Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego

Essentia EDITORA IFFLUMINENSE

Artigo Original
e-ISSN 2177-4560
DOI: 10.19180/2177-4560.v20n22026p27-43
Submetido em: 05 dez. 2025
Aceito em: 25 ago. 2026

Protocolo para quantificação de microplásticos em ambientes aquáticos: estudo de caso no rio Itabapoana

Protocol for the quantification of microplastics in aquatic environments: a case study of the Itabapoana river

Protocolo para la cuantificación de microplásticos en ambientes acuáticos: estudio de caso del río Itabapoana

Flávia Chrys´óstomo Silva https://orcid.org/0009-0004-5990-5098
Instituto Federal Fluminense
Doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas a Recursos Hídricos no Instituto Federal Fluminense (AmbHidro) pelo Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes (RJ), Brasil.
E-mail: flaviachrysostomo@gmail.com

Nikolas Gomes Silveira de Souza https://orcid.org/0000-0002-5724-2911
Instituto Federal Fluminense
Doutor em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos (AmbHidro) pelo Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes (RJ), Brasil.
E-mail: nichsouz@msn.com

Isadora Azevêdo dos Santos https://orcid.org/0009-0009-2041-372X
Instituto Federal Fluminense
Licencianda em Ciências da Natureza pelo Instituto Federal Fluminense - Campos dos Goytacazes (RJ), Brasil.
E-mail: isadoraazevedo2018@gmail.com

Manildo Marcião de Oliveira https://orcid.org/0000-0003-4245-7132
Instituto Federal Fluminense
Doutor em Ciências (UERJ). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense -campus Cabo Frio (RJ) – Brasil.
E-mail: manildodpicf@gmail.com

Vicente de Paulo Santos de Oliveira https://orcid.org/0000-0002-5981-0345
Instituto Federal Fluminense
Doutor em Engenharia Agrícola (UFV). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - campus Campos dos Goytacazes (RJ) – Brasil.
E-mail: vicente.oliveira@gsuite.iff.edu.br

Thiago Moreira de Rezende Araújo https://orcid.org/0000-0003-2512-9743
Instituto Federal Fluminense
Doutor em Ciências Naturais (UENF). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - campus Campos dos Goytacazes (RJ) – Brasil.
E-mail: taraujo@iff.edu.br

Resumo: A avaliação da qualidade da água é essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos; entretanto, indicadores tradicionais, como o Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET), não abrangem contaminantes como os microplásticos. A presença de microplásticos em ecossistemas aquáticos constitui uma preocupação ambiental crescente, a detecção e a quantificação dessas partículas são essenciais para subsidiar avaliações de risco, orientar estratégias de monitoramento e apoiar a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação da poluição plástica. Este estudo apresenta um protocolo metodológico para a quantificação de partículas de microplásticos em amostras de água superficial, combinando amostragem *in situ*, processamento laboratorial simplificado e uma abordagem de análise de imagem automatizada, validada por contagem manual. O protocolo foi aplicado como um estudo de caso no Rio Itabapoana, uma bacia hidrográfica que abrange três estados brasileiros, Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. As amostras foram coletadas em quatro campanhas sazonais, duas na estiagem e duas no período de cheia de 2024, e filtrados 150 litros de água por campanha. Um algoritmo de processamento de imagem foi desenvolvido em *Python* para identificar e contar partículas escuras com morfologia regular. As concentrações variaram entre 0,022 e 0,081 MP/m³, valores inferiores aos reportados em outros rios brasileiros, o que é atribuído tanto às características da bacia quanto às limitações do método, que não detecta fibras ou partículas claras. A metodologia proposta, apesar de suas limitações, oferece uma abordagem reprodutível e simplificada, viabilizando estudos de monitoramento iniciais e comparativos em rios, servindo como uma ferramenta para a análise de microplásticos.

Palavras-chave: Microplásticos. Monitoramento Ambiental. Rio Itabapoana.

Abstract: Water quality assessment is essential for the integrated management of water resources; however, traditional indicators such as the Water Quality Index (WQI) and the Trophic State Index (TSI) do not encompass emerging contaminants such as microplastics. The occurrence of microplastics in aquatic ecosystems represents a growing environmental concern, and the detection and quantification of these particles are essential to support risk assessments, guide monitoring strategies, and inform public policies aimed at mitigating plastic pollution. This study presents a methodological protocol for the quantification of microplastic particles in surface water samples, integrating in situ sampling, simplified laboratory processing, and an automated image analysis approach validated by manual counting. The protocol was applied as a case study in the Itabapoana River Basin, which extends across the Brazilian states of Espírito Santo, Minas Gerais, and Rio de Janeiro. Samples were collected during four seasonal field campaigns, two in the dry season and two in the wet season of 2024, with 150 liters of water filtered per campaign. An image-processing algorithm was developed in Python to identify and quantify dark microplastic particles with regular morphology. The concentrations ranged from 0.022 to 0.081 MP/m³, values lower than those reported for other Brazilian rivers, which can be attributed both to basin-specific characteristics and to methodological constraints, as fibers and light-colored particles were not detected. Despite these limitations, the proposed methodology provides a reproducible and simplified approach, enabling preliminary and comparative monitoring of microplastics in fluvial systems and serving as an effective analytical tool for environmental assessment and water quality management.

Keywords: Microplastics. Environmental Monitoring. Itabapoana River.

Resumen: La evaluación de la calidad del agua es fundamental para la gestión integrada de los recursos hídricos; sin embargo, los indicadores tradicionales, como el Índice de Calidad del Agua (ICA) y el Índice de Estado Trófico (IET), no incluyen contaminantes como los microplásticos. La presencia de microplásticos en los ecosistemas acuáticos constituye una preocupación ambiental creciente, y la detección y cuantificación de estas partículas son fundamentales para respaldar evaluaciones de riesgo, orientar estrategias de monitoreo y apoyar la formulación de políticas públicas dirigidas a la mitigación de la contaminación plástica. Este estudio presenta un protocolo metodológico para la cuantificación de partículas de microplásticos en muestras de agua superficial, que combina la toma de muestras in situ, un procesamiento de laboratorio simplificado y un enfoque de análisis de imágenes automatizado, validado mediante conteo manual. El protocolo se aplicó como estudio de caso en el río Itabapoana, una cuenca hidrográfica que abarca tres estados brasileños: Espírito Santo, Minas Gerais y Río de Janeiro. Las muestras fueron recolectadas en cuatro campañas estacionales —dos en el período seco y dos en el período de lluvias de 2024—, filtrando 150 litros de agua por campaña.Se desarrolló un algoritmo de procesamiento de imágenes en Python para identificar y contabilizar partículas oscuras con morfología regular. Las concentraciones variaron entre 0,022 y 0,081 MP/m³, valores inferiores a los reportados en otros ríos brasileños, lo que se atribuye tanto a las características de la cuenca como a las limitaciones del método, que no detecta fibras ni partículas claras. A pesar de sus limitaciones, la metodología propuesta ofrece un enfoque reproducible y simplificada, que posibilita estudios de monitoreo iniciales y comparativos en ríos, sirviendo como una herramienta para el análisis de microplásticos.

