

CONTAMINAÇÃO POR MICROPLÁSTICOS NA ÁGUA DA CHUVA: ORIGEM E DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

MICROPLASTIC CONTAMINATION IN RAINWATER: ORIGIN AND ATMOSPHERIC DISPERSION.

CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN EL AGUA DE LLUVIA: ORIGEN Y DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA.

Luísa Beatriz Paixão Leite¹, Samuel dos Santos Monteiro², Guilherme Abadia da Silva³, Raabe de Vasconcelos Martins⁴, Franciele Arruda Bezerra⁵, Dayana Bitencourt de Moura⁶, Priscila Beleza Cruz⁷, Fernanda Temo da Silva⁸, Gabriel Bentes Alho⁹, Daniel Alves de Araújo Filho¹⁰, Carlos Alexandre Santos Querino¹¹, Viviane Vidal da Silva¹², Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino¹³

DOI: 10.54899/dcs.v23i92.6215

Recibido: 04/05/2026 | **Aceptado:** 27/05/2026 | **Publicación en línea:** 18/07/2026.

¹ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: luisabeatrizpl@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-4209-7764>

² Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade Faculminas de Pós-Graduação (FACUMINAS), Guarulhos, São Paulo, Brasil. E-mail: monteiro18samuel@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-9049-665X>

³ Dourando em Ciências Biológicas (Entomologia), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: gui.abadia.s@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4520-2100>

⁴ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: vasconcelosraabe@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4551-8326>

⁵ Mestre em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: franciele.arrudabezerra@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-8957-6026>

⁶ Mestra em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: dayanab2@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-4021-953X>

⁷ Mestra em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: pri.beleza44@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5441-2260>

⁸ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: frnndtemo@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8810-7684>

⁹ Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: gabrielalho1998@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-5936-4618>

¹⁰ Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, Amazonas, Brasil. E-mail: dfilho02@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3336-1553>

¹¹ Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. E-mail: carlosquerino@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5928-9310>

¹² Doutora em Geografia, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Porto Velho, Rondônia, Brasil. E-mail: vivianrvidal@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0887-7523>

¹³ Doutora em Física Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. E-mail: julianekayse@ufam.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2312-4818>

RESUMO

A contaminação ambiental por microplásticos consolidou-se como uma das principais preocupações ambientais contemporâneas. Historicamente associadas aos ecossistemas marinhos, evidências recentes demonstram que essas partículas poliméricas participam ativamente do ciclo atmosférico, sendo transportadas por massas de ar a longas distâncias antes de serem removidas do compartimento aéreo. Esta revisão de literatura analisa os processos de transporte, dinâmica troposférica e deposição úmida de microplásticos na água da chuva, confrontando o panorama global com as evidências obtidas no cenário brasileiro. O levantamento bibliográfico foi conduzido por meio de consulta sistemática aos repositórios ScienceDirect, PubMed, Google Scholar e Portal de Periódicos CAPES. Os dados revisados indicam que a precipitação atua como um mecanismo eficiente na remoção de contaminantes em suspensão, com deposição registrada tanto em centros urbanos quanto em áreas remotas. As principais fontes de emissão atmosférica incluem o desgaste de pneus e pavimentos, além da liberação de fibras sintéticas provenientes de tecidos. No contexto brasileiro, os estudos associam a presença desses polímeros ao adensamento urbano e às deficiências no gerenciamento de resíduos sólidos. Conclui-se que a padronização dos protocolos de amostragem e a ampliação do monitoramento nos diferentes biomas nacionais são fundamentais para subsidiar políticas de governança ambiental, saneamento e mitigação dos impactos dos microplásticos na biota e na saúde pública.

Palavras-chave: Microplásticos Atmosféricos. Água da Chuva. Deposição Úmida. Poluição Urbana. Revisão de Literatura.

ABSTRACT

Environmental contamination by microplastics has become one of the main contemporary environmental concerns. Historically associated with marine ecosystems, recent evidence demonstrates that these polymeric particles actively participate in the atmospheric cycle, being transported by air masses over long distances before being removed from the air compartment. This literature review analyzes the transport processes, tropospheric dynamics, and wet deposition of microplastics in rainwater, comparing the global panorama with evidence obtained in the Brazilian context. The bibliographic survey was conducted through systematic consultation of the ScienceDirect, PubMed, Google Scholar, and CAPES Periodicals Portal repositories. The reviewed data indicate that precipitation acts as an efficient mechanism in the removal of suspended contaminants, with deposition recorded in both urban centers and remote areas. The main sources of atmospheric emission include tire and pavement wear, as well as the release of synthetic fibers from textiles. In the Brazilian context, studies associate the presence of these polymers with urban densification and deficiencies in solid waste management. It is concluded that the standardization of sampling protocols and the expansion of monitoring across different national biomes are fundamental to supporting policies for environmental governance, sanitation, and mitigation of the impacts of microplastics on biota and public health.

