683 - AMOSTRAGEM DE MICROPLÁSTICOS UTILIZANDO DRONES AQUÁTICOS EQUIPADOS COM UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANA.

Marcos Bruno Almeida Colombo[(1)]
Químico (USP) e mestre em Water Technology pela Wageningen University & Research (WUR), Holanda. Pesquisador na Universidade de Ciências Aplicadas NHL Stenden, Países Baixos.

Fernanda Filipaki[(2)]
Engenheira Ambiental e mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental (UNICENTRO). Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental (UNESP).

Luewton Lemos Felicio Agostinho[(1)]
Engenheiro Civil e mestre em Engenharia Sanitária (UFC). Doutor em física aplicada pela Universidade de Tecnologia de Delft (TUDelft), Países Baixos.
Professor do grupo de pesquisa Water Technology da Universidade de Ciências Aplicadas NHL Stenden, Países Baixos.

Endereço[(1)]**:** Rengerslaan 10, 8917 DD – Leeuwarden, Frísia (Países Baixos) | Tel: +31 6 8278-8196 – e-mail: bruno.colombo@nhlstenden.com

Endereço[(2)]**:** Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube 14-01, 17033-360 – Vargem Limpa, SP | e-mail: f.filipaki@unesp.br

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema inovador para coleta e concentração de amostras de nano- e microplásticos (NMPs) diretamente em corpos d'água, por meio do uso de drones aquáticos. A iniciativa buscou tornar o processo de amostragem mais eficiente, reduzindo limitações logísticas e ampliando a qualidade e abrangência dos dados ambientais coletados.

A estratégia adotada consistiu no uso de um módulo de ultrafiltração acoplado ao drone aquático, com a amostragem realizada por meio de mangueiras conectadas ao drone aquático, disponibilizado e operado pela empresa holandesa Indymo BV. Essa abordagem permitiu a coleta e concentração de amostras de 140 L para 20 L, reduzindo significativamente o volume a ser transportado e analisado em laboratório, além de tornar a amostra mais representativa.

As amostras foram analisadas por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), técnica utilizada para identificar polímeros com base em suas propriedades térmicas. Uma das amostras coletadas no canal Vallei (Amersfoort, Países Baixos) revelou a presença de polipropileno (PP). A detecção recorrente de polietileno de alta densidade (PEAD) — material que foi utilizado nos testes iniciais — indicou possíveis contaminações do sistema.

Os resultados ressaltam o potencial dos drones aquáticos na detecção de NMPs, especialmente em áreas de difícil acesso. Embora tenham sido identificados alguns desafios operacionais, como perdas, incrustações e contaminações, esses entraves podem ser contornados com ajustes no design do sistema. Avanços na automação e no controle do processo de coleta podem consolidar essa tecnologia como uma alternativa viável para o monitoramento ambiental de microplásticos em corpos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Microplásticos, monitoramento ambiental, ultrafiltração, calorimetria exploratória diferencial (DSC).

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação pública e científica com os impactos ambientais e à saúde humana causados pelo descarte inadequado de plásticos vem crescendo significativamente. Um dos focos dessa preocupação são os nano e microplásticos (NMPs), partículas altamente heterogêneas que se formam a partir da degradação de plásticos maiores ou são produzidas intencionalmente, e que podem atuar como vetores de poluentes e representar riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente. Sua ampla variação em termos de morfologia, composição polimérica, aditivos e contaminantes adsorvidos torna sua detecção, caracterização e avaliação toxicológica especialmente desafiadoras [1, 2, 3].

A crescente atenção dedicada aos NMPs) vem aumentando a adoção de medidas regulatórias significativas. Em setembro de 2023, a União Europeia implementou uma restrição sob o regulamento REACH, proibindo a adição intencional de microplásticos em diversos produtos, incluindo cosméticos, detergentes e fertilizantes, como parte do Plano de Ação para a Poluição Zero, que visa reduzir as emissões de microplásticos em 30% até 2030 [4]. Além disso, há uma mobilização crescente para o monitoramento de microplásticos em estações de tratamento de águas residuais (WWTPs), reconhecendo-as como fontes potenciais de liberação desses contaminantes no ambiente [5]. Paralelamente, iniciativas para monitorar microplásticos em água potável também estão em andamento. Por exemplo, na Califórnia, a State Water Resources Control Board adotou uma metodologia padronizada para o monitoramento de microplásticos em água potável, exigindo testes e relatórios por quatro anos, com divulgação pública dos resultados [6]. Essas ações refletem uma crescente conscientização sobre os riscos potenciais dos NMPs à saúde humana e ao meio ambiente, enfatizando a importância de quantificar os níveis de exposição por meio da análise desses contaminantes em diversos meios ambientais, como água potável, alimentos e corpos hídricos.

