

METODOLOGIA PARA AMOSTRAGEM, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE MICROPLÁSTICOS EM EFLUENTES INDUSTRIAIS

*Laura Gandolfi Lanzini¹; Ana de Araújo Carrion²; Cristhiane Alvim Valente³; Kauê Pelegrini⁴;
Manuel Rodrigues Loncan⁵ & Ricardo Meurer Papaléo⁶*

1. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler, Divisão de Laboratórios. R. Aurélio Porto, 37 - Partenon, Porto Alegre - RS, Brasil, 90620-090, (51) 3226-5633, laura.lzn2@gmail.com
2. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler, Divisão de Laboratórios. R. Aurélio Porto, 37 - Partenon, Porto Alegre - RS, Brasil, 90620-090, (51) 3226-5633, ana-carrion@fepam.rs.gov.br
3. Centro Interdisciplinar de Nanociência e Micro-Nanotecnologia (NanoPUCRS). Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre - RS, Brasil, 90619-900, (51) 3320-3500, cristhiane.valente@puers.br
4. Centro Interdisciplinar de Nanociência e Micro-Nanotecnologia (NanoPUCRS). Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre - RS, Brasil, 90619-900, (51) 3320-3500, kaue.pelegrini@edu.puers.br
5. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler, Divisão de Laboratórios. R. Aurélio Porto, 37 - Partenon, Porto Alegre - RS, Brasil, 90620-090, (51) 3226-5633, manuel-loncan@fepam.rs.gov.br
6. Centro Interdisciplinar de Nanociência e Micro-Nanotecnologia (NanoPUCRS). Av. Ipiranga, 6681, Porto Alegre - RS, Brasil, 90619-900, (51) 3320-3500, Papaleo@puers.br

Abstract: Plastic is a widely used material, easily found as a contaminant in water, soil, and air. Microplastics (MPs), considered plastic fragments up to 5 mm in size, are currently identified as bioaccumulative micropollutants in aquatic organisms and humans, responsible for various toxicological effects. Due to low plastic recycling rates and improper disposal, monitoring MPs in production sources and aquatic environments, which are the ultimate destination for these wastes, is crucial. The present study aims to propose a methodology for sampling, processing, and analyzing MPs in industrial effluents, with a view to its future application in monitoring the discharge of these effluents into the country's water resources. The protocol consists of three main stages: the first stage involves collecting industrial effluent at the source, the second is dedicated to processing the effluent itself for the separation and concentration of MPs, and the third stage focuses on the characterization of MPs (identification and quantification) using fluorescence microscopy. The protocol was applied to two real industrial effluent samples. To verify the protocol's effectiveness, a recovery rate measurement was performed, using a sample contaminated with a known quantity of MPs. The results indicate that the proposed protocol is efficient and adequate for future monitoring of MPs in effluents.

Resumo: O plástico é um material amplamente utilizado, sendo um contaminante encontrado facilmente na água, no solo e no ar. Os microplásticos (MPs), considerados fragmentos plásticos com tamanho de até 5 mm, são apontados, atualmente, como micropoluentes bioacumuladores nos organismos aquáticos e também em humanos, sendo responsáveis por diversos efeitos toxicológicos. Devido à baixa reciclagem de plásticos e o seu descarte inadequado, é relevante o monitoramento desses MPs nas fontes produtoras e nos ambientes aquáticos, os quais são o destino final desses resíduos. No presente trabalho, o objetivo é propor uma metodologia para amostragem, processamento e análise de MPs em efluentes industriais, visando a futura aplicação no monitoramento do lançamento desses efluentes nos recursos hídricos do País. O protocolo consiste em três etapas principais, sendo a primeira etapa destinada à coleta do efluente industrial na fonte geradora, a segunda ao processamento em si do efluente para a separação e concentração dos MPs, e a terceira etapa à caracterização dos MPs (identificação e quantificação) utilizando microscopia de

fluorescência. O protocolo foi aplicado em duas amostras reais de efluente industrial. Para a verificação da eficácia do protocolo, foi realizada uma medida da taxa de recuperação (*recovery rate*), através do processamento de uma matriz contaminada com uma quantidade conhecida de MPs. Os resultados encontrados indicam que este é um protocolo eficiente para a detecção de MPs e adequado para o monitoramento futuro de MPs em efluentes.

