Hg e Ni) atuam como vetores para estes poluentes potencialmente perigosos. Como são liberados simultaneamente com os MP, estes poluentes são expostos ao ambiente circundante e, conseqüentemente, transferidos para os seres humanos através da cadeia alimentar (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021, LA NASA, BIALE, *et al.*, 2021, LEE, JEONG, 2023).

Trabalhos na literatura reportam a presença de MP no corpo humano. A partir de dados da literatura, os MP foram documentados e encontrados no cérebro

(NIHART, GARCIA, *et al.*, 2025), no sangue humano (LESLIE, VAN VELZEN, *et al.*, 2022, V. L. LEONARD, LIDDLE, *et al.*, 2024), nos pulmões (HUANG, SHANG, *et al.*, 2025), na placenta (OLIVEIRA, OLIVEIRA, *et al.*, 2025, RAGUSA, SVELATO, *et al.*, 2021), no leite materno (LAI, LIU, *et al.*, 2022, RAGUSA, NOTARSTEFANO, *et al.*, 2022) e no coração (YANG, XIE, *et al.*, 2023).

De acordo com o trabalho de Danopoulos e colaboradores (2022), um dos principais efeitos relatados nas células humanas à exposição aos MP é a citotoxicidade. Embora sejam necessários mais resultados para evidências conclusivas relacionadas ao impacto dos MP à saúde humana, trabalhos publicados na literatura relatam um efeito preocupante causado pela ingestão de plásticos, como a desregulação endócrina em animais e humanos. Além disso, também foram observados outros efeitos como a indução de respostas neurotóxicas, desenvolvimento de doenças metabólicas e diminuição nos níveis de ATP celular (COOK, HALDEN, 2020).

