

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JOÃO PAULO CANINEO GARCIA

**Desafios na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil – Revisão
Sistemática**

São Paulo

2024

Desafios na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil – Revisão Sistemática

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues.

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Garcia, João Paulo Canineo

Desafios na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil – Revisão Sistemática / J. P. C. Garcia -- São Paulo, 2024.
32 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Microplásticos 2.Ambientes aquáticos 3.Quantificação 4.Análises ambientais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

Garcia, J. P. C. Desafios na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil – Revisão Sistemática. 2024. 32 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A poluição causada por plásticos é uma preocupação crescente na atualidade. Estes materiais, produzidos em grandes quantidades todos os anos, são frequentemente dispostos de maneira inadequada no ambiente, onde passam por alterações de natureza física e química em suas estruturas, fragmentando-se em pedaços menores chamados de microplásticos. Os microplásticos, assim definidos pelas suas dimensões entre 1 μm e 5 mm, apresentam elevada complexidade em seu comportamento e em suas interações com o meio ambiente, sendo seus efeitos deletérios amplamente estudados pela comunidade científica. Neste trabalho, fez-se revisão sistemática para avaliar os principais métodos analíticos atualmente empregados para quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil, verificando seus desafios e aplicabilidade. A literatura consultada demonstrou que a maior parte das publicações nacionais utiliza de métodos visuais e menos complexos, capazes de quantificar os microplásticos no ambiente, porém incapazes de caracterizar a sua composição polimérica ou quantificar contaminantes sorvidos no material. A inexistência de um padrão de referência metodológico para quantificação de microplásticos é um desafio citado por vários autores, e que também dificulta o trabalho de comparação de resultados entre diferentes pesquisas.

Palavras-chave: Microplásticos. Ambientes aquáticos. Quantificação. Análises ambientais.

ABSTRACT

Garcia, J. P. C. Challenges in quantifying microplastics in aquatic environments in Brazil – Systematic Review. 2024. 32 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Plastic pollution is a growing concern nowadays. These materials, produced in large quantities every year, are often disposed of inappropriately in the environment, where they undergo physical and chemical changes in their structures, fragmenting into smaller pieces called microplastics. Microplastics, defined by their dimensions between 1 μm and 5 mm, present high complexity in their behavior and interactions with the environment, and their harmful effects are widely studied by the scientific community. This work carried out a systematic review of publications to evaluate the main analytical methods currently used to quantify microplastics in aquatic environments in Brazil and around the world, verifying their challenges and applicability. The literature consulted demonstrated that most national publications use visual and less complex methods, capable of quantifying microplastics in the environment, but unable to characterize their polymeric composition or quantify contaminants sorbed into the material. The lack of a methodological reference standard for quantifying microplastics is a challenge cited by several authors, and which also makes it difficult to compare results between different studies.

Keywords: Microplastics. Aquatic environments. Quantification. Environmental analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1-1 – Principais polímeros que constituem os microplásticos.....	13
Figura 4.4-1 – Dinâmica de resíduos plásticos em um ambiente costeiro.....	17
Figura 4.4-2 – Métodos de amostragem de microplásticos.....	18
Figura 4.4-3 – Sistema de amostragem com bombeamento.....	19
Figura 4.4-4 – Etapas de quantificação de microplásticos.....	20
Figura 6-1 – Possibilidades analíticas na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos.....	29
Figura 6-2 – Fluxograma para planejamento do monitoramento de microplásticos.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2-1 – Aditivos empregados nos principais tipos de plásticos.....	14
Tabela 4.4-1 – Metodologias empregadas em estudos de quantificação de microplásticos em matrizes ambientais no Brasil.....	21
Tabela 4.4-2 – Metodologias aplicadas para quantificação de microplásticos em ensaios ecotoxicológicos.....	23
Tabela 5-1 – Publicações científicas utilizadas.....	24
Tabela 6-1 – Tipos de amostragem adotados nas publicações internacionais.....	26
Tabela 6-2 – Tipos de amostragem adotados nas publicações nacionais.....	27
Tabela 6-3 – Metodologias empregadas nas publicações nacionais.....	27

LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria de Plástico.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

CG-MS – Cromatografia Gasosa Acoplada à Espectrometria de Massas.

ICP-OES – Espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente.

MP – Microplástico(s).

PA – Poliamida.

PAH's – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos.

PC – Policarbonato.

PCB's – Bifenilas Policloradas.

PBDE's – Éteres de Difenilas Polibromados.

PE – Polietileno.

PET – Politereftalato de Etileno.

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos.

PP – Polipropileno.

PS – Poliestireno.

PVC – Policloreto de Vinila.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

UNEA – Assembleia Ambiental das Nações Unidas.

UV – Ultravioleta.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	10
3	JUSTIFICATIVA	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1	Definições e características	12
4.2	Microplásticos no ambiente	13
4.3	Microplásticos em ambientes aquáticos	14
4.4	Quantificação dos Microplásticos	16
5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o documento Perfil 2022, da Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST, 2022), a produção global de plásticos no ano de 2021 foi de 390,7 milhões de toneladas, sendo a China responsável pela maior produção mundial, equivalente a 32% do total. Neste mesmo ano, a indústria de plástico brasileira respondeu por 2% da produção global, ou cerca de 7,8 milhões de toneladas.

Ainda segundo o Perfil 2022 (ABIPLAST, 2022), 40,1% dos plásticos que foram consumidos em 2020 apresentam ciclo de vida curto (até 1 ano), sendo principalmente empregados nas indústrias de alimentos (21,9%), bebidas (6%), perfumaria, higiene e limpeza (3,2%) e química (3%). Cabe destacar a fração correspondente aos plásticos descartáveis, de 1,9% do total, que sabidamente são utilizados apenas uma vez antes de seu descarte.

Diante dos dados referentes à produção e ao consumo dos plásticos, fica evidente o desafio no gerenciamento ambiental destes materiais, que inevitavelmente serão descartados após sua utilização.

Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022 (ABRELPE, 2022), foram gerados aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil em 2022, representando uma média de 1,04 kg por habitante por dia. Embora esta publicação não apresente a composição gravimétrica dos resíduos coletados, uma análise da Abordagem Metodológica referente ao Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2020 (ABRELPE, 2020) permite constatar a fração estimada de materiais plásticos nos RSU em cada região brasileira, sendo 13,2% na região Norte, 15,6% na região Sudeste, 16,8% na região Centro-oeste, 16,9% na região Sul e 17,9% na região Nordeste.

Desta forma, extrapolando-se os dados gravimétricos obtidos em 2020 para os dados de geração total de resíduos apresentados no documento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) de 2022, estima-se um total aproximado de resíduos plásticos gerados em 2022 no Brasil entre 10,8 e 14,6 milhões de toneladas. Considerando a produção nacional já mencionada, de aproximadamente 7,8 milhões de toneladas anuais, se observa então que a geração de resíduos plásticos no Brasil seja maior que o total produzido.

É importante salientar que, por definição, os RSU são aqueles gerados pelas atividades domésticas (resíduo domiciliar) e atividades públicas (resíduos públicos), conforme descrito

pelo Diagnóstico Temático – Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Visão Geral (Brasil, 2021). Tal documento estimou que, no ano de 2020, foram recuperadas 1,07 milhão de toneladas de materiais recicláveis secos, dos quais 204,8 mil toneladas referiram-se a resíduos plásticos.

Como observado no Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICPLAST 2022), criado pela ABIPLAST, o maior volume de plástico consumido pelas indústrias de reciclagem não provém dos RSU. Os maiores fornecedores de plásticos para reciclagem foram as indústrias, os comércios de resíduos, os beneficiadores e as empresas de gestão de resíduos. São ainda citados as cooperativas, os catadores, os aterros e o fornecimento direto pela fonte geradora, totalizando cerca de 1,58 milhão de toneladas de resíduos plásticos reciclados em 2021.

Atualmente, observa-se que as atenções mundiais têm gradualmente sido voltadas para as problemáticas envolvendo a cadeia de consumo do plástico, por meio da adoção de medidas que visam restringir a circulação destes materiais (Buzo e Tecco, 2020).

Neste sentido, cabe citar a Resolução 5/14, publicada em março de 2022 pela Assembleia Ambiental das Nações Unidas (UNEA), que pacifica o conhecimento sobre o aumento mundial nos níveis de poluição por plásticos e reconhece os microplásticos como parte desta poluição. O documento, denominado em tradução literal “Acabar com a Poluição por Plásticos: Rumo a um Instrumento Internacional Juridicamente Vinculativo”, reafirma a importância da cooperação internacional mediante instrumentos e convenções para prevenção da poluição por plásticos (UNEP, 2022).