Palabras clave: Microplásticos. Monitoreo Ambiental. Río Itabapoana.

1 Introdução

A avaliação da qualidade da água para o diagnóstico e a gestão integrada dos recursos hídricos, estão tradicionalmente baseados na quantificação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, analisados através de índices como o Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET). Entretanto, essas análises apresentam limitações quanto à detecção de contaminantes emergentes, como os microplásticos, cuja presença tem sido constatada em ambientes aquáticos (LAMPARELLI, 2004; LI *et al*., 2024).

Os microplásticos são definidos como partículas plásticas com dimensões inferiores a 5 mm e constituem contaminantes emergentes que despertam atenção devido à sua persistência no ambiente, elevada área superficial específica, capacidade de adsorção de poluentes químicos e potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas aquáticas (ANDRADY, 2011; BROWNE *et al*., 2015; NOAA, 2009).

A exposição humana a microplásticos tem sido associada a potenciais riscos à saúde, incluindo processos inflamatórios, estresse oxidativo e diferentes efeitos tóxicos, configurando uma crescente preocupação para a saúde pública. Essa exposição pode ocorrer por múltiplas vias, sobretudo ingestão e inalação, sendo seus mecanismos e implicações ainda pouco compreendidos. (ABBAS *et al*., 2025; LI *et al*., 2023; LUO *et al*., 2025; ZHANG, X. & YU, C.; WANG, P. & YANG, C, 2025).

Os rios são as principais vias de transporte de microplásticos dos continentes para os oceanos, tornando o monitoramento de sistemas fluviais uma prioridade estratégica para compreender e mitigar a poluição de microplásticos (LEBRETON *et al*., 2017). No entanto, um dos maiores desafios para a avaliação da contaminação por microplásticos é a ausência de protocolos de amostragem e análise padronizados (GESAMP, 2015; UNEP, 2016). A diversidade de métodos para coleta, extração, identificação e quantificação de microplásticos dificulta a comparação de dados entre diferentes estudos e regiões, criando uma barreira para a formulação de políticas públicas e estratégias de gestão eficazes (SHIM *et al*., 2017).

No Brasil, ainda há uma lacuna regulatória sobre o tema, visto que a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece diretrizes para a classificação dos corpos hídricos e padrões de qualidade da água, mas não contempla parâmetros específicos para microplásticos. Entretanto, estudos recentes, como a CETESB (2024) e Montagner *et al.* (2021) têm apontado a urgência de protocolos metodológicos adaptados à realidade dos ecossistemas nacionais. Estudos em rios brasileiros, como os realizados na Bacia da Baía de Guanabara (DRABINSKI *et al*., 2023), têm revelado altas concentrações de microplásticos, especialmente em áreas densamente urbanizadas, evidenciando a urgência de desenvolver protocolos adaptados à realidade nacional. Entretanto, metodologias avançadas, como a Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) ou a espectroscopia Raman, exigem equipamentos de alto custo e equipe especializada, limitando sua aplicação em laboratórios com recursos restritos.

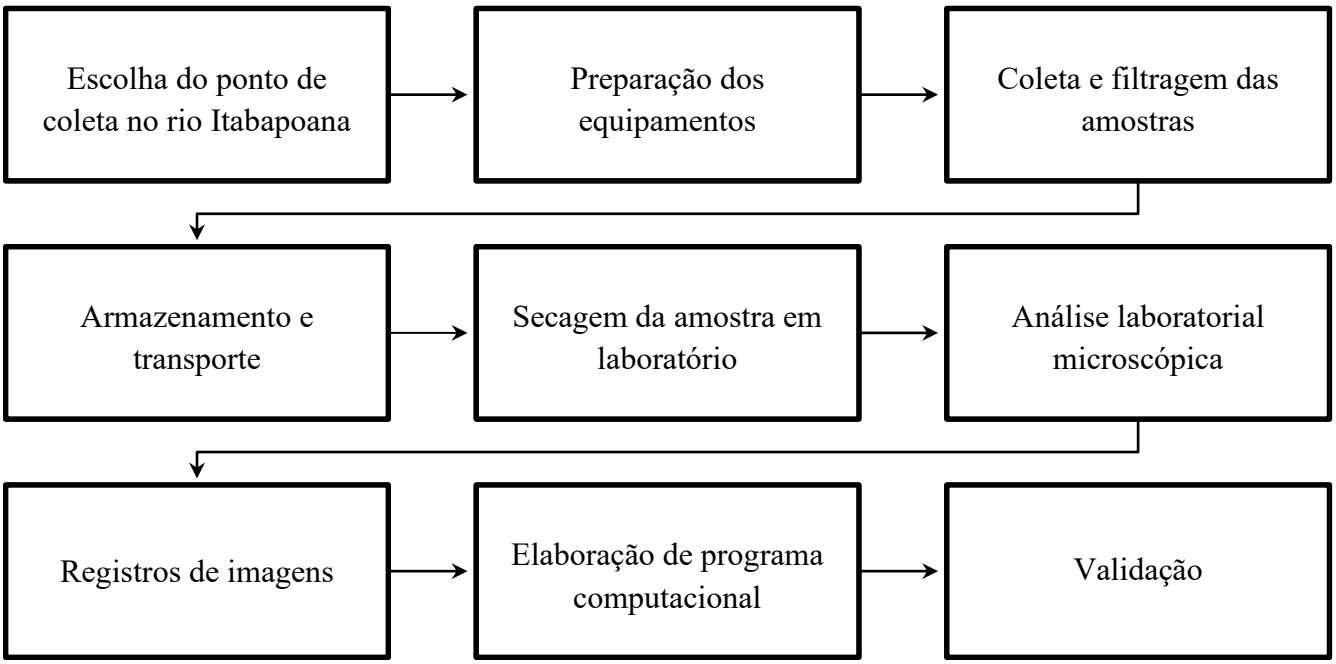
Diante desse cenário, este estudo propõe um protocolo metodológico simplificado para quantificação de partículas escuras e regulares em águas superficiais, combinando técnicas de amostragem, processamento

laboratorial e análise de imagem assistida por *software*. O método busca gerar resultados equivalentes à contagem manual, com menor erro e maior reprodutibilidade, oferecendo uma ferramenta acessível para o monitoramento de microplásticos em rios. O protocolo foi aplicado no Rio Itabapoana, bacia de relevância regional entre os estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica dos microplásticos em ambientes fluviais.