Entretanto, a comunidade científica ainda está entrando em consenso sobre os métodos analíticos mais adequados para quantificar e qualificar essas partículas. A maioria dos estudos foca em partículas maiores que 10 µm, devido às limitações de detecção das técnicas ópticas, deixando uma lacuna crítica no entendimento sobre partículas em escala submicrométrica. Assim, o conhecimento atual sobre os níveis reais de exposição humana aos NMPs em geral ainda é limitado, especialmente no que se refere aos nanoplásticos [7].

Além das dificuldades analíticas, o processo de amostragem desses materiais representa um desafio adicional, devido às suas reduzidas dimensões e baixas concentrações no ambiente. Diante disso, o uso de tecnologias emergentes, como drones aquáticos, vem se mostrando promissor para aprimorar a coleta de dados ambientais de forma inteligente e integrada. Essas inovações, possibilitam o monitoramento da qualidade da água de forma específica para os NMPs.

Nesse contexto, o presente projeto propõe a utilização de drones aquáticos como ferramenta inovadora para facilitar a amostragem e análise da presença de NMPs ambientais, colaborando com estratégias de monitoramento dessas partículas em corpos hídricos.

OBJETIVOS

Objetivos Gerais

Desenvolver uma configuração especializada para concentrar amostras de microplásticos diretamente no local de coleta, permitindo uma amostragem mais rápida e precisa em vários locais e profundidades, minimizando os desafios logísticos.

Objetivos Específicos

• Reduzir significativamente o volume de água que precisa ser transportado para o laboratório de ánalise, simplificando assim o manuseio das amostras;

• Reduzir o trabalho manual empenhado nas amostragens tradicionais, mitigando o risco de contaminação associado a essas operações e reduzindo o tempo necessário para as análises

• Melhorar a representatividade da amostra para determinações de microplásticos mais confiáveis.

METODOLOGIA

Conceito de aplicação

Foram realizados testes com um sistema de filtração e concentração por ultrafiltração, visando operar o drone de maneira independente no corpo hídrico onde a amostragem deve ser realizada. A Figura 1 abaixo ilustra o conceito da aplicação. Uma descrição dos componentes do *setup* de amostragem são ilustrados na Figura 2.

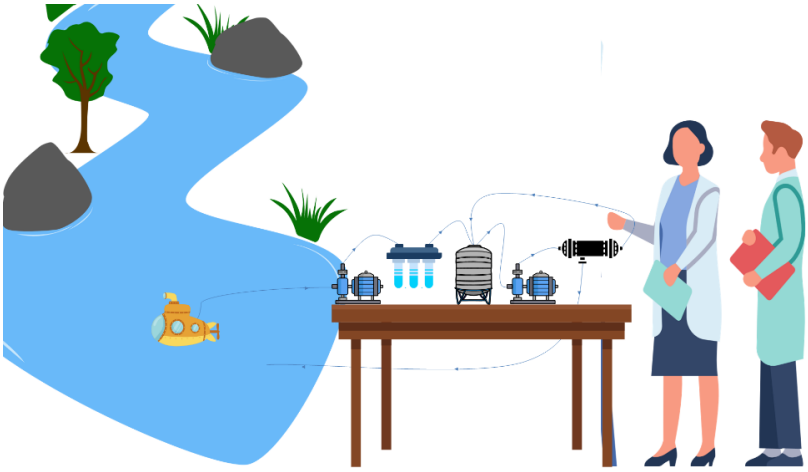

Figura 1: Ilustração do conceito de aplicação do drone aquático para amostragem de microplásticos em corpos hídricos.

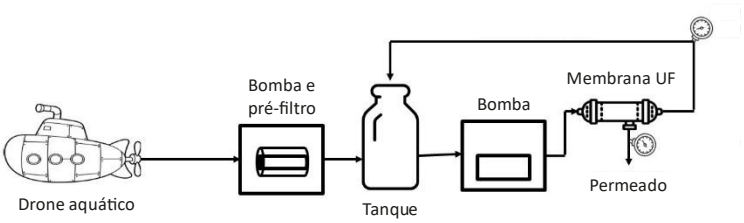

Figura 2: Esquema do sistema de filtração e concentração por ultrafiltração.