Palavras-Chave – Microplásticos; Metodologia; Efluente

INTRODUÇÃO

Os plásticos ganharam popularidade por seu baixo custo, leveza, resistência e fácil produção [Sol *et al.* (2023)], e atualmente dominam grande parte da indústria, sendo produzidas cerca de 460 milhões de toneladas de plástico anualmente [IUCN (2024)]. Ademais, cerca de 40% de todo o plástico produzido é de uso único [Parker (2024)], contribuindo imensamente para a geração de resíduos sólidos. Devido a sua durabilidade, baixa taxa de reciclagem e ao manejo ineficiente de resíduos [Lebreton *et al.* (2017)], plásticos e microplásticos se tornaram um poluente onipresente nos corpos d'água [Parker (2024)], trazendo desafios para a manutenção da saúde humana e ecossistêmica. Microplásticos (MPs) podem ser definidos como partículas plásticas de até 5 mm [Thompson *et al.* (2024)], classificadas em primárias, que são intencionalmente produzidas nessa escala, ou secundárias, oriundas da degradação de plásticos maiores [NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY (2023)].

Os MPs, em especial, podem ser bioacumulados nos organismos aquáticos, gerando efeitos de estresse oxidativo, neurotoxicidade, inflamação e danos à imunidade [Pelegriani *et al.* (2023)]. Já em humanos, tem-se descoberto diferentes efeitos negativos da presença de MPs no corpo, como a interação com o sistema imunológico [Barboza *et al.* (2018)], a geração de danos ao DNA, os efeitos citotóxicos e as alterações metabólicas [Coffin *et al.* (2022)]. Além disso, os MPs podem adsorver compostos químicos [Tourinho *et al.* (2019)] e desenvolver biofilmes com microrganismos patogênicos [Nyguen *et al.* (2021)], aumentando ainda mais a toxicidade inerente desse poluente. Nesse contexto, torna-se relevante o monitoramento dessas partículas tanto nas origens produtoras quanto nos ambientes aquáticos, que são os destinatários desses resíduos.

Atualmente, existem algumas metodologias para coleta e análise de MPs desenvolvidas pela Organização Internacional de Padronização (ISO) e pela *American Society for Testing & Materials* (ASTM), órgãos de normatização reconhecidos mundialmente. A ISO apresenta, através do documento ISO 24187 (*Principles for the analysis of microplastics present in the environment*), uma orientação generalizada para diferentes metodologias de análise de MPs de diferentes matrizes

ambientais, buscando uma harmonização das técnicas existentes. A organização também está desenvolvendo metodologias para a análise de MPs em águas através de técnicas de espectroscopia vibracional e técnicas termo-analíticas. Em complemento, foi publicada a ISO 4484-2, que estabelece uma metodologia de análise qualitativa-quantitativa para MPs provenientes da lavagem, fabricação, uso e descarte de tecidos.

Já a ASTM apresenta três protocolos-padrão. O primeiro, ASTM D8332-20, descreve procedimentos para a coleta de amostras de água, diferenciando em amostragem para sistemas pressurizados e não-pressurizados. A ASTM D8333-20 se refere ao uso da espectroscopia Raman, infravermelha e Py-GC-MS (*Pyrolysis gas chromatography/ mass spectrometry*) para identificação e quantificação de partículas e fibras de MPs em amostras de águas, enquanto a ASTM D8489-23 propõe um complemento a essas técnicas através de um *Dynamic Image Particle Size and Shape Analyzer*.

