

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ANA PAULA COTRIM DE MIRANDA

Impacto dos microplásticos: uma revisão sistemática da literatura quanto às técnicas de análises existentes

São Paulo

2024

Impacto dos microplásticos: uma revisão sistemática da literatura quanto às técnicas de análises existentes

Versão Corrigida

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*.

Orientadora: Professora Dra. Carolina Afonso Pinto

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

de Miranda, Ana Paula

Impacto dos microplásticos: uma revisão sistemática da literatura quanto às técnicas de análises existentes. / A. P. de Miranda -- São Paulo, 2024.

35 p.

Monografia (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.Microplástico 2.Técnicas de análise 3.Água superficial
4.contaminantes emergentes 5.Áreas contaminadas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha imensa gratidão a Deus, cuja orientação e força foram fundamentais ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe, cujo amor, apoio e dedicação foram essenciais em todos os momentos desta trajetória. Minha família, que sempre esteve ao meu lado, merece meu profundo agradecimento por todo incentivo e compreensão. Agradeço também à Dra. Carolina Pinto minha orientadora e à Jacqueline Zanin, minha coorientadora, pela orientação valiosa, apoio e incentivo durante a elaboração desta monografia. Agradeço a Jane Flor mestre e especialista, colega de trabalho que me inspirou na escolha deste tema tão importante nos dias de hoje. Expresso minha gratidão à Ana Paula Aguiar e Camila Medina, por terem sido as primeiras mentoras e proporcionado minhas primeiras oportunidades no campo profissional. Agradeço imensamente ao Julio Vilar, que me introduziu ao mundo da Investigação em alta resolução, além de instigar a busca pelo conhecimento dos contaminantes emergentes, e ao Paulo Negrão, que compartilhou seu conhecimento em Cromatografia Gasosa em matrizes líquidas e sólidas para análises em tempo real garantindo a melhor tomada de decisões em campo. Todos vocês desempenharam papéis significativos em minha jornada, e sou profundamente grata por cada ensinamento, apoio e oportunidade concedida.

RESUMO

MIRANDA, Ana Paula Cotrim de. Impacto dos microplásticos: uma revisão sistemática da literatura quanto as técnicas de análise existentes. 2024. 35 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Este estudo abordou a análise de microplásticos em águas superficiais por meio de uma revisão das metodologias científicas contemporâneas. No contexto de áreas contaminadas, destaca-se o crescente desafio da poluição por microplásticos nos ecossistemas aquáticos. Isso ressalta a necessidade crítica de métodos precisos para identificar e quantificar esses contaminantes emergentes. O estudo compôs sua base de dados por meio da exploração de bancos de dados *online*, utilizando critérios específicos de busca e seleção de artigos acadêmicos. Além disso, a pesquisa foi expandida globalmente, considerando contribuições relevantes de diversos países. A partir da exploração de diferentes técnicas analíticas, três delas foram examinadas: Cromatografia Gasosa de Termo-desorção-Espectrometria de Massas (TED-GC–MS), Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) e Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE). O estudo detalhou as vantagens, limitações e aplicações específicas de cada técnica na identificação e quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos. Elas compartilham características como precisão, sensibilidade e a capacidade de identificar e quantificar diferentes polímeros em vários tamanhos de microplásticos. Além de oferecer informações detalhadas sobre composição, distribuição e impacto nos ecossistemas aquáticos. A versatilidade na aplicação permite a utilização de diversas matrizes ambientais, indo além da água superficial. O TED-GC–MS se destaca por sua precisão na identificação de diversos polímeros em diferentes tamanhos de microplásticos, especialmente em amostras complexas, como efluentes de Estações de Tratamento de Águas. A HPLC demonstra eficiência na separação e identificação de compostos associados aos microplásticos em ambientes de água doce. Por outro lado, a EIE apresenta uma abordagem inovadora ao utilizar a resposta elétrica das amostras para detectar e quantificar microplásticos na água. No entanto, são discutidos desafios, como a complexidade técnica, custos de equipamentos e a necessidade de validação precisa dos resultados. Assim, este estudo proporcionou uma visão geral das técnicas modernas para a detecção de microplásticos, destacando suas vantagens, limitações e áreas para pesquisas futuras. O avanço contínuo nestas técnicas é fundamental para a compreensão mais precisa do impacto dos microplásticos nos ecossistemas aquáticos, permitindo estratégias mais eficazes para mitigar sua presença e os impactos ambientais e humanos.

Palavras-chave: Microplástico. Técnicas de análise. Água superficial. Contaminantes emergentes. Áreas contaminadas.

ABSTRACT

MIRANDA, Ana Paula Cotrim de. Impact of microplastics: a systematic review of the literature on existing analysis techniques. 2024. 35 f. Monograph (MBA in Contaminated Areas Management, Sustainable Urban Development and Brownfield Revitalization) – Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2024.

This study addressed the analysis of microplastics in surface waters through a review of contemporary scientific methodologies. In the context of contaminated areas, the growing challenge of microplastic pollution in aquatic ecosystems is highlighted. This underscores the critical need for accurate methods to identify and quantify these emerging contaminants. The study composed its database through the exploration of online databases, using specific criteria for search and selection of academic articles. In addition, the research was expanded globally, considering relevant contributions from several countries. From the exploration of different analytical techniques, three of them were examined: Thermal desorption-Mass Spectrometry Gas Chromatography (TED-GC-MS), High Performance Liquid Chromatography (HPLC) and Electrical Impedance Spectroscopy (EIS). The study detailed the advantages, limitations, and specific applications of each technique in identifying and quantifying microplastics in aquatic environments. They share characteristics such as accuracy, sensitivity, and the ability to identify and quantify different polymers in various sizes of microplastics. In addition to offering detailed information on composition, distribution and impact on aquatic ecosystems. The versatility in the application allows the use of various environmental matrices, going beyond surface water. TED-GC-MS stands out for its accuracy in identifying various polymers in different sizes of microplastics, especially in complex samples, such as effluents from Water Treatment Plants. HPLC demonstrates efficiency in separating and identifying compounds associated with microplastics in freshwater environments. On the other hand, EIE presents an innovative approach by using the electrical response of samples to detect and quantify microplastics in water. However, challenges such as technical complexity, equipment costs, and the need for accurate validation of results are discussed. Thus, this study provided an overview of modern techniques for the detection of microplastics, highlighting their advantages, limitations, and areas for future research. Continuous advancement in these techniques is key to a more accurate understanding of the impact of microplastics on aquatic ecosystems, allowing for more effective strategies to mitigate their presence and environmental and human impacts.

Keywords: Microplastic. Analysis techniques. Surface water. Emerging contaminants. Contaminated areas.

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas	Hz Hertz (frequência)
ASP Lodo Ativado Convencional	AC Corrente alternada
CG-MS Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas	MHz Megahertz (milhões de hertz)
DAF Flotação por Ar Dissolvido	IQH Índice de Qualidade de Acerto
DHI Digital Holographic Imaging	LDIR Infravermelho de baixa dispersão
EIA Electrical Impedance Spectroscopy	MBR Biorreator de membrana
EIE Espectroscopia de Impedância Elétrica	MEV Microscopia eletrônica de varredura
ETA Estação de Tratamento de Água	MP Microplástico
ETE Estação de Tratamento de Esgoto	MS Espectrometria de Massas
EUA Estados Unidos da América	NaCl Cloreto de sódio (sal comum)
FFF Fracionamento em Fluxo de Campo	ONU Organização das Nações Unidas
FLIM Lifetime Imaging Microscopy	OS Sistema operacional
FMR Rotor Molecular Fluorescente	PA Poliamida
FTIR Análise de infravermelho	PBi Portal de Busca Integrada
GAC Filtração por areia (Carvão ativado granulado)	PE Polietileno
GC Cromatografia Gasosa	PEAD Polietileno de alta densidade
GRID-Arendal Centro de Colaboração para Informação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável	PEBD Polietileno de baixa densidade
IR Análise de infravermelho	PP Polipropileno
HDC Cromatografia Hidrodinâmica	PS Poliestireno
HPLC Cromatografia Líquida de Alta Eficiência	EPS Poliestireno expandido
HR-MS Espectrometria de massas de alta resolução	PET Tereftalato de polietileno
	PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
	PU Poliuretanos
	PVA Álcool polivinílico