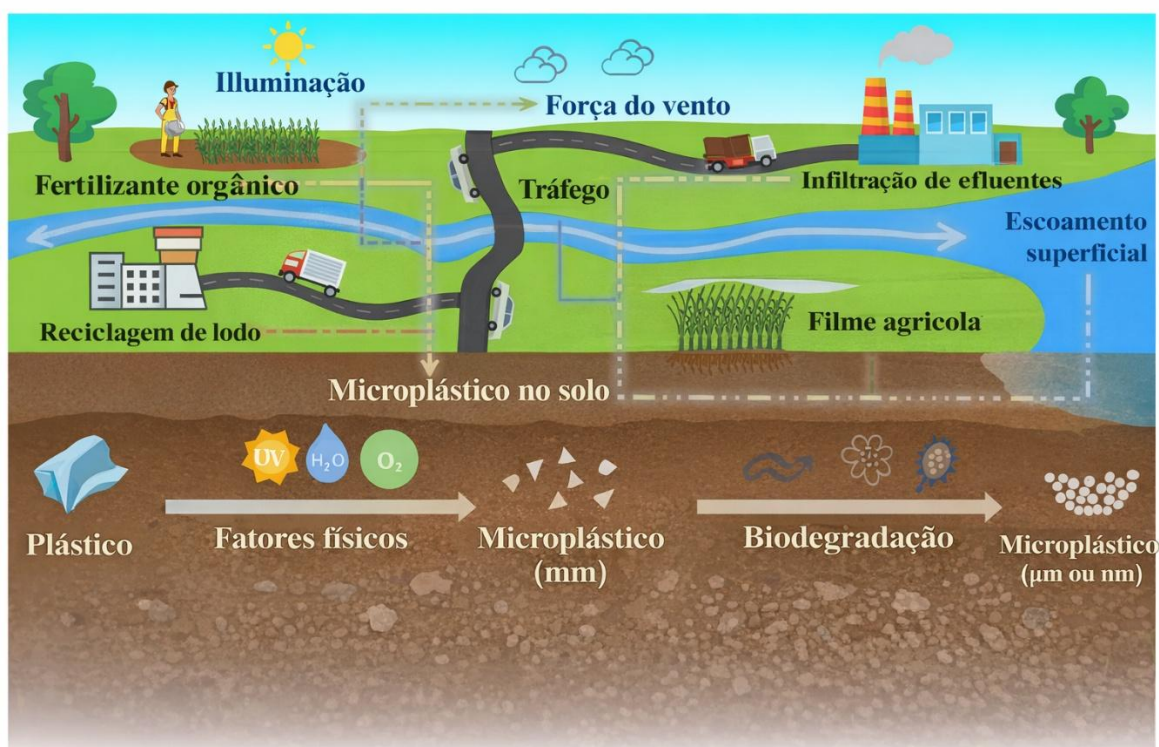
MICROPLÁSTICOS NO SOLO

Desde a virada do século, a pesquisa sobre a presença de MP no ambiente ganhou atenção da comunidade científica, onde a maioria das publicações incide sobre os ecossistemas marinhos (ŠUNTA, TREBŠE, *et al.*, 2021). A presença de MP no ambiente marítimo é estudada desde o início dos anos 70. Já em solos, o primeiro trabalho foi publicado em 2012 (JUNHAO, XINING, *et al.*, 2021). Porém, a pesquisa de MP em ambientes terrestres tem aumentado nos últimos anos. Segundo relatado na literatura, o acúmulo de MP em solos pode ser quatro vezes maior quando comparado aos ambientes aquáticos, onde a ocorrência é maior em solos agrícolas (ŠUNTA, TREBŠE, *et al.*, 2021).

Estudos reportados na literatura demonstram a ocorrência dos MP em tecidos de plantas e animais do ecossistema terrestre. No entanto, ainda há a escassez de trabalhos publicados, devido à dificuldade em entender a complexidade do comportamento e distribuição dos MP no solo, assim como a dificuldade dos métodos analíticos em garantir a precisão nas análises a partir de um baixo custo e alta eficiência (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021).

A presença dos MP nos solos é oriunda da deposição atmosférica, lixo, lodo de esgoto, uso de filmes plásticos na agricultura e fertilizantes orgânicos, onde as duas últimas correspondem às maiores fontes poluidoras, conforme mostrado na Figura 2. (FAN, QIU, *et al.*, 2023, STEINMETZ, KINTZI, *et al.*, 2020, ZHANG, WANG, *et al.*, 2021). Nos sistemas aquáticos, a poluição ocorre a partir de solos, areia do mar, efluentes domésticos e esgotos descartados diretamente nos corpos hídricos, indústrias de manufatura de plástico e pela decomposição de materiais plásticos no ambiente, onde os efluentes das estações de tratamento de água e os MP secundários são as maiores fontes poluidoras de MP no ambiente (AHMED, RAHMAN, *et al.*, 2021, XU, MA, *et al.*, 2020, ZHANG, WANG, *et al.*, 2021).

Figura 2 – Fontes de poluição dos MP em solo e o transporte pelo meio ambiente



Fonte: FAN, QIU, *et al.* (2023)

Quando entram em contato com o solo, os MP podem se acumular e persistir por muito tempo, pois as condições de pouca iluminação e oxigênio favorecem a preservação do material. Com isso, os MP interagem com a fauna e a flora do solo,

alterando suas propriedades físicas e químicas, afetando suas funções. Além disso, podem ser absorvidos pelas plantas e serem transportados para a cadeia alimentar (LAMICHHANE, ACHARYA, *et al.*, 2023). Os efeitos da presença dos MP no solo estão documentados na literatura. Segundo Wang e colaboradores (2022), os MP podem alterar as propriedades físico-químicas do solo como pH, densidade, agregação, estrutura, capacidade de absorção de água, porosidade, condutividade elétrica.

A exposição aos MP pode afetar a germinação de sementes, diminuição no crescimento das plantas e mortalidade de microrganismos presentes no solo (LAMICHHANE, ACHARYA, *et al.*, 2023). De Souza Machado e colaboradores (2019), em um estudo a partir da exposição da cebolinha (*Allium fistulosum*) aos polímeros PE, PP, PET, PS, fibras de poliéster e grânulos de poliamida no solo, observou que a presença destes materiais inibia a germinação das sementes. Ainda foi observado que os MP foram transportados para o caule e folhas, a partir da absorção pelas raízes, interferindo no crescimento da planta.

Os riscos da poluição plástica não estão relacionados apenas com a alteração do solo e o impacto na biota. Durante seu ciclo de vida e sua mobilidade pelo solo, os MP podem adsorver substâncias tóxicas, como plastificantes, antioxidantes, pigmentos, retardantes de chama, aditivos, metais tóxicos, fármacos, poluentes orgânicos e patógenos e genes de resistência que podem ser transportados e liberados no meio ambiente e em outros habitats. Além disso, podem entrar na cadeia alimentar a partir da ingestão destes MP pelos animais ou a partir do contato e absorção pelas plantas (FAN, QIU, *et al.*, 2023, SCOPETANI, CHELAZZI, *et al.*, 2022, SHANMUGAM, PRAVEENA, *et al.*, 2022).