O sistema de concentração utilizado incluía uma bomba de jardim integrada com pré-filtro, que bombeava a água capturada pelo drone para um tanque de concentração e armazenamento. Uma bomba de engrenagem era responsável por direcionar a amostra coletada para uma membrana de ultrafiltração com área de 0,50 m². Durante o processo, o permeado era devolvido ao corpo hídrico, enquanto o concentrado era recirculado para o tanque, reduzindo efetivamente o volume de água transportado e aumentando a concentração da amostra.

Drone aquático - *Remotely Operated Vehicle (ROV)*

Para aumentar a capacidade de monitoramento ao longo do corpo hídrico, e também viabilizar a coleta de amostra em profundidades diferentes, foi utilizado o drone aquático BlueROV2 (Figura 3), fabricado pela BlueRobotics (Torrance, EUA), e modificado pela empresa holandesa Indymo BV. O drone possui um design compacto, pesando 10 kg, com dimensões de 45,7 cm x 33,8 cm x 25,4 cm, o que facilita seu transporte e manuseio. O BlueROV2 opera em profundidades de até 100 metros, utilizando comunicação via cabo para a possibilidade de transmissão em tempo real de vídeo e dados de navegação. Equipado com quatro propulsores horizontais e dois verticais vetorizados, oferece excelente estabilidade e manobrabilidade, complementada por controles automáticos de profundidade e direção. Além disso, suporta uma carga útil de até 8 kg e é alimentado por baterias substituíveis com autonomia de 2 horas, permitindo missões prolongadas.

Figura 3: BlueROV2, veículo subaquático disponibilizado e modificado pela Indymo BV.

Preparo de amostra

Após a coleta, os 20 L de amostra foram concentrados em laboratório até atingir um volume final de 500 mL, facilitando o processo de secagem completa em estufa a 105°C, com o objetivo de preservar o material coletado para as etapas subsequentes. Com a amostra seca, iniciou-se o processo de digestão utilizando Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) a 30% (v/v), a 70°C e 60 rpm, para remover a elevada quantidade de matéria orgânica presente na água do canal, que poderia comprometer os resultados da análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Com a digestão concluída, procedeu-se à análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). A DSC é uma técnica utilizada para identificar plásticos com base em suas propriedades térmicas. Aproximadamente 8 mg da amostra sólida foram colocados em um cadinho apropriado, devidamente fechado e perfurado. O material foi então submetido a ciclos de aquecimento e resfriamento no equipamento DSC, permitindo a obtenção das temperaturas de fusão dos polímeros e a identificação dos plásticos presentes por meio das curvas geradas.

Antes dos testes com o drone, foram realizados experimentos em bancada para avaliar a eficácia da concentração da membrana utilizada. Utilizou-se como referência o padrão de polietileno de alta densidade (HDPE) para obter uma curva pré-determinada no DSC. Foram testadas duas configurações, empregando membranas com áreas superficiais de 0,25 m² e 0,50 m², respectivamente. A concentração de HDPE foi fixada em 200 µg/L, diluída em água deionizada. Para avaliar a hidrofilicidade da amostra, uma das configurações foi testada sem a adição de surfactante, enquanto a outra incluiu esse componente. A utilização do surfactante teve como objetivo a estabilização dos microplásticos na amostra, para que estes estivessem mais distribuídos na fase líquida e não apenas na superfície.

Local de amostragem

Após a montagem do sistema de filtração e testes iniciais em laboratório, o sistema foi testado pela primeira vez em conjunto com o drone aquático no canal Vallei (*Valleikanaal* em holandês), na região de Amersfoort (Figura 4).