A experiência brasileira na regulamentação dos plásticos ainda se demonstra incipiente. Buzo e Tecco (2020) levantaram as legislações acerca deste tema aprovadas até 2020 em assembleias legislativas de todos os estados brasileiros, e das câmaras municipais de suas respectivas capitais. Como resultado, observou-se que 18 das 27 capitais possuíam no ano de 2020 legislações proibitivas para o uso de canudos plásticos. Já as sacolas plásticas foram proibidas em sete capitais, e demais materiais plásticos como copos, talheres e pratos foram proibidos em cinco capitais.

Assim como ocorre com os contaminantes emergentes, a lacuna legislativa em nível federal para os microplásticos é evidente. Uma pesquisa realizada no Portal da Câmara dos Deputados em novembro de 2023 permitiu verificar a existência de diversos Projetos de Lei relacionados à poluição por plásticos, sendo o primeiro deles o PL 612/2007, que “dispõe sobre o uso de

sacolas plásticas biodegradáveis para acondicionamento de produtos e mercadorias a serem utilizadas nos estabelecimentos comerciais em todo território nacional”, atualmente aguardando o parecer do relator.

A árvore de apensados do referido Projeto de Lei conta ainda com outros projetos, cabendo destacar o PL 347/2020, que “proíbe, em todo o território nacional, a manipulação, a fabricação, a importação, a comercialização e o uso de *glitter* ou purpurina metálica ou plástica que contenham a adição intencional de microesferas de plástico”, e o PL 1228/2020, que “dispõe sobre a proibição, em todo território nacional, da fabricação, comercialização e uso de produtos plásticos de único uso”.

Em que pese a inexistência de um dispositivo legal em nível federal que restrinja a circulação de plásticos no Brasil, é importante ressaltar a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, instituída no Brasil pela Lei Federal N° 12.305/2010 (Brasil, 2010). A PNRS é atualmente o instrumento legal vigente que rege sobre os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relacionados ao processo de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, bem como sobre as responsabilidades dos seus geradores, destacando-se em seu texto a instrumentalização da Logística Reversa como forma de compartilhar a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos (tendo sido mais tarde instituído o Programa Nacional de Logística Reversa pelo Decreto Federal N° 10.936, de 12 de janeiro de 2022). Especificamente para o caso dos plásticos, em seu Artigo 32 a PNRS determina que as embalagens devam ser fabricadas com materiais que propiciem a sua reutilização ou reciclagem.

Em relação à distribuição dos microplásticos no meio ambiente, segundo Akdogan e Guven (2019), os estudos disponíveis na literatura apontam que os principais plásticos encontrados são os polímeros polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), politereftalato de etileno (PET), dentre outros.

Esta ocorrência se dá em praticamente todos os compartimentos ambientais, conforme apontado por Wang et al. (2023), que citam as pesquisas que encontraram microplásticos no solo, nos sedimentos, na água e no ar. Segundo os autores, maior atenção deve ser dada para este tipo de poluição nos rios e ambientes de água doce, que se encontram em contato mais direto com os seres humanos.

Esta abordagem também é adotada por Mai et al. (2020), que citam que o aporte de microplásticos nos oceanos ocorre majoritariamente pelo aporte dos rios. Utilizando o Índice

de Desenvolvimento Humano (IDH) como indicador principal, os autores elaboraram um modelo capaz de estimar o fluxo global de plásticos que entram nos oceanos advindo dos rios. O modelo, que foi considerado calibrado e validado, estimou um aporte médio global em 2018 de 134.000 toneladas métricas de plásticos aportados nos oceanos pelos principais rios do mundo.

Os efeitos deletérios dos microplásticos no ambiente e na vida aquática vão além dos danos físicos causados pela obstrução do trato digestivo, dos sufocamentos e do estresse. Uma vez no ambiente, estas pequenas partículas podem sorver diversos contaminantes, provocando outros efeitos fisiológicos, como alterações hormonais, problemas reprodutivos e de crescimento, aumentando o nível de degradação dos corpos d'água (MONTAGNER et al., 2021).

Esta característica dos microplásticos foi esclarecida por Liu et al. (2021), descrevendo as elevadas áreas superficiais específicas das partículas, que aumentam substancialmente sua capacidade de sorção de diversas substâncias no ambiente.

Considerando que, segundo estimado por Sharma et al. (2021), até o ano de 2060 os microplásticos deverão compor cerca de 13,2% de toda massa de poluentes plásticos ao redor do mundo, fica explícita a preocupação e a urgência nas discussões sobre a quantificação e monitoramento destes poluentes nos compartimentos ambientais.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi fazer uma revisão sistemática sobre as metodologias analíticas empregadas atualmente para quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos no Brasil.

Os objetivos específicos da pesquisa estão relacionados com a avaliação da viabilidade de implantação de tais metodologias, as principais implicações técnicas e financeiras, além dos desafios futuros na padronização das análises ambientais destes microplásticos.

3 JUSTIFICATIVA

As análises de laboratório são parte integrante dos processos de monitoramento de contaminantes em matrizes ambientais. Sem um monitoramento adequado, comprometem-se os estágios de gerenciamento de projetos ambientais, como o diagnóstico, as avaliações de risco e as proposições de medidas mitigadoras.

Contudo, as etapas que envolvem a quantificação de contaminantes, como a amostragem, o preparo das amostras e as análises propriamente ditas, demandam confiabilidade. É fundamental que sejam adotados métodos padronizados, ou, na falta de padronização, métodos testados e referendados pela literatura disponível.

Tratando-se da quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos, é notória a complexidade envolvida no processo de seleção do método a ser empregado. Não há uma normativa técnica ou um procedimento padrão adotado para estas análises ou para as etapas de amostragem. O ambiente aquático, de água doce ou salgada, está associado a diferentes compartimentos ambientais que interagem de forma dinâmica entre si. Partículas plásticas podem ser encontradas por toda extensão dos corpos d'água, seja nos sedimentos de fundo, em suspensão na massa líquida, flutuando em sua superfície ou na biota presente no ecossistema local.

Desta forma, faz-se necessário amplo conhecimento sobre os tipos de análises atualmente empregadas na quantificação e caracterização dos diferentes tipos de microplásticos em ambientes aquáticos, avaliando-se suas limitações, sua empregabilidade e a viabilidade de implantação.

Em tempo, é essencial que haja conhecimento geral sobre o panorama da cadeia dos plásticos no Brasil, compreendendo a sua cadeia produtiva, suas formas de disposição final e os desafios globais no gerenciamento ambiental destes materiais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Definições e características

Segundo Montagner et al. (2021), são encontradas várias definições na literatura para o termo microplástico, essencialmente em função do tamanho de suas partículas. A definição mais utilizada, que foi proposta em 2009 pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), é a de que estes materiais são partículas de polímeros orgânicos sintéticos com tamanho inferior a 5 mm.

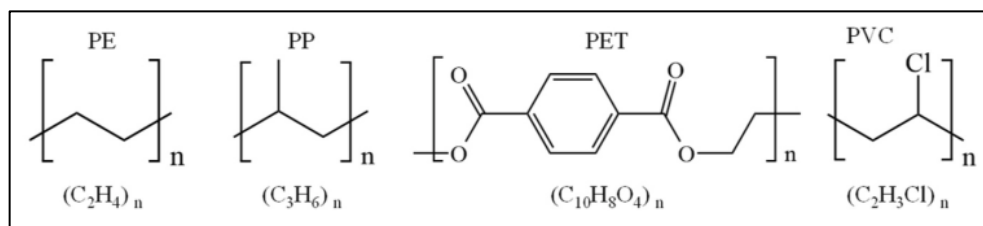
O Relatório Técnico da *International Organization for Standardization* (ISO) publicado em 2020 (ISO/TR 21960:2020 – *Plastics – Environmental aspects*) define os microplásticos como “quaisquer partículas sólidas insolúveis em água com dimensões entre 1 μm e 1000 μm ”.

A ausência de consenso na definição da dimensão dos microplásticos foi citada por Shi et al. (2023), que, mediante revisão sistemática de diversas publicações relacionadas ao tema, identificaram que não há classificação definitiva para os tamanhos das partículas, tanto na comunidade científica quanto nas entidades normalizadoras.

Neste trabalho, serão adotadas as dimensões entre 1 μm e 5000 μm (ou 5 mm) para definir os microplásticos, já que a maior parte da literatura consultada considera partículas menores que 1 μm como nanoplásticos, e partículas maiores que 5 mm como macropelásticos.

De acordo com Liu et al. (2021), os plásticos podem ser divididos em diferentes tipos, de acordo com diferentes padrões de classificação, sendo tal divisão igualmente aplicável aos microplásticos. Conforme o tipo de material polimérico, podem ser divididos em Polietileno (PE) e Polipropileno (PP); Conforme o tipo de matéria-prima empregada em sua fabricação, podem ser classificados em plásticos a base de petróleo ou em bioplásticos; Em função da resistência e tenacidade, podem ser classificados em Termofixos (resinas fenólicas ou epóxi) ou Termoplásticos – Polietileno Tereftalato (PET), Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), dentre outros; Ainda, segundo o tipo de composição química, podem ser classificados em biodegradáveis ou não biodegradáveis. As fórmulas estruturais dos principais polímeros citados estão dispostas na Figura 4.1-1.