No estudo de MP em solos, as publicações ainda são limitadas quando comparadas aos sistemas aquáticos, pois ainda é um desafio compreender sua distribuição e comportamento ambiental nos solos (ZHANG, WANG, *et al.*, 2021). Por conta do impacto ambiental, da saúde humana e animal pelos MP, é importante desenvolver metodologias analíticas que sejam capazes de identificar e quantificar estes materiais, para entender como ocorre a distribuição e qual o destino destes poluentes, com o objetivo de caracterizar os riscos envolvidos pela sua exposição e evitar a sua liberação no ambiente (HERMABESSIERE, ROCHMAN, 2021, LA NASA, BIALE, *et al.*, 2021).

TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MICROPLÁSTICOS

A preocupação pela poluição do ar, água, solo e da biota por MP em escala mundial tem destacado a necessidade da comunidade científica em definir o objetivo e o tamanho do problema, além de desenvolver, avaliar e otimizar estratégias eficientes para seu monitoramento. Entretanto, um dos desafios que envolve o estudo a respeito deste poluente é a variabilidade de amostras, pois os MP podem ser encontrados em uma ampla variedade de matrizes e em diferentes tamanhos, formatos e composição química (LA NASA, BIALE, *et al.*, 2021, MATSUEDA, MATTONAI, *et al.*, 2021).

Várias técnicas analíticas para a identificação e quantificação dos MP estão descritas na literatura. Em geral, essas metodologias envolvem a combinação de mais de uma técnica, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) aliada às técnicas espectroscópicas, como a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microespectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (μ -FTIR) espectroscopia Raman, extração e dessorção térmica seguida de análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (TED-GC/MS), termogravimetria diretamente acoplada ao espectrômetro de massas (TGA/MS), análise de gás gerado por espectrômetro de massas (EGA-MS) ou pirólise acoplada à cromatografia gasosa com espectrômetro de massas (Py-GC/MS) (BIALE, LA NASA, *et al.*, 2021, ŠUNTA, TREBŠE, *et al.*, 2021).

Métodos padronizados para a coleta, manuseio, separação e preparação da amostra, além da identificação dos MP estão em estágios iniciais de desenvolvimento. Algumas das tecnologias disponíveis que fornecem resultados positivos e reprodutíveis na identificação dos MP incluem Py-GC/MS, FTIR e espectroscopia Raman (PIPKIN, BELGANEH, *et al.*, 2021).

A Py-GC/MS é a técnica mais comumente utilizada na identificação dos tipos de polímeros. É considerada uma técnica promissora para a caracterização dos MP, pois utiliza compostos específicos gerados na decomposição térmica de polímeros para identificação em amostras ambientais, sendo capaz de fornecer informações a nível molecular, independentemente do tamanho e do formato da amostra, e dados qualitativos em misturas complexas de polímeros, graças a separação cromatográfica

e detecção pela espectrometria de massas dos produtos resultantes da pirólise da amostra (MATSUEDA, MATTONAI, *et al.*, 2021, OKOFFO, RIBEIRO, *et al.*, 2020).

Uma alternativa, menos frequente, é a técnica da cromatografia líquida (CL). A vantagem deste método é a análise de um maior número de amostras, aumentando a representatividade na caracterização dos MP e alta recuperação dos polímeros, mesmo que seja um método destrutivo. Além disso, a análise por CL ainda é pouco explorada (WU, YANG, *et al.*, 2020). Embora seja uma técnica sensível e altamente reprodutível, a utilização da CL para a análise de MP depende da solubilidade dos polímeros em eluentes orgânicos (THOMAS, SCHÜTZE, *et al.*, 2020).