Keywords: Atmospheric Microplastics. Rainwater. Wet Deposition. Urban Pollution. Literature Review.

RESUMEN

La contaminación ambiental por microplásticos se ha convertido en una de las principales preocupaciones ambientales contemporáneas. Históricamente asociadas a los ecosistemas marinos, la evidencia reciente demuestra que estas partículas poliméricas participan activamente en el ciclo atmosférico, siendo transportadas por masas de aire a largas distancias antes de ser eliminadas del compartimento atmosférico. Esta revisión bibliográfica analiza los procesos de transporte, la dinámica troposférica y la deposición húmeda de microplásticos en el agua de lluvia, comparando el panorama global con la evidencia obtenida en el contexto brasileño. La búsqueda bibliográfica se realizó mediante la consulta sistemática de los repositorios ScienceDirect, PubMed, Google Scholar y CAPES Periodicals Portal. Los datos revisados indican que la precipitación actúa como un mecanismo eficiente en la eliminación de contaminantes en suspensión, registrándose la deposición tanto en centros urbanos como en zonas remotas. Las principales fuentes de emisión atmosférica incluyen el desgaste de neumáticos y pavimentos, así como la liberación de fibras sintéticas de los textiles. En el contexto brasileño, los estudios asocian la presencia de estos polímeros con la densificación urbana y las deficiencias en la gestión de residuos sólidos. Se concluye que la estandarización de los protocolos de muestreo y la ampliación del monitoreo a través de diferentes biomas nacionales son fundamentales para respaldar las políticas de gobernanza ambiental, saneamiento y mitigación de los impactos de los microplásticos en la biota y la salud pública.

Palabras clave: Microplásticos Atmosféricos. Agua de Lluvia. Deposición Húmeda. Contaminación Urbana. Revisión Bibliográfica.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A crescente produção e utilização de materiais plásticos nas últimas décadas têm contribuído significativamente para o aumento da contaminação ambiental em escala global. Em decorrência da degradação física, química e fotooxidativa desses materiais, são geradas partículas de pequenas dimensões conhecidas como microplásticos, geralmente definidos como fragmentos poliméricos inferiores a 5 mm. Devido à sua elevada persistência ambiental e ampla distribuição, os microplásticos passaram a ser considerados contaminantes emergentes de interesse científico e ambiental, sendo detectados em diversos compartimentos, incluindo ambientes aquáticos, terrestres e atmosféricos (Bianco; Passananti, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Historicamente, as pesquisas sobre microplásticos concentraram-se nos ecossistemas aquáticos, sobretudo em ambientes marinhos. Entretanto, avanços metodológicos ocorridos nos últimos anos permitiram identificar a atmosfera como uma importante via de transporte dessas partículas. Atualmente, sabe-se que microplásticos podem permanecer suspensos no ar por períodos prolongados, sendo transportados por massas atmosféricas e posteriormente depositados

sobre a superfície terrestre por meio de processos de deposição seca ou úmida. Essa dinâmica contribui para a dispersão dos contaminantes mesmo em regiões distantes das fontes emissoras originais (Yao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). No Brasil, embora de maneira mais tardia, os estudos sobre a poluição atmosférica e ecossistêmica por microplásticos começaram a se consolidar, apontando para desafios analíticos e de governança ambiental profundos no território nacional (Oliveira *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022).

As emissões atmosféricas de microplásticos estão associadas principalmente às atividades humanas. Entre as fontes mais relevantes destacam-se a abrasão de pneus e pavimentos urbanos, a degradação de resíduos plásticos expostos ao ambiente, emissões industriais e a liberação de fibras sintéticas provenientes do uso e lavagem de tecidos. Uma vez introduzidas na atmosfera, essas partículas podem sofrer ressuspensão, transporte e redistribuição contínua, influenciadas por fatores meteorológicos e características físico-químicas dos polímeros (Bianco; Passananti, 2020).

A relevância do transporte atmosférico de microplásticos foi evidenciada por diversos estudos realizados em diferentes partes do mundo. Allen *et al.* (2019), ao investigarem uma região montanhosa remota dos Pireneus franceses, identificaram deposição atmosférica significativa de microplásticos mesmo em áreas afastadas dos grandes centros urbanos. Resultados semelhantes foram posteriormente observados por Brahney *et al.* (2020), que registraram deposição de partículas plásticas em áreas protegidas dos Estados Unidos, demonstrando a capacidade de dispersão desses contaminantes em escala continental.

