

ESTUDO SOBRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL PARTICULADO (MP_{2,5}) E A SAÚDE HUMANA NA REGIÃO AMAZÔNICA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE MANAUS/AM

André da Costa Hianes^{1*}

Heiner Machado da Silva^{2*}

Lincoln Lucilio Romualdo^{3*}

Resumo: O material particulado atmosférico na Amazônia é proveniente tanto de fontes urbanas, como o tráfego veicular, quanto de fontes sazonais e de grande impacto, como as queimadas de vegetação. Essas emissões liberam poluentes com variados tamanhos e composições químicas, que afetam a saúde da população e o ecossistema regional. A problemática central reside na carência de estudos nacionais que correlacionem os constituintes químicos específicos da fumaça de queimadas, como o material orgânico e os íons de K⁺, aos efeitos sobre a saúde humana em cidades da Região Norte. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é identificar os principais constituintes químicos do MP_{2,5} originados de queimadas e correlacioná-los aos efeitos sobre a saúde da população da cidade de Manaus. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e exploratória baseada em revisão bibliográfica sistemática que abrange publicações dos últimos cinco anos (2020–2024), selecionadas em bases como CAPES, SciELO e Google Acadêmico. Entre as técnicas analíticas, destacam-se a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), empregadas nos estudos analisados para identificar íons metálicos e compostos orgânicos. A relevância do estudo reside em sua contribuição para a compreensão dos riscos ambientais e sanitários associados à poluição por queimadas na região Amazônica, oferecendo subsídios para a formulação de políticas públicas de controle da qualidade do ar e para a definição de estratégias de mitigação dos efeitos nocivos à saúde humana em um contexto ambiental único no Brasil.

Palavras-chave: Queimadas; Amazônia; Poluição Atmosférica; Toxicologia Ambiental; Efeitos à Saúde.

^{1*} Instituto de Química – UF CAT: hianes.andre@gmail.com, heiner.machado@ufam.edu.br, lincolnromualdo@ufcat.edu.br

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a Amazônia Legal vem sendo submetida a intensas intervenções humanas, sobretudo associadas ao avanço do desmatamento e à ocorrência de queimadas. Essas atividades provocam impactos ambientais significativos e representam uma ameaça direta à saúde das populações residentes na região.

A combustão da biomassa florestal resulta na emissão de elevados níveis de poluentes atmosféricos, com ênfase no material particulado fino ($PM_{2,5}$), que possui alta capacidade de atingir as regiões mais profundas do sistema respiratório. A exposição a esse poluente está relacionada ao aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de agravar quadros clínicos em grupos populacionais mais vulneráveis (PEREIRA; ARAUJO, 2025).

Na cidade de Manaus, localizada no bioma da Amazônia, existem diversas fontes de poluentes atmosféricos tais como veículos automotores, usinas termoeletricas, o Polo Industrial de Manaus e queimadas florestais ocasionadas pela mudança no uso do solo no entorno da cidade. Além disso, as florestas de entorno são potenciais fontes de emissões biogênicas de gases, principalmente compostos orgânicos voláteis (COVs) e de material particulado (MP) biogênico, como, por exemplo, o pólen (VALEBONA *et al.*, 2023).

No que tange à composição química do $MP_{2,5}$ na Amazônia, Gioda *et al.*, (2023), revisaram dados para a região subequatorial amazônica (Tangará da Serra, Alta Floresta e Manaus) e identificaram elevado teor de carbono orgânico total e carbono negro (*black carbon*), além de iões solúveis em água (WSI) nos períodos de queimadas intensas.

Estudos recentes vêm mostrando que as emissões de $MP_{2,5}$ originadas de queimadas estão associadas a aumento de morbidade e mortalidade; por exemplo, Gonçalves *et al.* (2023) identificaram que exposições elevadas a $MP_{2,5}$ gerados por incêndios florestais contribuíram para elevação nos índices de severidade, mortalidade e incidência de COVID-19 em estados da Amazônia brasileira no período de 2020-2022.

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar, por meio

de uma revisão bibliográfica, a composição química do material particulado fino ($MP_{2,5}$) na região Amazônica e suas implicações para a saúde humana.

Busca-se identificar os principais constituintes químicos do $MP_{2,5}$ associados a fontes naturais e antrópicas, como queimadas, atividades industriais e emissões veiculares, bem como avaliar os efeitos desses poluentes sobre o sistema respiratório, cardiovascular e outros agravos à saúde das populações expostas. Adicionalmente, o estudo pretende reunir evidências científicas que contribuam para a compreensão dos riscos ambientais e sanitários na Amazônia, subsidiando futuras pesquisas e a formulação de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar e à proteção da saúde coletiva.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Material Particulado Atmosférico

O material particulado (MP) constitui um dos principais poluentes atmosféricos monitorados em estudos ambientais e de saúde pública, em razão de seus impactos sobre a qualidade do ar, os ecossistemas e a saúde humana. Trata-se de uma mistura complexa de partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera, cuja composição química, origem e propriedades físicas variam significativamente conforme as fontes emissoras e as condições atmosféricas (SEINFELD; PANDIS, 2016). A classificação do material particulado baseia-se predominantemente no diâmetro aerodinâmico das partículas, sendo as frações MP_{10} (diâmetro inferior a 10 μm) e $MP_{2,5}$ (diâmetro inferior a 2,5 μm) amplamente utilizadas em normas técnicas e estudos epidemiológicos. Dentre essas, o $MP_{2,5}$ destaca-se por sua elevada nocividade à saúde humana, uma vez que suas reduzidas dimensões favorecem a penetração profunda no trato respiratório, alcançando os alvéolos pulmonares e, em alguns casos, a corrente sanguínea (WHO, 2021; CUVINGE, 2025).