Apesar da existência de tais metodologias internacionais, elas são recentes e não estão totalmente difundidas globalmente. Muitos estudos ainda utilizam protocolos próprios, seja pelo custo ou pela viabilidade. Além disso, algumas entidades governamentais como a União Europeia e o Estado da Califórnia estão desenvolvendo metodologias que se enquadram mais especificamente em seus estudos e análises de qualidade de suas águas, como a *Commission Delegated Decision (EU) 2024/1441* e o SWB-MP2-rev1 (*Standard Operating Procedures for Extraction and Measurement by Raman Spectroscopy of Microplastic Particles in Drinking Water*). Desse modo, e considerando os malefícios dos MPs para a saúde humana e ambiental, o desenvolvimento de um protocolo-padrão para a análise desse poluente é essencial, contribuindo para uma futura regulação brasileira dos mps nas águas de fontes poluidoras e de diferentes ambientes aquáticos naturais.

OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo investigar e propor um guia metodológico para amostragem, processamento e análise de MPs em efluentes industriais, visando a sua futura aplicação como um protocolo padrão para monitorar o lançamento desses efluentes nas águas naturais do País. O protocolo aqui apresentado foi desenvolvido através de uma parceria entre a Fundação Estadual de

Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (Fepam-RS) e o Centro Interdisciplinar de Nanociência e Micro-Nanotecnologia da PUCRS (NanoPUCRS).

METODOLOGIA

O protocolo foi elaborado a partir da adaptação de um protocolo utilizado por Pelegrini *et al.* (2024) para avaliar amostras de sedimento costeiro. Este novo guia consiste em três etapas principais, sendo a primeira etapa destinada à coleta do efluente industrial na fonte geradora, a segunda ao processamento do efluente para a separação e concentração dos MPs, e a terceira etapa à identificação e quantificação dos MPs utilizando microscopia de fluorescência.

Na primeira etapa, denominada amostragem, o efluente industrial foi coletado na fonte geradora, uma Central de Tratamento de Efluentes Líquidos Industriais (CETEL). A coleta foi feita em dois pontos estratégicos da CETEL: na entrada (*inlet*, correspondendo ao efluente bruto) e na saída (*outlet*, efluente tratado). Foram utilizados frascos de vidro âmbar de 1L, previamente higienizados com solução de Extran 2% e enxaguados 3 vezes com água ultrapura (sistema purificador de água ultrapura Millipore Direct-Q 3 UV). Como a tampa dos frascos é de material plástico, foi utilizado papel alumínio entre a tampa e o vidro para evitar o contato direto do plástico com a amostra. Durante a coleta, o recipiente ficou aberto pelo menor tempo possível, para diminuir o contato do interior do frasco com o ar. Após a coleta, as amostras foram mantidas sob resfriamento até serem processadas. Na segunda etapa, denominada processamento, ocorreu a separação dos MPs do meio líquido. Inicialmente é realizada a filtração de 200 ml do líquido coletado por um sistema de filtração à vácuo com papel filtro qualitativo (\varnothing 11 cm e porosidade $<40 \mu\text{m}$), de forma a separar as fases sólida e líquida do efluente. Para acelerar o processo, a filtração foi realizada sob pressão reduzida com o auxílio de uma bomba de vácuo. Como resultado dessa etapa são obtidos filtros impregnados com resíduos sólidos, incluindo possíveis MPs e matéria orgânica inerente da fonte geradora. Em seguida, resíduos sólidos retidos no filtro foram submetidos a um processo de digestão química, visando remover a matéria orgânica. A digestão foi realizada a partir de uma reação de Fenton, que consiste na reação de peróxido de hidrogênio com o catalisador de ferro (II). Para essa etapa, conforme descrito por Masura *et al.* (2015), primeiramente foi obtido o catalisador de ferro (II) a partir de uma reação de sulfeto de ferro com ácido sulfúrico. Esse catalisador foi então adicionado ao peróxido de hidrogênio em um béquer na proporção 1:1 (volume). O filtro resultante da primeira etapa foi posicionado na parede interna do béquer que contém a solução de catalisador e peróxido de hidrogênio, e sua superfície foi irrigada com a solução através do auxílio de uma pipeta descartável.