2 Material e Método

A metodologia foi estruturada para permitir um monitoramento simplificado, desde a amostragem em campo até a quantificação final por análise de imagem, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1. O protocolo foi estruturado para assegurar reprodutibilidade, mantendo a consistência dos resultados obtidos e possibilitando a detecção de um conjunto definido de micropartículas.

Figura 1. Fluxograma metodológico.



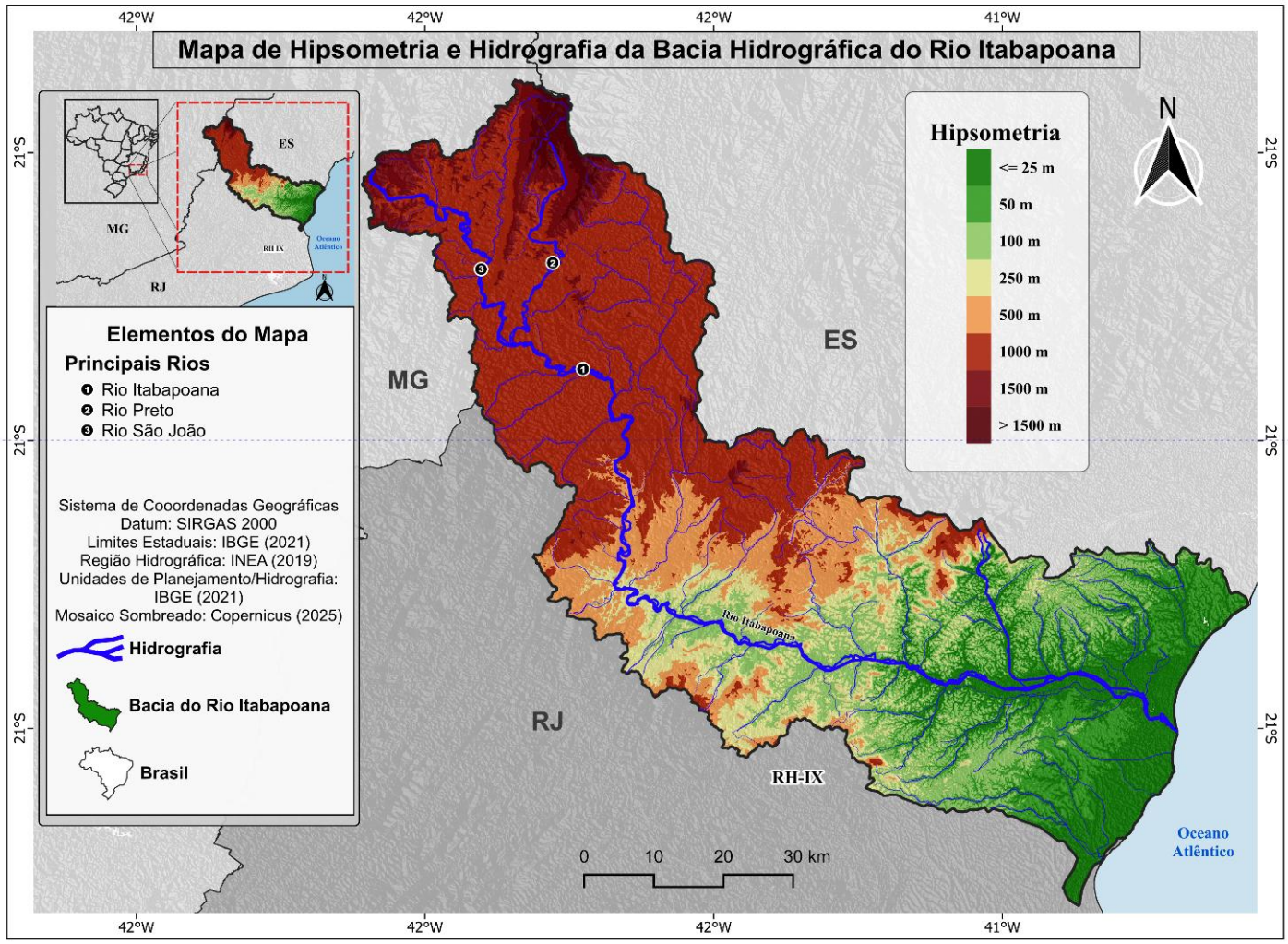
Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

2.1 Área de Estudo

O estudo foi conduzido no Rio Itabapoana, cuja bacia hidrográfica (Figura 2) tem aproximadamente 4.875 km² de área de drenagem e está situada na divisa entre os estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. O rio Itabapoana é formado pela confluência dos rios São João e Preto e sua nascente está localizada na Serra do Caparaó (AGEVAP, 2019). A bacia abrange 18 municípios e é caracterizada por múltiplas atividades antrópicas, incluindo agropecuária, indústria e urbanização. O ponto de amostragem foi estrategicamente selecionado em uma ponte que divide os estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro

(21°13'19.49"S, 41°18'30.74"O), localizada no trecho inferior do rio, de modo a integrar as contribuições de uma área significativa da bacia antes de sua foz no Oceano Atlântico. (AGERH, 2019; IEMA, 2002).

Figura 2 - Mapa da Bacia do rio Itabapoana.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

2.2 Amostragem

Foram realizadas quatro campanhas de amostragem para abranger a variabilidade sazonal: duas no período de estiagem (26 de junho e 19 de agosto de 2024) e duas no período de cheia (13 de novembro e 17 de dezembro de 2024). Essa estratégia busca avaliar como a variabilidade sazonal intervém na disponibilidade de micropoluentes como os microplásticos (NASCIMENTO *et al*., 2021; PRATA *et al*., 2018; MAGNI *et al*., 2019).

A amostragem foi realizada com auxílio de um recipiente com capacidade aproximada de 15 litros, balança digital e filtro. O filtro utilizado foi um copo de separação em PVC, da marca Limnotec, com dimensões de 12,8 cm de altura e 10 cm de diâmetro e abertura malha entre 20 e 500 µm. Durante cada coleta, foram filtrados 15 recipientes de água, cada um com aproximadamente 10 litros (totalizando cerca de 150

litros por ponto). O processo de filtragem foi realizado *in loco*. O material retido no filtro foi cuidadosamente transferido transportado para o laboratório LabFoz para posterior processamento e análises laboratoriais.

Para assegurar a integridade das amostras e reduzir riscos de contaminações externas, foram adotadas medidas de controle de qualidade durante todas as etapas de coleta e processamento (VASUDEVA *et al.*, 2025). As amostras foram armazenadas em ambientes fechados, limpos e isentos de materiais plásticos aparentes. Durante o manuseio, os recipientes permaneceram cobertos para evitar deposição de partículas atmosféricas.