No entanto, na análise de PET em solos, uma preparação e extração da amostra previamente à análise por CL, melhora o sinal dos polímeros presentes, mesmo em matrizes complexas (MÜLLER, GOEDECKE, *et al.*, 2020). A CL é uma técnica utilizada com sucesso para a identificação e quantificação de polímeros como PET, policarbonatos (PC) e outros a base de náilon (ADHIKARI, KELKAR, *et al.*, 2022, CASTELVETRO, CORTI, *et al.*, 2021). São poucos os trabalhos desenvolvidos para a análise de MP utilizando CL. O uso mais comum da técnica está na análise de contaminantes adsorvidos pelos MP, como fármacos (PUCKOWSKI, CWIEK, *et al.*, 2021), pesticidas (WANG, Ting, YU, *et al.*, 2020), desreguladores endócrinos (CHEN, ALLGEIER, *et al.*, 2019) ou produtos de degradação. Os MP mais comumente analisados por CL são o PET e o PC (CASTELVETRO, CORTI, *et al.*, 2020, ELERT, BECKER, *et al.*, 2017, WANG, ZHANG, *et al.*, 2017, YAN, YANG, *et al.*, 2022), pois a partir da despolimerização, os monômeros gerados por estes MP podem ser analisados por CL.

Já a análise térmica tem como base a identificação do polímero de acordo com os seus produtos de degradação. A análise térmica é composta por diferentes técnicas analíticas, e entre elas estão a termogravimetria (TGA) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC). Contudo, tanto a TGA quanto a DSC costumam estar associadas a outras técnicas como a termogravimetria acoplada ao detector de espectrometria de massas (TGA-MS), termogravimetria com dessorção térmica combinada a cromatografia gasosa acoplada a detector de espectrometria de massas (TGA-TD-GC-MS), análise por extração e dessorção térmica (TED) associada a outras técnicas, como a análise por extração e dessorção térmica acoplada a detector de espectrometria de massas (TED-MS). Além disso, as técnicas termoanalíticas podem

ser aplicadas em conjunto ou de maneira complementar as técnicas espectroscópicas como Raman e FTIR. Também é considerada uma técnica termoanalítica a Py-GC-MS, devido a utilização da pirólise (Py) (PEÑALVER, ARROYO-MANZANARES, *et al.*, 2020, PEREZ, CARRÉ, *et al.*, 2022, THOMAS, SCHÜTZE, *et al.*,). Dentre elas, uma técnica que se mostra como uma boa alternativa para a caracterização dos MP ou complementar às outras técnicas é a termogravimetria acoplada à calorimetria exploratória diferencial (TGA-DSC), pois apresenta fácil operação e baixo custo, além da vantagem em aproveitar as informações fornecidas em ambas as técnicas quando acopladas (PEÑALVER, ARROYO-MANZANARES, *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, S., KELKAR, V., KUMAR, R., *et al.* "Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini-review", **Polymer International**, v. 71, n. 5, p. 543–551, maio 2022. DOI: 10.1002/pi.6348.
- AHMED, M. B., RAHMAN, M. S., ALOM, J., *et al.* "Microplastic particles in the aquatic environment: A systematic review", **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145793, jun. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145793.
- ANDERSON, K. J. "The Development of Polymers", **MRS Bulletin**, v. 16, n. 7, p. 58–58, jul. 1991. DOI: 10.1557/S0883769400056578.
- BIALE, G., LA NASA, J., MATTONAI, M., *et al.* "A Systematic Study on the Degradation Products Generated from Artificially Aged Microplastics", **Polymers**, v. 13, n. 12, p. 1997, 18 jun. 2021. DOI: 10.3390/polym13121997.
- CARPENTER, E. J., ANDERSON, S. J., HARVEY, G. R., *et al.* "Polystyrene Spherules in Coastal Waters", **Science**, v. 178, n. 4062, p. 749–750, 17 nov. 1972. DOI: 10.1126/science.178.4062.749.
- CASTELVETRO, V., CORTI, A., BIANCHI, S., *et al.* "Quantification of poly(ethylene terephthalate) micro- and nanoparticle contaminants in marine sediments and other environmental matrices", **Journal of Hazardous Materials**, v. 385, p. 121517, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121517.
- CASTELVETRO, V., CORTI, A., LA NASA, J., *et al.* "Polymer Identification and Specific Analysis (PISA) of Microplastic Total Mass in Sediments of the