PVC Cloreto de polivinila

SIBiUSP Sistema Integrado de Bibliotecas da USP

Pyr GC-MS Cromatografia Gasosa de Pirólise-Espectrometria de Massas

RC Resistor e capacitor

SVM Support Vector Machine (Máquina de Vetores de Suporte)

TD-PTR-MS Dessorção Térmica – Reação de Transferência de Prótons – Espectrometria de Massas

TED-GC–MS

TGA Unidade de Análise Termogravimétrica

USP Universidade de São Paulo

WWF World Wildlife Fund (Fundo Mundial para a Natureza)

μm Micrômetro (1 milionésimo de metro)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	10
3. JUSTIFICATIVA.....	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
4.1 Plásticos e microplásticos	12
4.2 Plásticos e o meio ambiente	13
4.3 Contaminação da água doce	14
4.4 Impacto dos microplásticos.....	15
4.5 Técnicas de análise para microplásticos	16
5. MATERIAIS E METODOS	19
5.1 Estratégias de busca.....	20
5.2 Amostra selecionada	22
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6.1 Cromatografia Gasosa de Termo-desorção -Espectrometria de Massas.....	23
6.2 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência	24
6.3 Espectroscopia de Impedância Elétrica	26
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

Os microplásticos, fragmentos minúsculos de plástico comumente definidos como partículas com diâmetro inferior a 5 mm, emergiram como uma preocupação global em relação à contaminação ambiental. Essas pequenas partículas, resultantes da degradação de plásticos maiores ou produzidas diretamente na forma de microplásticos, tornaram-se uma presença ubíqua nos oceanos, promovendo impacto no meio ambiente e na saúde dos organismos que nele habitam (POMPEO et al., 2022).

A crescente preocupação com a poluição ambiental nas últimas décadas culminou na elaboração do relatório emitido pela ONU (Organização das Nações Unidas) em 2022, onde foi apresentado o impacto da poluição plástica no meio ambiente, indicando a necessidade de reformular padrões de produção, comercialização e descarte desses materiais a nível mundial.

Uma das metas globais é a redução da poluição nos oceanos. Dessa forma, no contexto da gestão de áreas contaminadas, a presença de microplásticos assume uma relevância cada vez maior. A gestão eficaz dos recursos hídricos requer não apenas o conhecimento e o controle de poluentes convencionais, mas também a consideração de contaminantes emergentes.

Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura existente sobre técnicas de análise relacionadas aos microplásticos em águas superficiais, considerando que essas águas fluem em direção aos oceanos. Para isso, foram abordados estudos científicos recentes, publicados entre 2022 e 2023 sobre a presença de microplásticos e as técnicas de análise utilizadas. Espera-se que essa pesquisa contribua para ampliar a compreensão dos desafios e oportunidades associados à contaminação por microplásticos em águas superficiais no Brasil, com ênfase na liderança em preservação ambiental e saúde humana.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho de levantamento bibliográfico foi analisar e sintetizar as informações existentes na literatura científica sobre o impacto dos microplásticos nas águas superficiais, além de obter uma progressão das técnicas de análises de microplásticos em ambientes aquáticos, fornecendo uma visão geral e atualizada sobre o tema.

3. JUSTIFICATIVA

Adotar uma nova perspectiva sobre os períodos históricos da humanidade é essencial, especialmente ao considerarmos os materiais que têm influenciado e continuam a influenciar nossa civilização. Como argumentado por Mindrisz et al. (2023), “ao longo da história, a humanidade tem caracterizado suas eras com base nos materiais dominantes, como na Idade da Pedra, do Bronze e do Ferro”. No entanto, conforme observado por Ilechukwu (2019), “atualmente estamos vivendo uma nova era: o Plastioceno”.

Segundo a ONU (2022), caso não ocorra alguma ação urgente relacionada à presença de microplásticos, as 11 milhões de toneladas que hoje chegam aos oceanos anualmente triplicarão nos próximos vinte anos, chegando a aproximadamente 37 milhões de toneladas de microplásticos em 2040. O aumento alarmante de microplásticos não apenas ameaça os ecossistemas, mas também contribui diretamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa, pois sua decomposição libera gases como metano e etileno, agravando as mudanças climáticas.

A Resolução 5/14 da Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente apresentou a grave ameaça global relacionada à poluição plástica (PNUMA, 2022). O documento, denominado "Acabar com a poluição plástica: rumo a um instrumento internacional juridicamente vinculativo", destaca-se como um dos acordos ambientais multilaterais mais importantes desde a implementação do Acordo de Paris (2015) sobre mudanças climáticas (ONU, 2022).

A Resolução reforça a importância da gestão de áreas contaminadas ao reconhecer os resíduos plásticos como um fator relevante na contaminação do solo, água e do ar. O descarte inadequado desses materiais resulta no aumento de microplásticos e na liberação gradual de produtos químicos tóxicos, poluindo os recursos hídricos e o solo. Portanto, a gestão eficaz de áreas contaminadas deve considerar os microplásticos como uma fonte emergente de contaminação, exigindo estratégias específicas para prevenir e remediar essa poluição ambiental.

A justificativa deste trabalho é a importância de compreender e abordar adequadamente a contaminação por microplásticos, que são contaminantes emergentes, no contexto do manejo de áreas contaminadas. O conhecimento sobre as técnicas de investigação dos microplásticos

é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de remediação e prevenção da contaminação, visando a proteção do meio ambiente e da saúde humana.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Informações relativas às abordagens metodológicas atuais foram reunidas durante a pesquisa sobre os impactos dos microplásticos em águas superficiais. Os métodos confiáveis e integrados, empíricos e não empíricos, teóricos e práticos relacionados à análise desses compostos em água serão apresentados a seguir.

4.1 Plásticos e microplásticos

Plásticos são formados por polímeros sintéticos derivados de fontes de carbono fóssil. Além disso, outros produtos químicos são adicionados aos polímeros para conferir propriedades específicas, tais como: cor, flexibilidade, estabilidade, repelência à água, retardamento de chama e resistência ultravioleta (LANDRIGAN et al., 2023).

São materiais “constituídos por macromoléculas, estruturas químicas de alto peso molecular, formadas por uma grande cadeia de monômeros, unidades químicas menores, que são unidas por ligações covalentes e que se repetem ao longo da cadeia” (OLIVATTO et al., 2018).

A densidade das partículas de plástico dispersas no meio ambiente varia de 0,8 a 2 g/cm³, sendo a mais recorrente, segundo os estudos, a de 1 g/cm³. O peso em média é de 12,5 µg. Essa variação é influenciada pelos diferentes polímeros utilizados em sua produção, com destaque para polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET), poliamida (PA), polipropileno (PP), poliestireno (PS), álcool polivinílico (PVA) e cloreto de polivinila (PVC) (KOELMANS, 2023; RANI-BORGES, 2022).

O plástico é classificado em três grupos: termoplásticos, representando a maior proporção, que são passíveis de derretimento e solubilização repetidos; duroplásticos, caracterizados pela estabilidade por não serem fusíveis; e elastômeros, menos estáveis, mas dotados de elasticidade devido à sua estrutura molecular (MICHAELI; GREIF; KAUFMANN, 1997).

Conforme Ashjar et al. (2023), os plásticos são categorizados em: macroplásticos, microplásticos e nanoplásticos, com base no tamanho das partículas. Arbitariamente, qualquer detrito de plástico com dimensão inferior a 5 mm é classificado como microplástico.

No entanto, fragmentos que variam de 1 a 5.000 μm , ocasionalmente também de 1.000 μm , são denominados nanoplásticos (SCHNEPF, 2023; KOELMANS, 2023).

De acordo com a origem do material, também são classificados como: microplástico primário e microplástico secundário (MONTAGNER et al., 2021; HUANG et al., 2023; KOELMANS, 2023).