Esse processo acarretou no arraste de todo material sólido contido no filtro para a solução. Após, a solução com os MPs foi aquecida até 70°C, com agitação magnética leve, para o início da reação. Ao final da reação, quando cessa o borbulhamento da solução, a presença de matéria orgânica foi monitorada visualmente (a olho nu). O processo da reação era repetido adicionando 20 ml de peróxido de hidrogênio e aquecendo-se novamente a solução, caso ainda fosse observada a presença de matéria orgânica na solução. Caso contrário, a solução seguia para o aquecimento final de 70°C por 30 min. Passado esse tempo, o béquer com a solução final foi retirado do aquecimento para esfriar até temperatura ambiente. Em seguida, a solução pós-tratamento de digestão foi filtrada com sistema à vácuo utilizando um filtro de ésteres mistos de celulose com poros de 0,45 µm, obtendo-se um segundo filtro do processamento com as amostras sólidas de MPs, porém livre ou com redução de contaminação por matéria orgânica.

Na última etapa, denominada caracterização, os MPs no filtro são marcados com o fluoróforo Vermelho de Nilo, o qual torna os MPs fluorescentes, permitindo que possam ser analisados por microscopia de fluorescência. Para a etapa de marcação dos MPs, uma solução 0,01 mg/ml do fluoróforo em etanol foi preparada [Prata *et al.* (2021)]. O filtro com as amostras coletadas foi posicionado no funil de vidro do sistema à vácuo e, com o auxílio de uma pipeta, a superfície do filtro foi coberta com a solução do fluoróforo. Após 10 minutos, o filtro foi enxaguado com água ultrapura, removendo o excesso de fluoróforo da superfície. Toda essa etapa foi realizada em um ambiente sem luz direta, de modo a evitar a fotodegradação do fluoróforo [Prata *et al.* (2021)]. O filtro foi posicionado sobre uma lâmina de vidro em uma placa de Petri, a qual foi coberta com papel alumínio para evitar contato com a luz. Em seguida, o filtro foi analisado em um microscópio de fluorescência para a identificação dos MPs coletados. Para a identificação dos diferentes formatos de microplásticos - fragmentos e fibras, foram realizadas duas varreduras no microscópio de fluorescência, uma com a luz azul e a outra com a luz ultravioleta (UV), respectivamente. A contagem das partículas é feita por, no mínimo, duas pessoas, e então é calculada uma média aritmética dos valores encontrados. Para a contagem de fragmentos, utilizou-se a luz azul com comprimento de onda de 470 nm e um filtro laranja. Já para quantificação de microfibras, utilizou-se luz UV com comprimento de onda de 254 nm [Prata *et al.* (2019)], seguida da análise da morfologia superficial [Zhu *et al.* (2019)].

Visto que os MPs são um poluente onipresente, encontrados na água, no solo e no ar [Le *et al.* (2023)], foram adotadas medidas de controle de qualidade durante o processamento, buscando diminuir a contaminação das amostras com MPs exógenos. Durante o processamento, todos que trabalharam com a amostra utilizaram luvas nitrílicas, jaleco de algodão e, preferencialmente,

camisetas de algodão e foi restringida a entrada de até três pessoas por vez no laboratório. Os materiais de laboratório foram higienizados com solução de Extran 5% e enxaguados três vezes com água ultrapura. Sempre que as amostras não estiverem sendo analisadas, estarão cobertas por papel alumínio para evitar exposição desnecessária ao ambiente.

O protocolo foi aplicado em duas amostras de efluentes (um bruto e um tratado), coletadas em uma CETEL na Região Metropolitana da Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul. Desta forma, uma via (n=1) de cada ponto de coleta foi utilizada para o teste piloto do protocolo. Junto à aplicação do protocolo em amostra real, uma amostra controle (n=3) com água ultra pura, sem MPs, foi processada e analisada para verificação de possível contaminação cruzada da aplicação do protocolo. Conforme indicado por Shrut e Kutralam-Muniasamy (2023), uma amostra controle do ar (branco do ar) também foi investigada, o qual consistia em um filtro umedecido com água ultrapura que foi posicionado em uma placa de Petri e ficou exposto ao ambiente ao longo do tempo de execução do protocolo nas amostras controle, sendo mais um tipo de controle de possível fonte de contaminação por partículas plásticas exógenas. Sempre que uma amostra controle era manipulada e exposta ao ar, a placa de Petri com o filtro do controle do ar era aberta, simulando a contaminação que a amostra recebia do ambiente. Por fim, os MPs dos filtros do controle do ar (n=3) foram marcados e analisados na microscopia de fluorescência para quantificação.