- Protected Marine Area of the Meloria Shoals", **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 796, 5 mar. 2021. DOI: 10.3390/polym13050796.
- CHEN, Q., ALLGEIER, A., YIN, D., *et al.* "Leaching of endocrine disrupting chemicals from marine microplastics and mesoplastics under common life stress conditions", **Environment International**, v. 130, p. 104938, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104938>.
- COOK, C. R., HALDEN, R. U., "Ecological and health issues of plastic waste". **Plastic Waste and Recycling**, [S.l.], Elsevier, 2020. p. 513–527. DOI: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00020-7.
- DA COSTA, J. P. "Micro- and nanoplastics in the environment: Research and policymaking", **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 1, p. 12–16, fev. 2018. DOI: 10.1016/j.coesh.2017.11.002.
- DANOPOULOS, E., TWIDDY, M., WEST, R., *et al.* "A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells", **Journal of Hazardous Materials**, v. 427, p. 127861, abr. 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127861.
- DE SOUZA MACHADO, A. A., LAU, C. W., KLOAS, W., *et al.* "Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance", **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 10, p. 6044–6052, 21 maio 2019. DOI: 10.1021/acs.est.9b01339.
- ELERT, A. M., BECKER, R., DUEMICHEN, E., *et al.* "Comparison of different methods for MP detection: What can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters?", **Environmental Pollution**, v. 231, p. 1256–1264, dez. 2017. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.074.
- FAN, W., QIU, C., QU, Q., *et al.* "Sources and identification of microplastics in soils", **Soil & Environmental Health**, v. 1, n. 2, p. 100019, jun. 2023. DOI: 10.1016/j.seh.2023.100019.
- GASPERI, J., WRIGHT, S. L., DRIS, R., *et al.* "Microplastics in air: Are we breathing it in?", **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 1, p. 1–5, fev. 2018. DOI: 10.1016/j.coesh.2017.10.002.
- GOMIERO, A., ØYSAED, K. B., PALMAS, L., *et al.* "Application of GCMS-pyrolysis to estimate the levels of microplastics in a drinking water supply system", **Journal**

- of Hazardous Materials**, v. 416, p. 125708, ago. 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125708.
- HE, Y., LU, J., LI, C., *et al.* "From pollution to solutions: Insights into the sources, transport and management of plastic debris in pristine and urban rivers", **Environmental Research**, v. 245, p. 118024, 15 mar. 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2023.118024.
- HERMABESSIERE, L., ROCHMAN, C. M. "Microwave-Assisted Extraction for Quantification of Microplastics Using Pyrolysis–Gas Chromatography/Mass Spectrometry", **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 40, n. 10, p. 2733–2741, out. 2021. DOI: 10.1002/etc.5179.
- HUANG, Y., SHANG, P., LI, Y., *et al.* "Lung hazards of microplastics and their toxicological mechanisms", **Environmental Pollution**, v. 385, p. 127149, nov. 2025. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.127149.
- JAMIESON, A. J., BROOKS, L. S. R., REID, W. D. K., *et al.* "Microplastics and synthetic particles ingested by deep-sea amphipods in six of the deepest marine ecosystems on Earth", **Royal Society Open Science**, v. 6, n. 2, p. 180667, fev. 2019. DOI: 10.1098/rsos.180667.
- JUNHAO, C., XINING, Z., XIAODONG, G., *et al.* "Extraction and identification methods of microplastics and nanoplastics in agricultural soil: A review", **Journal of Environmental Management**, v. 294, p. 112997, set. 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112997.
- KAZA, S., YAO, L. C., BHADA-TATA, P., *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC, World Bank, 2018.
- KRAUSKOPF, L.-M., HEMMERICH, H., DSIKOWITZKY, L., *et al.* "Critical aspects on off-line pyrolysis-based quantification of microplastic in environmental samples", **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 152, p. 104830, nov. 2020. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104830.
- LA NASA, J., BIALE, G., MATTONAI, M., *et al.* "Microwave-assisted solvent extraction and double-shot analytical pyrolysis for the quali-quantitation of plasticizers and microplastics in beach sand samples", **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, p. 123287, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123287.