“O microplástico primário é aquele que já foi produzido em tamanho microscópico para compor a formulação de determinados produtos, denominado pela indústria como “pellet” e o microplástico secundário é aquele resultante da fragmentação de artefatos de plásticos maiores descartados no meio ambiente, que tanto pode ocorrer no ambiente aquático ou terrestre”. Montagner et al., (2021, p.1974).

Essas pequenas partículas resultantes de fontes primárias podem ser originadas por processos como fotooxidação, fragilização, propagação de fissuras, abrasão, erosão, biodegradação, bioincrustação e agregação. Tais processos impactam propriedades físicas e químicas do polímero, incluindo cristalinidade, densidade e resistência (KOELMANS et al., 2022; RANIBORGES 2022).

A pequena escala dos microplásticos, e os riscos conhecidos e desconhecidos sobre os danos que este contaminante emergente pode trazer, levantam preocupações especiais no âmbito do gerenciamento de áreas contaminadas, tanto para os ecossistemas como para a saúde humana.

4.2 Plásticos e o meio ambiente

A produção mundial de plástico atingiu 359 milhões de toneladas em 2018, de acordo com a *PLASTIC EUROPE* (2019). Com projeções de diferentes órgãos ambientais indicando que o aumento, podendo chegar a 590 milhões de toneladas até 2050 (LANDRIGAN et al., 2023; GIRISH et al., 2023).

O crescente aumento na fabricação de plástico nas últimas décadas pode estar relacionado ao consumo de plásticos para uso único (KOELMANS et al., 2022). Esses itens representam metade do uso de plásticos em 2022, são eles o polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e poliestireno expandido (EPS) (ONU, 2022).

A gestão incipiente dos resíduos sólidos, e o descarte inadequado, ajudam a aumentar exponencialmente o problema, favorecendo o aumento quantitativo de microplásticos no meio

ambiente conforme apresentado por Azevedo (2023); Rani-Borges (2022); Koelmans et al. (2022). Esse cenário torna poluição por microplásticos um tema cada vez mais grave e urgente (HUANG et al., 2023).

O descarte ineficiente contribui significativamente para alterações nos aspectos físicos e químicos através da degradação dos polímeros que passam de macromoléculas para nanomoléculas (MONTAGNER et al., 2021).

Atualmente, está em discussão a adoção de medidas mais eficazes para coleta seletiva e reciclagem, discutem-se também alternativas como materiais plásticos biodegradáveis, polímeros hidrofílicos, oxibiodegradáveis, bioplásticos, além da aplicação da logística reversa (CARVALHO, 2023; NIAMH, 2023).

Azevedo (2022) destaca a importância dos “3R’s (reduzir, reutilizar e reciclar)” como base de uma política nacional de gestão de resíduos, enfatizando a necessidade de novas práticas de consumo e práticas de ensino para uma sociedade mais sustentável.

4.3 Contaminação da água doce

O levantamento realizado pela WWF em 2019, indica que o Brasil é considerado um dos maiores geradores de resíduos plásticos do mundo, totalizando 11,4 milhões de toneladas por ano, com apenas 1,28% sendo reciclado. Cerca de 75% de todo o plástico já produzido é lixo e 80% da poluição plástica nos oceanos é originada em terra (PEREIRA et al., 2021; KOELMANS et al., 2023; HUANG et al., 2023; WWF, 2019).

Outro ponto importante, de acordo com Huang et al. (2023), Girish et al. (2023), e Koelmans (2023), são as estações de tratamento de efluentes (ETEs), as principais fontes de microplásticos no meio ambiente, retraindo a maior parte desses resíduos, que varia de 70% a 99,9%. No entanto, devido ao grande volume de efluentes tratados diariamente e às diferentes metodologias de separação de sólidos nas ETEs, bilhões de partículas de microplástico podem ser liberadas diariamente nas águas superficiais.

Geralmente os microplásticos são eliminados nas ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) por meio do processo de tratamento, constituído de diversas etapas, que inclui tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário, empregando técnicas como coagulação, flotação por ar dissolvido (DAF), filtração por areia/GAC, lodo ativado

convencional (ASP), biorreatores de membrana (MBRs) e ozonização (BUI et al., 2020 *apud* GIRISH et al., 2023).

A remoção de microplásticos (MPs) por meio de tratamentos nas ETEs é um desafio complexo. A sedimentação primária, por exemplo, concentra-se na remoção de MPs flutuantes à superfície da água, enquanto a ozonização fragmenta microplásticos maiores em partículas ainda menores, tornando-os mais propensos a escapar do processo de tratamento. Por sua vez, o lodo ativado convencional (ASP) exige espaço considerável e resulta na produção de lodo que pode conter MPs menores. Já os biorreatores de membrana (MBRs) têm suas próprias limitações, retraindo microplásticos no lodo e enfrentando problemas de incrustação de membranas (GIRISH et al., 2023).

A coagulação é uma técnica de pré-tratamento em ETEs para remover partículas coloidais e suspensas na água. Nos últimos anos, tem ganhado interesse no tratamento de água e efluentes, porém a presença de Íons sulfato (SO_4^{2-}) pode influenciar, reduzindo a eficiência da coagulação (GIRISH et al., 2023).

4.4 Impacto dos microplásticos

O estudo de Girish et al. (2023) alinhado com Koelmans et al. (2023), defende que entender as técnicas de tratamento eficientes de água e efluentes é crucial para remoção dos microplásticos de matrizes aquosas. Enquanto medidas para lidar com esse problema relativamente recente, que causa danos há algum tempo, são discutidas e ajustadas, é fundamental compreender sobre as técnicas de amostragem de microplásticos para análise física e química desses poluentes.

Os microplásticos em ambientes aquáticos são originários de rios e tratamento de esgoto. Portanto, analisar essas partículas minuciosamente é necessário para enfrentar a poluição que causam, apesar da complexidade das informações, como aponta (HUANG et al., 2023).

“ De forma alarmante, um estudo recente sobre a poluição marinha por plástico pela GRID-Arendal, parceira do PNUMA, indica que os quatro ecossistemas costeiros que armazenam mais carbono e servem como barreiras naturais contra a subida dos mares e tempestades - manguezais, gramas marinhas, pântanos salgados e recifes de corais - estão sendo colocados sob pressão da poluição plástica terrestre como consequência de sua proximidade com os rios”. (ONU, 2022).

O impacto dessas partículas no meio ambiente está disponível em diversas fontes de pesquisa, porém para os humanos, os efeitos ainda não foram totalmente mapeados e os modelos aplicados são incompletos e não considera riscos acumulados, como riscos químicos e risco a

saúde humana Lin (2022); Koelmans (2022). Porém, os efeitos negativos da exposição a MPs na saúde humana têm sido altamente preocupantes, e modelos que utilizam camundongos apresentam resultados de efeitos tóxicos e distúrbios do metabolismo do trato intestinal e fígado, capacidade reprodutiva prejudicada e comportamento alterado (LIN, 2022).

Embora os estudos de toxicidade para saúde humana estejam na fase preliminar, é urgente aprofundar a pesquisa sobre o impacto dos microplásticos para abordar questões ambientais importantes, proteger a saúde humana, desenvolver técnicas de pesquisa mais eficazes e promover a gestão sustentável dos recursos naturais (LANDRIGAN et al.2023; LIN, 2022; e ONU, 2022).

Antes de considerar as técnicas de análise de microplásticos, é importante entender como essas partículas são coletadas. Fu et al. (2020), mencionam métodos comuns, como inspeção visual, separação por densidade e tratamentos químicos.

4.5 Técnicas de análise para microplásticos

As técnicas de análise de microplásticos envolvem caracterização física, identificação química e análise quantitativa. Compreender essas técnicas requer o domínio de abordagens metodológicas empíricas e teóricas. O objetivo é consolidar o conhecimento para análise de microplásticos em águas superficiais, fornecendo uma base sólida para futuras ações (FU et al., 2020).

