REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

TERRITÓRIOS DE FOGO E QUALIDADE DO AR: MODELAGEM EXPLORATÓRIA DE PM2,5 E DESAFIOS DA GOVERNANÇA SOCIOAMBIENTAL EM MANAUS (2023–2025)

FIRE TERRITORIES AND AIR QUALITY: EXPLORATORY MODELING OF PM2,5 AND SOCIO-ENVIRONMENTAL RISK GOVERNANCE CHALLENGES IN MANAUS (2023–2025)

Ciências Humanas • 24/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/795433243

Jefferson Mendes Holanda[1]

Bárbara Vilaça Regis[2]

Carlos Augusto Oliveira de Souza[3]

Christina Aline de Melo Martins[4]

Ingrid Pinto Vieira[5]

Lilian Barros Goes[6]

Paulo Dionísio Muniz Gonçalves[7]

Denison Melo Aguiar[8]

RESUMO

A ocorrência de queimadas na Amazônia e a circulação atmosférica de poluentes suscitam questões sobre a relação entre os territórios de ocorrência do fogo e as áreas potencialmente afetadas pela deterioração da qualidade do ar. Este estudo objetivou analisar exploratoriamente as relações entre a distribuição espacial e temporal das detecções de fogo no Amazonas, as condições meteorológicas e as concentrações indicativas de material particulado fino ($PM_{2,5}$) em Manaus, entre 2023 e 2025, discutindo suas implicações para a governança dos riscos socioambientais. Adotou-se delineamento observacional, ecológico e quantitativo, com dados do INPE, da estação meteorológica INMET A101 e de três sensores PurpleAir. A caracterização descritiva compreendeu 515 dias elegíveis, enquanto a modelagem exploratória utilizou 406 dias, com validação temporal e comparação de quatro modelos. Registraram-se 19.601 detecções de fogo em 2023, 25.499 em 2024 e 4.545 em 2025. As medianas anuais indicativas de $PM_{2,5}$ foram de 11,29, 10,46 e 4,70 µg/m³, respectivamente, observadas sob cobertura temporal desigual. A inclusão de indicadores de fogo e interação direcional não proporcionou melhoria preditiva robusta em relação aos controles meteorológicos e temporais. Os resultados não permitem confirmar ou refutar o transporte atmosférico de fumaça nem atribuir fontes emissoras específicas. Conclui-se que a distinção entre ocorrência territorial do fogo, condições meteorológicas e concentrações ambientais é fundamental para a interpretação dos riscos e para o aprimoramento do monitoramento integrado e da governança socioambiental.

Palavras-chave: queimadas; material particulado fino; segurança humana; fumaça em Manaus; Amazonas.

ABSTRACT

Biomass burning in the Amazon and the atmospheric transport of pollutants raise questions about the relationship between fire occurrence areas and locations potentially affected by deteriorating air quality. This study aimed to explore the relationships among the spatial and temporal distribution of fire detections in Amazonas, meteorological conditions, and indicative fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations in Manaus from 2023 to 2025, discussing their implications for socio-environmental risk governance. An observational, ecological, and quantitative design was adopted using data from the Brazilian National Institute for Space Research (INPE), the INMET A101 meteorological station, and three PurpleAir sensors. Descriptive characterization included 515 eligible days, whereas exploratory modeling used 406 days, with temporal validation and comparison of four models. Amazonas recorded 19,601 fire detections in 2023, 25,499 in 2024, and 4,545 in 2025. Annual indicative $PM_{2.5}$ medians were 11.29, 10.46, and 4.70 μg/m³, respectively, under unequal temporal coverage. Adding fire-detection indicators and a directional interaction did not yield a robust predictive improvement over meteorological and temporal controls. The findings neither confirm nor rule out atmospheric smoke transport and do not allow the attribution of specific emission sources. The study concludes that distinguishing the territorial occurrence of fires, meteorological conditions, and ambient pollutant concentrations is essential for interpreting environmental risks and improving integrated monitoring and socio-environmental risk governance.