- LAI, H., LIU, X., QU, M. "Nanoplastics and Human Health: Hazard Identification and Biointerface", **Nanomaterials**, v. 12, n. 8, p. 1298, 11 abr. 2022. DOI: 10.3390/nano12081298.
- LAMICHHANE, G., ACHARYA, A., MARAHATHA, R., *et al.* "Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures", **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 4, p. 4673–4694, abr. 2023. DOI: 10.1007/s13762-022-04261-1.
- LEE, J., JEONG, S. "Approach to an answer to “How dangerous microplastics are to the human body”: A systematic review of the quantification of MPs and simultaneously exposed chemicals", **Journal of Hazardous Materials**, v. 460, p. 132404, 15 out. 2023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132404.
- LESLIE, H. A., VAN VELZEN, M. J. M., BRANDSMA, S. H., *et al.* "Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood", **Environment International**, v. 163, p. 107199, maio 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107199.
- MATSUEDA, M., MATTONAI, M., IWAI, I., *et al.* "Preparation and test of a reference mixture of eleven polymers with deactivated inorganic diluent for microplastics analysis by pyrolysis-GC–MS", **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 154, p. 104993, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104993.
- MONTAGNER, C., DIAS, M., PAIVA, E., *et al.* "Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos", **Química Nova**, 2021. DOI: 10.21577/0100-4042.20170791.
- MONTAGNER, C., VIDAL, C., ACAYABA, R. "Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios", **Química Nova**, 11 jul. 2017. DOI: 10.21577/0100-4042.20170091.
- MÜLLER, A., GOEDECKE, C., EISENTRAUT, P., *et al.* "Microplastic analysis using chemical extraction followed by LC-UV analysis: a straightforward approach to determine PET content in environmental samples", **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 1, p. 85, dez. 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00358-x.
- NAPPER, I. E., DAVIES, B. F. R., CLIFFORD, H., *et al.* "Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest", **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 621–630, 20 nov. 2020. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.10.020.

- NIHART, A. J., GARCIA, M. A., EL HAYEK, E., *et al.* "Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains", **Nature Medicine**, v. 31, n. 4, p. 1114–1119, abr. 2025. DOI: 10.1038/s41591-024-03453-1.
- OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. Paris, OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/de747aef-en>.
- OKOFFO, E. D., RIBEIRO, F., O'BRIEN, J. W., *et al.* "Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography–mass spectrometry", **Science of The Total Environment**, v. 715, p. 136924, maio 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136924.
- OLIVEIRA, C. W. L., OLIVEIRA, L. F. a. M., GARCIA, J., *et al.* "First evidence of microplastic accumulation in placentas and umbilical cords from pregnancies in Brazil", **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 97, p. e20241298, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520241298>.
- PARKER, L. **The world's plastic pollution crisis explained**. 6 jul. 2019. Environment.
- PEGADO, T., ANDRADES, R., NOLETO-FILHO, E., *et al.* "Meso- and microplastic composition, distribution patterns and drivers: A snapshot of plastic pollution on Brazilian beaches", **Science of The Total Environment**, v. 907, p. 167769, 10 jan. 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167769.
- PEÑALVER, R., ARROYO-MANZANARES, N., LÓPEZ-GARCÍA, I., *et al.* "An overview of microplastics characterization by thermal analysis", **Chemosphere**, v. 242, p. 125170, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125170.
- PEREZ, C. N., CARRÉ, F., HOARAU-BELKHIRI, A., *et al.* "Innovations in analytical methods to assess the occurrence of microplastics in soil", **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107421, jun. 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107421.
- PIPKIN, W., BELGANEH, R., ROBBERTSON, W., *et al.* "Identification of Microplastics in Environmental Monitoring Using Pyrolysis–GC–MS Analysis", **LCGC North America**, v. 39, n. 4, p. 179–186, 7 abr. 2021.
- PLASTICS EUROPE. **Plastic - The Fast Facts 2023**. Bruxelas, [s.n.], 2023.

- PUCKOWSKI, A., CWIEK, W., MIODUSZEWSKA, K., *et al.* "Sorption of pharmaceuticals on the surface of microplastics", **Chemosphere**, v. 263, p. 127976, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127976>.
- RAGUSA, A., NOTARSTEFANO, V., SVELATO, A., *et al.* "Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk", **Polymers**, v. 14, n. 13, p. 2700, 30 jun. 2022. DOI: 10.3390/polym14132700.
- RAGUSA, A., SVELATO, A., SANTACROCE, C., *et al.* "Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta", **Environment International**, v. 146, p. 106274, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106274.
- RANGEL-BUITRAGO, N., BEN-HADDAD, M., NICOLL, K., *et al.* "Marine plastic pollution in the Anthropocene: A linguistic toolkit for holistic understanding and action", **Ocean & Coastal Management**, v. 248, p. 106967, 1 fev. 2024. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106967.
- ROTHMAN, R., RYAN, A. J., "The History and Future of Plastics". **Plastic Pollution in the Global Ocean**, Trends in Aquatic Systems. [S.l.], WORLD SCIENTIFIC, 2022. v. Volume 1. p. 21–46. DOI: 10.1142/9789811259111_0002.
- SCHNEIDER, I., MAFFESSIONI, D. "Plastic Pellets in the Sandy Sediment of Beaches on the Middle Coast of Rio Grande do Sul, Brazil", **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. e04447–e04447, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n2-008.
- SCOPETANI, C., CHELAZZI, D., CINCINELLI, A., *et al.* "Hazardous contaminants in plastics contained in compost and agricultural soil", **Chemosphere**, v. 293, p. 133645, abr. 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133645.
- SHANMUGAM, S. D., PRAVEENA, S. M., SARKAR, B. "Quality assessment of research studies on microplastics in soils: A methodological perspective", **Chemosphere**, v. 296, p. 134026, jun. 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134026.
- SONG, J., WANG, C., LI, G. "Defining Primary and Secondary Microplastics: A Connotation Analysis", **ACS ES&T Water**, v. 4, n. 6, p. 2330–2332, 14 jun. 2024. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00316.
- STEINMETZ, Z., KINTZI, A., MUÑOZ, K., *et al.* "A simple method for the selective quantification of polyethylene, polypropylene, and polystyrene plastic debris in soil by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry", **Journal of**

- Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 147, p. 104803, maio 2020. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104803.
- ŠUNTA, U., TREBŠE, P., KRALJ, M. B. "Simply Applicable Method for Microplastics Determination in Environmental Samples", **Molecules**, v. 26, n. 7, p. 1840, 25 mar. 2021. DOI: 10.3390/molecules26071840.
- THOMAS, D., SCHÜTZE, B., HEINZE, W. M., *et al.* "Sample Preparation Techniques for the Analysis of Microplastics in Soil—A Review", **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9074, 31 out. 2020. DOI: 10.3390/su12219074.
- THOMPSON, R. C., OLSEN, Y., MITCHELL, R. P., *et al.* "Lost at Sea: Where Is All the Plastic?", **Science**, v. 304, n. 5672, p. 838–838, 7 maio 2004. DOI: 10.1126/science.1094559.
- V. L. LEONARD, S., LIDDLE, C. R., ATHERALL, C. A., *et al.* "Microplastics in human blood: Polymer types, concentrations and characterisation using μ FTIR", **Environment International**, v. 188, p. 108751, jun. 2024. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108751.
- WAHL, A., LE JUGE, C., DAVRANCHE, M., *et al.* "Nanoplastic occurrence in a soil amended with plastic debris", **Chemosphere**, v. 262, p. 127784, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127784.
- WALKER, T. R., FEQUET, L. "Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution", **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 160, p. 116984, 1 mar. 2023. DOI: 10.1016/j.trac.2023.116984.
- WANG, F., WANG, Q., ADAMS, C. A., *et al.* "Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives", **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127531, 15 fev. 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127531.
- WANG, L., ZHANG, J., HOU, S., *et al.* "A Simple Method for Quantifying Polycarbonate and Polyethylene Terephthalate Microplastics in Environmental Samples by Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry", **Environmental Science & Technology Letters**, v. 4, n. 12, p. 530–534, 12 dez. 2017. DOI: 10.1021/acs.estlett.7b00454.
- WANG, T., YU, C., CHU, Q., *et al.* "Adsorption behavior and mechanism of five pesticides on microplastics from agricultural polyethylene films", **Chemosphere**, v. 244, p. 125491, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125491>.

- WANG, Y., OKOCHI, H., TANI, Y., *et al.* "Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation", **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 6, p. 3055–3062, 1 dez. 2023. DOI: 10.1007/s10311-023-01626-x.
- WU, M., YANG, C., DU, C., *et al.* "Microplastics in waters and soils: Occurrence, analytical methods and ecotoxicological effects", **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110910, out. 2020. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110910.
- XU, S., MA, J., JI, R., *et al.* "Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects", **Science of The Total Environment**, v. 703, p. 134699, fev. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134699.
- YAN, M., YANG, J., SUN, H., *et al.* "Occurrence and distribution of microplastics in sediments of a man-made lake receiving reclaimed water", **Science of The Total Environment**, v. 813, p. 152430, mar. 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152430.
- YANG, Y., XIE, E., DU, Z., *et al.* "Detection of Various Microplastics in Patients Undergoing Cardiac Surgery", **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 30, p. 10911–10918, 1 ago. 2023. DOI: 10.1021/acs.est.2c07179.
- ZHANG, S., WANG, J., YAN, P., *et al.* "Non-biodegradable microplastics in soils: A brief review and challenge", **Journal of Hazardous Materials**, v. 409, p. 124525, maio 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124525.