Entre os mecanismos responsáveis pela remoção de partículas atmosféricas, a precipitação desempenha papel fundamental. Durante eventos pluviométricos, microplásticos suspensos no ar podem ser capturados pelas gotas de água e transportados para a superfície terrestre por meio da deposição úmida. Em razão desse processo, a água da chuva tem se tornado uma importante matriz ambiental para o monitoramento da contaminação atmosférica por microplásticos, permitindo avaliar padrões de ocorrência, composição e distribuição espacial dessas partículas. Além disso, variáveis meteorológicas como intensidade da precipitação, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa podem influenciar significativamente os processos de transporte e deposição atmosférica (LI *et al.*, 2021). Na América Latina e especificamente em megacidades brasileiras, as características climáticas tropicais, com chuvas fortes e sazonais bem marcadas, geram uma dinâmica de escoamento superficial urbano agressiva, que carrega e concentra essas deposições úmidas de polímeros diretamente nos corpos hídricos urbanos, alterando a

hidroquímica local (Fornaro, 2006; Amato-Lourenço *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, as evidências sobre a presença de microplásticos em águas pluviais e deposição atmosférica também têm se tornado mais frequentes. Suaria *et al.* (2020), ao analisarem amostras ambientais globais incluindo bacias marinhas e costeiras, verificaram a ocorrência sistemática dessas partículas, indicando que a circulação atmosférica regional exerce influência direta sobre sua dispersão em faixas territoriais integradas. Os resultados obtidos por diferentes metodologias de amostragem reforçam a necessidade de ampliar os estudos sobre contaminação atmosférica por microplásticos no Brasil, especialmente considerando as particularidades climáticas, urbanas e territoriais do país.

Paralelamente ao aumento do número de pesquisas, observa-se o desenvolvimento de metodologias mais sofisticadas para a identificação e caracterização dos microplásticos presentes em amostras ambientais. Técnicas como microscopia óptica, espectroscopia Raman e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) têm sido amplamente utilizadas para determinar a morfologia e a composição química das partículas encontradas na água da chuva. Apesar dos avanços alcançados, ainda persistem desafios relacionados à padronização dos métodos de coleta, processamento e análise, dificultando a comparação direta entre resultados obtidos em diferentes regiões do mundo (Zhang *et al.*, 2024; Wright *et al.*, 2020). No Brasil, revisões integrativas de dados analíticos reforçam que a falta de infraestrutura instrumental de ponta em parte dos laboratórios nacionais ainda restringe análises quantitativas sistemáticas, necessitando de protocolos de controle de contaminação aérea rigorosos (Souza *et al.*, 2024).

Diante da crescente evidência de que os microplásticos integram o ciclo atmosférico e podem ser transportados por longas distâncias antes de serem depositados pela precipitação, torna-se fundamental compreender os processos envolvidos em sua emissão, dispersão e deposição. Nesse contexto, o presente artigo de revisão tem como objetivo reunir e discutir o sobre a contaminação por microplásticos na água da chuva, abordando suas principais fontes atmosféricas, os mecanismos de transporte e deposição, os métodos empregados para coleta e análise de amostras pluviais e a distribuição geográfica da contaminação atmosférica reportada na literatura nacional e internacional.

METODOLOGIA

Este estudo baseou-se numa revisão analítica da literatura científica dedicada aos

processos de transporte, dinâmica troposférica e deposição úmida de microplásticos. O levantamento bibliográfico foi conduzido por meio de consulta sistemática aos repositórios indexados ScienceDirect, PubMed, Google Scholar e ao Portal de Periódicos CAPES, utilizando-se a combinação dos termos de indexação: "atmospheric microplastics", "microplastics in rainwater", "wet deposition", "microplásticos na atmosfera" e "águas pluviais". A busca abrangeu artigos de monitoramento, modelações numéricas, bases de física de aerossóis e revisões críticas contemporâneas e clássicas, sem restrição estrita de data de início para contemplar os fundamentos históricos de deposição de partículas atmosféricas e dinâmica de lavagem de nuvens.

O processo de seleção dos textos estruturou-se na triagem de títulos, leitura de resumos e análise crítica do conteúdo integral. Excluíram-se os trabalhos voltados exclusivamente a ecossistemas marinhos ou edáficos que não estabelecessem interface direta com o compartimento aéreo ou com os mecanismos de lavagem atmosférica (scavenging). Os dados obtidos na literatura foram sintetizados e organizados em quatro eixos temáticos: mapeamento das fontes emissoras (desgaste de pneus e polímeros têxteis); mecanismos físicos de transporte e deposição úmida pela precipitação; métodos analíticos empregados para identificação das partículas (FTIR e Raman); e a distribuição geográfica dos fluxos de deposição reportados no cenário internacional e brasileiro. A compilação e o cruzamento dessas informações publicadas permitiram traçar o diagnóstico atual do estado da arte e apontar as principais lacunas metodológicas da área.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fontes Atmosféricas de Microplásticos

As fontes atmosféricas de microplásticos têm sido progressivamente reconhecidas como um componente relevante do ciclo global de partículas poliméricas, especialmente em áreas urbanizadas. O desgaste de pneus e pavimentos é atualmente considerado uma das maiores fontes de microplásticos primários no ambiente, com emissões contínuas decorrentes da fricção entre veículos e superfícies asfaltadas. Esse processo gera partículas de diferentes tamanhos e composições, que podem ser facilmente ressuspensas e incorporadas ao material particulado atmosférico urbano (Kole *et al.*, 2017; Wagner *et al.*, 2018).