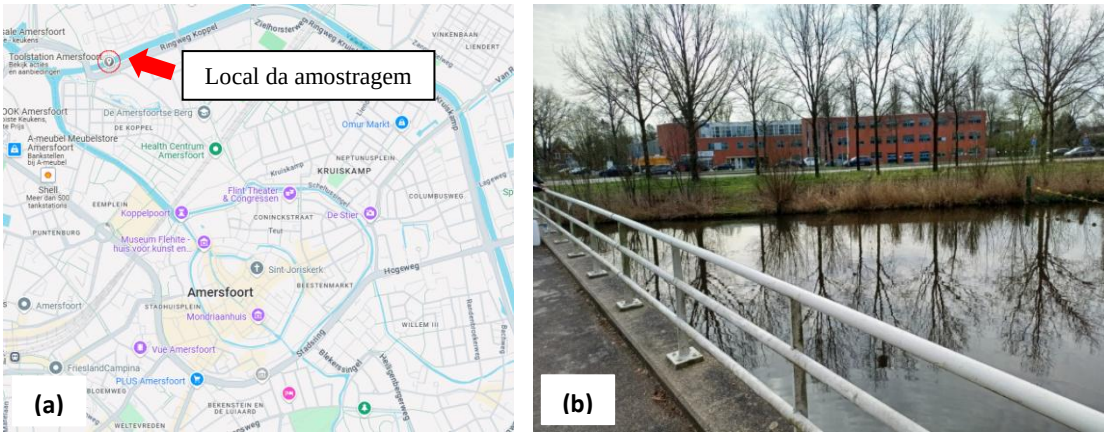

Figura 4 – a) Local da amostragem com o drone aquático e sistema de filtração acoplado, no canal Vallei, situado na cidade de Amersfoort, Países Baixos (imagem do Google Maps). b) Fotografia do local de amostragem, obtida pelo autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes iniciais

A determinação da temperatura de fusão do polímero é essencial para a realização da análise de microplásticos por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Isso permite verificar se as partículas identificadas na amostra correspondem ao padrão estudado, facilitando a identificação de poluentes em locais específicos. No caso do polietileno de alta densidade (PEAD), polímero utilizado para os testes iniciais, o sinal obtido para o plástico puro se localiza a uma temperatura de fusão aproximada de 125°C, conforme mostrado na Figura 5.

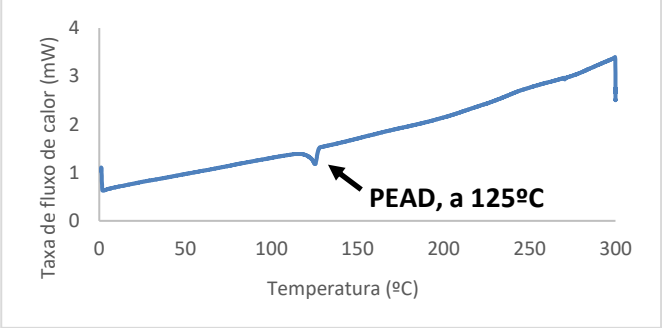

Figura 5 – Sinal de referência do polietileno de alta densidade (PEAD) na análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Utilizando o PEAD como referência, foi realizada a avaliação da eficácia do processo de concentração das amostras, testando duas configurações: sem adição de surfactante e com a presença desse componente. Os resultados obtidos permitiram determinar a eficiência das membranas avaliadas no processo de concentração (Figura 6).