2.3 Análise laboratorial e processamento de imagens

As amostras foram analisadas com base no procedimento elaborado pela NOAA (Mansura *et al.,* 2015) e adaptado para a realidade da disponibilidade de equipamentos do laboratório LabFoz (Laboratório de Análise e Monitoramento das Águas) – IFF Campos dos Goytacazes/RJ e do LEMAM (Laboratório de Ecotoxicologia e Microbiologia Ambiental) – IFF de Cabo Frio/RJ.

No laboratório LEMAM, foram realizadas as análises de imagem com auxílio do microscópio estereoscópico binocular (Centauro®) equipado com uma câmera digital CMOS de 2MP (modelo NXM-EP200). Para a quantificação e caracterização dos microplásticos, foram realizadas fotografias por quadrantes de cada amostra. Essa abordagem permitiu varredura sistemática e detalhada da amostra, garantindo que todas as partículas da amostra fossem registradas.

A metodologia proposta para a detecção e contagem de objetos em imagens microscópicas compreende, além da etapa de varredura, as seguintes etapas de análise de vizinhança, detecção de esfericidade com tolerância, classificação e limiarização de cores, identificação de pontos de interesse e conversão para polígonos, contagem e ajuste fino.

O algoritmo inicia com uma varredura exaustiva da imagem, processando cada pixel individualmente. Para cada pixel, é realizada uma análise de sua vizinhança imediata, considerando os pixels adjacentes. Esta etapa é crucial para a identificação de padrões espaciais e para a contextualização de cada elemento da imagem em relação ao seu entorno.

Após a análise de vizinhança, o algoritmo avalia a probabilidade de um conjunto de pixels formar um objeto com morfologia esférica ou aproximadamente esférica. Reconhecendo que a representação digital de formas circulares em uma grade de pixels é inerentemente discreta e que variações morfológicas podem ocorrer em amostras biológicas ou materiais, foi incorporada uma margem de tolerância de 12% para a esfericidade. Essa tolerância permite a inclusão de objetos que, embora não perfeitamente circulares, exibam características predominantemente esféricas, como formas ligeiramente elípticas ou irregulares.

A classificação de cores é realizada em uma escala de 0 a 255, correspondente à profundidade de 8 bits da imagem. Para a identificação de objetos de interesse, um processo de limiarização (OTSU, 1979) é aplicado onde pixels são categorizados com base em sua intensidade. Um aspecto crítico desta etapa é a aceitação de

até duas camadas de tonalidades escuras. Esta decisão metodológica visa mitigar o impacto de artefatos como reflexos, variações de luminosidade ou a presença de minerais que poderiam ser erroneamente classificados como parte do objeto, garantindo que a ausência de energia (escuridão) seja interpretada de forma mais flexível, sem comprometer a detecção de objetos legítimos.

Com base na classificação de cores e na análise de esfericidade, o algoritmo procede à identificação dos pontos de interesse, que representam as localizações mais prováveis dos objetos na imagem. Estes pontos são então convertidos em representações poligonais, permitindo uma descrição vetorial dos objetos detectados. Esta conversão facilita a manipulação e a análise geométrica dos objetos, além de ser um formato adequado para a visualização e exportação dos resultados.

A etapa final do processo envolve a contagem dos polígonos detectados, fornecendo o número total de objetos identificados na imagem. A metodologia incorpora um mecanismo de ajuste fino, que permite ao usuário refinar os parâmetros do algoritmo para otimizar a contagem. Este ajuste pode ser iterativo, permitindo que o usuário explore diferentes configurações até alcançar a acurácia desejada, seja para incluir mais objetos ou para filtrar ruídos e falsos positivos.

2.4 Análise computacional

Para a quantificação das partículas, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Python, utilizando as bibliotecas OpenCV e NumPy. A escolha pela contagem computacional, em detrimento do método manual, é justificada pela redução da subjetividade, aumento da reprodutibilidade e otimização do tempo de análise (NOAA, 2009; GESAMP, 2015).

O programa desenvolvido utilizou algoritmos de processamento de imagem com critérios específicos para identificar e quantificar as partículas plásticas, minimizando a subjetividade e o erro humano associados à contagem manual. Os critérios de seleção incluíram a extração de pixels que estivessem entre os 12% mais escuros da imagem. Objetos alongados foram eliminados, sendo mantidos apenas pontos ou formas quase circulares. Além da escuridão individual do pixel, a média da região circundante também deveria estar entre os 12% mais escuros da imagem, o que ajudou a reduzir falsos positivos e a evitar ruídos de 1-2 pixels, sem, contudo, eliminar pontos reais.

A contagem foi feita por um pipeline determinístico que transforma cada imagem em regiões candidatas e, ao final, em medidas físicas e densidades. Primeiro, a imagem RGB é convertida para tons de cinza $I:\Omega \rightarrow [0,1]$ e calibrada em unidades físicas por meio da barra de 500 µm. Então, mede-se a largura da barra em pixels L_{bar}^{px} e define-se o fator de conversão s $(\mu m/px)$ como $s = L_{bar}^{\mu m}/L_{bar}^{px}$ (Eq. 1). Grandezas geométricas em pixels são convertidas por $L\mu m = s\,L_{px}, W_{\mu m} = s$ e $A_{\mu m^2} = s^2 A_{px}$ (Eq. 2). A área do campo de visão é $A_{FOV} = \frac{W_{px} H_{px} s2}{10^6}$ (mm²) (Eq. 3). Essa abordagem corresponde à calibração espacial clássica usada em microscopia e no ImageJ/Fiji.

Em seguida, isola-se as partes mais escuras via limiarização. Seja F a CDF das intensidades de I; escolhe-se um limiar $\tau = F^{-1}(p)$ (Eq. 4) para reter apenas a fração ppp mais escura e define-se a máscara $D(x) = 1\{I(x) \leq \tau\}$(Eq. 5). Quando há variação de iluminação, usa-se limiares clássicos Otsu (1979), que escolhe τ maximizando a variância interclasses $\sigma_b^2 = w_0 w_1(\mu_0 - \mu_1)^2$ (Eq. 6), e Sauvola, um limiar local $T(x) = m(x)\left[1 + k\left(\frac{s(x)}{R} - 1\right)\right]$ (Eq. 7). Esses métodos são consagrados na literatura de processamento de imagens.

A máscara é então limpa morfologicamente por abertura $(D \circ B) = (D \ominus B) \oplus B$ (Eq. 8) e pela remoção de objetos muito pequenos, o que reduz ruído sem distorcer a fotometria local. A abertura (erosão seguida de dilatação com o mesmo elemento estruturante) é um operador básico de morfologia matemática.

A região da barra de escala SSS (dilatada com pequena margem) é excluída da contagem. $D' = D \backslash S$ (Eq. 9). Objetos que tocam a borda do campo também podem ser removidos para evitar contagens parciais. Sobre D', rotulamos os componentes conectados e medimos, para cada região R, os eixos maior e menor da elipse equivalente (derivados dos momentos de segunda ordem), obtendo comprimento L_px, largura W_{px}, área A_{px} e razão de aspecto $\rho = \frac{Lpx}{Wpx}$ (Eq. 10). Essas definições são as usadas pelas rotinas padrão de medição.