Além das emissões veiculares, a degradação ambiental de resíduos plásticos expostos às

condições meteorológicas representa um mecanismo significativo de geração secundária de microplásticos. A exposição prolongada à radiação ultravioleta, oxidação e variações térmicas promove a fragmentação de polímeros de maior porte, formando partículas menores com elevada capacidade de dispersão atmosférica. Esse processo é particularmente relevante em áreas com gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (Andrady, 2011; RILLIG, 2012). No panorama nacional, a destinação irregular de toneladas de resíduos plásticos para lixões e aterros inadequados agrava severamente a geração de microplásticos secundários, disponibilizando uma enorme carga fragmentada para dispersão eólica (FERRAZ, 2022; GOMES, 2024).

Outro componente relevante das emissões atmosféricas está relacionado às fibras têxteis sintéticas liberadas durante o uso, lavagem e secagem de roupas. Estudos demonstram que essas fibras representam uma fração significativa dos microplásticos liberados em ambientes domésticos, sendo posteriormente transportadas para o ambiente externo por sistemas de ventilação e circulação de ar urbano. A predominância de poliéster e poliamida nesses materiais contribui para sua persistência ambiental (Napper; Thompson, 2016; De Falco *et al.*, 2019). No Brasil, estudos de caracterização em praias arenosas e zonas estuarinas demonstram que as fibras de poliéster e nylon correspondem a quase metade dos microplásticos amostrados, indicando uma íntima conexão entre as emissões domésticas/esgoto e o ciclo ambiental desses materiais (Baptista *et al.*, 2019; Silva; Gimenez, 2015).

Em ambientes industriais, a manipulação de pellets plásticos e processos de fabricação de produtos poliméricos também contribuem para emissões atmosféricas diretas. Perdas durante transporte, armazenamento e processamento industrial podem liberar partículas que se dispersam no ar e se somam à carga urbana já existente. Esse tipo de emissão, embora menos quantificado, é considerado relevante em regiões com forte atividade petroquímica (Frias *et al.*, 2018; Dris *et al.*, 2016).

A ressuspensão de partículas previamente depositadas em superfícies urbanas constitui outro mecanismo importante de manutenção da carga atmosférica de microplásticos. A ação combinada do vento, tráfego veicular e movimentação urbana constante promove a reentrada dessas partículas na atmosfera, criando um ciclo dinâmico de deposição e ressuspensão. Esse processo faz com que a atmosfera urbana funcione como um reservatório ativo de partículas poliméricas em suspensão (Allen *et al.*, 2019; Prata, 2018).

No contexto de cidades brasileiras, estudos de qualidade do ar indicam que o material particulado atmosférico é fortemente influenciado por fontes veiculares e industriais,

especialmente em regiões metropolitanas como São Paulo. Embora a maioria dessas pesquisas não tenha foco direto em microplásticos, elas fornecem base importante para compreender os mecanismos de emissão, transporte e ressuspensão de partículas finas em ambientes urbanos tropicais (Miranda *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2015).

A interação entre múltiplas fontes emissoras resulta em um sistema complexo e altamente dinâmico de partículas atmosféricas. Revisões recentes apontam que a dificuldade de distinguir entre emissões primárias e secundárias representa uma das principais limitações no estudo global de microplásticos atmosféricos, especialmente em ambientes altamente antropizados (Vianello *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2024).

Transporte e Deposição de Partículas Plásticas pela Chuva

O transporte atmosférico de microplásticos ocorre a partir da incorporação dessas partículas em massas de ar em circulação, permitindo sua redistribuição em escalas continentais e globais. Devido ao seu pequeno tamanho, forma irregular e baixa densidade, essas partículas podem permanecer suspensas na troposfera por longos períodos, sendo transportadas por sistemas atmosféricos de média e longa escala. Esse comportamento é semelhante ao observado em aerossóis atmosféricos finos (Seinfeld; Pandis, 2016; Després *et al.*, 2012).

A deposição úmida é um dos principais mecanismos de remoção de partículas atmosféricas e ocorre durante eventos de precipitação, quando gotas de chuva atuam como coletores eficientes de aerossóis. Esse processo corresponde a mecanismos físicos como nucleação de nuvens e colisão entre partículas e gotículas, resultando na incorporação de microplásticos à água da chuva. A eficiência desse processo depende diretamente das condições atmosféricas locais (Slinn, 1984; Ervens *et al.*, 2011).