Figura 4.1-1 – Principais polímeros que constituem os microplásticos.



Fonte: Extraído de Shi et al. (2023).

Especificamente para o caso dos microplásticos, a classificação pode ser dada em função de sua origem, sendo assim divididos entre os primários e os secundários. Os microplásticos primários são aqueles produzidos intencionalmente em tais dimensões, como *pellets*, abrasivos e esfoliantes. Os microplásticos secundários são fragmentos formados no ambiente a partir de processos de degradação de porções plásticas maiores (Da Costa; Duarte; Rocha-Santos, 2019).

4.2 Microplásticos no ambiente

A fragmentação dos pedaços maiores de plástico é essencialmente causada pela quebra da estrutura polimérica dos materiais. O estresse físico ocasionado por incidência de radiação solar (ultravioleta), processos de hidrólise ou atuação de agentes oxidantes são os mecanismos primários envolvidos na formação dos microplásticos secundários, conforme citado por Shi et al. (2023).

Esta formação também pode ocorrer em condições tidas como ambientalmente seguras, como em aterros sanitários projetados conforme as melhores práticas de engenharia. GodvinSharmila et al. (2023) analisaram sistematicamente dez publicações que avaliaram a presença de microplásticos no lixiviado de aterros sanitários na China, Sérvia, Tailândia e Finlândia. Os estudos detectaram microplásticos compostos por diversos tipos de polímeros nas amostras de lixiviado, enfatizando que as condições desta matriz são propícias à sorção de diversos poluentes na superfície das partículas. Ainda segundo os autores, a maioria dos métodos empregados para tratamento de lixiviado não são capazes de remover os microplásticos, permitindo que estes contaminantes acabem chegando aos corpos d'água.

A literatura disponível sobre os efeitos deletérios dos microplásticos nos seres vivos é bastante ampla. Rahman et al. (2021) analisaram 129 publicações sobre os potenciais riscos à saúde humana devido à exposição a micro e nanoplásticos. As principais rotas de exposição foram a ingestão, inalação e contato dérmico, devido à presença destes poluentes na água, no ar, nos alimentos e em produtos como cosméticos e creme dental. Esta exposição resulta em

potenciais riscos à saúde humana, associados ao estresse oxidativo, alterações metabólicas e até aumento no risco de desenvolvimento de câncer. Segundo os autores, embora o conhecimento acerca da toxicidade dos microplásticos ainda seja limitado, sabe-se que tal toxicidade seja primariamente influenciada pela concentração de exposição, composição das partículas, contaminantes sorvidos, órgãos envolvidos e suscetibilidade do indivíduo.

A composição química dos microplásticos também foi abordada por Kershal, Turra e Galdani (2019), que descreveram substâncias de toxicidade conhecida e que podem ser encontradas na forma de aditivos dos principais polímeros utilizados industrialmente na fabricação de plásticos. Dentre elas, o Bisfenol A e outros orgânicos fenólicos utilizados como antioxidantes, os ftalatos, utilizados como plastificante e o Tris (2-cloroetil) fosfato, utilizado como retardante de chamas.

Os aditivos também são citados por Wang et al. (2023), conforme sintetizado na Tabela 4.2-1. De acordo com os autores, os microplásticos são ainda capazes de adsorver substâncias de elevado interesse ambiental, como as bifenilas policloradas (PCBs), os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e os éteres de difenilas polibromados (PBDEs). Em tempo, alguns compostos como o Bisfenol A também são reconhecidos mundialmente como disruptores endócrinos, podendo causar alterações de caráter hormonal em seres vivos.

Tabela 4.2-1 – Aditivos empregados nos principais tipos de plásticos.

Polímero	Abrev.	Aditivos
Polietileno	PE	Bisfenol A, Octilfenol, Nonilfenol, retardante de chamas bromados (BFRs)
Polipropileno	PP	Tricloroetil fosfato
Policloreto de Vinila	PVC	Ftalatos, Nonilfenol
Poliestireno	PS	Ftalatos
Politereftalato de Etileno	PET	Ftalatos, retardante de chamas bromados (BFRs)
Poliamida	PA	Tetraciclina, Trimetropim
Policarbonatos	PC	Bisfenol A, Nonilfenol

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2023).

4.3 Microplásticos em ambientes aquáticos

Wang et al. (2023) avaliaram o aporte de microplásticos em ambientes aquáticos (marinhos ou de água doce), dividindo-os em quatro grupos: o lançamento de efluentes industriais, já que a maior parte dos sistemas de tratamento existentes não é capaz de reter estas partículas; os despejos domésticos, que podem conter microplásticos provenientes de produtos de higiene, cosméticos e fibras têxteis; os aportes atmosféricos, quando condições climáticas extremas

podem favorecer o carreamento de resíduos e materiais plásticos para os corpos d'água, e; a poluição causada por operações diretas na água, como atividades pesqueiras, extração de petróleo, transporte e turismo.

Em ambientes aquáticos, conforme citado por Olivatto et al. (2018), os microplásticos podem ser encontrados em zonas mais superficiais ou mais profundas, dependendo da densidade do material. Contudo, tal característica física pode ser alterada em função do tempo de residência deste poluente no ambiente, já que a formação de biofilmes na superfície dos microplásticos pode favorecer sua sedimentação.

Ainda segundo os autores, nas regiões mais profundas e nos sedimentos, as partículas estão menos sujeitas à degradação, podendo inclusive serem utilizadas como indicadores geológicos potenciais no Antropoceno.

A ingestão de MP nestes compartimentos é observada em organismos desde o primeiro nível trófico, conforme exposto por Montagner et al. (2021). Desta forma, este poluente afeta desde o fito e zooplâncton até tartarugas e pássaros. Segundo os autores, a densidade dos microplásticos também influenciará na biodisponibilidade, já que as partículas menos densas tendem a ser ingeridas por espécies que habitam as zonas mais superficiais, e as partículas mais densas por espécies que habitam zonas mais profundas e sedimento.

Assim como ocorre com as pesquisas sobre o comportamento e os efeitos deletérios dos microplásticos no meio ambiente, o tratamento e remoção de tais poluentes também são amplamente discutidos na literatura.

Em seu trabalho, Liu et al. (2021) avaliaram formas de eliminação da poluição por plásticos, dividindo os métodos de degradação em quatro categorias: a biodegradação, a fotodegradação, e degradação química e a degradação térmica. No entanto, estes processos dependem de fatores intrínsecos dos materiais, como a estrutura polimérica, o formato da partícula e a adição de aditivos químicos em sua composição, além de fatores ambientais como pH, temperatura, oxigenação e luminosidade do meio em que se encontram.

Sharma et al. (2021) avaliaram diversas publicações sobre o tratamento de microplásticos em águas residuárias e de consumo humano, cabendo destacar números promissores encontrados, como a redução de 56,7% da massa molecular do polietileno obtida por meio da biorremediação com o fungo marinho *Zalerion maritimum* após 14 dias de incubação, e a

redução de 99,9% de microplásticos presentes no esgoto, após tratamento com reator biológico de membrana (MBR).

Conforme Liu et al. (2021), a seleção do melhor método para o tratamento de águas contendo microplásticos deve levar em conta a sustentabilidade ambiental das tecnologias empregadas e a sua viabilidade econômica. Um importante ponto a ser discutido é a possibilidade de aproveitamento dos subprodutos gerados nos processos de tratamento, como por exemplo, o gás metano produzido a partir de processos de biodegradação anaeróbica.