Para aproximar pontos escuros e reduzir falsos positivos, aplica-se filtros conservadores: a região é aceita apenas se sua intensidade média $\overline{I_R}$ estiver entre as menores do histograma global, i.e., $\overline{I_R} \leq F^{-1}$ (Eq. 11), e se respeitar limites geométricos como $\rho \leq \rho_{max}$ (Eq. 12), $L_{\mu m} \leq L_{max}$ (Eq. 13) *e* $A_{\mu m2} \leq A_{max}$ (Eq. 14). Esses critérios restringem manchas extensas/alongadas e preservam alvos compactos e escuros.

A contagem por imagem é o número N de regiões que sobrevivem a todas as etapas; a densidade areal é $\rho_A = \frac{N}{A_{FOV}}$ em MP mm^{-2} (Eq. 15). Relatórios de métodos de microplásticos (NOAA, 2009; GESAMP, 2015) recomendam expressar resultados como contagens/densidades normalizadas pela área (ou volume) do campo/amostra e registrar metadados de processamento, o qual adotamos neste fluxo. Os parâmetros utilizados em cada equação serão explicitados a seguir.

Eq. (1), $L_{bar}^{\mu m}$ é o comprimento nominal da barra de escala em micrômetros (para a presente pesquisa foi adotado 500 µm); $L_{bar}^{\mu m}$ é a largura da barra medida na imagem e por imagem (em pixels); s é o fator de conversão espacial em µm/px, que transforma qualquer medida de pixel para micrômetros.

Eq. (2), $L\mu m$ *e* $W_{\mu m}$ são, respectivamente, os eixos maior e menor (em pixels) da elipse equivalente de uma região; A_{px} é a área dessa região (em pixels quadrado); $L\mu m, W_{\mu m}$ e $A_{\mu m^2}$ são as mesmas grandezas convertidas para micrômetros e micrômetros quadrado usando s.

Eq. (3), W_{px} e H_{px} são a largura e altura da imagem (em pixels); A_{FOV} é a área do campo de visão (em m³), obtida multiplicando a área em pixels por s2 e convertendo de µm² para mm² (10^6).

Eq. (4), F é a CDF (função distribuição acumulada) das intensidades do mapa em cinza I; p∈ (0,0,5] é a fração (percentil) de pixels mais escuros que desejamos reter; τ=F−1(p) é o limiar de intensidade correspondente a esse percentil.

Eq. (5), $D(x) = 1\{I(x) \leq \tau\}$ é a máscara binária de pixels escuros (se 1 = escuro, se 0 = não escuro).

Eq. (6), w_0 e w_1 são as proporções de pixels nas classes clara e escura; μ_0 e μ_1 são as médias de intensidade nas classes; σ_b^2 é a variância interclasses maximizada para escolher τ (OTSU, 1979).

Eq. (7), T(x) é o limiar local no ponto x qualquer; m(x) e s(x) são a média e desvio-padrão locais da intensidade numa janela deslizante; R é o alcance dinâmico esperado do desvio (constante, p.ex., 128 em imagens de 8 bits, 256 em 16 bits, etc); k é o ganho que regula a sensibilidade ao contraste local (SAUVOLA; PIETIKÄINEN, 2000).

Eq. (8), D∘B é a abertura morfológica de D por B, definida como erosão (⊖) seguida de dilatação (⊕); B é o elemento estruturante (aqui, consideramos o microplástico a imagem de um disco pequeno).

Eq. (9), S é a máscara da barra de escala (incluindo uma pequena margem ao redor); D′=D\S remove essa região para não contar a barra.

Eq. (10), ρ é a razão de aspecto da região (quão alongada ela é, contada em pixel).

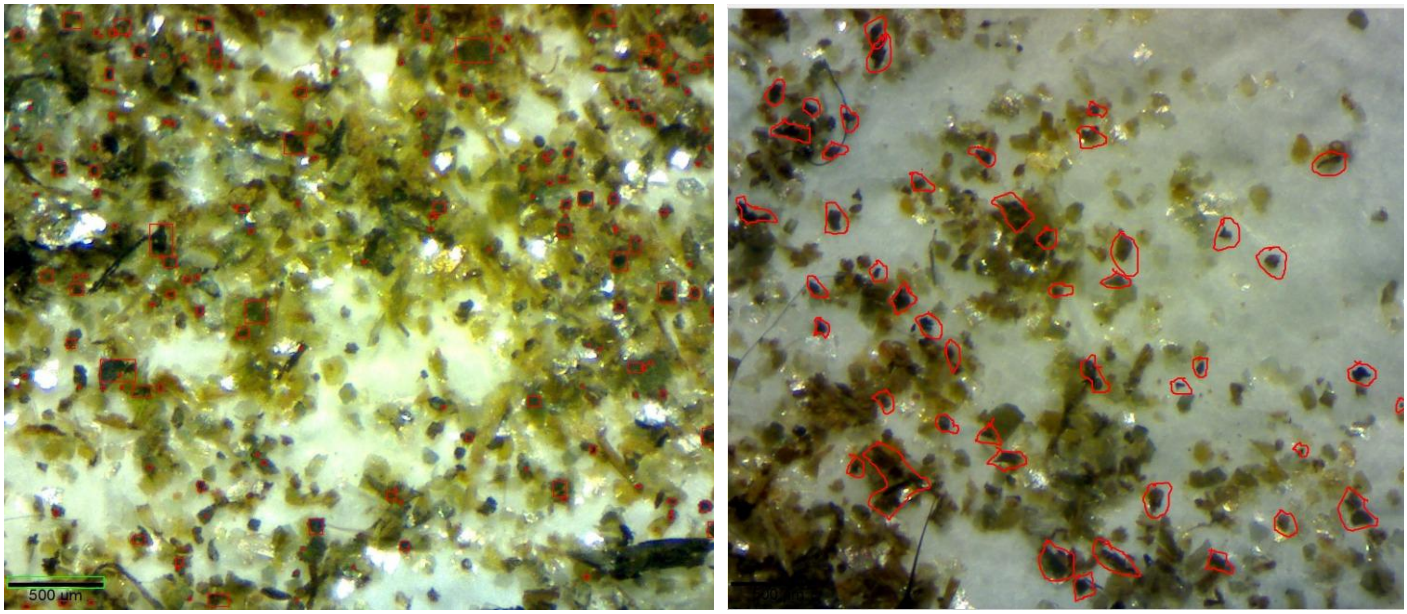
Eq. (11), $\bar{I_R}$ é a intensidade média dentro da região R; q é um percentil escuro global (da CDF F); o critério $\bar{I_R} \leq F^{-1}$ (q) garante que a região como um todo é suficientemente escura. A ideia aqui é não considerar minerais que possam ser escuros, assumindo que o mineral poderá ser multicores.