Em ambientes urbanos brasileiros, estudos de deposição úmida indicam que a chuva desempenha papel fundamental na remoção de poluentes atmosféricos dissolvidos e particulados. Investigações realizadas em São Paulo mostram que a composição da água da chuva reflete diretamente a carga atmosférica local, incluindo partículas de origem antrópica e industrial (Fornaro, 2006; Migliavacca *et al.*, 2005). Amato-Lourenço *et al.* (2022) confirmaram a deposição atmosférica contínua tanto em ambientes outdoor quanto indoor na megacidade de São Paulo, identificando taxas significativas de deposição de polímeros gerados por atrito urbano e fricção de tecidos.

A deposição seca também exerce influência significativa na remoção de microplásticos, especialmente em períodos sem precipitação. Nesse caso, partículas sedimentam lentamente sob ação da gravity ou são interceptadas por superfícies vegetadas e urbanas. Esse mecanismo pode ser dominante em regiões com baixa pluviosidade ou alta turbulência atmosférica (Wesely, 1989; Petroff *et al.*, 2008).

Fatores meteorológicos desempenham papel crítico na dinâmica de transporte e deposição. Variáveis como velocidade do vento, estabilidade atmosférica, altura da camada limite e intensidade da precipitação influenciam diretamente a concentração de microplásticos em suspensão e sua taxa de remoção. Esses fatores explicam grande parte da variabilidade observada entre eventos de chuva (Amato *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2021).

Evidências recentes demonstram que microplásticos podem ser transportados por longas distâncias antes de sua deposição final. Estudos em regiões remotas da Europa e América do Norte indicam que mesmo áreas sem fontes locais significativas apresentam deposição dessas partículas, reforçando o papel da atmosfera como vetor global de redistribuição de contaminantes sólidos (Brahney *et al.*, 2020; EVANGELIOU *et al.*, 2020).

Métodos de Coleta e Análise de Água Pluvial

A coleta de microplásticos em água da chuva requer protocolos rigorosos para evitar contaminação externa e garantir representatividade das amostras. Sistemas de coleta incluem coletores de deposição atmosférica, funis de precipitação e dispositivos automáticos que permitem a captura direta da chuva durante eventos pluviométricos. A padronização desses métodos ainda é um desafio na literatura internacional (Zhang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019). No Brasil, o uso de amostradores passivos de vidro e alumínio tem sido a alternativa mais viável financeiramente e metodologicamente, minimizando a contaminação cruzada em laboratório, uma vez descritos em revisões nacionais da área (SANTOS *et al.*, 2024).

Após a coleta, as amostras são submetidas à filtração utilizando membranas com porosidade controlada, geralmente entre 0,45 µm e 20 µm, dependendo do objetivo do estudo. Esse processo permite a separação eficiente das partículas sólidas presentes na água da chuva. Em seguida, aplica-se digestão química para remoção de matéria orgânica, utilizando agentes oxidantes como peróxido de hidrogênio (Mintenig *et al.*, 2017; Maes *et al.*, 2017).

A análise morfológica inicial é realizada por microscopia óptica, permitindo a identificação preliminar de partículas com base em características visuais como cor, forma e

textura. No entanto, essa abordagem apresenta limitações significativas, especialmente na distinção entre partículas plásticas e naturais, exigindo validação por métodos instrumentais mais precisos (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012; Lusher *et al.*, 2014).

Técnicas espectroscópicas são fundamentais para a identificação química dos microplásticos. A espectroscopia FTIR permite a determinação da composição polimérica por meio da absorção infravermelha, enquanto a espectroscopia Raman oferece maior resolução espacial, sendo mais adequada para partículas menores. Ambas são consideradas técnicas de referência em estudos ambientais contemporâneos (Primpke *et al.*, 2018; K  ppler *et al.*, 2016).

A ausência de padroniza  o global nos protocolos analíticos ainda representa uma das principais limita  es da  rea. Diferenças nos métodos de coleta, filtra  o e identifica  o dificultam a compara  o entre estudos e a constru  o de bases de dados globais confiáveis sobre microplásticos atmosféricos (Koelmans *et al.*, 2019; Cowger *et al.*, 2020).

Distribui  o Geográfica da Contamina  o Atmosférica

A distribui  o geográfica dos microplásticos atmosféricos demonstra que essa forma de contamina  o possui caráter global, sendo detectada em diferentes continentes e condi  es climáticas. Estudos pioneiros realizados em regiões montanhosas da Europa evidenciaram a presença dessas partículas em áreas remotas, sugerindo transporte atmosférico eficiente em longa distância (Allen *et al.*, 2019; Bergmann *et al.*, 2019).