Nesse sentido, o material particulado é reconhecido como um indicador-chave da poluição atmosférica urbana e industrial, estando associado tanto a processos naturais quanto antrópicos e configurando-se como um fenômeno multifatorial que integra dimensões ambientais, sociais e econômicas.

Fontes de Emissão e Comportamento Atmosférico

De acordo com Seinfeld & Pandis (2016) as fontes de emissão do material particulado podem ser classificadas em naturais e antrópicas. Entre as fontes naturais destacam-se a ressuspensão de poeira do solo, a erosão eólica, os aerossóis marinhos, as erupções vulcânicas, as emissões biogênicas associadas à vegetação e os incêndios florestais. Em determinadas regiões, especialmente áreas áridas e semiáridas, essas fontes podem representar uma parcela significativa das concentrações de MP_{10} , embora seus impactos à saúde permaneçam relevantes (IPCC, 2022).

As fontes antrópicas são predominantes em áreas urbanas e industriais, estando associadas principalmente à queima de combustíveis fósseis em veículos automotores, processos industriais, geração de energia, atividades da construção civil, mineração e queimadas agrícolas (BRAGA *et al.*, 2001; ANDREAE; ROSENFELD, 2008).

No contexto urbano, o tráfego veicular destaca-se como uma das principais fontes de $MP_{2,5}$, em razão da combustão incompleta de combustíveis, do desgaste de pneus, freios e pavimentos, além da ressuspensão de partículas depositadas nas vias. No contexto industrial, especialmente na siderurgia, as emissões atmosféricas estão relacionadas às diferentes etapas do processo produtivo, cuja intensidade e composição variam conforme as tecnologias adotadas e a eficiência dos sistemas de controle ambiental (CAVALCANTI, 2012).

Do ponto de vista atmosférico, o material particulado pode ser classificado em primário, quando emitido diretamente pelas fontes, e secundário, quando formado na atmosfera a partir de reações químicas envolvendo precursores gasosos, como óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (SEINFELD; PANDIS, 2016). Características como tamanho, forma, densidade, higroscopicidade e composição química influenciam o tempo de permanência das partículas na atmosfera, seu transporte em longas distâncias e sua participação em processos climáticos, incluindo a formação e modificação de nuvens (ARTAXO *et al.*, 2013).

Composição do Material Particulado

A composição química do material particulado atmosférico é altamente heterogênea e depende das fontes emissoras e dos processos físico-químicos que ocorrem na atmosfera. De modo geral, o MP é constituído por componentes inorgânicos, orgânicos e, em menor proporção, biológicos, cuja distribuição relativa varia conforme o contexto urbano, regional e climático (PARRA, 2023).

Os constituintes inorgânicos incluem metais pesados e metaloides, como chumbo, cádmio, níquel, cromo e zinco, frequentemente associados a atividades industriais, tráfego veicular e processos de combustão. Também são encontrados íons solúveis, como sulfatos, nitratos e amônio, formados a partir de reações atmosféricas envolvendo óxidos de enxofre e nitrogênio (SEINFELD; PANDIS, 2016). Muitos desses elementos apresentam reconhecido potencial tóxico, sobretudo quando associados ao MP_{2,5}.

A fração orgânica do material particulado compreende compostos orgânicos primários, emitidos diretamente pelas fontes, e compostos orgânicos secundários, formados por reações fotoquímicas na atmosfera. Essa fração inclui hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, ácidos orgânicos, n-alcanos e traçadores específicos de queima de biomassa, como o levoglucosano. Segundo Oliveira (2006), diversos constituintes orgânicos e metais-traço presentes no MP_{2,5} apresentam potencial tóxico, mutagênico e carcinogênico.

Adicionalmente, o material particulado pode conter componentes biológicos, como pólen, esporos de fungos, bactérias e fragmentos vegetais, conhecidos como bioaerossóis. Esses componentes são particularmente relevantes em regiões com intensa atividade agrícola ou em ambientes naturais e podem atuar como agentes alergênicos e potencialmente patogênicos (EMYGDIO, 2016).

A composição do material particulado está diretamente relacionada aos seus efeitos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Estudos nacionais indicam que a exposição contínua ao MP atmosférico, especialmente aquele enriquecido com metais potencialmente tóxicos e compostos orgânicos nocivos, está associada ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como ao aumento da mortalidade precoce em populações urbanas (LIMA *et al.*, 2025). Do ponto de vista ambiental, o MP contribui para a degradação da qualidade do ar, a

redução da visibilidade atmosférica e a deposição de contaminantes em ecossistemas terrestres e aquáticos, além de influenciar processos climáticos ao atuar como núcleos de condensação de nuvens (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Técnicas Analíticas Aplicadas ao Estudo de MP

Diante da elevada complexidade química do material particulado atmosférico, a caracterização detalhada de seus constituintes requer o emprego de técnicas analíticas de alta sensibilidade e seletividade. Nesse contexto, métodos baseados em espectrometria de massas têm se destacado por sua capacidade de identificar e quantificar tanto elementos inorgânicos quanto compostos orgânicos presentes em baixas concentrações no MP. Entre essas técnicas, a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) e a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) figuram como ferramentas amplamente utilizadas em estudos de aerossóis atmosféricos.

A espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) é amplamente empregada na determinação de elementos-traço e metais pesados em amostras ambientais, incluindo o material particulado atmosférico, devido à sua elevada sensibilidade analítica, capacidade multielementar e baixos limites de detecção, frequentemente atingindo níveis em partes por trilhão (ppt) (ESPINOZA-QUIÑONES *et al.*, 2010).

Essa técnica é particularmente relevante na quantificação de metais associados ao MP_{2,5}, pois permite a identificação de constituintes que podem apresentar potencial tóxico e impactos adversos à saúde humana, tais como Pb, Cd, Ni e Zn, cuja presença em partículas finas está correlacionada a doenças respiratórias e cardiovasculares (ESPINOZA-QUIÑONES *et al.*, 2010; CARLOS, 2020).

A alta sensibilidade analítica do ICP-MS permite a quantificação de metais em concentrações da ordem de ng·m⁻³, tornando essa técnica particularmente adequada para estudos envolvendo o material particulado fino (MP_{2,5}) (ARTAXO *et al.*, 2013; SEINFELD; PANDIS, 2016). Metais como Fe, Al, Ca, Zn, Pb, Ni e Cr são frequentemente utilizados como indicadores de fontes emissoras e de potencial toxicidade do aerossol atmosférico. Além disso, estudos recentes têm empregado o ICP-MS para avaliar a bioacessibilidade desses elementos no MP_{2,5}, aspecto

fundamental na análise de riscos à saúde humana, conforme demonstrado por Polezer *et al.* (2019) em estudo realizado na cidade de Manaus.

De maneira complementar, a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) tem sido amplamente utilizada para a caracterização da fração orgânica do material particulado, permitindo a separação, identificação e quantificação de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis presentes nos aerossóis. A aplicação do GC-MS na análise de aerossóis inclui a detecção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), importantes traçadores de combustão incompleta, bem como a determinação de levoglucosano, usado como marcador molecular da queima de biomassa atmosférica (CRISTALE; SILVA; MARCHI, 2008).

Campanhas experimentais realizadas na Amazônia, como o projeto GoAmazon2014/5, evidenciaram que a composição orgânica do material particulado sofre modificações significativas à medida que o aerossol envelhece e se desloca da pluma urbana de Manaus para o interior da floresta, refletindo processos fotoquímicos complexos (SHILLING *et al.*, 2018).

Controle, Monitoramento e Normas de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar constituem instrumentos fundamentais para o controle das emissões de material particulado, estabelecendo limites máximos de concentração considerados aceitáveis para a proteção da saúde humana e do meio ambiente. Organismos internacionais, como a Organização Mundial da Saúde, têm revisado periodicamente suas diretrizes, tornando-as mais restritivas à luz de novas evidências científicas (WHO, 2021).

No Brasil, os padrões nacionais são definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio de resoluções que estabelecem valores de referência para MP_{10} e $MP_{2,5}$, alinhados de forma progressiva às recomendações internacionais (BRASIL, 2018). O controle das emissões envolve instrumentos regulatórios e tecnológicos, como licenciamento ambiental, inventários de emissões, inspeções veiculares e a adoção de sistemas de controle de poluição, incluindo filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos e lavadores de gases (COOPER; ALLEY, 2010).

O monitoramento contínuo do material particulado é essencial para a gestão da qualidade do ar e a verificação do cumprimento das normas vigentes. Avanços

recentes incluem a incorporação de sensores de baixo custo, modelagem preditiva e sistemas de informação geográfica, embora a literatura ressalte a necessidade de validação rigorosa desses dados (SNYDER *et al.*, 2013). Ademais, estudos destacam que os impactos do MP não são distribuídos de forma homogênea, afetando de maneira desproporcional populações vulneráveis, o que reforça a necessidade de políticas públicas integradas e orientadas por princípios de justiça ambiental (BRAGA JR. *et al.*, 2021).