A avaliação e quantificação dos microplásticos é desafiadora devido à diversidade de metodologias aplicadas nos estudos Koelmans et al., (2023). E segundo Schnepf (2023), o maior desafio é a simplificação dos modelos frente à variedade de formas e tamanhos, carecendo de uma base de dados coesa. O próprio termo atribuído aos fragmentos inferiores a 5 mm é, por si só, vago, representando uma mistura heterogênea de polímeros com inúmeras formas, tamanhos e superfícies (KOELMANS et al., 2023).

Schnepf (2023) defende que as técnicas de análise precisam fornecer dados abertos sobre o tamanho e características das partículas para que seja possível a aplicação em métodos estatísticos mais precisos. O desafio é grande, estabelecer modelos confiáveis implica no mapeamento de diferentes características e agrupamento dessas nos modelos estatísticos.

As técnicas e ações para captura dos microplásticos em águas superficiais podem ser tradicionais ou arrojadas. A pesquisa de Peng et al. (2023), apresenta os microrrobôs que

demonstraram eficácia ao trabalhar em conjunto, seguindo o modelo de 'unidade na diversidade'. Durante a irradiação de luz e fotocatalise subsequente, a morfologia dos microrrobôs transformou-se em redes porosas, capturando eficientemente os microplásticos para sua degradação.

Para Piyathilake (2023) os métodos analíticos existentes sejam justificáveis apenas para microplásticos, eles não são totalmente padronizados para nanoplásticos. Essa observação ressalta a necessidade contínua de desenvolvimento e aprimoramento de técnicas analíticas para abranger adequadamente as dimensões cada vez menores dos poluentes plásticos.

Whiting et al. (2022) evidenciaram a eficácia do método de oxidação com reação de Fenton em riachos urbanos próximos a Cincinnati, OH. O protocolo envolveu a filtração em membrana de poliéster revestida com ouro e análise com infravermelho, para identificação precisa dos polímeros, alcançando notável recuperação de $88,3\% \pm 1,2\%$. Essa abordagem possibilitou a quantificação eficiente de microplásticos até 20 μm , equiparando-se a técnicas como FTIR e espectroscopia Raman. Além de apresentar um algoritmo de classificação de forma, que utiliza valores de razão de aspecto para categorizar microplásticos em fibras, fragmentos fibrosos, fragmentos, fragmentos esféricos e esferas. Neste caso ocorreu uma classificação mais eficaz das amostras, sendo metade delas composta por fragmentos, enquanto as formas restantes compunham a outra metade (WHITING et al., 2022).

O estudo apresentado por Whiting et al. (2022), destaca que a implementação de um índice de qualidade de acerto (IQH) de 0,7 facilitou a classificação das partículas conhecidas e não identificadas com base em correspondências espectrais. A comparação com padrões do *Center for Marine Debris Research Polymer Kit 1.0*, analisados por *Low-Dispersive Infrared* (LDIR), ressaltou a similaridade nas identificações em relação às análises de FTIR, evidenciando a atratividade do LDIR pela sua automação e simplicidade em análises de alto rendimento de microplásticos (WHITING et al., 2022).

Piyathilake (2023), apresenta a evolução de novas tendências de pesquisas em métodos instrumentais para determinação qualitativa e quantitativa de microplásticos. Foram considerados 800 artigos publicados entre 2004 e 2022, em seu último trabalho, que apresentou o Fracionamento em Fluxo de Campo (FFF) e a Cromatografia Hidrodinâmica (HDC) emergindo para extração desses materiais.

Desenvolvimentos modernos, como o Rotor Molecular Fluorescente (FMR) e a Reação de Dessorção Térmica-Transferência de Prótons-Espectrometria de Massas (TD-PTR-MS), além de técnicas avançadas de imagem, como *Digital Holographic Imaging* (DHI) e *Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy* (FLIM), proporcionam análises precisas em nanoescala da topografia da superfície de nanoplásticos (PIYATHILAKE, 2023).

Em relação às técnicas implementadas a partir de 2022, destaca-se um contador de partículas com análise óptica, utilizado para a detecção quantitativa de microplásticos (MPs) na água através da Fluorescência em tempo real (NICOLAI, 2022). A pesquisa conduzida em laboratório empregou amostras reais provenientes de uma estação de tratamento de esgoto municipal, utilizando um microscópio confocal de fluorescência projetado para identificar micropartículas de plástico em amostras líquidas. Os resultados foram confrontados com medidas de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) tradicional, corroborando a presença de polietileno PEAD e uma quantidade insignificante de PVC (NICOLAI, 2022).

Le Juge et al. (2023), referindo-se à técnica de Cromatografia Gasosa de Pirólise-Espectrometria de Massas (Pyr GC MS), mostrou que essa metodologia permite a análise de partículas em diversas matrizes ambientais, incluindo água doce, águas residuais, solo e matéria orgânica. A abordagem destrutiva do Pyr GC MS envolve a decomposição anaeróbica das partículas, seguida pela separação cromatográfica e quantificação por espectrometria de massas. Comparado às técnicas espectroscópicas convencionais, o Pyr GC MS destaca-se por sua capacidade de detalhar a composição química dos polímeros, confirmando suas estruturas independentemente de variações de tamanho, forma ou aditivos.

A Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), com base na pesquisa de Huang et al. (2023), identifica, caracteriza e quantifica moléculas orgânicas em partículas plásticas. Semelhante à Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG MS), essa técnica utiliza cromatogramas padrão de polímeros para identificação. Destaque para a complexidade e demora na preparação da amostra, comparando com métodos como a Pyro GC MS. A literatura destaca limitações da HPLC na determinação precisa de microplásticos em amostras reais, indicando a necessidade de novos protocolos, especialmente para nanoplásticos (PIYATHILAKE, 2023).

Para Bifanio et al. (2023), existe uma nova tendência na aplicação do EIA (Electrical Impedance Spectroscopy) para a quantificação de microplásticos em sistemas de água doce corrente. Nesse método, eletrodos são submersos na água em movimento para avaliar a impedância causada pela resistência das partículas. Essa abordagem permite uma medição calibrada que facilita a identificação e a quantificação das partículas de microplástico presentes na água corrente.

Já Moraz e Breider (2021) detectaram e quantificaram microplásticos não marcados utilizando Rotor Molecular Fluorescente (FMR), com aplicação em amostras biológicas. Neste estudo conclui-se que, quando esse método é comparado a outras novas tendências, ele oferece mais vantagens em termos de manuseio de equipamentos.

A técnica de Dessorção Térmica – Reação de Transferência de Prótons – Espectrometria de Massas (TD-PTR-MS) é empregada para detectar e medir nanoplásticos de diferentes tipos na água. Por meio desse método, diversos polímeros, como PE, PP, PET, OS, PVC, e até mesmo resíduos de pneus, foram identificados, resultando na quantificação dos vapores plásticos ionizados por meio da técnica aplicada AL-AZZAWI et al., 2022; LE JUGE et al., 2023; HANKETT, et al., 2023; PIYATHILAKE, 2023; MEILER et al., 2023; BIFANIO et al., 2023

5. MATERIAIS E METODOS

Para constituir a base de dados desta pesquisa, foram explorados bancos de dados *online* de fontes acadêmicas, visando obter um panorama atualizado a partir de estudos publicados entre os anos de 2022 e 2023. O objetivo primordial foi obter uma progressão das técnicas de análise de microplásticos em ecossistemas aquáticos.

A pesquisa foi conduzida com base em critérios pré-estabelecidos, que incluíram a seleção criteriosa do período de publicação, a definição precisa de palavras-chave para as buscas nos sites e a aplicação de métodos de análise específicos para microplásticos em ambientes aquosos. A seguir, detalhamos as etapas fundamentais que compõem a construção deste referencial teórico.

5.1 Estratégias de busca

A pesquisa foi realizada em diversas plataformas acadêmicas, englobando fontes nacionais e internacionais, com o propósito de oferecer uma visão geral sobre o tema dos microplásticos. Os critérios adotados para a busca sistemática incluíram:

Palavras-chave: Foram utilizadas as palavras "Microplásticos" e "Microplastics" em inglês e português, excluindo outros idiomas para refinar os resultados nas buscas realizadas nos sites SIBiUSP, PBi (Portal de Busca Integrada), Dedalus e Periódicos Capes. Nos sites internacionais Science Direct e PubMed as palavras de busca foram Techniques, Microplastic, Investigation. conforme detalhado na **Tabela 1**.