4.4 Quantificação dos microplásticos

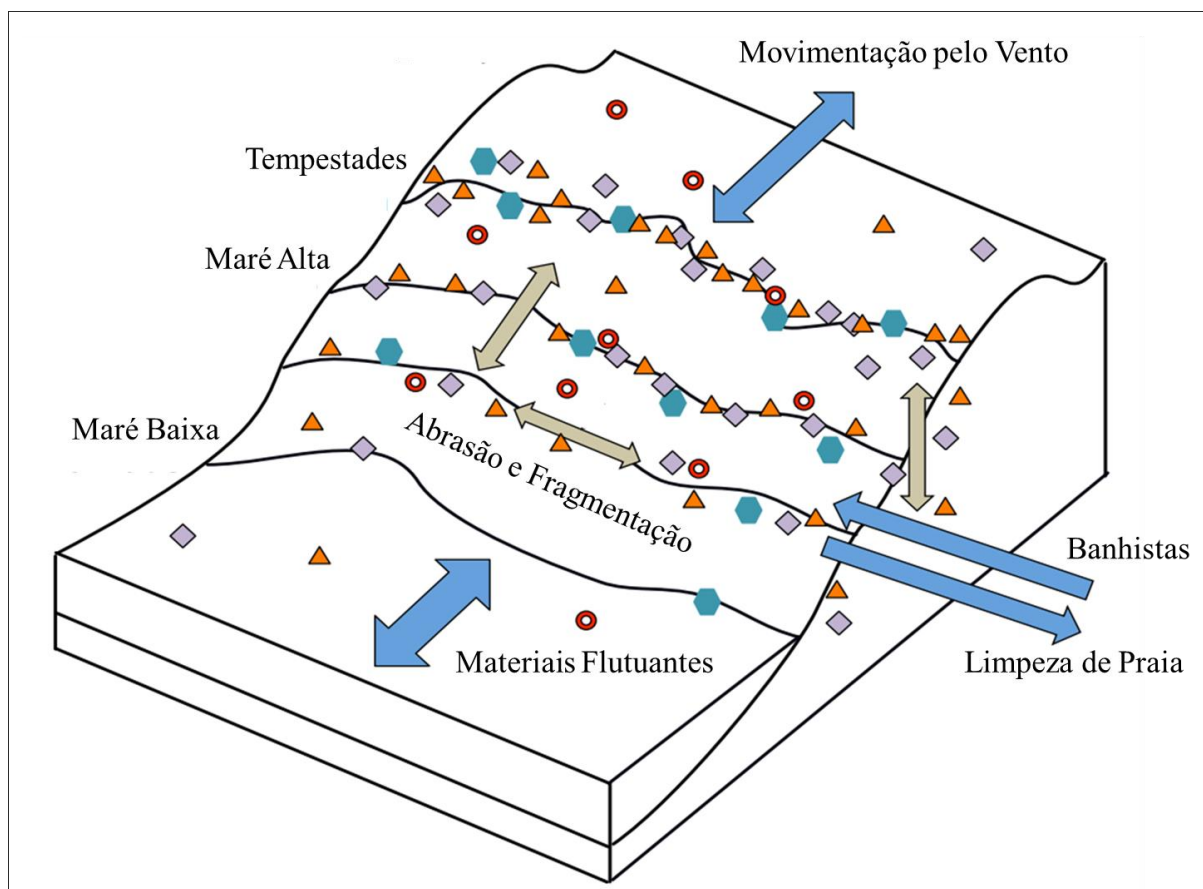
Muitas publicações podem ser encontradas na literatura sobre a temática da quantificação de partículas plásticas nas diferentes matrizes ambientais (SILVA et al., 2022). Segundo os autores, mostra-se urgente a necessidade do estabelecimento de procedimentos e metodologias padronizadas para a adequada quantificação e análise de risco destes contaminantes.

No entanto, a padronização de metodologias enfrenta desafios. Conforme descrito por Liu et al. (2021), devido às diferenças na composição, estrutura e propriedades dos microplásticos, os métodos para sua quantificação também podem ser diferentes. Desta forma, é primordial que se conheça os tipos e propriedades dos materiais que estão sendo analisados.

Assim como ocorre em praticamente todas as análises ambientais, a primeira etapa para avaliação de microplásticos consiste na sua amostragem. Já nesta etapa, conforme Montagner et al. (2021), há o desafio da escolha da estratégia a ser adotada, uma vez que as partículas a serem quantificadas são insolúveis, possuem diferentes composições e propriedades, além de encontrarem-se dispersas de forma heterogênea no meio que será amostrado.

Tanto a superfície quanto a coluna d'água apresentam comportamento dinâmico, com interações entre as áreas marginais e com os sedimentos. Além destes aspectos, os resíduos contendo microplásticos também podem ser aportados por via atmosférica e interagir com organismos aquáticos, dificultando a compreensão da dispersão e distribuição das partículas nestes ambientes (Kershal; Turra; Galdani, 2019). Um exemplo desta dinâmica em um ambiente costeiro pode ser observado na Figura 4.4-1.

Figura 4.4-1 – Dinâmica de resíduos plásticos em um ambiente costeiro.



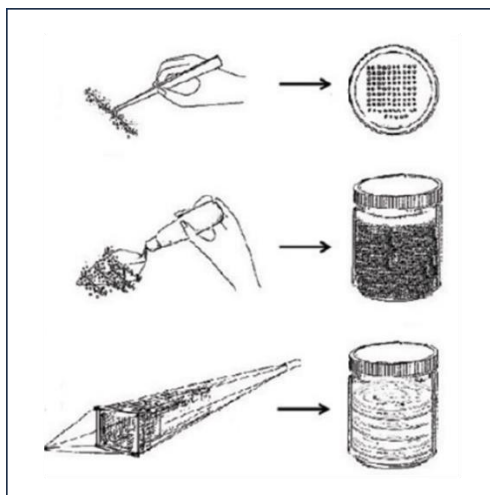
Fonte: Adaptado de Kershal; Turra; Galdani (2019).

Desta forma, o conhecimento sobre o comportamento das partículas e do ambiente em que se encontram se faz essencial para definição da metodologia de amostragem e elaboração do plano de monitoramento.

Hidalgo-Ruz et al. (2012) revisaram sistematicamente 68 publicações sobre a quantificação de microplásticos em ambientes marinhos até o ano de 2011, englobando os sedimentos, a coluna d'água e a sua superfície. Os métodos empregados para amostragem nestas publicações foram divididos em três tipos. O primeiro deles foi a amostragem seletiva, que pode ser compreendida como aquela realizada diretamente no ambiente, coletando-se os itens visíveis a olho nu, usualmente na superfície dos sedimentos. O segundo método, a amostragem em massa, refere-se a retirada de grandes volumes de amostra para análises de laboratório, sem que haja a redução ou concentração da amostra. Por fim, o método do volume reduzido, que consiste na redução da amostra durante a sua coleta, preservando-se e concentrando-se apenas as frações

de interesse analítico, como ocorre na coleta de amostras através de redes de arrasto. As três metodologias distintas podem ser observadas na Figura 4.4-2.

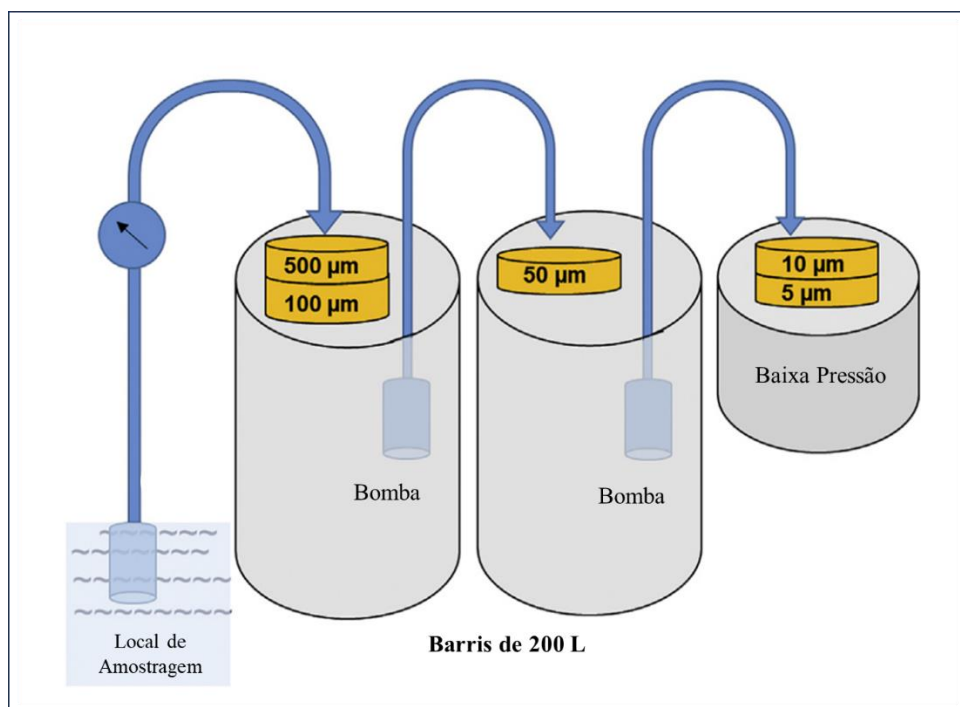
Figura 4.4-2 – Métodos de amostragem de microplásticos.



Fonte: Adaptado de Hidalgo-Ruz et al. (2012).

Bannick et al. (2018) avaliaram um método de amostragem de microplásticos por bombeamento centrífugo, inicialmente em uma amostra preparada em laboratório e posteriormente no lançamento de efluentes de uma estação de tratamento de águas residuárias. O processo consistiu em bombear as amostras através de um sistema de aço inoxidável, passando por peneiras com diferentes aberturas: 500, 100, 50, 20 e 10 μm (Figura 4.4-3). Os testes apresentaram resultados satisfatórios, com recuperação entre 80 e 110%, e demonstraram que quanto maior a partícula a ser investigada, maior volume de amostra é requerido na coleta, e quanto menor a partícula, mais avançados devem ser os métodos químicos de detecção.