Keywords: biomass burning; fine particulate matter; human security; Wildfire smoke in Manaus; Amazonas.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui um problema de saúde pública e proteção ambiental cujos efeitos podem ultrapassar limites territoriais e administrativos. Entre os poluentes de maior relevância sanitária, destaca-se o material particulado fino ($PM_{2,5}$), composto por partículas com diâmetro aerodinâmico de até 2,5 micrômetros, associado a efeitos adversos à saúde e capaz de permanecer em suspensão e ser transportado na atmosfera (Pope; Dockery, 2006; Organização Mundial da Saúde, 2021). Em episódios de queimadas e incêndios florestais, a distribuição espacial da fumaça depende não apenas da localização das fontes emissoras, mas também das condições meteorológicas e dos processos de transporte e remoção atmosférica (Heilman et al., 2014; Reid et al., 2016).

Na Amazônia, a dinâmica sazonal das queimadas e a circulação atmosférica tornam particularmente relevante a investigação das relações entre ocorrência do fogo e qualidade do ar em áreas urbanas. A emissão de poluentes em determinada localidade não implica que seus efeitos atmosféricos permaneçam restritos à área de combustão, assim como a identificação de detecções de fogo por satélite não permite, isoladamente, determinar a origem das partículas registradas em uma cidade. A interpretação dessas relações exige considerar a distribuição espacial e temporal das detecções, as condições meteorológicas e as limitações dos indicadores utilizados (Longo et al., 2009; Heilman et al., 2014).

Manaus constitui um contexto relevante para essa investigação, em razão de sua localização na Amazônia e da ocorrência de episódios de deterioração da qualidade do ar associados ao contexto regional das queimadas. Estudos sobre a crise de fumaça de 2023 e sobre o transporte atmosférico de poluentes na região contribuem para situar o problema, sem dispensar a análise específica dos registros

ambientais disponíveis para a capital amazonense (Ferrante; Marinho; Fearnside, 2025; Jang; Jun, 2026). Nesse cenário, torna-se necessário distinguir a ocorrência territorial do fogo, as condições de circulação atmosférica e as concentrações de material particulado observadas em Manaus, evitando pressupor correspondência direta ou atribuição causal entre esses fenômenos.

A investigação dessas relações também apresenta implicações para a segurança humana, compreendida como abordagem orientada à proteção das pessoas diante de ameaças que comprometem suas condições de vida e bem-estar (PNUD, 1994; PNUD, 2022). Sob essa perspectiva, a poluição atmosférica relacionada às queimadas pode ser interpretada como risco socioambiental que demanda produção de informações confiáveis, comunicação adequada e capacidade de articulação institucional. No ordenamento jurídico brasileiro, o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e as diretrizes de prevenção e gestão de riscos oferecem fundamentos normativos para essa discussão (Brasil, 1988, art. 225; Brasil, 2012). Entretanto, a existência desses fundamentos não constitui, por si só, evidência da efetividade das medidas públicas de proteção.

A disponibilidade de sistemas de monitoramento ambiental amplia as possibilidades de observar a ocorrência de queimadas, as condições meteorológicas e a qualidade do ar. No Amazonas, informações produzidas pelo Programa Queimadas, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e por redes de sensores ambientais podem subsidiar análises integradas. Todavia, esses registros representam dimensões distintas do fenômeno: as detecções por satélite não equivalem diretamente ao volume de emissões, as observações meteorológicas locais não reconstituem integralmente trajetórias

atmosféricas e as medições indicativas de $PM_{2,5}$ não correspondem necessariamente à exposição individual da população. Reconhecer essas diferenças é condição para interpretar os dados sem extrapolar sua capacidade explicativa.

Diante desse quadro, formula-se o seguinte problema de pesquisa: em que medida a distribuição espacial e temporal das detecções de fogo no Amazonas e as condições meteorológicas se relacionam com as concentrações indicativas de material particulado fino ($PM_{2,5}$) registradas em Manaus entre 2023 e 2025, e quais são os limites dessas evidências para a interpretação dos riscos socioambientais?