MATERIAIS E MÉTODOS

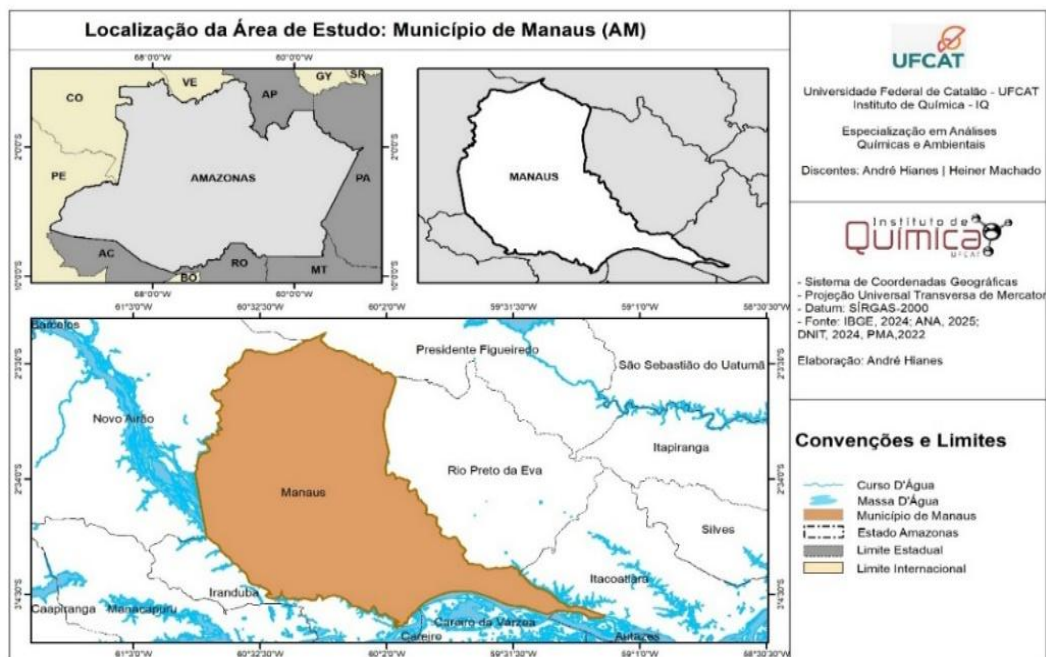
A presente pesquisa foi realizada no município de Manaus/AM, com objetivo de entender as principais características de material particulado e suas fontes de emissões, bem como avaliar as incidências de doenças relacionadas a esse tipo de poluição e apresentar métodos de controle utilizados para monitoramento em grandes metrópoles.

Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Manaus, onde corresponde a 11.401,092 km², equivalendo a 0,73% do território do estado do Amazonas. Limita-se com os municípios de Presidente Figueiredo ao norte, Iranduba e Careiro da Várzea ao sul, Rio Preto da Eva e Itacoatiara a leste e a Novo Airão a oeste. De acordo com o último censo, a cidade possui aproximadamente 2.063.689 de habitantes (IBGE, 2022).

A cidade está localizada no coração da Amazônia, uma das regiões mais úmidas do Brasil e onde ocorre elevada incidência de radiação solar. O clima da cidade é tropical úmido, caracterizado por altas temperaturas, umidade elevada e chuvas torrenciais. A temperatura média anual da região é de 26,7 °C e a umidade do ar é relativamente alta durante todo o ano, com médias mensais entre 79% e 88%. O índice pluviométrico também é elevado, em torno de 2300 milímetros anuais, sendo março o mês mais chuvoso (335 mm) e agosto o mais seco (47 mm) (UFAM, 2023). A figura 1 mostra o mapa de localização da área de estudo.

Figura 1 – Mapa de Localização da Área de Estudo



Fonte: (Autores, 2025).

Levantamento de Dados

A pesquisa realizou levantamento de dados dos últimos dez anos, compreendendo os anos 2015 a 2024. O trabalho apresenta como base uma análise bibliográfica, sendo a mesma de caráter descritivo e explicativo, com tipologia bibliográfica e documental, com levantamentos de dados.

A obtenção dos dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados científicas reconhecidas, incluindo o Portal de Periódicos da CAPES, a SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) e o Google Acadêmico. Essas plataformas foram utilizadas para a identificação, seleção e análise de artigos científicos, dissertações, teses e outros documentos relevantes, garantindo a confiabilidade, a atualidade e a relevância das informações utilizadas no desenvolvimento do estudo.

RESULTADOS

A elevada presença de carbono orgânico total e carbono negro no MP_{2,5} durante os períodos de queimadas, conforme observado por Gioda *et al.*, (2023), indica forte contribuição da queima de biomassa para a deterioração da qualidade do

ar na região de Manaus. Esses constituintes estão associados a processos de combustão incompleta e apresentam elevada capacidade de induzir estresse oxidativo e inflamação no sistema respiratório.

O carbono negro, por sua vez, atua como um importante vetor de compostos orgânicos tóxicos, incluindo hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, que possuem reconhecido potencial carcinogênico e estão associados ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares (SAKURAY *et al.*, 2023). Gioda *et al.*, (2023) afirma que a exposição contínua a essas partículas finas favorece a penetração profunda nos alvéolos pulmonares, desencadeando respostas inflamatórias sistêmicas.

Durante pesquisas realizadas por Costa *et al.* (2023) a predominância de íons solúveis em água, como K^+ , (SO_4^{2-}) e (NH_4^+) , identificados durante episódios intensos de queimadas, reforça a assinatura química da queima de biomassa. O potássio, em especial, é amplamente utilizado como marcador de queimadas e está associado ao aumento da higroscopicidade das partículas, potencializando sua deposição no trato respiratório.

Segundo Oliveira *et al.* (2024) esses mecanismos ajudam a explicar os aumentos observados na incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e infecciosas na população de Manaus durante períodos de maior concentração de $MP_{2,5}$, conforme relatado por estudos epidemiológicos recentes na região amazônica.