Figura 4.4-3 – Sistema de amostragem com bombeamento.



Fonte: Adaptado de Bannick et al. (2018).

De acordo com Silva et al. (2022), a técnica mais comum para coleta de microplásticos em ambientes aquáticos é a de redes com malha entre 300 e 350 μm . Entretanto, considerando-se a classificação de tamanho dos microplásticos entre 1 e 5.000 μm , é de se esperar que os resultados obtidos com tais redes possam ser subestimados.

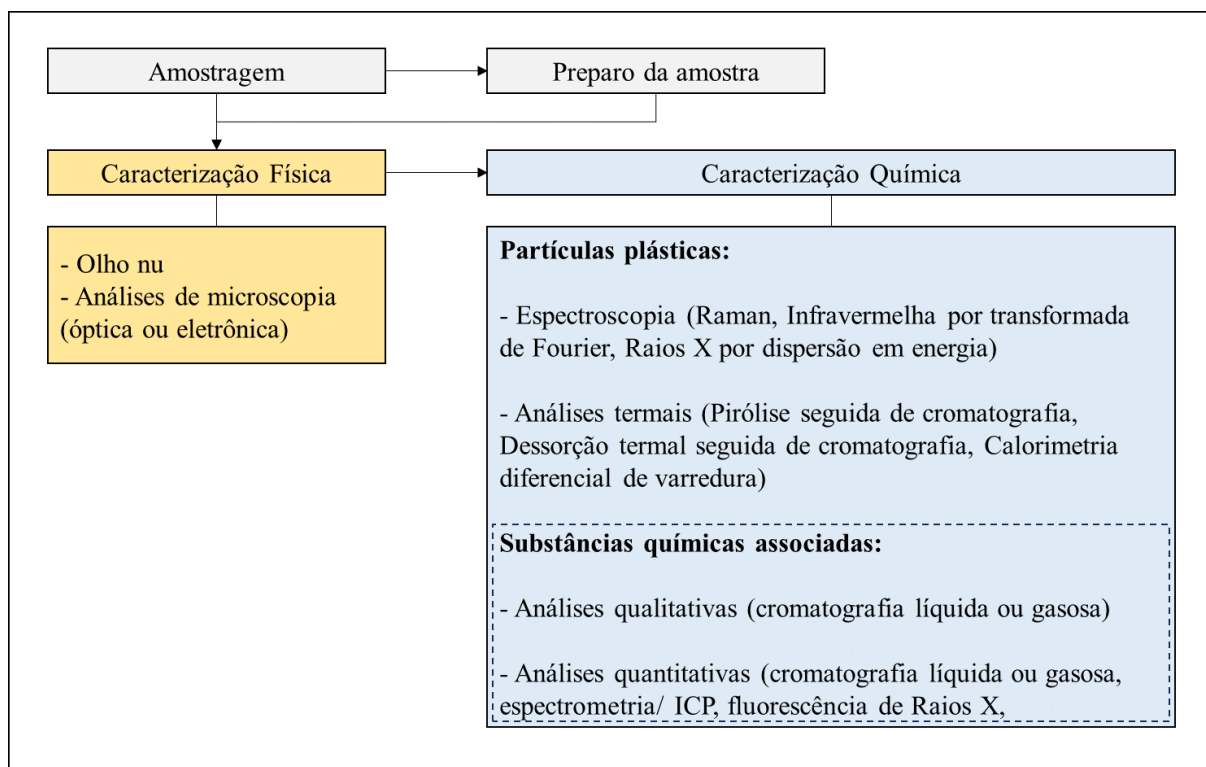
Desta forma, avaliando-se as diversas abordagens sobre os procedimentos de amostragem disponíveis na literatura, nota-se que a escolha do método esteja intimamente associada com as dimensões das partículas de interesse e com a profundidade alvo do estudo.

Uma vez realizada a amostragem das matrizes ambientais, as amostras devem idealmente passar por um processo de preparo, que pode ser dividido em duas etapas. Conforme Montagner et al. (2021), a primeira etapa consiste na separação das partículas, que pode ser realizada por filtração ou peneiramento (caso estes processos não tenham sido realizados já na amostragem), isolando os microplásticos de outros detritos orgânicos ou inorgânicos. A segunda etapa, de remoção da matéria orgânica, comumente envolve a adoção de processos de digestão da amostra utilizando ácidos, álcalis, enzimas ou outras substâncias oxidantes como o peróxido de hidrogênio, com objetivo de reduzir as interferências analíticas em etapas posteriores de caracterização química dos microplásticos.

É importante destacar que, assim como ocorre com os métodos de amostragem, os procedimentos de preparo de amostras também sofrem com a falta de harmonização e padronização metodológica, conforme citado em diversas publicações disponíveis na literatura.

De modo geral, o processo analítico dos microplásticos pode ser dividido em caracterização física e caracterização química (Kershal; Turra; Galdani, 2019). Em casos específicos, uma terceira análise pode ser realizada, quantificando-se outros contaminantes eventualmente associados às partículas plásticas. A análise física é feita de forma visual, podendo ser a olho nu ou com auxílio de métodos de microscopia. Já as análises químicas, que são usualmente realizadas após a caracterização física, podem ser realizadas por intermédio de técnicas de espectroscopia ou análises termais, cabendo ressaltar que outras análises de laboratório podem ser realizadas para quantificação de substâncias associadas, como poluentes sorvidos na superfície dos materiais. A Figura 4.4-4 sintetiza as etapas aqui descritas, realizadas entre a amostragem e as análises químicas.

Figura 4.4-4 – Etapas de quantificação de microplásticos.



Fonte: Adaptado de Kershal, Turra e Galdani (2019).

De acordo com Montagner et al. (2021), a inspeção visual da amostra, seja a olho nu ou com auxílio de microscópio óptico, ainda é muito empregada no processo de triagem das matrizes suspeitas de conterem microplásticos. Embora sujeita a incertezas, esta inspeção

apresenta acessibilidade e baixo custo, podendo ser realizada facilmente ainda em campo. Contudo, ainda segundo os autores, esta técnica pode fornecer resultados subjetivos, caso não seja feita uma confirmação química com emprego de técnicas instrumentais subsequentes.

No Brasil, as pesquisas com dados de monitoramento e caracterização de microplásticos no meio ambiente ainda são escassas. Olivatto et al. (2018) analisaram sistematicamente 21 publicações nacionais sobre o tema, observando que as pesquisas ocorreram com maior intensidade nas regiões costeiras do Nordeste e Sudeste do país. As metodologias levantadas pelos autores, para análises realizadas em águas e sedimentos, estão sintetizadas na Tabela 4.4-1.

Tabela 4.4-1 – Metodologias empregadas em estudos de quantificação de microplásticos em matrizes ambientais no Brasil.

Local	Matriz	Amostragem	Metodologia	Ano
Praia de Boa Viagem - PE	Sedimento	Raspagem superficial (2 cm)	Caracterização física com auxílio de microscopia	2010
Arquipélago São Pedro e São Paulo - PE	Água	Arrasto superficial com rede de plâncton	Filtração da amostra e caracterização física com auxílio de microscopia	2013
Estuário de Goiania - PE	Água	Arrasto superficial com rede de plâncton	Filtração da amostra e caracterização física com auxílio de microscopia	2014
Estuário de Goiania - PE	Água	Arrasto superficial com rede de plâncton	Filtração da amostra e caracterização física com auxílio de microscopia	2016
Praia de Santos - SP	Sedimento	Coleta superficial	Extração por Soxhlet seguida de quantificação por cromatografia gasosa (CG-MS)	2013
Baía de Santos - SP	Sedimento	Coleta em diversas praias	Separação e identificação por espectroscopia Raman e microscópio óptico	2014
Baía de Santos - SP	Sedimento	Coleta em diversas praias	Extração de PAHs por Soxhlet seguida de quantificação por cromatografia gasosa (CG-MS)	2013
Baixada Santista - SP	Sedimento	Coleta em diversas praias	Extração de POPs por Soxhlet seguida de quantificação por cromatografia gasosa (CG-MS)	2016
Estuário de Paranaguá - PR	Sedimento	Coleta superficial	Quantificação visual	2016
Baixada Santista - SP	Sedimento	Coleta em diversas praias	Digestão ácida e quantificação de metais pesados por ICP-OES	2018
Baía de Guanabara - RJ	Sedimento	Coleta em diversas praias	Separação por densidade e caracterização física com microscopia	2016

Continua.

Tabela 4.4-1 – Metodologias empregadas em estudos de quantificação de microplásticos em matrizes ambientais no Brasil – Continuação.