Nas Eqs. (12), (13) e (14), ρ_{max}, L_{max} e A_{max} são limiares de seleção (máximo de razão de aspecto, comprimento e área) usados para excluir objetos muito alongados ou grandes, preservando pontos escuros com uma forma aceitável para o microplastico. Este é um limitante, porque fibras ou aspectos que venham a diferir muito do esférico poderá ser ignorado.

Eq. (15), N é a contagem final de regiões que passaram por segmentação, limpeza e filtros; ρ_A é a densidade areal de MPs (em MP mm^{-2}) calculada no campo de visão.

Na Figura 3 constam imagens processadas pelo programa computacional e por contagem manual, destacando os microplásticos identificados e contados, na cor vermelha.

Figura 3. Exemplo de análise computacional de imagem (a) e análise manual (b).



(a) (b)

Fonte: Dos autores, 2025.

A validação foi realizada meio da comparação com a contagem manual realizada em um subconjunto com imagens selecionadas aleatoriamente das quatro campanhas. Para cada imagem, foram registradas tanto a contagem manual (Nm) quanto a contagem automatizada (Nc). O erro percentual médio absoluto entre os dois métodos foi calculado pela Equação 16.

$$\text{Erro (\%)} = (|Nc - Nm| / Nm) \times 100 \quad (16)$$

onde Nc representa a contagem automatizada e Nm a contagem manual.

As principais limitações deste estudo estão relacionadas às restrições instrumentais e metodológicas inerentes à etapa de detecção e caracterização dos microplásticos. A análise realizada foi restrita à identificação de partículas escuras, ou seja, microplásticos transparentes ou de cores claras, bem como fibras alongadas, que são formas comuns de microplásticos em ambientes aquáticos, podem não ter sido detectados e quantificados de forma eficaz. A ausência de etapas de triagem por densidade ou granulometria, ou de análises físico-químicos confirmatórios, como espectroscopia Raman ou FTIR, impedem a confirmação da natureza plástica de todas as partículas identificadas. Outro fator limitante é a ausência da etapa de digestão, que eliminaria grande parte da matéria orgânica e melhoraria o *background* do filtro. Dessa forma, os resultados apresentados se referem a partículas escuras com características morfológicas de microplásticos, e não exclusivamente a microplásticos confirmados.

Ainda assim, a abordagem aplicada oferece estimativa da presença de microplásticos, priorizando a reprodutibilidade do procedimento de contagem e permitindo sua adaptação em outros contextos de monitoramento ambiental. O protocolo sugerido auxilia na triagem inicial, podendo ser aplicado como método qualitativo, indicando presença ou ausência, ou como método semiquantitativo quando realizada a contagem

de microplásticos em amostras de água.

3 Resultados

Os resultados obtidos evidenciam a presença contínua de microplásticos no baixo curso do rio Itabapoana, confirmando o papel dos rios como importantes vetores de transporte de poluentes até os ambientes marinhos (LEBRETON et al., 2017). As principais fontes potenciais incluem o escoamento agrícola associado ao uso de fertilizantes encapsulados, o descarte urbano difuso e os efluentes domésticos, além da abrasão de pneus, embalagens plásticas e da lixiviação de materiais têxteis (MAPBIOMAS, 2024). Esses processos contribuem para a introdução e manutenção de micropartículas no sistema fluvial, ressaltando a necessidade de integrar o monitoramento de microplásticos às estratégias de gestão de recursos hídricos, especialmente considerando que o rio Itabapoana é um corpo d'água de domínio da União e responsável pelo abastecimento de municípios dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

Os dados analisados foram apresentados em microplásticos (MP) por metro cúbico (m^3), em função das saídas de campo, vide Tabela 1, onde a Saída 1 aconteceu no dia 26 de junho de 2024, a Saída 2 no dia 19 de agosto de 2024, a Saída 3 no dia 13 de novembro de 2024 e a Saída 4 no dia 17 de dezembro de 2024. Nas amostras coletadas período de estiagem do rio Itabapoana (saídas 1 e 2), os resultados foram de 0,028 MP/m^3 e 0,081 MP/m^3. Já as amostras coletadas em período de cheia (saídas 3 e 4), a apresentaram, respectivamente, 0,022 MP/m^3 e 0,046MP/m^3. Ao analisar os resultados, não foi possível afirmar uma correlação direta entre a sazonalidade e a quantidade de microplásticos. A análise estatística dos dados revelou que a média aritmética, determinada a partir da soma de todos os valores dividida pelo número de observações, foi de aproximadamente 0,045 partículas de microplásticos (MP) por metro cúbico em cada coleta.

Tabela 1. Concentração de microplásticos por campanha.

Campanha	Data	Condição hidrológica	Concentração (MP/m^3)	Proporção (%)
S1	26/06/2024	Estiagem	0,028	14,8
S2	19/08/2024	Estiagem	0,081	45,7
S3	13/11/2024	Cheia	0,022	12,6
S4	17/12/2024	Cheia	0,046	24,7
Média ± DP			**0,045 ± 0,026**	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Em termos absolutos, as concentrações observadas (0,022–0,081 MP/m^3) situam-se no limite inferior de faixas reportadas em rios tropicais moderadamente impactados (0,05–0,8 MP/m^3; WANG *et al*., 2017). As concentrações reportadas neste trabalho são inferiores às encontradas em outros sistemas fluviais brasileiros, especialmente aqueles em bacias hidrográficas mais urbanizadas. Drabinski *et al.* (2023) realizou uma

pesquisa em rios que deságuam na Baía de Guanabara (Rio de Janeiro) que reportou concentrações médias de 3.651,5 itens/m³, com picos de até 51.166,5 itens/m³ no altamente urbanizado Rio Maracanã. Essa disparidade, que ultrapassa quatro ordens de magnitude, não pode ser atribuída unicamente a uma menor poluição no Rio Itabapoana. A principal explicação reside nas limitações metodológicas do presente estudo, que são fundamentais para a correta interpretação dos dados. O estudo de Drabinski *et al.* (2023), que utilizou microscopia com confirmação por FTIR, revelou que 63,3% das partículas eram fibras e que a cor mais comum era transparente. Ambos os tipos de partículas (fibras e de cores claras) não são detectados no protocolo da presente pesquisa, que tem como foco partículas escuras e regulares. Portanto, o método aqui proposto captura apenas uma pequena e específica fração da contaminação total por MPs. Isso pode ser atribuído à malha de filtragem (≥20 μm) e à exclusão de partículas claras.