Segundo WHO (2021), realizou em seu estudo a aplicação de um indicador agregado de exposição, que combina concentração e tempo de exposição ao $MP_{2,5}$, onde evidenciou que extensas áreas dessas regiões apresentam qualidade do ar inadequada de forma recorrente. Os resultados demonstraram que, entre 2010 e 2019, aproximadamente 60% da população residente na Amazônia e no Centro-Oeste esteve exposta a concentrações de $MP_{2,5}$ superior ao limite recomendado pela Organização Mundial da Saúde, por cerca de seis meses ao ano.

Conforme destacado por Oliveira *et al.* (2023), os maiores percentuais de dias com concentrações de $MP_{2,5}$ acima de $15 \mu g/m^3$ concentraram-se nos meses de agosto a outubro, período que coincide com a intensificação das queimadas e com a estação seca na Amazônia. Essas áreas de maior exposição apresentaram forte correspondência espacial com a região conhecida como Arco do Desmatamento, indicando a estreita relação entre desmatamento, fogo e degradação da qualidade do ar.

Dessa forma, a composição química do MP_{2,5} proveniente das queimadas não apenas caracteriza a fonte emissora, mas também explica, do ponto de vista toxicológico, os impactos adversos observados sobre a saúde da população urbana de Manaus, evidenciando a relação direta entre eventos de queimadas, poluição atmosférica e agravos à saúde pública.

Principais Doenças Ocasionadas pelo Material Particulado

A classificação do material particulado é realizada com base no diâmetro aerodinâmico, destacando-se as frações MP₁₀ ($\leq 10 \mu\text{m}$), MP_{2,5} ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) e partículas ultrafinas ($\leq 0,1 \mu\text{m}$). Essa diferenciação mostra-se fundamental para a compreensão dos mecanismos fisiopatológicos envolvidos, uma vez que cada fração apresenta comportamento distinto no trato respiratório e potencial diferenciado de impacto à saúde (SEINFELD; PANDIS, 2016).

De acordo com Costa (2015), a deposição do material relaciona-se ao diâmetro aerodinâmico, sendo que partículas maiores se retêm nas vias aéreas superiores, enquanto as finas e ultrafinas alcançam as regiões distais do pulmão. Esse fenômeno favorece a ativação de respostas inflamatórias sistêmicas, com repercussões significativas sobre os sistemas respiratório e cardiovascular.

De acordo com *Global Burden of Disease* (2008), partículas com menor diâmetro aerodinâmico são capazes de atingir regiões profundas dos pulmões e, em alguns casos, transpor a barreira alvéolo-capilar, alcançando a corrente sanguínea. Evidências epidemiológicas indicam que tanto a exposição aguda quanto a crônica ao MP está associada ao aumento da morbimortalidade por doenças respiratórias, cardiovasculares, metabólicas e neurológicas, consolidando esse poluente como um dos principais fatores de risco ambiental em escala global.

Além do tamanho, os resultados apontam que a composição química do material particulado exerce papel central na determinação de seus efeitos biológicos. Componentes como metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, sulfatos, nitratos e carbono elementar foram frequentemente associados a processos de estresse oxidativo, inflamação crônica e disfunção endotelial. Dessa forma, a toxicidade do MP não se restringe à sua concentração atmosférica, mas também à natureza química e à reatividade de seus constituintes (KELLY; FUSSELL, 2017).

Os resultados evidenciam que o material particulado (MP) apresenta elevada relevância do ponto de vista da saúde pública em razão de sua capacidade de penetração no sistema respiratório humano. Nesse sentido Shilling *et al.*, (2018), partem do reconhecimento de que os aerossóis atmosféricos exercem papel central na qualidade do ar e apresentam impactos relevantes sobre a saúde humana. Ao demonstrarem que o aerossol fino presente no plume urbano de Manaus é majoritariamente orgânico, altamente oxidado e formado predominantemente por processos fotoquímicos secundários, fornecem subsídios fundamentais para a compreensão das características físico-químicas do MP_{2,5}, frequentemente associadas a maior potencial pró-inflamatório segundo a literatura biomédica.

Nesse contexto, Polezer *et al.*, (2019), ancoram-se na premissa de que não apenas a massa do MP_{2,5}, mas, sobretudo, sua composição química e a fração bioacessível de seus constituintes, são determinantes para os efeitos adversos à saúde. Os autores demonstram que partículas finas oriundas de distintos modelos de desenvolvimento urbano apresentam perfis químicos contrastantes, com variações significativas nas concentrações e na bioacessibilidade de metais potencialmente tóxicos, como Fe, Cu, Zn, Mn, Ni, Cr, Pb e V.

Do ponto de vista biomédico, os metais bioacessíveis presentes no MP_{2,5} atuam como importantes indutores de estresse oxidativo, principalmente por meio de reações redox, como as reações do tipo Fenton e Haber–Weiss. Esses processos resultam na geração excessiva de espécies reativas de oxigênio (ROS) no microambiente pulmonar, promovendo um desequilíbrio redox intracelular, reconhecido como um dos principais gatilhos moleculares da inflamação associada à exposição à poluição particulada.