Ano de Publicação: O foco da pesquisa esteve em artigos publicados nos anos de 2022 e 2023, visando obter informações atualizadas sobre o tema. Nos sites Science Direct e PubMed, o foco do ano de publicação foi ainda mais recente, para o ano de 2023.

Ordenação por Data: A ordenação dos resultados foi feita pela data mais recente, visando identificar as técnicas e descobertas mais atuais na área dos microplásticos. Na tabela a seguir observa-se de forma ordenada o quantitativo de pesquisas publicadas para o tema dentro do contexto ambiental de interesse.

Tabela 1. Estratégia e critérios de busca para elaboração deste estudo

Fonte de busca	Ano da Publicação	Palavras-chave buscadas	Número de Artigos obtidos na busca
SIBiUSP	2022 /2023	Microplásticos Microplastics	27
PBi (Portal de Busca Integrada)	2022 /2023	Microplásticos Microplastics	22
Dedalus	2022 /2023	Microplásticos Microplastics	21
Periódicos Capes	2022 /2023	Microplásticos Microplastics	18
Science Direct	2023	Techniques, Microplastic,	48
PubMed	2023	Investigation	52

Fonte: Dados compilados pela autora (2024).

Por fim, dos 188 artigos inicialmente obtidos na busca sistemática, foram aplicados critérios adicionais de seleção como:

- Relevância do conteúdo para o objetivo da pesquisa.
- Qualidade da metodologia utilizada nos estudos.
- Atualidade dos dados apresentados.
- Coerência com os temas abordados na pesquisa.

Após a análise dos estudos, foram identificados 16 artigos que discutiram sobre o tema de microplásticos em matrizes aquosas. Esses artigos são listados a seguir.

- 1- Amostragem de microplásticos nos efluentes de estações de tratamento de águas residuais: Melhores práticas e sinergias entre análises termoanalíticas e espectroscópicas (AL-AZZAWI et al., 2022).
- 2- Distribuição de microplásticos (MPs) nos sedimentos superficiais do Pântano Freidounkenar (ASHJAR N et al., 2023).
- 3- Plásticos e microplásticos como tema gerador no ensino de polímeros sob o prisma da sustentabilidade. (AZEVEDO et al., 2022).
- 4- Detecção de microplásticos na água usando espectroscopia de impedância elétrica e máquinas de vetor de suporte. (Sensores e Sistemas de Medição) (BIFANIO et al., 2022).
- 5- Remoção coagulativa de microplásticos de matrizes aquosas: Progressos recentes e perspectivas futuras (GIRISH et al., 2023).
- 6- Importância da matriz: novas perspectivas para a extração, preparação e quantificação de microplásticos em um estudo de mesocosmos de água doce (HANKETT et al., 2023).
- 7- Métodos analíticos para microplásticos no meio ambiente: uma revisão (HUANG et al., 2023).
- 8- Avaliação de risco de partículas de microplástico (KOELMANS et al., 2022).
- 9- A Comissão Minderod-Monaco sobre Plásticos e Saúde Humana (LANDRIGAN et al., 2023).
- 10- Identificação de nanopartículas de poliestireno a partir de matéria orgânica natural em matrizes ambientais complexas por pirólise-cromatografia gasosa-espectrometria de massa (LE JUGE et al., 2023).

- 11- Risco potencial de microplásticos em alimentos processados: Avaliação de risco preliminar sobre tipos de polímeros, abundância e exposição humana a microplásticos (LIN et al., 2022).
- 12- Abordagens para Detectar Microplásticos na Água Usando Medidas de Impedância Elétrica e Máquinas de Vetor de Suporte (MEILER et al., 2023).
- 13- Um Novo Método Óptico para Detecção Quantitativa de Microplásticos na Água com Base em Análise de Fluorescência em Tempo Real. (NICOLAI, et al., 2022).
- 14- Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções (POMPEO et al., 2022).
- 15- Avaliação realista de risco dos microplásticos no solo é prejudicada pela falta de dados elegíveis sobre as características das partículas: Um apelo por padrões de relatório mais elevados. (SCHNEPF et al., 2023).
- 16- Uma técnica automatizada de alto rendimento para detecção, quantificação e caracterização de microplásticos em águas superficiais usando espectroscopia direta no infravermelho a laser (WHITING et al., 2022).

5.2 Amostra selecionada

A pesquisa se concentrou em técnicas modernas para analisar microplásticos, sendo que três dessas técnicas mostraram excelentes resultados na investigação desse contaminante emergente em água doce, em águas residuais e no solo. As técnicas destacadas - Cromatografia Gasosa de Pirólise-Espectrometria de Massas (Pyr GC MS), Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) e Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIA) - são técnicas fundamentais na identificação e quantificação de polímeros plásticos em diversos ambientes (AL-AZZAWI et al., 2022; LE JUGE et al., 2023; HANKETT, et al., 2023; PIYATHILAKE, 2023; MEILER et al., 2023; BIFANIO et al., 2023).

Apesar da EIA ser mais aplicada para água doce em movimento, sua capacidade de monitoramento em tempo real oferece uma avaliação dinâmica dos microplásticos. Essas técnicas permitem uma análise detalhada e ampla, contribuindo para uma compreensão abrangente dos poluentes e para melhores estratégias de gestão ambiental.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A elaboração deste trabalho resultou de uma investigação das metodologias científicas atuais para a análise de microplásticos em água superficial, incluindo técnicas como CG MS, DHI, FFF, FLIM, FMR, HDC, HPLC e TD-PTR-MS. A partir dessa compilação de dados

observou-se que três técnicas de análise são promissoras e possuem sensibilidade para quantificação de microplásticos, além de aspectos em comum como: custo de análise, rapidez de obtenção de resultados e aplicabilidade em diferentes ambientes, sobretudo em contextos aquáticos, como água doce e Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs).

A análise detalhada dos resultados das pesquisas sobre a junção de técnicas como cromatografia Gasosa de Termo-desorção – Espectrometria de Massas (TED-GC-MS), ou cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) e *Electrical Impedance Spectroscopy*, presentes nesse estudo, busca mostrar técnicas de análise de microplásticos em meio aquoso. Esta discussão não apenas evidenciará as vantagens das técnicas selecionadas, mas também apontará desafios para avanços na compreensão e mitigação de áreas contaminadas por microplásticos.

6.1 Cromatografia Gasosa de Termo-desorção -Espectrometria de Massas

A pesquisa de Al-Azzawi et al. (2022) explorou a Termo-Desorção - Cromatografia Gasosa - Espectrometria de Massas (TED-GC-MS), um método avançado para detectar e quantificar microplásticos (MPs) em amostras complexas, efluentes de Estações de Tratamento de Águas Residuais. Dois tipos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) foram examinados: efluentes secundários tratados e efluentes terciários do filtro de areia. As amostras passaram por um processo de decomposição controlada usando um adsorvente de fase sólida para liberar produtos de decomposição dos microplásticos. Esses produtos foram então submetidos à dessorção térmica, permitindo sua transferência da fase sólida para a fase gasosa.

O sistema de amostragem de Al-Azzawi et al. (2022) consistiu em uma bomba de alto volume e três filtros de cesto configurados em cascata com diferentes valores de corte (100 µm, 50 µm, 10 µm). Isso permitiu a filtragem de volumes de amostragem de até 7 m³, após a remoção da peneira de 10µm da carcaça modular. Durante a amostragem, as peneiras foram protegidas em folhas de alumínio e os procedimentos de filtração e enxágue foram feitos em uma caixa de fluxo laminar para evitar a contaminação pelo ar. As partículas foram lavadas dos filtros em copos de vidro usando água ultrapura (UPW) e uma escova de metal. As alíquotas foram filtradas usando membranas de nitrato de celulose e, em seguida, transferidas para frascos de vidro com solução de surfactante *Tween* para facilitar a remoção de partículas do filtro. A etapa seguinte envolveu a cromatografia gasosa (GC) para separar com precisão os produtos de decomposição dos microplásticos. Após essa separação, os componentes resultantes foram

introduzidos no espectrômetro de massas (MS), onde foram ionizados, fragmentados e analisados para identificação precisa dos polímeros presentes (AL-AZZAWI et al., 2022).