Local	Matriz	Amostragem	Metodologia	Ano
Baía de Guanabara - RJ	Água	Arrasto superficial com rede de plâncton	Contagem manual e análise qualitativa por espectroscopia do infravermelho	2016
Baía de Guanabara - RJ	Água	Arrasto horizontal com rede de plâncton	Filtração da amostra e caracterização por espectroscopia do infravermelho, análise elementar e microscopia com processamento digital de imagens	2017
Baía de Guanabara - RJ	Água	Arrasto oblíquo com rede de plâncton	Caracterização por espectroscopia do infravermelho e análise morfológica com microscopia	2018

Fonte: Adaptado de Olivatto et al. (2018).

Um levantamento de publicações nacionais também foi realizado por Montagner et al. (2021), que encontraram 80 trabalhos em revistas indexadas até o ano de 2020, sendo a areia de praia a matriz ambiental mais estudada nestas pesquisas. 48 dos 80 trabalhos adotaram a inspeção visual como método de quantificação de microplásticos no ambiente, e 19 utilizaram recursos de microscopia, porém sem posterior complementação com análises químicas das partículas, evidenciando que a maior parte das pesquisas de microplásticos no Brasil ainda adotam metodologias menos complexas.

Segundo os autores, a técnica analítica instrumental mais adotada na caracterização de MP através da confirmação de sua identidade polimérica é a Espectroscopia de Infravermelho. Esta técnica utiliza radiação eletromagnética entre 780 nm e 50 μ m, obtendo-se o espectro de absorção do polímero e medindo-se sua transmitância ou reflectância, únicas para cada tipo de material. Uma lacuna deixada por esta técnica é a identificação de MP menores que 20 μ m, o que pode ser compensado pela complementação analítica com a técnica de espectroscopia de Raman.

Embora não seja o foco deste estudo, é importante destacar que, conforme Silva et al. (2020), a quantificação e caracterização dos microplásticos são as etapas primordiais para pesquisas subsequentes na área da ecotoxicologia. Tais pesquisas avaliam o caráter agudo (comportamento, alterações fisiológicas, taxa de letalidade) e o caráter crônico (taxas de reprodução e crescimento) da toxicidade causada pela exposição de organismos vivos aos microplásticos. Os autores listaram as metodologias comumente empregadas, bem como suas vantagens e desvantagens, conforme sintetizado na Tabela 4.4-2.

Tabela 4.4-2 – Metodologias aplicadas para quantificação de microplásticos em ensaios ecotoxicológicos.

Metodologia	Vantagens	Desvantagens
Estereomicroscopia	Baixo custo	Sem caracterização química ou determinação de massa, baixa confiabilidade, tempo elevado de análise
Microscopia de epifluorescência	Manuseio rápido e fácil, possibilidade de automação na contagem de partículas	Requer uso de corantes, materiais biológicos podem fornecer falsos positivos, partículas degradadas podem não ser tingidas (falsos negativos)
Câmaras de Burkner	Baixo custo, manuseio fácil e rápido	Tamanho máximo da partícula limitado a 100 µm, baixa precisão
Hemocitômetro	Baixo custo, manuseio fácil e rápido, medição direta	Tamanho máximo da partícula limitado a 100 µm, só é preciso com número elevado de partículas
Espectroscopia de fluorescência	Triagem de partículas, não destrutivo	Requer preparo de amostra
Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	Pouco ou nenhum preparo de amostra, análise não destrutiva	Contaminações ou aditivos podem prejudicar os resultados, não fornece quantificação direta, vulnerável a interferentes
Micro espectroscopia FTIR	Caracterização química de partículas menores em relação ao FTIR tradicional, permite contagem de partículas	Elevado tempo de análise
Espectroscopia Raman	Melhor resposta a grupos funcionais apolares, elevada resolução espacial	Incapaz de medir amostras fluorescentes excitadas por laser
Micro Espectroscopia Raman	Caracterização química de partículas menores em relação à espectroscopia Raman	Elevado tempo de análise
Microscopia de aquisição de imagens de tempo de vida de fluorescência (FLIM)	Técnica não destrutiva, permite a visualização em tempo real da posição espacial das espécies moleculares identificadas	Útil para microplásticos com elevada autofluorescência (caso contrário demandará o uso de corantes), requer um banco de dados para comparativo de resultados, pode ser afetada por agentes externos (interações moleculares, pH, temperatura)
Espectroscopia de microondas	Identificação rápida e <i>in situ</i> de microplásticos em matrizes complexas como solo, não requer preparo, análise não destrutiva, baixo custo	Requer calibração para medir a diferença de frequência entre o material contaminado e o não contaminado por microplásticos

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2020).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração deste estudo teve como base dados obtidos na literatura, revisados sistematicamente. Para tanto, foram pesquisados artigos de revisão e artigos de pesquisa no portal eletrônico *Science Direct*, utilizando palavras-chave na língua inglesa relacionadas aos termos *microplastics*, *aquatic environment*, *quantification*, *analysis*, *sampling* e *analytical challenges*. Especificamente para publicações nacionais, como o levantamento de legislações proibitivas, foi utilizado o portal acadêmico do Google, buscando-se pelos termos microplásticos, plásticos, proibição, aspectos legais.

Devido ao grande volume existente de dados, foram priorizados os materiais publicados a partir do ano 2020, embora tenham sido consultadas referências mais antigas. Nesta busca inicial foram encontradas 2522 publicações relacionadas à ocorrência de microplásticos em ambientes aquáticos e compartimentos ambientais associados. Os resultados foram então filtrados, buscando-se por publicações com abordagens sobre metodologias analíticas empregadas na quantificação de microplásticos (sendo priorizados métodos de análise de partículas compatíveis com as dimensões definidas neste estudo, ou seja, entre 1 e 5.000 μm).

Os artigos resultantes foram selecionados conforme seus respectivos títulos, excluindo-se aqueles que abordassem técnicas para detecção de substâncias específicas associadas aos microplásticos (como metais ou orgânicos adsorvidos), estudos de caráter exclusivamente toxicológico e/ou análises realizadas em tecidos de animais marinhos, resultando em 35 publicações para leitura de seus respectivos resumos. Destas, foram selecionadas 25 publicações de maior relevância para leitura completa, 15 das quais foram utilizadas, conforme disposto na Tabela 5-1.

Tabela 5-1– Publicações científicas utilizadas.

Autor(es)	Título	Ano	Periódico	País de origem
AKDOGAN, Z; GUVEN, B.	Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs	2019	Environmental pollution, v. 254	Turquia
BUZO, M. G., TECCO, V. S.	Levantamento de legislações proibitivas para o consumo de plásticos descartáveis nas capitais dos estados brasileiros	2020	Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas, n.12	Brasil
DA COSTA, J. P; DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T.	Plásticos no ambiente	2019	Recursos Hídricos, v. 40	Brasil
GODVINSHARMILA, V. et al.	Microplastics as emergent contaminants in landfill leachate: Source, potential impact and remediation technologies	2023	Journal of Environmental Management, v. 343	Índia

Continua.

Tabela 5-1– Publicações científicas utilizadas – Continuação.

Autor(es)	Título	Ano	Periódico	País de origem
HIDALGO-RUZ, V. et al.	Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification	2012	Environmental science & technology, v. 46	Chile
KERSHAW, P. J; TURRA A; GALGANI F.	Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean	2019	GESAMP No. 108	ONU
LIU, L. et al.	On the degradation of (micro) plastics: Degradation methods, influencing factors, environmental impacts	2022	Science of the Total Environment, v. 806	China
MAI, L. et al.	Global riverine plastic outflows	2020	Environmental Science & Technology, v. 54	China
MONTAGNER, C. C. et al.	Microplásticos: Ocorrência Ambiental e Desafios Analíticos.	2021	Química Nova, v. 44	Brasil
OLIVATTO, G. P. et al.	Microplásticos: Contaminantes de preocupação global no Antropoceno	2018	Revista Virtual de Química, v. 10	Brasil
RAHMAN, A. et al.	Potential human health risks due to environmental exposure to nano-and microplastics and knowledge gaps: a scoping review	2021	Science of the Total Environment, v. 757	Canadá
SHARMA, S. et al.	Microplastics in the environment: occurrence, perils, and eradication	2021	Chemical Engineering Journal, v. 408	Índia
SHI, H. et al.	Small plastic fragments: A bridge between large plastic debris and micro-& nano-plastics.	2023	TrAC Trends in Analytical Chemistry	China
SILVA, A. L. P et al.	Analytical methodologies used for screening micro (nano) plastics in (eco) toxicity tests	2022	Green Analytical Chemistry	Portugal
WANG, H. et al.	Marine micro (nano) plastics determination and its environmental toxicity evaluation	2023	TrAC Trends in Analytical Chemistry	China

Fonte: Do autor.