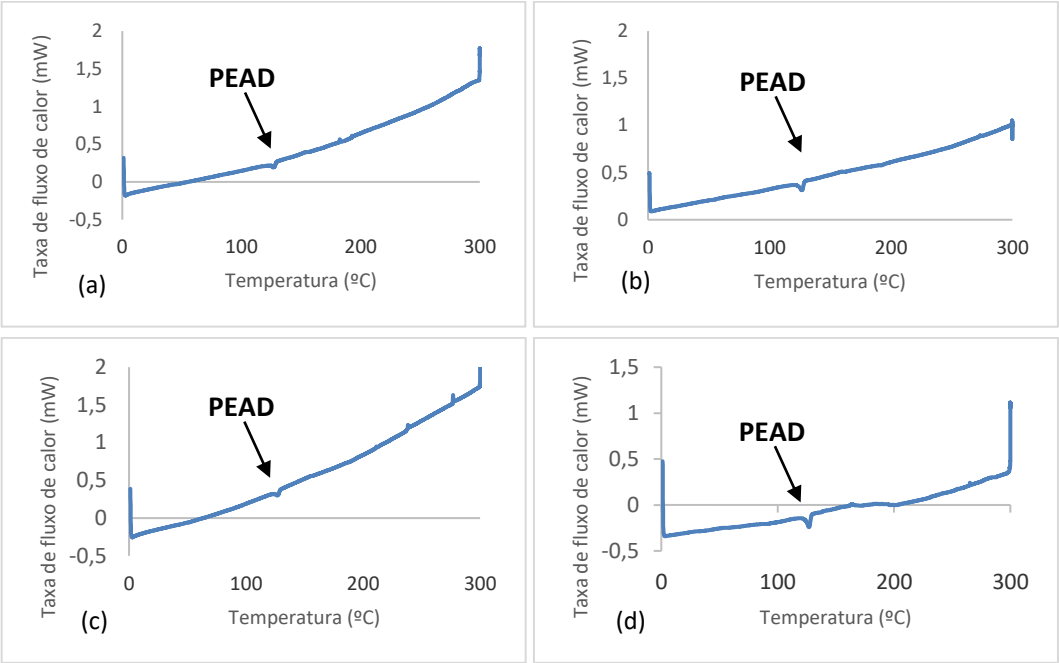

Figura 6 – Sinais de DSC para os testes com: a) membrana de 0,25 m^2 sem surfactante; b) membrana de 0,25 m^2 com surfactante; c) membrana de 0,5 m^2 sem surfactante; d) membrana de 0,5 m^2 com surfactante.

Os resultados apresentados na Figura 6 sugerem que, em geral, apesar de não haver diferenças consideráveis no sinal obtido tanto com a variação da área de membrana, quanto com a utilização de surfactantes, um sinal mais discernível de PEAD foi obtido com a membrana maior e uso de surfactante. A membrana de maior área foi utilizada no teste subsequente realizado em água de canal, nos Países Baixos.

Testes de amostragem e concentração in-situ no Valleikanaal (Amersfoort, Países Baixos)

Os resultados dos testes na água de superfície são mostrados na Figura 7 abaixo.

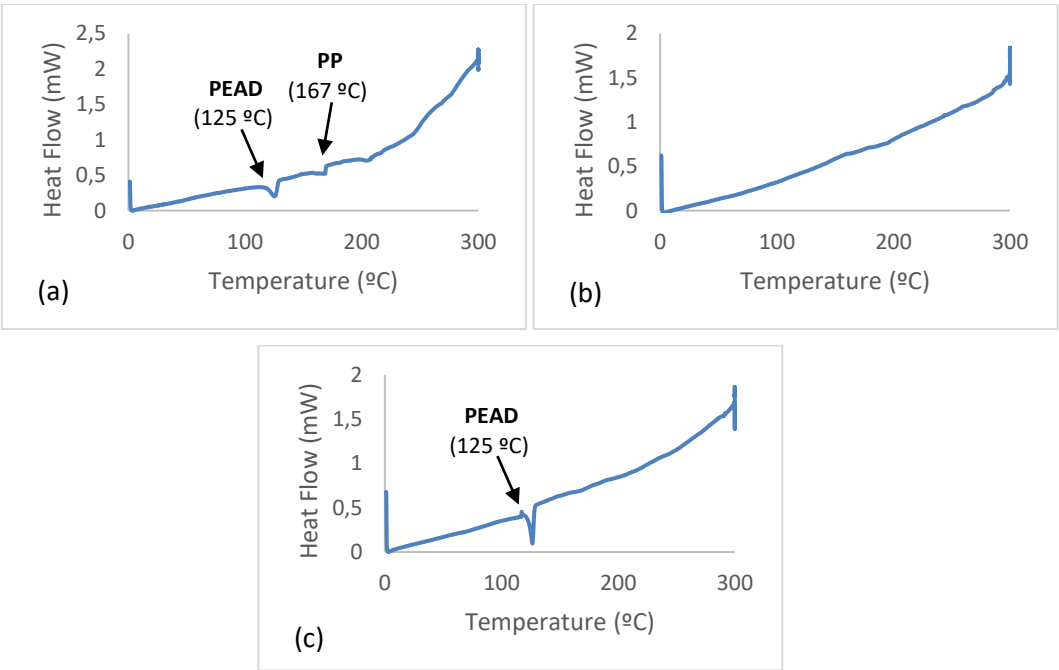

Figura 7 – Resultados da análise de DSC com tipos de NMPs encontrados em a) Água concentrada do canal Vallei; b) Sólidos coletados no pré-filtro durante a amostragem c) Água de lavagem utilizada para o *backflushing* da membrana de ultrafiltração.

Estudos demonstram que o polipropileno (PP) constitui uma fração significativa dos microplásticos encontrados em ambientes aquáticos. Essa prevalência é atribuída às práticas inadequadas de descarte e à resistência do polímero à degradação, o que leva à sua persistência a longo prazo nos ecossistemas marinhos [8]. A degradação do PP em partículas menores contribui para a poluição ambiental, afetando negativamente a vida marinha e podendo entrar na cadeia alimentar. A detecção de PP nas amostras coletadas reforça a necessidade de monitoramento contínuo da poluição plástica e da implementação de estratégias eficazes de gestão de resíduos para mitigar seu impacto ambiental.