O método TED-GC-MS se destaca por sua capacidade de detectar vários tipos de polímeros em diferentes tamanhos de partículas de microplásticos. Sua precisão oferece uma compreensão mais profunda dos impactos desses materiais nos ecossistemas e na saúde ambiental.

A aplicação dessa técnica requer equipamentos especializados, como a Unidade de Análise Termogravimétrica (TGA) para a decomposição da amostra, o Adsorvente de Barra de Agitação de Fase Sólida para a sorção dos produtos de decomposição e o Cromatógrafo Gasoso (GC) para a separação dos componentes. O Espectrômetro de Massas (MS) é utilizado para a análise detalhada dos compostos separados (AL-AZZAWI et al., 2022).

O método não exige tratamento químico específico da amostra e pode detectar compostos em baixas concentrações. No entanto, é importante destacar que o sistema de amostragem em cascata apresentou limitações na retenção de partículas devido a filtração de bolo e irregularidades nos poros das malhas dos filtros de aço. O uso do polímero substituto PE para avaliar a eficiência de remoção de microplásticos mostrou-se promissor, mas requer mais investigação para determinar sua eficácia (AL-AZZAWI et al., 2022).

O estudo de Al-Azzawi et al. (2022) propôs um fluxo de trabalho viável para a amostragem e análise de microplásticos, enfatizando a importância da harmonização dos métodos de amostragem para garantir a comparabilidade entre estudos.

O TED-GC-MS, conforme abordado por Al-Azzawi et al. (2022), se destaca pela sua precisão na identificação de uma variedade de polímeros em diferentes tamanhos de microplásticos. Sua capacidade analítica em efluentes de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) oferece uma visão detalhada da composição e distribuição desses materiais, fornecendo informações cruciais para estudos de contaminação.

6.2 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

Hankett, et al. (2023), apresenta a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC). Nesta técnica, os componentes são separados em uma coluna cromatográfica com partículas estacionárias porosas. A amostra líquida é injetada em uma corrente de solvente (fase móvel), impulsionada por uma bomba de alta pressão através da coluna. Durante esse percurso, os

diferentes componentes interagem de maneira distinta com a fase estacionária, resultando em diferentes taxas de eluição.

No âmbito da análise de microplásticos em ambientes de água doce, a HPLC/HR-MS (Cromatografia Líquida de Alta Eficiência acoplada à Espectrometria de Massas de Alta Resolução) é uma aplicação avançada. Enquanto a HPLC separa os compostos presentes na amostra, a espectrometria de massas de alta resolução os detecta e identifica com alta precisão (HANKETT, et al., 2023).

Nesse processo, a amostra líquida é bombeada através da coluna cromatográfica para separar os lixiviáveis ou produtos químicos associados aos microplásticos, baseando-se em suas interações com a fase estacionária. Posteriormente, esses compostos são direcionados para o espectrômetro de massas, onde são ionizados e fragmentados. A análise dos íons gerados possibilita a identificação dos compostos específicos presentes na amostra (HANKETT, et al., 2023).

Os estudos de Hankett et al. (2023), indicam que, no caso de microplásticos de polímeros, como poliuretanos (PU) ou polipropilenos (PP), a HPLC/HR-MS pode detectar e quantificar compostos associados a esses polímeros. Por exemplo, a presença de 3-ciano-4-metoxi-N-metil-2-piridona, um composto associado aos microplásticos de PU, pode ser identificada e quantificada em concentrações variadas nas amostras de água doce ou sedimento (HANKETT, et al., 2023).

A amostragem foi realizada em cinco momentos ao longo de um ano, coletadas a 30 cm de profundidade. Microplásticos de poliuretano (PU) e polipropileno (PP) foram introduzidos nas colunas de água com concentração inicial de 50 mg L⁻¹.

As amostras foram preparadas para análise, incluindo secagem, transferência para gradientes de densidade, reação de Fenton para digestão de material orgânico, seguido por análises de microscopia estereoscópica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), pirólise GC/MS para quantificação de PU e PP, e análises de contaminantes orgânicos solúveis em água via HPLC/HR-MS. Os experimentos mostraram altas taxas de recuperação de microplásticos, porém desafios com materiais inorgânicos nos filtros Anodisc® exigiram ajustes nos procedimentos de preparação, sugerindo a necessidade de melhorias para análises futuras.

A técnica aplicada por Hankett, et al. (2023), oferece uma capacidade analítica avançada, permitindo a identificação de compostos químicos específicos associados aos microplásticos. Ao combinar a eficiência da separação cromatográfica com a sensibilidade e alta resolução da espectrometria de massas, essa combinação de metodologia contribui para uma análise detalhada.

A HPLC, conforme descrita por Hankett, et al. (2023) demonstra eficiência na separação e identificação de compostos associados aos microplásticos em ambientes de água doce. A combinação da separação cromatográfica com a alta resolução da espectrometria de massas possibilita a análise precisa de polímeros específicos, permitindo a identificação e quantificação detalhada desses materiais.

6.3 Espectroscopia de Impedância Elétrica

O trabalho de Meiler et al. (2023) apresenta os resultados adquiridos a partir da Espectroscopia de Impedância Elétrica (EIE), que se baseia no princípio fundamental de explorar a resposta elétrica de um sistema submetido a uma corrente alternada (AC). Essa corrente varia em amplitude e direção de maneira periódica, sendo medida em Hertz (Hz), determinando quantos ciclos completos ocorrem por segundo.

A EIE mede a impedância, que é a resistência total oferecida por um circuito à passagem da corrente alternada. Essa impedância inclui a resistência real e a reatância devido à capacitância e à indutância. Analogamente, a resistência elétrica de um circuito pode ser comparada à resistência encontrada pela água ao passar por uma mangueira apertada. Quando a corrente elétrica passa por um circuito, encontra essa resistência, que é a impedância. Esta é a soma das resistências encontradas pela corrente, considerando tanto a resistência real quanto efeitos especiais dos componentes do circuito, como capacitores e indutores (MEILER et al., 2023).

A análise na EIE é realizada em diferentes frequências para obter um espectro de impedância, revelando a resposta do sistema a diversas frequências. Na detecção de microplásticos na água, essa técnica emprega eletrodos submersos na amostra para gerar uma corrente alternada de diferentes frequências. A variação na impedância elétrica é registrada e analisada para identificar padrões que indicam a presença, concentração e tipo de microplástico presente (MEILER et al., 2023).

Essa técnica não apenas detecta a presença dos microplásticos na água, mas também quantifica. Ao medir a resposta elétrica, é possível estabelecer uma relação entre a resposta medida e a quantidade conhecida de microplásticos, permitindo a estimativa da quantidade, mesmo quando essa informação é desconhecida. Entretanto, é fundamental considerar fatores externos, como a salinidade da água, que podem influenciar a impedância elétrica e exigem cuidados na análise dos dados para garantir precisão na detecção e identificação dos microplásticos.

Embora o estudo de Meiler et al. (2023) não forneça detalhes específicos sobre a preparação pré-análise das amostras para a EIE, é comum que a preparação inclua etapas para criar suspensões plástico-água, garantir homogeneidade das amostras e remover impurezas que possam interferir nas medições (MEILER et al., 2023).

O uso do algoritmo de aprendizado de máquina, como o SVM (*Support Vector Machine*), para processar os dados da EIE oferece a capacidade de classificar tipos de microplásticos ou estimar concentrações, mas a qualidade dos resultados depende muito da qualidade dos dados e do processo de extração de características. A validação cuidadosa do modelo é essencial para garantir resultados confiáveis na detecção e quantificação de microplásticos na água.

No estudo de Meiler et al., (2023) foram realizadas medições estacionárias e dinâmicas para analisar microplásticos (MP). A célula de medição, circular e cilíndrica, possuía eletrodos de alumínio conectados a um medidor LCR E4980A da Agilent por cabos coaxiais RG174 A/U. As impedâncias foram medidas em 200 frequências logaritmicamente equidistantes de 20 Hz a 2 MHz para detectar alterações na presença de água, usando amostras repetidas e varreduras de frequência (MEILER et al., 2023).