Além de artigos científicos, foram pesquisadas informações socioeconômicas relativas à cadeia global dos plásticos, desde sua produção até a destinação final. Tais informações foram obtidas em documentos oficiais do Ministério das Cidades e de associações como a ABRELPE e a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantificação e caracterização dos microplásticos presentes nos compartimentos ambientais apresenta diversos desafios. Não há, por exemplo, uma concordância em relação a própria definição do termo microplástico, que pode variar entre publicações em função do tamanho da partícula.

Um dos pontos pacíficos entre os autores das publicações revisadas neste estudo é a urgente necessidade de padronização de metodologias para correta comparação e acompanhamento de resultados. Como apontado por Wang et al. (2023) e por Silva et al. (2022), as pesquisas não identificaram um método padronizado para as análises, o que também dificulta, segundo Montagner et al. (2021) a comparação dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

Nas publicações pesquisadas, a amostragem seletiva foi amplamente adotada como método de amostragem de partículas nos sedimentos. Para a coleta nas matrizes líquidas, métodos de redução de amostra como as redes de plâncton e os métodos de bombeamento foram os mais utilizados, como pode ser observado no trabalho de Hidalgo-Ruz et al. (2012), cujas metodologias de amostragem estão sintetizadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 – Tipos de amostragem adotados nas publicações internacionais.

Matriz	Tipo de amostragem		
	Seletiva	Em massa	Redução da amostra
Sedimentos	24	18	3
Água do mar	-	1	35

Fonte: Adaptado de Hidalgo-Ruz et al. (2012).

Especificamente para as publicações nacionais, pode ser observado comportamento semelhante, conforme observado por Olivatto et al. (2018). Todas as publicações levantadas pelos autores, relacionadas à ambientes aquáticos, adotaram métodos de amostragem seletiva nos sedimentos e métodos de arrasto (com redução de amostra) para matrizes líquidas, conforme apresentado na Tabela 6-2.

Tabela 6-2 – Tipos de amostragem adotados nas publicações nacionais.

Matriz	Tipo de amostragem		
	Seletiva	Em massa	Redução da amostra
Sedimentos	8	-	-
Água do mar	-	-	6

Fonte: Adaptado de Olivatto et al. (2018).

Embora boa parte das publicações preconize a adoção de um método específico de amostragem ao longo da pesquisa, certos cuidados devem ser tomados em função do tamanho da partícula a ser amostrada, conforme exposto por Bannick et al. (2018). Segundo os autores, os volumes a serem amostrados devem ser observados em função do diâmetro médio das partículas a serem analisadas, bem como a necessidade de aplicação de pressão para efetiva filtração de amostra.

De modo geral, no Brasil a maior parte dos estudos relacionados à quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos utiliza metodologias mais simples, de caráter visual ou com auxílio de microscopia óptica, como pode ser observado no estudo de Olivatto et al. (2018), cujos resultados estão sintetizados na Tabela 6-3. Embora estas análises sejam fundamentais no monitoramento destes poluentes, elas não são capazes de fornecer informações sobre a composição das partículas ou de outras substâncias químicas de interesse que eventualmente estejam sorvidas na superfície do material.

Tabela 6-3 – Metodologias empregadas nas publicações nacionais.

Metodologia analítica	Número de publicações
Caracterização visual e/ou uso de microscopia óptica	6
Microscopia de infravermelho	3
Extração por Soxhlet e cromatografia gasosa CG-MS	3
Espectroscopia Raman	1
Digestão ácida de metais e espectrometria ICP-OES	1

Fonte: Adaptado de Olivatto et al. (2018).

No trabalho de Montagner et al. (2021), das 80 publicações nacionais consultadas pelos autores, 46 adotaram apenas a identificação visual na identificação das partículas, sem uso de microscopia e sem posterior caracterização química. Ao todo, apenas 13 trabalhos utilizaram algum tipo de método de caracterização dos microplásticos por meio de técnicas de laboratório.

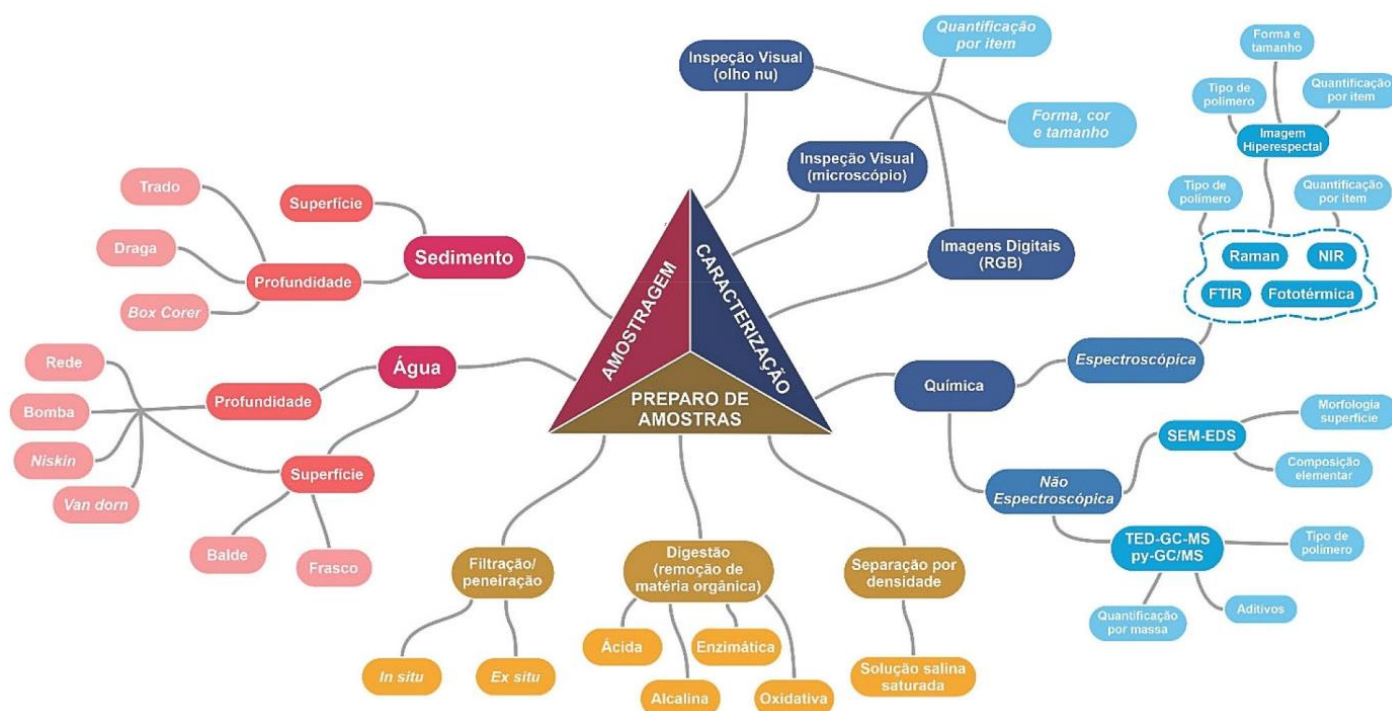
Os levantamentos de Olivatto et al. (2018) e Montagner et al. (2021) evidenciam a existência de implicações técnicas e financeiras para a condução de análises para caracterização química dos microplásticos. É importante destacar que os equipamentos empregados nas metodologias apresentadas neste estudo não são comumente encontrados em universidades, dificultando a condução de estudos com tal refinamento analítico. A mesma situação ocorre em laboratórios privados, uma vez que a maior parte dos equipamentos aqui citados não são utilizados para análises ambientais rotineiramente realizadas para cumprimento de requisitos legais.

Como pode ser observado no estudo de Olivatto et al. (2018), as publicações nacionais sobre este tema tendem a focar em compartimentos ambientais específicos, abordando análises em apenas uma matriz, o que pode facilitar a comparação entre métodos e resultados. Conforme os autores, cerca de 80% dos estudos brasileiros são focados em ambientes marinhos, tendência que também pode ser observada nas publicações internacionais.

Conforme bem exposto no guia “GESAMP” (Kershal; Turra; Galdani, 2019), o ambiente aquático possui elevada complexidade, sendo fundamental a compreensão das possíveis interações existentes entre cada porção de interesse a ser analisada. Sendo assim, o planejamento do monitoramento de microplásticos deve considerar as características do compartimento ambiental que será amostrado, a influência do entorno imediato, a quantidade de material coletado e os recursos disponíveis, como equipamentos, embarcações e pessoal técnico.

De modo a sintetizar as possibilidades metodológicas, Montagner et al. (2021) elaboraram um panorama gráfico considerando as etapas de amostragem, preparo e caracterização das amostras, conforme apresentado na Figura 6-1.

Figura 6-1 – Possibilidades analíticas na quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos.