A investigação é orientada por uma hipótese exploratória única: a circulação atmosférica pode produzir uma dissociação entre os territórios de ocorrência do fogo e aqueles potencialmente afetados pela poluição atmosférica, de modo que a distribuição espacial das detecções de fogo, considerada isoladamente, não é suficiente para explicar as concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ observadas em Manaus. Essa hipótese orienta a análise das associações observacionais, sem pressupor que os procedimentos empregados permitam identificar trajetórias de fumaça, atribuir fontes emissoras específicas ou demonstrar relações causais.

O objetivo geral consiste em analisar exploratoriamente as relações entre a distribuição espacial e temporal das detecções de fogo no Amazonas, as condições meteorológicas e as concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ registradas em Manaus entre 2023 e 2025, discutindo as implicações e os limites dessas evidências para a governança dos riscos socioambientais. Especificamente, busca-se: (a) caracterizar a distribuição temporal e espacial das detecções de

fogo no Amazonas, considerando sua localização em relação a Manaus; (b) descrever a variabilidade temporal das concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ registradas pelos sensores selecionados, considerando a cobertura e as limitações dos dados; (c) examinar exploratoriamente a associação entre detecções de fogo, condições meteorológicas e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$, por meio das especificações estatísticas adotadas no estudo; e (d) discutir as implicações dos resultados e de suas incertezas para o monitoramento ambiental, a interpretação territorial dos riscos e a governança socioambiental.

Metodologicamente, desenvolve-se um estudo observacional, ecológico e quantitativo, de caráter exploratório, com dados de detecções de fogo do INPE, informações meteorológicas da estação INMET A101 e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ provenientes de três sensores PurpleAir, no período de 2023 a 2025. A análise combina caracterização descritiva, classificação espacial das detecções e comparação de modelos estatísticos, respeitando os critérios de elegibilidade e as limitações instrumentais das séries. A governança socioambiental constitui o eixo interpretativo dos achados, sem que se pretenda avaliar diretamente a efetividade de políticas públicas ou identificar a origem física das partículas observadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Queimadas, Material Particulado e Circulação Atmosférica na Amazônia

As queimadas e os incêndios florestais constituem fontes de emissão de gases e aerossóis atmosféricos, incluindo material

particulado fino ($PM_{2,5}$), cuja distribuição depende das características da combustão, das condições meteorológicas e dos processos de transporte e remoção atmosférica. Na Amazônia, a sazonalidade das precipitações, a dinâmica do uso da terra e a variabilidade climática influenciam a ocorrência do fogo e as condições de dispersão dos poluentes. Assim, a localização de uma detecção de fogo não corresponde necessariamente ao território em que seus possíveis efeitos atmosféricos serão observados, pois partículas emitidas pela queima de biomassa podem ser transportadas para áreas distantes das fontes emissoras (Longo et al., 2009; Heilman et al., 2014).

A interpretação das relações entre queimadas e qualidade do ar exige distinguir três fenômenos: a detecção de anomalias térmicas por satélite, a emissão de poluentes durante a combustão e a concentração atmosférica de partículas em determinado local. Embora relacionados, esses processos não apresentam correspondência quantitativa direta. As detecções de fogo não constituem medidas de massa emitida, enquanto as concentrações de $PM_{2,5}$ dependem também de fatores como circulação atmosférica, precipitação, deposição e contribuição de outras fontes. Consequentemente, a coincidência temporal entre registros de fogo e elevação do material particulado não permite, isoladamente, atribuir a origem das partículas a incêndios específicos (Longo et al., 2009; Reid et al., 2016).

A crise de fumaça registrada em Manaus em 2023 reforçou a relevância regional desse problema. Ferrante, Marinho e Fearnside (2025) discutem a relação entre incêndios e deterioração das condições atmosféricas na capital amazonense, enquanto Jang e Jun (2026) examinam aspectos da poluição atmosférica e do

transporte de fumaça durante aquele período. Esses estudos contribuem para fundamentar a possibilidade de influência de emissões externas sobre áreas urbanas. Entretanto, a identificação de trajetórias específicas e a quantificação da contribuição de diferentes fontes dependem de procedimentos próprios de atribuição atmosférica, não substituídos pela simples comparação entre detecções de fogo e concentrações ambientais.