A partir desse estresse oxidativo, ocorre a ativação indireta de vias de sinalização pró-inflamatórias, especialmente aquelas reguladas por fatores de transcrição sensíveis ao estado redox celular, como o NF-κB e o AP-1. No nível molecular, essa ativação resulta no aumento da expressão de citocinas pró-inflamatórias, quimiocinas e moléculas de adesão endotelial, como IL-6, IL-8 e TNF-α, promovendo o recrutamento de células inflamatórias e a amplificação da resposta inflamatória no epitélio respiratório.

Além disso, partículas finas, uma vez depositadas nos alvéolos pulmonares, podem favorecer a liberação de mediadores inflamatórios para a circulação sistêmica

ou permitir a translocação de componentes solúveis, contribuindo para disfunções cardiovasculares e outros efeitos extrapulmonares. Esse mecanismo é particularmente associado a ambientes urbanos com maior influência de tráfego veicular e atividades industriais, nos quais a fração bioacessível de metais tende a ser mais elevada.

No que se refere especificamente à queima de biomassa amazônica, Butt *et al.*, (2019), ressaltam que o MP_{2,5} apresenta elevado potencial tóxico, em razão de sua composição rica em carbono orgânico, carbono elementar e compostos derivados da combustão incompleta. O material particulado fino é predominantemente constituído por aerossóis orgânicos ricos em compostos aromáticos oxigenados, polifenóis derivados da lignina, açúcares anidros, como o levoglucosano, e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, o que confere elevada reatividade biológica e favorece sua interação com os tecidos pulmonares após a inalação profunda.

No que se refere aos mecanismos biológicos, evidências experimentais e clínicas indicam que a inalação de partículas finas promove a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio, desencadeando a ativação de vias inflamatórias e a liberação de citocinas pró-inflamatórias. Esses mecanismos estão intimamente associados ao surgimento e ao agravamento de diversas doenças respiratórias crônicas, especialmente aquelas relacionadas à exposição contínua a poluentes ambientais (GOMES, 2002).

As doenças respiratórias figuram entre os agravos mais diretamente associados à exposição ao material particulado. Evidências consistentes demonstram correlação entre concentrações elevadas de MP e aumento da incidência e exacerbação de asma, bronquite crônica, doença pulmonar obstrutiva crônica e infecções respiratórias agudas, com efeitos mais pronunciados em crianças e idosos, considerados grupos fisiologicamente mais vulneráveis (SCHRAUFNAGEL *et al.*, 2019).

No âmbito cardiovascular, os resultados corroboram a associação entre a exposição ao MP_{2,5} e alterações da função vascular, aumento da coagulabilidade sanguínea e aceleração do processo aterosclerótico, estabelecendo um elo consistente entre a poluição atmosférica e o aumento da incidência de doenças cardiovasculares (BROOK *et al.*, 2010). Estudos adicionais indicam que a exposição prolongada ao MP_{2,5} está associada ao aumento da ocorrência de eventos graves,

como infarto agudo do miocárdio, acidente vascular cerebral, hipertensão arterial sistêmica e insuficiência cardíaca, mediados por mecanismos inflamatórios, autonômicos e trombogênicos (RAJAGOPALAN; AL-KINDI; BROOK, 2018).

Adicionalmente, os resultados reforçam que o material particulado, especialmente aquele oriundo da queima de combustíveis fósseis, contém substâncias reconhecidamente carcinogênicas. A poluição do ar e o MP são classificados como carcinogênicos para humanos, com evidências robustas para o desenvolvimento de câncer de pulmão (IARC, 2016). Mecanismos genotóxicos, como danos ao DNA e alterações epigenéticas, também foram associados à exposição ao MP, relacionando-o a doenças metabólicas, como o diabetes mellitus tipo 2, e a distúrbios neurológicos, incluindo declínio cognitivo e doenças neurodegenerativas (BLOCK; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS, 2009).

Apesar do consenso científico quanto aos efeitos adversos do material particulado, persistem discussões acerca dos limites considerados seguros para a exposição e da toxicidade relativa entre diferentes frações e composições químicas do MP (WHO, 2021). Nesse contexto, normas técnicas e legislações ambientais, como os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde e pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, vêm sendo periodicamente revisadas, refletindo o avanço contínuo do conhecimento científico sobre os impactos do material particulado na saúde humana.

CONCLUSÕES

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu consolidar evidências científicas robustas acerca da relevância ambiental e sanitária do material particulado fino (MP_{2,5}) na região Amazônica, com ênfase no município de Manaus. A revisão da literatura demonstrou que a composição química do MP_{2,5} na região é fortemente influenciada por fontes antrópicas e naturais, destacando-se, de maneira recorrente, as queimadas de biomassa como um dos principais vetores de degradação da qualidade do ar, especialmente durante o período seco.

Os resultados analisados indicam que o MP_{2,5} proveniente de queimadas apresenta elevada concentração de carbono orgânico total, carbono negro e íons solúveis em água, como K⁺, (SO₄²⁻) e (NH₄⁺), os quais constituem marcadores

químicos característicos da combustão de biomassa. Esses constituintes conferem às partículas maior toxicidade, higroscopicidade e capacidade de penetração profunda no sistema respiratório, potencializando processos de estresse oxidativo, inflamação sistêmica e disfunções fisiológicas associadas a diferentes agravos à saúde.