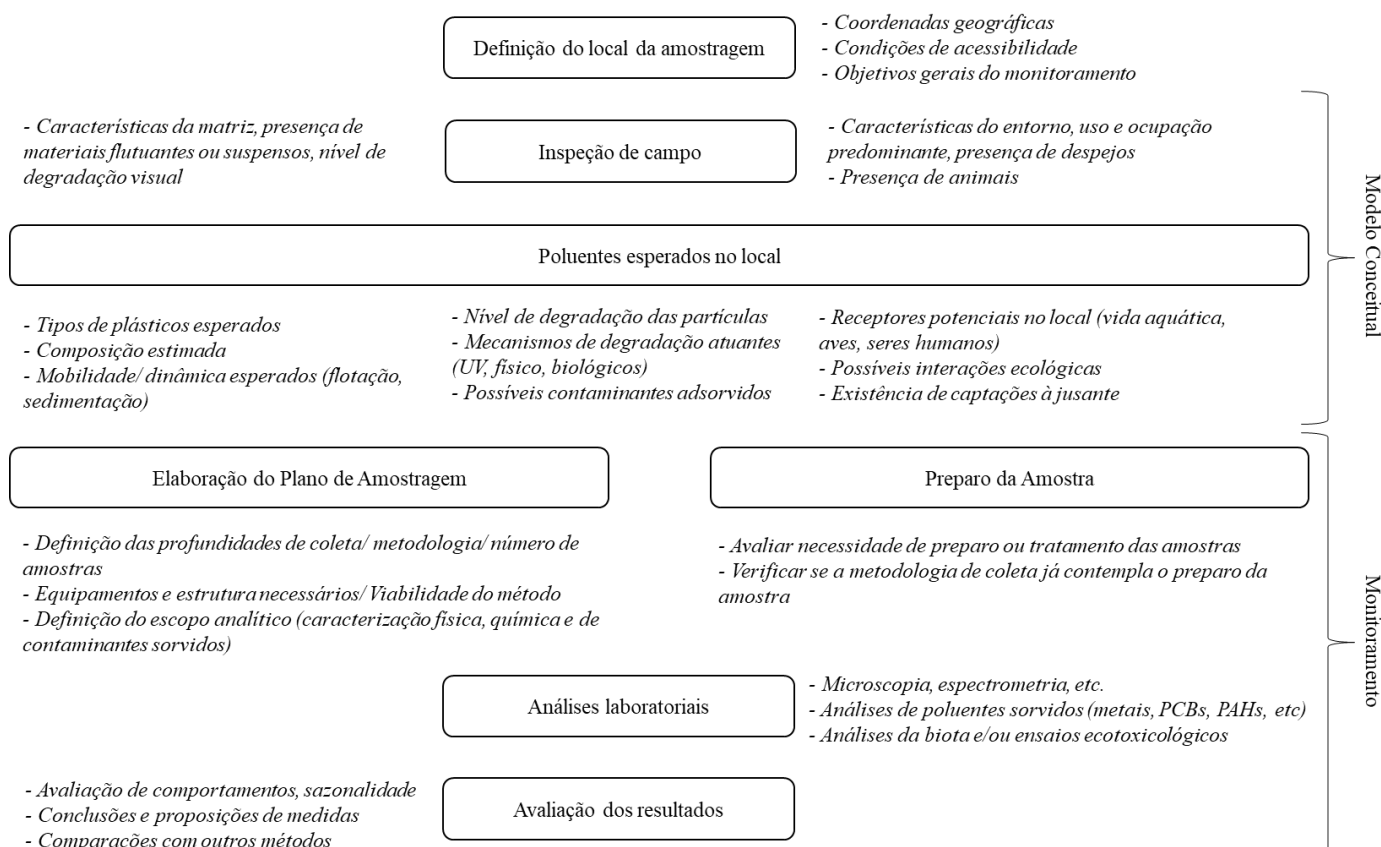


Fonte: Adaptado de Montagner et al. (2021).

Diante das vastas possibilidades analíticas envolvidas na quantificação de microplásticos, e na complexidade do comportamento deste tipo de poluente, é evidente que o planejamento seja uma etapa primordial para este trabalho. Uma ferramenta que pode auxiliar na elaboração do plano de amostragem é a confecção prévia de um “modelo conceitual” da área, avaliando-se as condições do local e coletando-se informações relevantes para a definição das metodologias a serem empregadas posteriormente.

Desta forma, avaliando-se as dificuldades e desafios citados pelos autores nas publicações utilizadas neste estudo, foi elaborado um fluxograma para o monitoramento de microplásticos, conforme apresentado na Figura 6-2. O objetivo deste fluxograma é auxiliar na condução dos estudos de quantificação de microplásticos, ressaltando pontos importantes em cada etapa deste processo.

Figura 6-2 – Fluxograma para planejamento do monitoramento de microplásticos.



Fonte: Do autor.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria de plástico representa um grande papel na economia em nível global. Enquanto os dados produtivos refletem a importância econômica da cadeia do plástico para a sociedade, paralelamente ficam evidentes os desafios no gerenciamento destes materiais, desde sua produção até a disposição final após o seu uso.

Quando encontrados na forma de microplásticos (1 μm a 5.000 μm), apresentam elevada relevância ambiental, havendo notório interesse na comunidade científica mundial em pesquisas sobre os efeitos deletérios destes materiais sobre o meio ambiente. Um senso comum entre estas pesquisas é a urgente necessidade de padronização de métodos analíticos para estes poluentes, para que possam ser quantificados e monitorados nos compartimentos ambientais afetados.

A padronização analítica pode garantir não apenas a confiabilidade, mas também a possibilidade de comparação entre os resultados obtidos, ou até mesmo a definição de padrões legais de qualidade baseados em concentrações máximas aceitáveis.

Por fim, a temática dos microplásticos em ambientes aquáticos é ampla e permeia por diversos assuntos, que vão da dinâmica das partículas nos compartimentos ambientais a estudos de caráter toxicológico e ecotoxicológico, passando pela avaliação e/ou desenvolvimento de metodologias analíticas para quantificação destes materiais. Há aqui uma grande oportunidade no desenvolvimento científico, já que a literatura no Brasil ainda se demonstra carente de pesquisas nestas áreas. Espera-se que este estudo possa contribuir de alguma forma com futuras pesquisas neste vasto campo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2022. 2022.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020 – Abordagem Metodológica. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/abordagem-metodologica-2020/>>.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>>.
- AKDOGAN, Z; GUVEN, B. Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental pollution*, v. 254, p. 113011, 2019.
- BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2021). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf>.
- BUZO, M. G., TECCO, V. S. Levantamento de legislações proibitivas para o consumo de plásticos descartáveis nas capitais dos estados brasileiros. *Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas*, Macapá, n.12, p.113-123, 2020.
- DA COSTA, J. P; DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. Plásticos no ambiente. *Recursos Hídricos*, v. 40, n. 1, 2019.
- GODVINSHARMILA, V. et al. Microplastics as emergent contaminants in landfill leachate: Source, potential impact and remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, v. 343, p. 118240, 2023.
- HIDALGO-RUZ, V. et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental science & technology*, v. 46, n. 6, p. 3060-3075, 2012.
- ISO/TR 21960:2020, Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies (ISO/TR 21960:2020).
- KERSHAW, P. J; TURRA A; GALGANI F. Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. 2019.
- LIU, L. et al. On the degradation of (micro) plastics: Degradation methods, influencing factors, environmental impacts. *Science of the Total Environment*, v. 806, p. 151312, 2022.
- MAI, L. et al. Global riverine plastic outflows. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 16, p. 10049-10056, 2020.
- MONTAGNER, C. C. et al. Microplásticos: Ocorrência Ambiental e Desafios Analíticos. *Química Nova*, v. 44, p. 1328-1352, 2021.

OLIVATTO, G. P. et al. Microplásticos: Contaminantes de preocupação global no Antropoceno. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 6, p. 1968-1989, 2018.

PICPLAST – PLANO DE INCENTIVO À CADEIA DO PLÁSTICO. 2022. Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil.

RAHMAN, A. et al. Potential human health risks due to environmental exposure to nano-and microplastics and knowledge gaps: a scoping review. *Science of the Total Environment*, v. 757, p. 143872, 2021.

SHARMA, S. et al. Microplastics in the environment: occurrence, perils, and eradication. *Chemical Engineering Journal*, v. 408, p. 127317, 2021.

SHI, H. et al. Small plastic fragments: A bridge between large plastic debris and micro-& nano-plastics. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, p. 117308, 2023.

SILVA, A. L. P et al. Analytical methodologies used for screening micro (nano) plastics in (eco) toxicity tests. *Green Analytical Chemistry*, p. 100037, 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP). UNEA Resolution 5/14 entitled “End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument”. Dakar, Senegal, 2022. Disponível em: <
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/39812/OEWG_PP_1_INF_1_UNEA%20resolution.pdf> .

WANG, H. et al. Marine micro (nano) plastics determination and its environmental toxicity evaluation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, p. 117332, 2023.