Não houve resposta no DSC para os sólidos coletados no pré-filtro (Figura 5b), o que significa que materiais plásticos maiores, ou seja mili- e macrométricos não foram identificados na amostra. No entanto, conforme pode ser visto nas Figuras 5a e 5c, o PEAD utilizado nos testes iniciais com a membrana foi repetidamente detectado, mesmo efetuando as retrolavagens na membrana. Isso mostra que os materiais plásticos ficam encrustrados na membrana e prejudicam a qualidade da análise, causando um efeito de contaminação cruzada.

Em relação ao volume de amostragem, foram coletados 140 L de água do canal, posteriormente reduzidos a 20 L ainda no local da coleta. Assim, foi possível efetivamente concentrar a amostra em um fator de 7 vezes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso de drones subaquáticos pode ser uma ferramenta valiosa para amostragem, pois permite o acesso a locais de difícil alcance e possibilita a coleta em diferentes profundidades da coluna d'água, tornando-os um excelente suporte para a coleta de dados em ambientes aquáticos. A implementação da concentração *in-situ* otimiza significativamente a logística de transporte das amostras, reduzindo o volume que efetivamente precisa ser levado ao laboratório para análise.

Os testes iniciais realizados demonstram que os plásticos estão sendo concentrados e liberados na corrente de concentrado do módulo de ultrafiltração. No entanto, as mesmas partículas plásticas utilizadas como referência (PEAD) nos primeiros testes continuaram sendo detectadas em amostras subsequentes, mesmo após a retrolavagem da membrana com água da torneira. Apesar desses desafios, o estudo demonstrou que a concentração de amostras de microplásticos *in-situ* para análise laboratorial é uma abordagem promissora para a análise de microplásticos, abrindo caminho para métodos mais eficazes de monitoramento ambiental e detecção de microplásticos em ecossistemas aquáticos.

Diante dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se:

- Exploração de métodos para o controle de incrustações e limpeza para garantir que não ocorra contaminação cruzada;
- Implementação de um sistema de membranas em paralelo ou o uso de uma membrana com maior área superficial para aumentar a concentração da amostra e otimizar o tempo de concentração;
- Instalação de um sistema de filtragem na entrada (mangueira) para filtrar e reduzir o risco de obstruções;
- Automatização do sistema, permitindo o controle preciso da quantidade de entrada e possibilitando que o drone opere sem a necessidade de intervenção humana no processo de concentração;
- Testes de viabilidade de um sistema flutuante, permitindo que o sistema se mova junto com o drone, eliminando a necessidade de uma mangueira longa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IVLEVA, N. P. Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: Challenges, advanced methods, and perspectives. *Chemical Reviews*, v. 121, n. 19, p. 11886–11936, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178

[2] MINTENIG, S.; BAUERLEIN, P.; KOELMANS, A.; DEKKER, S.; WEZEL, A. Closing the gap between small and smaller: Towards a framework to analyse nano-and microplastics in aqueous environmental samples. *Environmental Science: Nano*, v. 5, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1039/C8EN00186C

[3] KOELMANS, B. et al. A scientific perspective on microplastics in nature and society. SAPEA, 2019. ZONMW. What are microplastics doing in our bodies? A knowledge agenda for microplastics and health. 2021. Disponível em: https://www.zonmw.nl/fileadmin/user_upload/Report_Microplastics_English_2020.pdf

[4] EUROPEAN COMMISSION. Zero Pollution Action Plan: Towards zero pollution for air, water and soil. 12 maio 2021. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en

[5] EUROPEAN COMMISSION. Comissão Europeia propõe novas regras para reduzir a poluição por microplásticos. 17 abr. 2025. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_25_1023

[6] CALIFORNIA STATE WATER RESOURCES CONTROL BOARD. Microplastics in drinking water. [s.d.]. Disponível em: https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/microplastics.html

[7] GIGAULT, J.; EL HADRI, H.; NGUYEN, B.; GRASSL, B.; ROWENCZYK, L.; TUFENKJI, N.; FENG, S.; WIESNER, M. Nanoplastics are neither microplastics nor engineered nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, v. 16, n. 5, p. 501–507, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41565-021-00886-4

[8] LI, Y.; WANG, X.; FU, Y.; WANG, Z. Microplastics in freshwater and drinking water: Occurrence, removal, and health risks. *Chemosphere*, v. 299, Artigo 134383, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134383