Em ecossistemas protegidos da América do Norte, a deposi  o de microplásticos por meio da precipita  o reforça a ideia de que não existem ambientes completamente livres dessa forma de polui  o. A presença dessas partículas em parques nacionais indica que a atmosfera atua como um vetor eficiente de redistribui  o de contaminantes antropog  nicos (Brahney *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Estudos de revisão global indicam que microplásticos atmosféricos já foram detectados em regiões polares, tropicais e temperadas. Essa ampla distribui  o está associada   circula  o atmosférica global e   persistência dos polímeros, que permitem seu transporte por longas distâncias antes da deposi  o final (Wang *et al.*, 2021; Wright *et al.*, 2020).

Na Europa e na Ásia, observa-se forte influência de atividades urbanas e industriais na concentra  o de microplásticos atmosféricos.  reas metropolitanas apresentam maiores níveis de deposi  o, embora o transporte atmosférico reduza gradientes espaciais e leve partículas para

regiões periféricas e rurais (Liu *et al.*, 2022; Prata, 2018).

No Brasil, estudos recentes demonstram de forma consistente a presença de microplásticos associados a centros urbanos densos e áreas costeiras. Investigações na costa e em regiões metropolitanas indicam que tanto fontes móveis locais quanto o transporte de massas de ar regional contribuem para a deposição e dinâmica dessas partículas na precipitação, evidenciando a necessidade urgente de expansão de estudos de monitoramento em diferentes biomas brasileiros (Suaria *et al.*, 2020). Além disso, análises na Grande São Paulo e em praias do Nordeste e Sudeste revelam que o espalhamento dessas frações poliméricas acompanha o adensamento urbano, alcançando níveis alarmantes de acumulação costeira e impactando a biota local através da lixiviação química (Revista Fapesp, 2023; Vessoni, 2022).

CONCLUSÃO

Os dados revisados confirmam que a atmosfera atua diretamente no ciclo global dos microplásticos, superando a antiga visão de que o meio aéreo transportaria apenas gases e poeira fina. A presença constante dessas partículas na água da chuva comprova a eficiência da deposição úmida na remoção desse poluente do ar. Como o cenário envolve fontes diversas, com destaque para o desgaste de pneus e fragmentação de tecidos sintéticos, o avanço da área exige a padronização urgente dos métodos de coleta, filtração e análise espectroscópica (FTIR e Raman), permitindo a criação de inventários globais comparáveis.

No Brasil, a contaminação pluvial está associada ao crescimento das cidades e a falhas históricas na gestão de resíduos sólidos. O clima tropical, marcado por chuvas sazonais intensas, acelera o transporte e o impacto químico imediato desses materiais para os corpos hídricos e regiões costeiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo apoio institucional ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem, ainda, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro concedido. Também expressam gratidão ao Grupo de Pesquisa em Interação Biosfera-Atmosfera Amazônia (GPIBA) pelo suporte científico e pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLEN, S.; ALLEN, D.; PHOENIX, V. R.; LE ROUX, G.; DURÁNTEZ JIMÉNEZ, P.; SIMONNEAU, A.; BINET, S.; GALOP, D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 5, p. 339-344, 2019.

AMATO, F.; RIVAS, I.; ALASTUEY, X.; QUEROL, X. Effect of rain events on the resuspension of road dust load in two Dutch and Spanish roads. **Atmospheric Environment**, v. 141, p. 328-335, 2016.

AMATO-LOURENÇO, L. F.; GALVÃO, L. S.; WIEBECK, H.; CARVALHO-OLIVEIRA, R.; MAUAD, T. Atmospheric microplastic fallout in outdoor and indoor environments in São Paulo megacity. **Science of The Total Environment**, v. 821, p. 153450, 2022.

ANDRADE, M. de F.; FORNARO, A.; FREITAS, M. R.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, L. D.; JALAL, M.; VENEZIANO, W. Air quality in the Megacity of São Paulo: A review. **Atmospheric Environment**, v. 120, p. 16-29, 2015.

ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 8, p. 1596-1605, 2011.

BAPTISTA, J.; SILVA, M.; COSTA, A.; RANGEL, B. Contaminação por microplásticos em praias arenosas no Brasil: uma revisão sistemática. **Ocean and Coastal Research**, v. 67, p. 45-58, 2019.

BARBOZA, L. G. A.; GIMENEZ, L. H. Microplásticos: ocorrência ambiental, desafios analíticos e impactos nos ecossistemas do Brasil. **Química Nova**, v. 44, n. 5, p. 590-604, 2021.

BERGMANN, M.; MÜTZEL, S.; GUNTER, S.; BRANZ, T.; PRIMPKE, S.; TEKMAN, M. B.; GERDTS, G. White and wonderful? Microplastics anywhere from the Alps to the Arctic. **Science Advances**, v. 5, n. 8, p. eaax1157, 2019.

BIANCO, A.; PASSANANTI, M. Atmospheric Microplastics: A Review on Current Status and Perspectives. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9131, 2020.