Para melhor compreensão da relação entre as quantidades de microplásticos em cada saída, foram realizadas análises de proporcionalidade. Os dados obtidos evidenciam que a Saída 2 se destaca como a de maior concentração (aproximadamente 45,7%), destacando-se significativamente das demais; a Saída 4 vem em segundo lugar, com uma proporção de aproximadamente 24,7%; a Saída 1 contribui com cerca de 14,8% do total e a enquanto a Saída 3 apresenta a menor proporção, em torno de 12,6%. Resultados semelhantes foram reportados em Magni *et al.* (2019) e Nascimento *et al.* (2021), nos quais concentrações aumentaram durante estiagem devido ao menor volume hídrico e aporte de fontes urbanas contínuas. Jin *et al.* (2025) relacionou a abundância de microplásticos em águas continentais durante a estação seca é sistematicamente superior à da estação chuvosa, reforçando que a diluição é um fator determinante na dinâmica de microplásticos em sistemas fluviais.

A análise de proporcionalidade reforça a observação de que a Saída 2 possui uma concentração significativamente maior de microplásticos em comparação com as outras saídas, sendo aproximadamente três vezes maior que as Saída 1 e 3. Entretanto, é válido destacar que a amostra da Saída 2 apresentou falha de armazenamento, dificultando a análise por imagens. A Saída 3, realizada em época de cheia, consistentemente apresenta as menores proporções em relação às demais, indicando que ela tem a menor quantidade de microplásticos entre todas as saídas analisadas.

A escolha pela contagem computacional foi motivada pela redução de subjetividade e pelo aumento da reprodutibilidade, em contraste com a contagem manual, que tende a gerar falsos positivos/negativos. Estudos como NOAA (2009) e GESAMP (2015) recomendam registro de metadados, como realizado neste estudo. A filtragem física *in loco* garantiu comparabilidade entre campanhas, embora métodos adicionais de separação por densidade pudessem aumentar a seletividade.

A abordagem proposta demonstra a viabilidade de automatizar a detecção e contagem de objetos em imagens microscópicas com profundidade de cor limitada. A incorporação de uma margem de tolerância para a esfericidade e a flexibilização na limiarização de cores são aspectos cruciais que conferem robustez ao algoritmo, permitindo sua aplicação em cenários onde a qualidade da imagem ou a morfologia dos objetos

podem variar. A capacidade de ajuste dos parâmetros do algoritmo permite a adaptação a diferentes contextos de pesquisa e a otimização dos resultados de acordo com as necessidades específicas do usuário.

O percentual médio de erro entre os métodos manual e computacional foi de 10%, indicando uma boa concordância entre as abordagens. Esta validação reforça a robustez do método computacional para a quantificação de microplásticos, mesmo diante das limitações mencionadas. Os resultados obtidos são confiáveis dentro do escopo do método empregado, fornecendo estimativa de partículas com características de microplásticos no rio Itabapoana. Ainda que os resultados obtidos tenham indicado coerência entre a classificação automática e a interpretação visual, ampliar a amostragem em estudos futuros irá aumentar a confiabilidade e a robustez da validação.

O desenvolvimento de métodos simplificados e de baixo custo representa um avanço significativo para o estudo dos microplásticos. O protocolo proposto nesta pesquisa se insere nesse cenário, entretanto, foi realizado um levantamento de outras metodologias consolidadas na literatura para posterior comparação, vide Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes abordagens de baixo custo para análise de microplásticos.

Método	Custo	Detecção de Fibras	Confirmação Química	Velocidade	Referência
Coloração com Nile Red + Microscopia	Baixo	Sim	Não (sugestivo)	Moderada	MESQUITA, P. et al., 2022
Espectroscopia NIR Portátil	Moderado	Sim	Sim (limitado)	Alta	WANDER, L. et al., 2022
Microscopia de Celular + Deep Learning	Muito Baixo	Sim	Não	Alta	ARJU, M. Z. B. Z. et al., 2025

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

O método desenvolvido neste estudo apresenta simplicidade operacional e agilidade do processamento automatizado, embora apresente limitações quanto à amplitude da detecção. Enquanto técnicas que utilizam o corante fluorescente *Nile Red* (NIR) possibilitam identificar uma gama mais ampla de polímeros, abrangendo fibras e partículas claras, essas abordagens, embora de baixo custo, também não oferecem confirmação polimérica definitiva (MESQUITA, 2022). Nesse sentido, futuras aplicações poderão integrar o pipeline de análise de imagem proposto à coloração por Nile Red, ampliando significativamente a capacidade de detecção e a aplicabilidade em estudos ambientais de maior complexidade.

A espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), por sua vez, surge como uma alternativa de custo moderado com capacidade de confirmação de alguns tipos de polímeros (WANDER *et al.*, 2022). Arju *et al.* (2025) desenvolveram um método de detecção de microplásticos utilizando um microscópio miniaturizado acoplado a smartphones para capturar imagens de microplásticos, que são processadas automaticamente por

um modelo treinado. As vantagens incluem custo relativamente baixo, portabilidade, detecção em tempo real e capacidade de identificar múltiplas morfologias, incluindo fibras. As limitações são a necessidade de treinamento prévio do modelo e a dependência de confirmação química externa (ATR-FTIR) para identificação polimérica definitiva.

O desenvolvimento de métodos simplificados auxilia na democratização do monitoramento de MPs. O protocolo proposto na presente pesquisa se destaca pela alta velocidade de análise e pelo baixo custo, não requerendo reagentes ou equipamentos além de um microscópio básico e um computador. No entanto, essa eficiência tem como contraponto uma menor abrangência na detecção. O protocolo deste estudo, portanto, se posiciona como uma ferramenta de triagem inicial, ideal para laboratórios com recursos limitados que buscam iniciar um programa de monitoramento.

4 Considerações finais

A presente pesquisa desenvolveu e validou um protocolo simplificado baseado em análise de imagens microscópicas de 8 bits, resultando na detecção e contagem de objetos com morfologia esférica ou aproximadamente esférica. A metodologia desenvolvida e aplicada para a quantificação de microplásticos no rio Itabapoana demonstrou ser reprodutível, com a contagem automatizada apresentando um erro médio de 10% em comparação com a validação manual, o que confere confiabilidade ao método.

Os resultados quantitativos indicaram concentrações entre 0,022 e 0,081 MP/m³ (média de 0,045 MP/m³), esses valores representam uma contagem preliminar de microplásticos, que deve ser interpretada levando em consideração as limitações do método, que não detecta fibras e partículas claras. Entretanto, os resultados aqui apresentados podem ser comparáveis a outros estudos da literatura. A principal contribuição do estudo reside na proposição de uma metodologia acessível e de baixo custo. O protocolo é recomendado para estudos de monitoramento inicial em bacias hidrográficas.