Foram testados plásticos comumente encontrados, como polipropileno (marca: Moplen 2000HEXP da LyondellBasell Industries) e uma mistura de polietileno de baixa densidade (PEBD). Para cada teste, suspensões plástico-água foram preparadas variando de 0 a 10 g de plástico por amostra. Além disso, investigou-se o impacto da salinidade e de material biológico nas amostras, ajustando as composições das soluções. A salinidade foi simulada com diferentes teores de NaCl em água deionizada, refletindo condições de água doce, salobra e salina. A presença de material biológico foi representada pela alface *iceberg*, uma variedade de alface conhecida pelo seu formato compacto de cabeça e folhas crocantes.

A análise dos dados foi realizada no MATLAB R2021a. As medições dinâmicas envolveram o bombeamento de partículas esféricas em uma célula de medição de fluxo com uma bomba peristáltica ajustável, monitorando repetidamente a mistura água-plástico (MEILER et al., 2023).

A análise dos dados gerou curvas de impedância mostrando variações significativas na presença de diferentes concentrações de plástico, demonstrando um semicírculo característico em frequências mais altas, modelado como um circuito RC paralelo. Essas medidas são cruciais para avaliar a resposta da impedância em presença de microplásticos, fornecendo insights importantes para futuras análises e detecção desses materiais no ambiente.

Embora a técnica apresentada por Meiler et al. (2023) ofereça vantagens significativas para o monitoramento ambiental e de saúde pública, é essencial continuar a pesquisa para aprimorar sua sensibilidade, validação dos resultados e compreensão dos efeitos dos microplásticos nos ecossistemas e na saúde humana.

Após análise destas três técnicas de investigação de microplásticos em água superficial, é notável o progresso significativo no desenvolvimento de métodos para detecção desses poluentes ambientais. A Cromatografia Gasosa de Termo-desorção - Espectrometria de Massas destacou-se na identificação precisa de diferentes polímeros em microplásticos, apesar dos desafios no sistema de amostragem em cascata. A Cromatografia Líquida de Alta Eficiência, combinada com a Espectrometria de Massas de Alta Resolução, mostrou potencial na identificação e quantificação de compostos associados aos microplásticos, em diferentes ambientes incluindo água doce. Enquanto isso, a Espectroscopia de Impedância Elétrica demonstrou promessa na detecção e quantificação dos microplásticos, mas requer aprimoramentos para considerar fatores externos, como a salinidade da água, visando garantir resultados precisos. Essas técnicas específicas ressaltam a constante necessidade de avanços para melhor compreender e combater a contaminação por microplásticos em variados ambientes aquáticos.

A abordagem da EIE, tal como estudada por Meiler et al. (2023), introduz uma estratégia inovadora que explora a resposta elétrica de amostras à corrente alternada. Embora apresente capacidade de detecção e quantificação de microplásticos na água, sua sensibilidade pode ser influenciada por fatores externos, demandando análises cautelosas para resultados confiáveis.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise detalhada das metodologias científicas atuais para a detecção de microplásticos (TED-GC-MS, HPLC e EIE) revelou um panorama promissor, embora complexo, para a identificação e quantificação desses materiais em ambientes aquáticos.

Apesar do potencial dessas técnicas, há desafios significativos a serem superados, como a complexidade técnica e o custo dos equipamentos, que podem restringir sua aplicação em diferentes ambientes. Além disso, a interpretação precisa dos dados e a validação dos resultados são etapas críticas em cada uma dessas metodologias, exigindo rigor e cuidado na análise.

É imperativo destacar que avanços contínuos na pesquisa são cruciais para aprimorar a sensibilidade, precisão e validade das técnicas estudadas. O desenvolvimento de abordagens mais acessíveis e adaptáveis a diferentes condições ambientais, ou até mesmo a combinação de técnicas é essencial para uma compreensão mais abrangente do impacto dos microplásticos nos ecossistemas aquáticos e na saúde humana.

Assim, este estudo oferece uma visão geral de três métodos promissores para a detecção e análise de microplásticos. Ao salientar suas vantagens, limitações e áreas para futuras pesquisas, espera-se contribuir para o progresso contínuo no monitoramento e entendimento dos efeitos dos microplásticos, possibilitando estratégias mais eficazes para mitigar sua presença e impacto nos ecossistemas aquáticos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AZZAWI, Mohammed S.M. et al. Microplastic sampling from wastewater treatment plant effluents: Best-practices and synergies between thermoanalytical and spectroscopic analysis. *Water Research*, Volume 219, 2022, p. 118549. ISSN 0043-1354. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118549>. Acesso em: 07 dez 2023.

ASHJAR N, KESHAVARZI B, MOORE F, ZAREI M, BUSQUETS R, ZEBARJAD SM, MOHAMMADI Z. Microplastics (MPs) distribution in Surface Sediments of the Freidounkenar Paddy Wetland. *Environ Pollut.* 2023 Jan; 317:120799. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120799. Epub 2022 Nov 30. PMID: 36462675. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122020140>. Acesso em: 10 nov. 2023

AZEVEDO, Aline Soares Fonseca de. Plásticos e microplásticos como tema gerador no ensino de polímeros sob o prisma da sustentabilidade. Paracambi, 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado) - UFRJ, Instituto de Química, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (ProfQui), 2022. Orientador: Marcelo Hawrylak Herbst. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/6750>. Acesso 09 de Dez 2023.

BIFANIO, L. et al. Detection of microplastics in water using electrical impedance spectroscopy and support vector machines. *Sensors and Measuring Systems*, 21th ITG/GMA-Symposium, Nuremberg, Alemanha, 1-4, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9861922>. Acesso em 11 out. 2023.

CARVALHO, Danielli de Andrade; GONÇALVES, Anderson Tiago Peixoto. Contribuições da logística reversa na sustentabilidade de uma empresa de acumuladores elétricos. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Programa de Pós-Graduação em Gestão, 2023. Inovação e Consumo - PPGIC. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/44851>. Acesso em: 02 nov. 2023. ORCID: 0000-0002-7338-2180.

FU, Wanyi; MIN, Jiacheng; JIANG, Weiyu; li, YANG; ZHANG, Wen. Separation, characterization and identification of microplastics and nanoplastics in the environment. *Science of The Total Environment*, volume 721, 2020, p. 137561. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137561>. Acesso em: 10 nov 2023.

GIRISH, N.; PARASHAR, N.; HAIT, S. (2023). Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: Recent progresses and future perspectives. *Science of The Total Environment*, Volume 899, 15 November 2023, 165723. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165723. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723043462?via%3Dihub>.

HANKETT, J. M. et al. Matrix Matters: novel insights for the extraction, preparation, and quantitation of microplastics in a freshwater mesocosm study. *Microplastics and Nanoplastics*, v. 3, n. 1, p. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43591-023-00062-6>. DOI: 10.1186/s43591-023-00062-6. Disponível em: <https://microplastics.springeropen.com/articles/10.1186/s43591-023-00062-6>.

HUANG, Zike; HU, Bo; WANG, Hui. Analytical methods for microplastics in the environment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 21, n. 1, p. 383-401, 2023. DOI: 10.1007/s10311-022-01525-7. Métodos analíticos para microplásticos no meio ambiente: uma revisão | *Cartas de Química Ambiental* (springer.com).

ILECHUKWU, Ifenna et al. Occurrence of microplastics in surface sediments of beaches in Lagos, Nigeria. *European Chemical Bulletin*, v. 8, n. 11, p. 371-375, 2019. Disponível em: [https://scholar.google.com.br/scholar?q=Ilechukwu+\(et+al+2019\).+microplastics&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.br/scholar?q=Ilechukwu+(et+al+2019).+microplastics&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart). Acesso em: 23 out. 2023.

KÖCHE, José Carlos. Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. Petrópolis: Vozes, 2011. ISBN 85.326. p 16-35. 501. Disponível em: http://www.adm.ufrpe.br/sites/www4.deinfo.ufrpe.br/files/Fundamentos_de_Metodologia_Cienti%CC%81fica.pdf. Acesso em 20 out. 2023.