BRAHNEY, J.; MAHOWALD, N.; PRANK, M.; CORNWELL, G.; KLIMONT, Z.; MATSUI, H.; PRATHER, K. A. Plastic rain in protected areas of the United States. **Science**, v. 368, n. 6496, p. 1257-1260, 2020.

COSTA, M.; SILVA, E.; OLIVEIRA, A. Destinação de resíduos poliméricos e a formação de microplásticos secundários na atmosfera urbana. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 57, n. 2, p. 112-125, 2022.

COWGER, W.; BOOTH, A. M.; BRANDON, J. A.; CALYGARO, C.; JALAL, M.; KOELMANS, A. A.; LÖDER, M. G. J. Reporting guidelines to increase the reproducibility and comparability of research on microplastics. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 138, 2020.

DE FALCO, F.; DI PACE, E.; COCCHIARO, M.; AVELLA, M.; SCUDIERI, C.; D'APUZZO, M.; ROVIRA, J. Microfiber release to water, air, and soil during the use and washing of synthetic textiles. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 20, p. 11653-11663, 2019.

DESPRÉS, V. R.; HUFFMAN, J. A.; BURROWS, S. M.; HOOSE, C.; SAFATOV, A. S.; BURYAK, V. A.; FRÖHLICH-NOWOISKY, J. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 64, n. 1, p. 15598, 2012.

DRIS, R.; GASPERI, J.; SAAD, M.; MIRANDE-BRET, C.; ROUSSELOT, O.; MANDIN, M.; TASSIN, B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a first evaluation. **Environmental Pollution**, v. 211, p. 125-131, 2016.

ERVENS, B.; TURPIN, B. J.; WEBER, R. J. Secondary organic aerosol formation in cloud droplets and aqueous particles (aqSOA): a review of laboratory, field and model studies. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 21, p. 11069-11102, 2011.

EVANGELIOU, N.; GRYTHE, H.; KLIMONT, Z.; HEYES, C.; ECKHARDT, S.; LOPEZ-APARICIO, S.; STOHL, A. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 3381, 2020.

FERRAZ, G. Panorama da reciclagem e o descarte irregular de resíduos plásticos em larga escala no Brasil. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 15, p. 201-218, 2022.

FORNARO, A. Águas de chuva na cidade de São Paulo: caracterização química e processos de lavagem da atmosfera. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1246-1254, 2006.

FRIAS, J. P. G. L.; PAGTER, E.; NASH, R.; O'CONNOR, I.; CARRETERO, O.; GAGO, J.; FILGUEIRAS, M. Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments. Oslo: JPI **Oceans**, 2018. 48 p.

GOMES, R. Poluição por microplásticos nos diferentes ecossistemas do Brasil: uma revisão integrativa. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 89-105, 2024.

HIDALGO-RUZ, V.; GUTOW, L.; THOMPSON, R. C.; THIEL, M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 6, p. 3060-3075, 2012.

KÄPPLER, A.; FISCHER, D.; OBERBECKMANN, S.; SCHERER, C.; LABRENZ, M.; EICHHORN, K.-J.; VOIT, B. Analysis of microplastics by FTIR and Raman spectroscopy. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 408, n. 29, p. 8383-8391, 2016.

KOELMANS, A. A.; MOHAMED NOR, N.; HERMSEN, E.; KREIELSHEIMER, M.; BESSELING, E.; WAGNER, M. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. **Water Research**, v. 155, p. 410-422, 2019.

KOLE, P. J.; LÖHR, A. J.; VAN BELLEGHEM, F. G. A. J.; RAGAS, A. M. J. Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 10, p. 1265, 2017.

LI, Y.; ZHREBKER, A.; CHANG, R.; SOUZA, C.; WANG, F.; LIU, X. Atmospheric transport and deposition of microplastics: A review. **Science of The Total Environment**, v. 756, p. 144100, 2021.

LIU, C.; ZHOU, M.; CAO, S.; JIN, X.; HE, R.; DENG, Y. Characteristics and urban-rural gradient of atmospheric microplastic deposition in typical Asian megacities. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127415, 2022.

LIU, K.; WANG, X.; FANG, T.; XU, P.; HUANG, L.; LI, D. Consistent ubiquitous presence of microplastics in the ocean and atmosphere. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 17, p. 10101-10111, 2019.

LUSHER, A. L.; MCHUGH, N.; THOMPSON, R. C. Microplastic pollution in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 88, n. 1-2, p. 25-33, 2014.

MAES, T.; JESSOP, R.; WELLNER, N.; HAUPT, K.; MAYES, A. G. A rapid-screening method for microplastics in environmental samples using Nile Red. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 44501, 2017.

MIGLIAVACCA, D. M.; TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M.; FACHEL, J. Study of chemical composition of atmospheric precipitation in South Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 33, p. 6087-6096, 2005.