A eficácia do novo protocolo foi verificada com base na determinação do *recovery rate* [Way *et al.* (2022)]. Nesse processo, contamina-se a matriz estudada com uma quantidade conhecida de MPs e realiza-se o processamento para recuperá-las, verificando o desempenho do método em questão. Para o estudo de *recovery rate* foi utilizado como a matriz pré-contaminada a água ultrapura. No primeiro teste, foram utilizadas 50 partículas entre 1-5 mm, considerados MPs grandes. Dessas 50, 10 partículas eram de poliestireno (PS) preto, 10 de polipropileno (PP) azul, 10 de PP rosa, 10 de polietileno (PE) branco, e 10 eram fibras de nylon (compostas por poliamida). Já no segundo teste, foram utilizados 30 MPs na mesma escala, sendo 10 de PP rosa, 10 de PP verde e 10 de PE branco. Ao final da execução das etapas do processamento nas amostras pré-contaminadas, foi contabilizada visualmente a quantidade dos MPs adicionados que foram recuperados após aplicação do protocolo, sendo o resultado apresentado como uma taxa de recuperação percentual (*a percentage recovery rate*). Como as partículas adicionadas eram visíveis a olho nu, os filtros finais não passaram pela

etapa de marcação com o fluoróforo e foram analisados visualmente, e sem a necessidade de microscopia óptica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Sol *et al.* (2023), a reação de Fenton está entre os métodos de digestão mais comuns em estudos de MPs [Prata *et al.* (2021); Pelegrini *et al.* (2024)] e também é recomendada pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos para o tratamento de amostras de água. A reação de Fenton se mostrou eficiente para remover os contaminantes orgânicos, facilitando a posterior contagem das partículas pela microscopia. Em relação à contagem de MPs, antes de decidir-se pela microscopia, foi cogitado o uso da análise de espectroscopia Raman, uma técnica não-destrutiva que possibilita a determinação da composição química dos MPs [Araujo *et al.* (2018)] que também foi utilizada por Pelegrini *et al.* (2024), porém como estratégia para identificação dos MPs. No entanto, o método é extremamente laborioso devido à falta de um equipamento automatizado, tornando-o inviável para este protocolo, que objetiva ter caráter prático. Dessa forma, optou-se pelo uso da microscopia de fluorescência, para a identificação e a quantificação com alta sensibilidade e especificidade [Rost (2010)]. O estudo de revisão de Sol *et al.* (2023) destaca que a microscopia, podendo ser combinada com fluoróforos, é a melhor técnica para se obter informações sobre tamanho e morfologia das partículas analisadas. O fluoróforo Vermelho de Nilo, um dos mais utilizados em pesquisas com MPs, tem alta precisão, conseguindo destacar até 95% dos MPs maiores que 1 mm e 72% dos MPs menores [Sol, *et al.* (2023)]. Além disso, o uso de microscopia para análise quantitativa complementado por espectroscopia para análise qualitativa é bem difundido [Sol *et al.* (2023)] e também está presente nas metodologias internacionais, como a ISO/DIS 16094-2 e a ISO 4484-2. O efluente bruto da CETEL apresentou 276 fragmentos e 7 fibras de partículas plásticas, enquanto no efluente tratado foram encontrados 57 fragmentos e 2 fibras. A concentração de MPs para o efluente bruto foi de 1415 MPs/L e de 295 MPs/L para o efluente tratado. Na etapa de filtragem para a amostra de efluente bruto foram filtrados apenas 150 ml de efluente, ao invés de 200 ml propostos no protocolo devido à obstrução do filtro pelos resíduos sólidos da amostra. Dessa forma, identificou-se a necessidade de adaptações ao protocolo dependendo da natureza do efluente. O mesmo não ocorreu com a amostra de efluente tratado. Encontrou-se uma diminuição de 79% na concentração de MPs no efluente tratado em relação ao bruto, sugerindo que o tratamento da CETEL foi favorável na remoção de MPs. Essa redução era esperada, estando de acordo com os resultados encontrados por Karakurt *et al.* (2025). No estudo de Karakurt *et al.* (2025), a indústria com maior contaminação por MPs apresentou 112 MPs/L no