A variabilidade interanual também deve ser considerada. Signori et al. (2026) relacionam diferenças nas condições de seca e na distribuição de incêndios sul-americanos, em 2023 e 2024, a combinações distintas de fatores oceânicos e climáticos. Essa perspectiva recomenda cautela na interpretação de oscilações anuais das detecções de fogo, uma vez que tais variações não podem ser atribuídas automaticamente a um único fator ambiental ou institucional.

2.2. Territorialidade dos Riscos e Interpretação das Evidências Ambientais

A dimensão territorial dos riscos associados às queimadas não se restringe aos locais onde ocorre a combustão. É necessário distinguir o território de ocorrência do fogo, as áreas potencialmente alcançadas pelos poluentes e os espaços político-administrativos responsáveis pela gestão dos riscos. Essas dimensões podem apresentar sobreposições, mas não são necessariamente coincidentes. A circulação atmosférica constitui um dos mecanismos capazes de conectar áreas emissoras e receptoras, embora a demonstração de trajetórias específicas exija evidências meteorológicas e procedimentos analíticos adequados (Longo et al., 2009; Heilman et al., 2014).

Essa distinção é especialmente relevante na interpretação de informações geoespaciais. A distribuição das detecções de fogo em relação a Manaus permite identificar padrões de localização, direção e distância, mas não define, por si só, áreas de contribuição atmosférica. Da mesma forma, a direção do vento observada em uma estação meteorológica representa uma condição local e não equivale à reconstrução do percurso das massas de ar. A integração dessas informações pode revelar associações exploratórias e orientar novas investigações, sem demonstrar automaticamente relações causais ou a origem física das partículas.

A interpretação territorial também depende da qualidade e da cobertura dos instrumentos de observação. Sensores ambientais de baixo custo ampliam as possibilidades de acompanhamento temporal do material particulado, mas suas medições exigem atenção à calibração, à disponibilidade dos registros e à representatividade espacial. Assim, a convergência entre diferentes fontes de informação pode fortalecer a caracterização de episódios ambientais, desde que sejam reconhecidas as limitações específicas de cada indicador (Reid et al., 2016; Lima et al., 2025).

Nesse sentido, a contribuição analítica da abordagem territorial consiste em reconhecer que os limites administrativos não correspondem necessariamente aos limites físicos dos fenômenos atmosféricos. Essa constatação oferece fundamento para discutir a necessidade de articulação entre monitoramento, interpretação espacial e gestão pública, sem pressupor que os dados ambientais disponíveis permitam avaliar diretamente o desempenho das instituições responsáveis pela proteção da população.

2.3. Segurança Humana e Governança Socioambiental dos Riscos

A segurança humana amplia a compreensão da proteção coletiva ao situar as pessoas e suas condições de existência no centro da análise dos riscos, incluindo ameaças ambientais que podem ultrapassar fronteiras político-administrativas. Essa perspectiva, desenvolvida pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, permite interpretar a deterioração da qualidade do ar como problema que envolve bem-estar, prevenção e capacidade de resposta, sem restringi-lo às atribuições tradicionais de controle da criminalidade (PNUD, 1994; PNUD, 2022).

No Brasil, a proteção diante dos riscos ambientais encontra fundamento no artigo 225 da Constituição Federal de 1988, que assegura o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, instituída pela Lei nº 12.608/2012, estabelece diretrizes relacionadas à prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação diante de desastres, favorecendo a articulação entre diferentes setores da administração pública (Brasil, 1988; Brasil, 2012). O Plano Nacional de Segurança Pública e Defesa Social 2021–2030 também contempla ações relacionadas à prevenção de desastres, incêndios e proteção ambiental, embora essas diretrizes gerais não comprovem a existência ou a efetividade de protocolos específicos de proteção contra episódios de $PM_{2,5}$ em Manaus (Brasil, 2021).