Do ponto de vista epidemiológico, as evidências reunidas corroboram a associação entre a exposição aguda e crônica ao $MP_{2,5}$ e o aumento da incidência e agravamento de doenças respiratórias, cardiovasculares, metabólicas e neoplásicas, com impactos mais expressivos em grupos populacionais vulneráveis, como crianças, idosos e indivíduos com comorbidades pré-existentes. Observou-se, ainda, que os períodos de maior concentração de $MP_{2,5}$ coincidem espacial e temporalmente com a intensificação das queimadas e com áreas inseridas no chamado Arco do Desmatamento, evidenciando a estreita relação entre mudanças no uso do solo, poluição atmosférica e riscos à saúde pública na Amazônia.

Adicionalmente, o estudo reforça que os impactos do material particulado não se restringem à sua concentração atmosférica, mas estão intrinsecamente relacionados à sua composição química e à natureza das fontes emissoras. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de estratégias integradas de monitoramento da qualidade do ar que incorporem, além da quantificação do $MP_{2,5}$ a caracterização química detalhada das partículas, de modo a subsidiar avaliações mais precisas de risco à saúde humana.

Por fim, conclui-se que o enfrentamento dos impactos associados ao $MP_{2,5}$ na região Amazônica exige o fortalecimento de políticas públicas voltadas ao controle do desmatamento e das queimadas, à ampliação e qualificação das redes de monitoramento atmosférico e à integração entre ciência, gestão ambiental e saúde pública. A produção e a sistematização de conhecimento científico sobre a composição química do material particulado e seus efeitos biológicos configuram-se como elementos fundamentais para a formulação de estratégias eficazes de mitigação, visando à proteção da saúde coletiva e à promoção da sustentabilidade ambiental em um dos biomas mais estratégicos do planeta.

REFERÊNCIAS

Livros

- BRAGA JR, Benedito PF et al. Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2021.
- CAVALCANTI, Pedro Porto Silva. Gestão ambiental na indústria siderúrgica-aspectos relacionados às emissões atmosféricas. 2012.
- COOPER, C. David; ALLEY, Forrest Christopher. **Air pollution control: A design approach**. Waveland press, 2010.
- GLOBAL BURDEN OF DISEASE. WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. **The global burden of disease: 2004 update**. World Health Organization, 2008. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241563710>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change PÖRTNER, H.-O. et al. (eds.). Cambridge University Press, 2022, p. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. John Wiley & Sons, 2016.
- SNYDER, Emily G. et al. The changing paradigm of air pollution monitoring. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 20, p. 11369-11377, 2013.

Artigos em Periódicos

- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, DJESR. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. **Earth-Science Reviews**, v. 89, n. 1-2, p. 13-41, 2008.
- ARTAXO, Paulo et al. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday discussions**, v. 165, p. 203-235, 2013.
- BLOCK, Michelle L.; CALDERÓN-GARCIDUEÑAS, Lilian. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. **Trends in neurosciences**, v. 32, n. 9, p. 506-516, 2009.

- BUTT, Edward W. *et al.* Large Air Quality and Public Health Impacts due to Amazonian Deforestation Fires in 2019. **Geohealth**, [S.L.], v. 5, n. 7, p. 1-16, jul. 2021. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2021gh000429>.
- BROOK, Robert D. *et al.* Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association. **Circulation**, v. 121, n. 21, p. 2331-2378, 2010.
- COSTA, Maria Angélica Martins *et al.* Evaluation of the Dry Deposition of Particles Emitted by Biomass Combustion. **Chemical Engineering & Technology**, [S.L.], v. 46, n. 6, p. 1204-1211, 22 fev. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.202200477>.
- CRISTALE, Joyce; SILVA, Flavio Soares; MARCHI, Mary Rosa Rodrigues de. Desenvolvimento e aplicação de método GC-MS/MS para análise simultânea de 17 HPAs em material particulado atmosférico. **Ecletica Quimica**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 69-78, 22 dez. 2008. Ecletica Quimica. <http://dx.doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v33.4.2008.p69-78>.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F. R., MÓDENES, A. N., PALÁCIO, S. M., SZYMANSKI, N., WELTER, R. A., RIZZUTTO, M. A., BORBA, C. E., KROUMOV, A. D. Evaluation of trace element levels in muscles, liver and gonad of fish species from Sao Francisco River of the Paraná Brazilian state by using SR-TXRF technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 68, pg. 2202–2207, 2010.
- GIODA, A. *et al.* Assessing over decadal biomass burning influence on particulate matter composition in subequatorial Amazon: literature review, remote sensing, chemical speciation and machine learning application. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 95, n. 2, p. 01-20, dez. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765202320220932>.
- GOMES, MARIA JOÃO. Ambiente e pulmão. **Jornal de Pneumologia**, v. 28, p. 261-269, 2002.
- GONÇALVES, K. S. *et al.* The potential impact of PM2.5 on the covid-19 crisis in the Brazilian Amazon region. **Revista de Saúde Pública**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 1-20, 14 set. 2023. Universidade de São Paulo. Agência de Bibliotecas e Coleções Digitais. <http://dx.doi.org/10.11606/s1518-8787.2023057005134>.