Os dados gerados por esta metodologia poderão auxiliar nas estratégias de mitigação e políticas públicas voltadas para a redução da poluição por microplásticos em rios brasileiros. Outros estudos que tratem da ocorrência de microplásticos no rio Itabapoana não foram encontrados, possibilitando que essa metodologia seja inédita de contagem de microplásticos através de programa computacional.

Estudos futuros poderão expandir esta metodologia a fim de fornecer resultados ainda mais apurados da dinâmica dos microplásticos nos rios brasileiros. Recomenda-se a integração de técnicas complementares que permitam a caracterização físico-química e morfológica dos microplásticos, incluindo a detecção de fibras e partículas transparentes.

Referências

ABBAS, G.; AHMED, U.; AHMAD, M. A. **Impact of Microplastics on Human Health: Risks, Diseases, and Affected Body Systems.** Microplastics, v. 4, n. 2, art. 23, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/microplastics4020023

AGERH – Agência Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo. **De Olho no Rio: Itabapoana.** Vitória: AGERH, 2019. Disponível em: https://agerh.es.gov.br/. Acesso em: 05 set. 2025.

AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório Síntese – Caracterização Hidrográfica do Rio Itabapoana.** Resende: AGEVAP, 2019. Disponível em: https://www.agevap.org.br/. Acesso em: 05 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **ANA e ABDI lançam edital para soluções que reduzam a presença de plástico nas águas brasileiras.** 2 jun. 2023. Disponível em: https://www.abdi.com.br/abdi-e-ana-abrem-edital-para-selecionar-solucoes-que-reduzam-plastico-nas-aguas/. Acesso em: 12 set. 2025.

ANDRADY, A. L. **Microplastics in the marine environment.** Marine Pollution Bulletin, v. 62, n. 8, p. 1596-1605, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

ARJU, M. Z. B. Z. *et al.* **Deep-learning enabled rapid and low-cost detection of microplastics using mobile phone microscopy**. Scientific Reports, v. 15, p. 8180, 2025. DOI: https://doi.org/10.1039/D4RA07991D

BROWNE, M. A. et al. **Linking effects of anthropogenic debris to ecological impacts.** Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 282, n. 20142929, p. 1-10, 2015.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo 2024.** São Paulo: CETESB, 2024.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.

DRABINSKI, T. L. *et al.* **Microplastics in Freshwater River in Rio de Janeiro and Its Role as a Source of Microplastic Pollution in Guanabara Bay, SE Brazil.** Micro, v. 3, p. 208-223, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/water5010015.

GESAMP – Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. **Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment.** http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90 Joint Group, Rep. Stud. GESAMP n. 90, 2015.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Hidrelétrico do Rio Itabapoana.** Vitória, 2002. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2002/Complexo%20hidrel%C3%A9trico%20do%20rio%20Itabapoana/EIA%20ITABAPOANA.pdf. Acesso em: 10 set. 2025.

LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LEBRETON, L. C. M. et al. **River plastic emissions to the world's oceans.** Nature Communications, v. 8, n. 15611, p. 1-10, 2017. DOI: 10.1038/ncomms15611.

LI, J.; LIU, H.; CHEN, J. P. **Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection.** Water Research, v. 137, p. 362-374, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056.

LI, Y.; TAO, L.; WANG, Q.; et al. **Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects.** Environmental Health, v. 1, n. 4, p. 249-257, 2023. DOI: 10.1021/envhealth.3c00052.

LI, J.; WANG, Y.; TANG, R.; LIU, Y. **Microplastics in inland waters: Sources, fate, and implications for freshwater ecosystems**. Science of the Total Environment, v. 906, p. 167743, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.167743.

LUO, Q.; TAN, H.; YE, M.; et al. **Microplastics as an emerging threat to human health: An overview of potential health impacts.** Journal of Environmental Management, v. 387, 125915, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125915.

MAGNI, S.; BINELLI, A.; PITTURA, L.; AVIO, C. G.; DELLA TORRE, C.; PARENTI, C. C.; GORBI, S.; REGOLI, F. **The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant.** Science of the Total Environment, v. 652, p. 602-610, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.269

MAPBIOMAS BRASIL. **Coleção 10 – Cobertura e uso da terra (1985–2024): Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana.** 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/. DOI: https://doi.org/10.58053/MapBiomas/IBQPF6

MESQUITA, P. *et al.* **A low-cost microfluidic method for microplastics identification**. Micromachines, v. 13, n. 4, p. 593, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/mi13040593

MONTAGNER, C. C.; DIAS, M. A.; PAIVA, E. M.; VIDAL, C. **Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos.** Química Nova, v. 44, n. 7, p. 856-867, 2021.

NASCIMENTO, R. C. M.; COSTA, C. R.; CAVALCANTI, J. S. S.; COSTA, M. F. **Seasonal variability of water quality parameters in an urban tropical estuary (Northeast Brazil).** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 9, p. 278-293, 2022. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.009.0022.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Marine debris program: microplastics.** Silver Spring: NOAA, 2009.

OTSU, N. **A threshold selection method from gray-level histograms.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979. DOI: https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076.

PRATA, J.; DA COSTA, J.; DUARTE, A.; ROCHA-SANTOS, T. **Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review.** TrAC – Trends in Analytical Chemistry, v. 110, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029.

SAUVOLA, J.; PIETIKÄINEN, M. **Adaptive document image binarization.** Pattern Recognition, v. 33, n. 2, p. 225-236, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00055-2.

SHIM, W. J.; HONG, S. H.; EO, S. E. **Identification methods in microplastic analysis: a review.** Analytical Methods, v. 9, n. 9, p. 1384-1391, 2017. DOI: https://doi.org/10.1039/C6AY02558G

UNEP – United Nations Environment Programme. **Marine plastic debris and microplastics: global lessons and research to inspire action and guide policy change.** Nairobi: UNEP, 2016.

VASUDEVA, M.; WARRIER, A. K.; KARTHA, V. B.; UNNIKRISHNAN, V. K. **Advances in microplastic characterization: spectroscopic techniques and heavy metal adsorption insights.** TrAC – Trends in Analytical Chemistry, v. 183, p. 118111, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118111.

WANDER, L. *et al.* **Development of a low-cost method for quantifying microplastics in soils and compost using near-infrared spectroscopy**. Measurement Science and Technology, v. 33, n. 7, p. 075801, 2022. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac5e5f

WANG, W.; NDUNGU, A. W.; LI, Z.; WANG, J. **Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China.** Science of the Total Environment, v. 575, p. 1369-1374, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.213.

ZHANG, X.; YU, C.; WANG, P.; YANG, C. **Microplastics and human health: unraveling the toxicological pathways and implications for public health.** Frontiers in Public Health, v. 13, p. 1567200, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1567200.

Agradecimentos

Os autores reconhecem e agradecem a disponibilidade do uso do High Performance Computer - Escola de Sagres do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro/UERJ atrelada ao Atlantic International Research Centre (AIR Centre).