A governança socioambiental dos riscos pressupõe distinguir a produção de informações sobre ameaças, sua interpretação e a adoção de medidas institucionais de proteção. O monitoramento de queimadas, das condições meteorológicas e da qualidade do ar pode oferecer subsídios para decisões públicas, mas a disponibilidade de dados não demonstra, isoladamente, a emissão de alertas, sua recepção pela população ou a implementação de

respostas preventivas. No contexto amazônico, iniciativas de integração informacional, como a plataforma do Sistema Eletrônico de Vigilância Ambiental – SELVA apresentada por Lima et al. (2025), ilustram possibilidades de monitoramento regional, sem constituir evidência suficiente de resultados protetivos específicos.

Desse modo, a governança socioambiental é adotada nesta pesquisa como perspectiva de interpretação das implicações dos resultados ambientais, e não como uma hipótese adicional sobre a efetividade das políticas públicas. A distinção entre ocorrência territorial do fogo, condições atmosféricas observadas e capacidade institucional de proteção permite discutir a importância da informação ambiental para a segurança humana, preservando os limites empíricos de uma investigação baseada em registros de detecção, meteorologia e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Delineamento, Questão Analítica e Limites da Inferência

A investigação caracteriza-se como estudo observacional retrospectivo, com análise de séries temporais diárias e contextualização territorial. O recorte quantitativo abrange o período de 1º de janeiro de 2023 a 31 de dezembro de 2025, tendo Manaus como referência para as observações de qualidade do ar e meteorologia e o estado do Amazonas como abrangência principal das detecções de fogo. A análise documental e a literatura científica fundamentam a interpretação dos resultados à luz da segurança humana e da governança socioambiental, sem constituir avaliação de implementação ou efetividade de políticas públicas.

A estratégia articula três dimensões: (i) caracterização espacial e temporal das detecções de fogo; (ii) análise exploratória das relações entre detecções, condições meteorológicas e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$; e (iii) interpretação das implicações e dos limites dessas evidências para a governança dos riscos socioambientais. Não foram realizadas reconstruções de trajetórias atmosféricas, análises de composição química das partículas ou avaliações de exposição individual. Consequentemente, os procedimentos empregados não permitem atribuir fontes emissoras específicas, estabelecer relações causais ou mensurar efeitos sanitários locais.

3.2. Fontes, Unidades de Observação e Proveniência

A auditoria documental das detecções de fogo considerou três exportações anuais do Programa Queimadas do INPE: focos_br_am_ref_2023(1).csv, com 19.601 registros amazonenses; focos_br_am_ref_2024(1).csv, com 25.499 registros; e focos_br_ref_2025.csv, com 136.393 registros nacionais, dos quais 4.545 classificados como pertencentes ao Amazonas. Os arquivos apresentam informações de data, coordenadas geográficas e unidade territorial, mas não contêm campo interno que permita identificar independentemente o satélite responsável por cada detecção. A caracterização das séries como provenientes do satélite de referência depende, portanto, da documentação de sua obtenção. As contagens não representam incêndios individualizados, área queimada ou volume de emissões, tampouco foram combinadas com totais de outras plataformas de observação (INPE, s.d.).

Os dados meteorológicos foram obtidos das séries históricas de 2023 a 2025 da estação automática A101 — Manaus, disponibilizadas pelo

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), compreendendo direção e velocidade do vento, precipitação, temperatura e umidade relativa, conforme disponibilidade. As concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ foram extraídas de séries históricas da plataforma PurpleAir, referentes aos sensores Centro, Coroado e Chapada, identificados pelos códigos 161261, 161279 e 31509, com resolução temporal de 60 minutos. Os registros foram obtidos em 16 de outubro de 2026, conforme os arquivos e logs de extração, preservando os campos de umidade relativa e $PM_{2,5}$ CF1 dos canais A e B.