efluente bruto e 21 MPs/L no efluente tratado; uma remoção de MPs de aproximadamente 81%. Em relação às amostras controle do processamento, encontrou-se 24 ± 7 (média \pm desvio padrão amostral) MPs entre fragmentos e fibras, sendo uma concentração média de 0,5 MPs/L. Já para as amostras controle do ar, obteve-se uma média de $7 \pm 4,5$ de partículas encontradas e concentração média de 0,18 MPs/L. Portanto, os resultados das amostras controle indicam a presença de MPs exógenos à amostra, podendo ser os responsáveis por valores com super notificação de amostras reais. Incluir no estágio de desenvolvimento do protocolo parâmetros de controle de qualidade são importantes ferramentas para evitar introduzir variação indesejada ou viés nos resultados de quantificação de MPs [Shrut e Kutralam-Muniasamy (2023)]. Quando comparamos os resultados da concentração média do branco do processamento com o branco do ar, acredita-se que a contaminação pelo ar do laboratório é mínima e não afetou a análise das amostras reais. A amostra de efluente bruto da CETEL apresentou uma quantidade de 20 vezes mais presença de MPs que a amostra controle. Quanto ao *recovery rate*, os polímeros escolhidos foram representativos para amostras de água, visto que os tipos poliméricos mais comumente encontrados em ambientes aquáticos são, em ordem decrescente, PE, polietileno tereftalato (PET), poliamida (PA), PP, PS, polivinil álcool (PVA) e policloreto de vinila (PVC) [Ashrafy *et al.* (2023)]. Os MPs foram colocados em meio aquoso e processaram-se as amostras como descrito no protocolo. Ao final do primeiro teste, foram recuperadas 9 partículas de PS, 7 partículas de PP azul, 10 partículas de PP rosa, 8 partículas de PE e 2 fibras de nylon. Já no segundo teste, foram recuperadas 9 partículas de PP rosa, 9 partículas de PP verde e 7 partículas de PE branco. A média para a taxa de recuperação percentual encontrada para o processamento foi de 77,5%. Em suma, apesar de termos uma taxa de 22,5% de subestimação, o resultado corrobora valores observados em pesquisas com metodologias semelhantes apresentadas na revisão de Sol *et al.* (2023). Uma meta-análise realizada por Way *et al.* (2022) demonstrou que o *recovery rate* médio em estudos de MPs é de 86%, e que esse valor pode ser influenciado pela matriz das amostras, pelos reagentes utilizados, pelo tipo polimérico e tamanho dos MPs adicionados, entre outros fatores. O estudo aponta que, quanto maiores as partículas utilizadas, maior o *recovery rate*, e que as pesquisas que utilizaram MPs entre 1-5 mm tiveram uma taxa de recuperação média de 84,8%. Ademais, a recuperação em meio aquoso é de 67-82%, e os MPs compostos por polímeros de alta densidade, como é o caso do nylon, são os mais difíceis de recuperar.

A partir desse estudo prévio pela busca da melhor estratégia para a elaboração de um protocolo padrão que atenda as etapas de amostragem, processamento e análise de MPs em efluentes industriais, fica evidente a necessidade de analisar criticamente cada etapa da metodologia para evitar introduzir

alguma variação indesejada em medições de amostras desconhecidas, as quais são facilmente impactadas principalmente pelo método de amostragem, tipo de material da matriz e protocolo de extração, contaminação cruzada pelos operadores, limitações nas análises de caracterização e a própria correção no processo de execução de cada etapa [Shrut e Kutralam-Muniasamy (2023)].