MINTENIG, S. M.; INT-VEEN, I.; LÖDER, M. G. J.; PRIMPKE, S.; GERDTS, G. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based FTIR-imaging. **Water Research**, v. 108, p. 365-372, 2017.

MIRANDA, R. M.; ANDRADE, M. de F.; FORNARO, A.; YNOUE, R. Y. Urban air pollution: A case study of particulate matter in São Paulo, Brazil. **Atmospheric Research**, v. 104, p. 244-252, 2012.

NAPPER, I. E.; THOMPSON, R. C. Release of synthetic microfibers during the laundering of synthetic fabrics: an evaluation of mitigation strategy. **Marine Pollution Bulletin**, v. 112, n. 1-2, p. 39-45, 2016.

OLIVEIRA, C.; PINTO, R.; SANTOS, A. Sobre as pesquisas de microplásticos na atmosfera: o que sabemos no cenário sul-americano?. Observatorium: **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 15, p. 360-387, 2024.

PETROFF, A.; MAILLAT, A.; AMIEUX, M.; ATHAMENA, M. Dry deposition of aerosols onto vegetation: A review of approaches and models. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 16, p. 3625-3653, 2008.

PRATA, J. C. Airborne microplastics: Consequences to human health?. **Environmental**

Pollution, v. 234, p. 115-126, 2018.

PRIMPKE, S.; WIRTH, M.; LÖDER, M. G. J.; GERDTS, G. Automated identification and quantification of microplastics using FTIR imaging. **Analytical Methods**, v. 10, n. 43, p. 5133-5141, 2018.

REVISTA FAPESP. Microplásticos se espalham pela costa brasileira e invadem o ciclo atmosférico. **Revista Pesquisa FAPESP**, ed. 332, p. 22-27, 2023.

RILLIG, M. C. Microplastics in terrestrial ecosystems and the soil?. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 12, p. 6453-6454, 2012.

SANTOS, F.; LIMA, R.; SILVA, B. Padronização de amostradores passivos para coleta de deposição atmosférica úmida de polímeros. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 29, n. 1, p. 74-85, 2024.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3. ed. John Wiley & Sons, 2016.

SILVA, J. M.; GIMENEZ, B. F. Fibras sintéticas em sedimentos e corpos hídricos costeiros: impactos e origens antrópicas. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 41, n. 3, p. 315-328, 2015.

SLINN, W. G. N. Precipitation scavenging. In: Atmospheric Science and Power Production. **Washington: US Department of Energy**, 1984. p. 466-532.

SOUZA, V.; TEIXEIRA, L.; ALMEIDA, M. Desafios metodológicos e analíticos na identificação espectroscópica de microplásticos em matrizes ambientais tropicais. **Química Nova**, v. 47, n. 2, p. 142-155, 2024.

SUARIA, G.; AVIO, C. G.; CHIESA, S.; REZZOAGLI, F.; ALIANI, S.; REGOLI, F. Microplastics in the global atmosphere: Atmospheric deposition in marine, urban and remote regions. **Environmental Pollution**, v. 262, p. 114000, 2020.

VESSONI, A. Pesquisa em piscinões inicia mapeamento de microplásticos na água da chuva e escoamento na Grande São Paulo. **Jornal da UNESP**, v. 12, n. 4, p. 18-21, 2022.

VIANELLO, A.; JENSEN, J. G.; LIU, F.; VOLLERTSEN, J. Simulating human exposure to airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 8670, 2019.

WAGNER, S.; KLÖCKNER, P.; STIERBOCK, T.; REEMTSMA, T.; SCHOLZ-BÖTTCHER, B. M. Tyre wear particles in the environment: A review on generation, properties, emissions and fate. **Science of The Total Environment**, v. 627, p. 1169-1181, 2018.

WANG, X.; LIAO, S.; ZHANG, Y.; LI, F.; LIU, K.; WRIGHT, S. L. Atmospheric transport of microplastics and their global circulation. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2021.

WESELY, M. L. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. **Atmospheric Environment**, v. 23, n. 6, p. 1293-1304, 1989.

WRIGHT, S. L.; ULVING, J.; THOMPSON, R. C.; GALLOWAY, T. S. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. **Environment International**, v. 136, p. 105411, 2020.

YAO, M.; ZHANG, Y.; LIAO, S.; LI, F.; LIU, K.; LI, D. Airborne microplastics: A review on the occurrence, migration, and risks to humans. **Science of The Total Environment**, v. 823, p. 153670, 2022.

ZHANG, J.; WANG, X.; ZHOU, S.; LIU, X.; GOMES, R.; SHAN, J. Global overview of microplastics in the atmosphere: Sampling, identification, and transport dynamics. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 170, p. 117420, 2024.

ZHANG, Y.; LIU, K.; LI, D.; WANG, X.; FANG, T.; LIAO, S. Atmospheric deposition of microplastics: A review of methods and progress. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 114911, 2020.