A proveniência meteorológica foi conferida nos arquivos INMET_N_AM_A101_MANAUS_01-01-2023_A_31-12-2023.CSV, INMET_N_AM_A101_MANAUS_01-01-2024_A_31-12-2024.CSV e INMET_N_AM_A101_MANAUS_01-01-2025_A_31-12-2025.CSV. Os cabeçalhos identificam a estação automática A101 — Manaus (latitude −3,10333333; longitude −60,01638888; altitude 61,25 m). Foram identificadas, respectivamente, 8.760, 8.784 e 8.760 linhas horárias com carimbos temporais válidos em UTC, sem duplicação de horários. Para vento (velocidade), os arquivos registram 8.636, 8.700 e 8.632 valores não ausentes; para precipitação, 8.636, 8.700 e 8.599. Os dados usam separador ponto e vírgula e vírgula decimal; a data local é obtida por conversão de UTC para America/Manaus (UTC−4), mantendo a distinção entre a data do registro e a data civil local. A contagem de linhas não implica cobertura meteorológica completa em todas as variáveis (INMET, s.d.).

Para rastreabilidade, foram preservados os nomes exatos dos seis arquivos e calculadas assinaturas SHA-256; o inventário técnico separado identifica ano, abrangência, número de registros e hash de cada arquivo. Os arquivos INPE não trazem comprovante interno de data de download; os CSVs do INMET tampouco registram

inequivocamente a data da extração. Assim, a data de obtenção desses conjuntos não foi presumida. Os metadados do sistema e a contagem dos registros foram auditados diretamente nos arquivos disponíveis, e a reexecução dos modelos a partir das matrizes intermediárias foi realizada em auditoria estatística posterior; a validação independente da procedência instrumental de cada foco permanece uma verificação distinta.

A produção científica regional também foi utilizada para situar a infraestrutura de observação existente. Lima et al. (2025) descrevem o SELVA, sistema de vigilância ambiental que integra sensores de baixo custo e dados de satélite. Essa referência sustenta a discussão sobre potencial de monitoramento, mas as medições PurpleAir aqui analisadas não foram equiparadas automaticamente aos registros da plataforma SELVA. Signori et al. (2026) contribuem para contextualizar a variabilidade climática dos incêndios em 2023–2024; seus resultados não substituem uma modelagem de circulação atmosférica específica desta pesquisa.

3.3. Tratamento Espacial e Temporal das Detecções

As coordenadas das detecções de fogo foram relacionadas a um ponto de referência em Manaus e distribuídas em oito setores azimutais de 45°: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste. Adotaram-se as coordenadas −3,119° de latitude e −60,022° de longitude. As distâncias foram estimadas por aproximação geométrica plana, com conversão das diferenças de coordenadas para radianos, correção longitudinal pelo cosseno da latitude média e raio terrestre de 6.371 km. Os azimutes foram calculados a partir dessas diferenças, no sentido horário a partir do norte, e classificados com limites em 22,5°, 67,5°, 112,5°, 157,5°, 202,5°,

247,5°, 292,5° e 337,5°, incluindo os limites inferiores no setor seguinte. Foram analisados recortes do território amazonense e áreas regionais situadas até aproximadamente 1.000 km da capital. A matriz espacial utilizada na modelagem corresponde a esse procedimento; tais delimitações são exploratórias, não representam áreas de contribuição atmosférica nem permitem identificar a origem das plumas de fumaça.

Os registros foram agregados diariamente e relacionados às séries meteorológicas e às concentrações indicativas de $PM_{2,5}$. Considerou-se que a direção registrada pelo anemômetro expressa a procedência do vento, e não seu sentido de deslocamento. As correspondências temporais e direcionais foram interpretadas como associações exploratórias, sem atribuição física de fontes, uma vez que não foram realizadas análises de trajetórias retroativas de massas de ar, modelagem de transporte atmosférico ou caracterização composicional das partículas.

3.4. Tratamento da Qualidade do Ar e Auditoria Instrumental

A série de $PM_{2,5}$ foi construída a partir das horas com observações simultâneas nos três sensores PurpleAir. A auditoria de cobertura identificou 515 dias com pelo menos 18 horas simultâneas de registros válidos: 142 em 2023, 181 em 2024 e 192 em 2025. Nesse subconjunto, as medianas anuais foram, respectivamente, 11,29, 10,46 e 4,70 $\mu g/m^3$. Esses valores estão condicionados à disponibilidade dos sensores e à seleção dos dias, não representando médias anuais de Manaus nem a exposição de toda a população.