CONCLUSÃO

Podemos concluir que a aplicação do protocolo é adequada para o processamento e análise de amostras de efluentes industriais no contexto de monitoramento de fontes poluidoras, e que a futura validação do método é possível. As técnicas utilizadas no protocolo apresentado vão ao encontro de estudos e metodologias internacionais. Os valores encontrados para os brancos indicam pouca contaminação das amostras durante as etapas de processamento e análise, enquanto a taxa de recuperação percentual de 77,5% mostrou-se satisfatória quando comparada a estudos semelhantes (67-82%). Considerando-se que não há nenhum tipo de regulamentação de microplásticos nas águas naturais do Brasil, a apresentação deste protocolo consiste em um passo importante para o desenvolvimento de uma técnica padronizada no país. Assim, contribuindo para preencher uma das lacunas mais importantes para incluir os microplásticos como um padrão de qualidade das águas, auxiliando na melhoria da saúde humana e ecossistêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPq) e aos funcionários da Fepam-RS e do NanoPUCRS pelo apoio na realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2020). “Standard Practice for Collection of Water Samples with High, Medium, or Low Suspended Solids for Identification and Quantification of Microplastic Particles and Fibers (ASTM D8332-20)”.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2020). “Standard Practice for Preparation of Water Samples with High, Medium, or Low Suspended Solids for Identification and Quantification of Microplastic Particles and Fibers Using Raman Spectroscopy, IR Spectroscopy, or Pyrolysis-GC/MS (ASTM D8333-20)”.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2023). “Test Method for Determination of Microplastics Particle and Fiber Size, Distribution, Shape, and Concentration in Waters with High to Low Suspended Solids Using a Dynamic Image Particle Size and Shape Analyzer (ASTM D8489-23)”.
- ARAUJO, C.F.; NOLASCO, M.M; RIBEIRO, A.M.P & RIBEIRO-CLARO P.J.A. (2018). “Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects”. Water Research, vol. 142, pp. 426-440.
- ASHRAFY, A.; LIZA A.A.; ISLAM, M.N. et al. (2023). “Microplastics Pollution: A Brief Review of Its Source and Abundance in Different Aquatic Ecosystems”. Journal of Hazardous Materials Advanced vol. 9, n. 100215.
- BARBOZA, L.G.A.; VETHAAK, A.D; LAVORANTE, B.R.B.O. et al. (2018). “Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health”. Marine Pollution Bulletin vol. 133, p. 336-348.
- COFFIN, S.; BOUWMEESTER, H.; BRANDER S. et al. (2022). “Development and application of a health-based framework for informing regulatory action in relation to exposure of microplastic particles in California drinking water”. Microplastics and Nanoplastics vol. 2, n. 12.
- EUROPEAN COMMISSION (2024). “COMMISSION DELEGATED DECISION (EU) 2024/1441 of 11 March 2024 supplementing Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council by laying down a methodology to measure microplastics in water intended for human consumption”.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2023). “Principles for the analysis of microplastics present in the environment (ISO 24187:2023)”.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2023). “Textiles and textile products - Microplastics from textile sources. Part 2: Qualitative and quantitative analysis of microplastics (ISO 4484-2:2023)”.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2023). “Water quality - Analysis of microplastics in water. Part 2: Vibrational spectroscopy methods for waters with low content of suspended solids including drinking water (ISO/FDIS 16094-2)”.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN) (2024). “Issues brief - Plastic pollution”.

KARAKURT, O.; ALTUNTAS, O.; SIMSEK, I. *et al.* (2025) “Microplastics from industrial sources: A known but overlooked problem” Journal of Water Process Engineering, vol. 72, n. 107487.

LE, T.M.T.; TRUONG, T.M.S.; NGUYEN, P.D. *et al.* (2023). “Evaluation of microplastics removal efficiency of waste-water treatment plants in a developing country, Vietnam”. Environmental Technology & Innovation vol. 29, n. 102994.