KOELMANS, A.A. et al. Risk assessment of microplastic particles. *Nat Rev Mater*, v. 7, p. 138–152, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00411-y>.

LANDRIGAN, P.J. et al. The Minderoo-Monaco Commission on Plastics and Human Health. *Annals of Global Health*, v. 89, n. 1, p. 23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5334/aogh.4056>.

LE JUGE, C.; GRASSL, B.; ALLAN, I. J.; GIGAULT, J. Identification of polystyrene nanoplastics from natural organic matter in complex environmental matrices by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 415, n. 15, p.

2999-3006, jun. 2023. DOI: 10.1007/s00216-023-04609-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-023-04609-7>. Acesso em: 27 nov. 2023.

LIN, Q. et al. Potential risk of microplastics in processed foods: Preliminary risk assessment concerning polymer types, abundance, and human exposure of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 247, p. 114260, 2022. ISSN 0147-6513. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114260. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651322011009>. Acesso em: 24 out. 2023.

MATERIĆ, D., KJÆR, H. A., Vallelonga, P., Tison, J.-L., Röckmann, T., & Holzinger, R. (2022). Nanoplastics measurements in Northern and Southern polar ice. *Environmental Research*, 208, 112741. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112741>. Acesso em 11 nov 2023.

MEILER, V. et al. Approaches to Detect Microplastics in Water Using Electrical Impedance Measurements and Support Vector Machines. *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, n. 5, pp. 4863-4872, 1 de março de 1, doi: 2023.10/JSEN.1109.2023.

MEILER, V.; PFEIFFER, J.; BIFANO, L.; KANDLBINDER-PARET, C.; FISCHERAUER, G. "Approaches to Detect Microplastics in Water Using Electrical Impedance Measurements and Support Vector Machines", in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, n. 5, pp. 4863-4872, 1 de março de 1, doi: 2023.10/JSEN.1109.2023.

MICHAELI, Walter; GREIF, Helmut; KAUFMANN, Hans; VOSSEBÜRGER, Franz-Josef; DIHLMANN, Christian. *Tecnologia dos plásticos*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1995. ISBN 9788521200093. Disponível em: https://dedalus.usp.br/F/J3268I6NNCDAAURJPU6Y39YPV296YH56D2XMV2DPTJPEL9KVKN-04486?func=direct&doc_number=001573500. Acesso em: 02 out. 2023.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). *Pesquisa Social. Teoria, método e criatividade*. 18 ed. Petrópolis: Vozes, 2001. Disponível em: https://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1428/minayo__2001.pdf. Acesso 12 out. 2023.

MINDRISZ, Liv Goldstein Ascer. *Efeitos do plastificante Bis (2-etilhexil) ftalato (DEHP) na fisiologia de Hymeniacidon heliophila*. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de

São Paulo, 2023. Tese de Doutorado em Fisiologia Geral. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41135/tde-12092023-111344/pt-br.php>. Acesso em: 23 out. 2023.

MONTAGNER, Cassiana C.; DIAS, Mariana Amaral; PAIVA, Eduardo Maia; VIDAL, Cristiane. Microplásticos: Ocorrência Ambiental e Desafios Analíticos. *Química Nova*, vol. 44, n° 10, 2021. ISSN: 0100-4042 (versão impressa) ISSN: 1678-7064 (versão online). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/VJ58TBjHVqDZsvWLckcFbTQ#>. Acesso em: 16 nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170791>.

MORAZ A, BREIDER F. Detection and Quantification of Nonlabeled Polystyrene Nanoparticles Using a Fluorescent Molecular Rotor. *Anal Chem*. 2021 Nov 16;93(45):14976-14984. doi: 10.1021/acs.analchem.1c02055. Epub 2021 Nov 4. PMID: 34735123. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34735123/>. Acesso em: 11 de nov de 2023.

NIAMH, Bernhard V.K.J. Schmidt. 2023. Hydrophilic polymers: Current trends and visions for the future. *Science Article history*: Received 23 March 2023 Revised 11 July 2023 Accepted 17 October 2023. Acesso dia 02 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101753>.

NIAMH, Bernhard V.K.J. Schmidt. 2023. Hydrophilic polymers: Current trends and visions for the future. *Science Article history*: Received 23 March 2023 Revised 11 July 2023 Accepted 17 October 2023. Acesso dia 02 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101753>.

NICOLAI, Eleonora et al. A New Optical Method for Quantitative Detection of Microplastics in Water Based on Real-Time Fluorescence Analysis. *Water*, v. 14, n. 20, p. 3235, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/20/3235>. Acesso 11 de nov. 2023.

OLIVATTO, G. P. et al. Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno. *Rev. Virtual Quim.*, v. 10, n. 6, p. 1968-1989, 2018. Publicado online em 17 de dezembro de 2018. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=defini%C3%A7%C3%A3o+de+micropl%C3%A1sticos&btnG=. Acesso em: 10 out. 2023.

ONU. PROGRAMA PARA O MEIO AMBIENTE. 2022. Dia histórico no combate à poluição plástica: nações se comprometem a desenvolver acordo juridicamente vinculante.

Nairóbi, 02 mar. 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/dia-historico-no-combate-poluicao-plastica-nacoes-se#:~:text=%E2%80%9CO%20dia%20de%20hoje%20marca,desde%20o%20acordo%20de%20Paris>. Acesso em: 19 nov. 2023.

ONU. From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Authors UNEP. 21 de October 2021 report. UN environment programme. Acesso em: 26 out. 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/interactives/pollution-to-solution/?lang=PT>.

PENG, X., Urso, M., Kolackova, M., Huska, D., & Pumera, M. (2024). Microrrobôs Biohíbridos Acionados Magneticamente para Remoção Sustentável de Micro/Nanoplásticos do Ambiente Aquático. *Advanced Functional Materials*, 34(3), artigo 2307477. <https://doi.org/10.1002/adfm.202307477>. Acesso em: 07 de dez, 2023.

PIYATHILAKE, Udara; LIN, Chuxia; BUNDSCHUH, Jochen; HERATH, Indika. A review on constructive classification framework of research trends in analytical instrumentation for secondary micro(nano)plastics: What is new and what needs next? *Environmental Pollution*, Volume 335, 2023, p. 122320. ISSN 0269-7491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122320>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123013222>.

PEREIRA, T. da C. et al. MICROPLÁSTICOS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO – UMA REVISÃO. *Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo Y práctica*, v. 14, n. 2, p. 917–932, 2021. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.75496>.

PLASTICS EUROPE. *Plastics – the Facts 2019: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente). Resolução 5/14 da UNEA intitulada "Acabar com a poluição plástica: rumo a um instrumento internacional juridicamente vinculativo"; Nações Unidas: Nova York, NY, EUA, 2022; pp. 1-5. Disponível em:

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/39812/OEWG_PP_1_INF_1_UNEA%20resolution.pdf. Acesso em 19 out. 2023.

POMPEO, Marcelo; RANI-BORGES, Barbara; PAIVA, Teresa Cristina Brazil de. Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2022. 2016 p. ISBN 978-65-88234-11-2.

SCHNEPF, Uwe. Realistic Risk Assessment of Soil Microplastics Is Hampered by a Lack of Eligible Data on Particle Characteristics: A Call for Higher Reporting Standards. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 1, p. 3-4, jan. 2023. DOI: 10.1021/acs.est.2c08151. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08151>. Acesso em 20 de out 2023.

WHITING, Q.T., O'Connor, K.F., Potter, P.M. et al. Uma técnica automatizada de alto rendimento para detecção, quantificação e caracterização de microplásticos em águas superficiais usando espectroscopia direta no infravermelho a laser. *Anal Bioanal Chem* 414, 8353–8364 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04371-2>. Acesso em 10 dezembro 2023.

WWF - Fundo Mundial para a Natureza. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. Gland, Suíça: WWF Internacional, Março de 2019. ISBN 978-2-940529-93-3. Disponível em <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso dia 19 de out 2023.