A rastreabilidade foi verificada mediante reprocessamento independente de dez arquivos CSV horários exportados da

plataforma PurpleAir, totalizando 63.086 linhas de origem, com registros de download associados. O processamento utilizou a média dos canais $PM_{2,5}$ CF1 A e B, rejeitando observações quando a diferença absoluta entre eles superava simultaneamente 5 µg/m³ e 70% da média dos canais. Aplicou-se a correção $PM_{2,5}$ = máx(0; 0,524 × média dos canais − 0,0862 × umidade relativa + 5,75), seguida da conversão dos horários para UTC−4. Foram selecionadas horas coincidentes nos três sensores, com valores corrigidos estritamente positivos, e calculadas médias diárias para datas com pelo menos 18 horas válidas. O procedimento reproduziu 13.551 horas simultâneas e 515 dias da base histórica. A exclusão de valores corrigidos iguais a zero constitui critério operacional, não evidência de ausência física de partículas. A equação de correção empregada corresponde à formulação publicada por Barkjohn, Gantt e Clements (2021), desenvolvida com dados dos Estados Unidos; sua aplicação neste estudo não substitui a validação metrológica local.

As correlações de Pearson entre os agregados dos sensores foram elevadas (Centro–Coroado: 0,979; Centro–Chapada: 0,990; Coroado–Chapada: 0,990), considerando a identificação geográfica corrigida. Entretanto, concordância temporal não comprova calibração ou exatidão metrológica. A auditoria recuperou os registros horários dos canais A e B, os dados de umidade, os identificadores numéricos e os registros de extração, permitindo reproduzir o processamento. Identificou-se uma inversão dos rótulos Centro e Chapada na base diária intermediária, corrigida na interpretação geográfica. Na ausência de comprovação de colocalização ou calibração local com instrumento de referência, as concentrações de $PM_{2,5}$ permanecem indicativas.

3.5. Construção da Amostra Analítica e Validação Temporal

A amostra analítica principal exigiu pelo menos 22 horas simultâneas de $PM_{2,5}$ nos três sensores PurpleAir e 18 registros horários diários de direção do vento válida, com velocidade superior a 0,3 m/s, excluindo condições de calmaria. As variáveis ambientais foram integradas por data local, sem exigência de coincidência horária entre $PM_{2,5}$ e vento. Após a exclusão de observações com covariáveis ausentes, obtiveram-se 120 dias elegíveis em 2023, 153 em 2024 e 133 em 2025, totalizando 273 dias de treinamento (2023–2024) e 133 de teste temporal (2025). As variáveis defasadas foram calculadas sobre a série diária contínua, antes da seleção da amostra.

A amostra ampliada utilizou o mesmo limite mínimo de 22 horas simultâneas de $PM_{2,5}$, mas exigiu pelo menos 18 registros diários de direção do vento, sem aplicar o filtro adicional de velocidade superior a 0,3 m/s na seleção. Esse procedimento resultou em 285 dias de treinamento e 138 de teste, acrescentando 17 dias à amostra principal. Seus resultados foram reservados à análise de sensibilidade, sem combinação dos denominadores. Em 2025, a amostra principal não apresentou dias elegíveis em agosto e setembro, limitando a avaliação preditiva durante meses relevantes para a sazonalidade da fumaça.

3.6. Modelagem Exploratória e Incerteza

A variável resposta foi definida como log(1 + $PM_{2,5}$ diário indicativo). Foram estimados quatro modelos de regressão por mínimos quadrados ordinários: M0, com $PM_{2,5}$ do dia anterior, precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e termos sazonais seno e cosseno do mês; M1, acrescentando a contagem total de detecções de fogo; M2, incorporando as detecções no setor sudeste; e M3, incluindo as detecções a sudeste, a fração diária de

vento procedente do sudoeste e sua interação. As contagens de fogo foram transformadas por log(1 + x) e defasadas em um dia. Os modelos foram ajustados com dados de 2023–2024 e avaliados em 2025, utilizando a raiz do erro quadrático médio (RMSE), na escala logarítmica.