LEBRETON, L.C.M.; VAN DER ZWET, J.; DAMSTEEG, J.W. *et al.* (2017). “River plastic emissions to the world’s oceans”. Nature Communications vol. 8, n. 15611

MASURA, J.; BAKER, J.; FOSTER, G. & COURTNEY, A. (2015). “Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments”. NOAA Technical Memorandum.

NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY (2023). “Microplastics”. National Geographic

NGUYEN, N.H.A.; EL-TEMSAH, Y.S.; CAMBIER, S. *et al.* (2021). “Attached and planktonic bacterial communities on bio-based plastic granules and micro-debris in seawater and freshwater”. Science of the total Environment vol.785, n. 147413.

PARKER, L. (2024). “Por que a poluição plástica se tornou uma crise global? Grande parte do planeta está nadando em plástico descartável, algo que está prejudicando muito a saúde animal e humana. Será que é possível reverter essa situação?”. National Geographic Brasil.

PELEGRINI, K. (2023). “Avaliação da presença de microplásticos na praia de Torres/RS, produção e estudo dos efeitos toxicológicos de micro/nanopartículas de polipropileno (PP) ao longo do desenvolvimento de zebrafish (*Danio Rerio*)”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

PELEGRINI, K.; PEREIRA, T.C.B.; MARASCHIN, T.G. *et al.* (2023). “Micro- and nanoplastic toxicity: A review on size, type, source, and test-organism implications”. Science of the Total Environment vol. 878, n. 162954.

PELEGRINI, K.; PEREIRA, T.C.B.; WERTHEIMER, C.C.S. *et al.* (2024). “Microplastics Beach Pollution: Composition, Quantification and Distribution on the Southern Coast of Brazil.” Water Air Soil Pollut, vol. 235, n. 724.

PRATA, J. C. *et al.* (2019). “A new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT)”. Science of the Total Environment vol. 699, p. 1277-1283.

PRATA, J.C.; REIS, V.; MATOS, J.T.V. *et al.* (2021). “Selection of microplastics by Nile Red staining increases environmental sample throughput by micro-Raman spectroscopy”. Science of the Total Environment vol. 783, 146979.

ROST, F. (2010). “Fluorescence microscopy: Applications” in *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Second Edition)*. Org. Landon, J.C., ed. Academic Press, Ashfield (NWS)-Austrália, pp. 619-624.

SHRUTI, V.C e KUTRALAM-MUNIASAMY, G. (2023). “Blanks and bias in microplastic research: Implications for future quality assurance”. Trends in Environmental Analytical Chemistry vol. 38, e00203.

SOL, D.; SOLÍS-BALBÍN, C.; LACA, A. *et al.* (2023). “A standard analytical approach and establishing criteria for microplastic concentrations in wastewater, drinking water and tap water”. Science of the Total Environment vol. 899, n. 165356.

STATE WATER RESOURCES CONTROL BOARD (2022). “(SWB-MP2-rev1) Standard Operating Procedures for Extraction and Measurement by Raman Spectroscopy of Microplastic Particles in Drinking Water”. Division of drinking water, State of California.

THOMPSON, R.C.; COURTENE-JONES, W.; BOUCHER, J. *et al.* (2024). “Twenty years of microplastic pollution research - what have we learned?” Science vol. 386, n. 2746.

TOURINHO, P.S.; KOZI, V.; LOUREIRO, S. & VAN GESTEL, C.A.M. (2019). “Partitioning of chemical contaminants to microplastics: Sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation”. Environmental Pollution vol. 252, parte B, p. 1246-1256.

WAY, C.; HUDSON, M.D.; WILLIAMS, I.D. & LANGLEY, G.J. (2022). “Evidence of underestimation in microplastic research: A meta-analysis of recovery rate studies”. Science of the Total Environment vol. 805, n. 150227.

ZHU, X.; NGUYEN, B.; YOU, J.B. *et al.* (2019). “Identification of Microfibers in the Environment Using Multiple Lines of Evidence”. Environmental Science & Technology, vol. 53, pp. 11877-11887.