- KELLY, Frank J.; FUSSELL, Julia C. Role of oxidative stress in cardiovascular disease outcomes following exposure to ambient air pollution. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 110, p. 345-367, 2017.
- OLIVEIRA, Bruna Larissa Aires de *et al.* Qualidade do ar na cidade de Manaus: material particulado e suas relações com as queimadas. **Geoconexões Online**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 108-118, 16 mar. 2024. Geoconexoes Online. <http://dx.doi.org/10.53528/geoconexes.v4i2.155>.
- OLIVEIRA, I. N. *et al.* *Air pollution from forest burning as environmental risk for millions of inhabitants of the Brazilian Amazon: an exposure indicator for human health.* **Cadernos de Saúde Pública**, v. 39, n. 6, e00131422, 2023. DOI: 10.1590/0102-311XEN131422.
- PEREIRA, M. A. C; ARAÚJO, J. N. Monitoramento ambiental de poluentes atmosféricos decorrentes de queimadas na Amazônia Legal: uma revisão integrativa da literatura científica. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, [S.L.], v. 23, n. 9, p. 1-18, 23 set. 2025. Brazilian Journals. <http://dx.doi.org/10.55905/oelv23n9-125>.
- POLEZER, Gabriela *et al.* The influence that different urban development models has on PM2.5 elemental and bioaccessible profiles. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 01-12, 16 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-51340-4>.
- RAJAGOPALAN, Sanjay; AL-KINDI, Sadeer G.; BROOK, Robert D. Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. **Journal of the American College of Cardiology**, v. 72, n. 17, p. 2054-2070, 2018.
- SAKURAY, Alice Murai *et al.* VARIABILIDADE TEMPORAL DE BLACK CARBON NO MATERIAL PARTICULADO FINO ATMOSFÉRICO EM CENTRO URBANO. **Revista Valore**, [S.L.], v. 8, p. 1-13, 19 jun. 2023. Instituto de Cultura Técnica Sociedade Civil Ltda. <http://dx.doi.org/10.22408/rev8020231356e-8063>.
- SCHRAUFNAGEL, Dean E. *et al.* Air pollution and noncommunicable diseases: a review by the forum of international respiratory societies' environmental committee, part 2: air pollution and organ systems. **Chest**, v. 155, n. 2, p. 417-426, 2019.

SHILLING, John E. *et al.* Aircraft observations of the chemical composition and aging of aerosol in the Manaus urban plume during GoAmazon 2014/5. **Atmospheric Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 18, n. 14, p. 10773-10797, 30 jul. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-18-10773-2018>.

Trabalhos apresentados em eventos

VALEBONA, F. B. *et al.* Caracterização Do Material Particulado Fino E Respostas Epidemiológicas em Manaus, AM, Brasil. In: Congresso da Abes - CBESA - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais [...] . [S.L.]: Abes, 2023. p. 01-07. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/32cbesa/405_tema_vii.pdf. Acesso em: 01 dez. 2025.

Documentos on-line

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 491, 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=766. Acesso em: 17 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidade de Manaus-AM**. 2022. Censo. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/manaus/panorama>. Acesso em: 27 nov. 2025.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). *Outdoor air pollution*. Lyon: IARC. <https://www.iarc.who.int/> Acesso em: 17 dez. 2025.

UFAM - UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZÔNAS (org.). 2023. **Cidade de Manaus**. 2023. Disponível em: <https://edoc.ufam.edu.br/bitstream/123456789/3227/12/Manaus%20-%20Portugu%C3%AAs%20Online.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2025.

World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021. ISBN 9789240034228. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Acesso em: 17 dez. 2025.

Teses, dissertações e trabalhos acadêmicos originais:

CARLOS, Nataliny Danila de Aquino. *Análise de elementos traços em Curimbatá (Prochilodus lineatus) na bacia do Rio Vermelho através de espectrometria de fluorescência de raio-X por reflexão total (TXRF)*. 2020. 62 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis-MT, 2020. Disponível em: https://ufr.edu.br/ppgta/wp-content/uploads/2020/09/Nataliny_2020.pdf. Acesso em: 06 jan. 2026.

COSTA, Natalia de Souza Xavier. **Efeito da exposição ao material particulado atmosférico no desenvolvimento da lesão pulmonar aguda (LPA) induzida por LPS**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CUVINGE, Adilson Borges Paquissi. *Poluição do ar e seus efeitos na saúde humana com ênfase nas doenças respiratórias: uma revisão sistemática*. 32 f. Monografia (Licenciatura em Ciências Biológicas) — Instituto de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-CE, 2025.

EMYGDIO, Ana Paula Mendes. **Identificação de bioaerossóis de origem fúngica na cidade de São Paulo**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Regiani Carvalho de. **Efeito da composição do material particulado fino, PM_{2,5} e residual oil fly ash (ROFA), como determinante do potencial mutagênico e tóxico celular: um estudo em bioensaios vegetais e animais**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PARRA, Yendry Jomolca. **Caracterização química, fontes de emissão e toxicidade do material particulado atmosférico em regiões do centro-oeste do Brasil**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Capítulos

LIMA, Ana Luiza Medeiros Vasconcelos et al. **POLUIÇÃO DO AR: UM FATOR DE RISCO EMERGENTE PARA DOENÇAS CARDIOVASCULARES**. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 104, p. 82-101, 2025.