O desempenho preditivo dos modelos foi comparado por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE), calculada na escala log(1 + $PM_{2,5}$) para o período de teste de 2025. A comparação tomou M0, composto por controles meteorológicos e temporais, como especificação de referência. A inferência sobre os coeficientes utilizou erros-padrão robustos à heterocedasticidade e autocorrelação (HAC), com sete defasagens. A incerteza do desempenho relativo foi examinada por reamostragem mensal pareada dos erros quadráticos, com 5.000 replicações e intervalo de 95% obtido pelos percentis 2,5 e 97,5. A interação direcional resultou de exploração prévia de setores e critérios de seleção, não constituindo hipótese pré-registrada. Por essa razão, os resultados foram interpretados como exploratórios, sem atribuição causal ou identificação física de fontes emissoras.

A auditoria estatística reproduziu, mediante reexecução do script preservado, os quatro RMSE da Tabela 3, a composição da amostra principal (273 dias de treinamento e 133 de teste) e o procedimento de reamostragem mensal com 5.000 replicações. A comparação da matriz intermediária com a base PurpleAir validada confirmou as 515 médias diárias, suas coberturas horárias e os resultados da Tabela 2; os agregados espaciais da Tabela 1 foram reconciliados com a matriz INPE. Essa verificação assegura a reprodução dos cálculos condicionados às matrizes de entrada, mas não constitui auditoria

independente de todas as etapas de construção dos indicadores meteorológicos e direcionais.

A análise de incerteza considerou a dependência temporal dos erros. Análises exploratórias anteriores utilizaram 4.000 replicações de bootstrap circular em blocos de sete observações elegíveis, sem garantia de continuidade dos dias de calendário; essa estratégia não é equivalente à reamostragem mensal pareada adotada na avaliação principal. A seleção exploratória das interações, a sensibilidade aos critérios de calmaria e a cobertura sazonal incompleta do teste limitam a generalização do desempenho preditivo.

3.7. Integração Interpretativa e Restrições

A integração interpretativa articulou os resultados das séries ambientais à literatura sobre circulação atmosférica, territorialidade dos riscos, segurança humana e governança socioambiental. A hipótese exploratória única orientou a análise da possível dissociação entre os territórios de ocorrência do fogo e as áreas potencialmente afetadas pela poluição atmosférica. Entretanto, as informações disponíveis permitiram examinar apenas associações observacionais entre detecções de fogo, condições meteorológicas e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$, sem reconstruir trajetórias de massas de ar ou identificar a contribuição de fontes emissoras específicas. O Plano Nacional de Segurança Pública e Defesa Social 2021–2030 foi utilizado como referência institucional para discutir implicações dos resultados, sem avaliação empírica da implementação de políticas públicas. Não foram realizadas estimativas de exposição individual, efeitos sanitários locais ou capacidade efetiva de autoproteção da população.

4. RESULTADOS

4.1. Distribuição Anual e Territorial das Detecções de Fogo

A série de detecções de fogo do satélite de referência no estado do Amazonas registrou 19.601 ocorrências em 2023, 25.499 em 2024 e 4.545 em 2025 (Tabela 1; Gráfico 1). Houve aumento de 30,1% entre 2023 e 2024, seguido de redução de 82,2% entre 2024 e 2025. Essas contagens expressam registros de detecção por satélite, não correspondendo diretamente ao número de incêndios individualizados, à extensão das áreas queimadas ou ao volume de poluentes emitidos.

A classificação espacial em oito setores azimutais de 45°, tomando Manaus como referência, identificou no setor sudoeste (202,5° a 247,5°) 7.040 detecções em 2023, 10.615 em 2024 e 1.682 em 2025. Os valores diferem das contagens produzidas anteriormente com um quadrante de 90°, pois representam delimitações geométricas distintas. As faixas de distância apresentadas na Tabela 1 constituem recortes espaciais independentes da classificação direcional e não devem ser interpretadas como subdivisões do setor sudoeste.

Tabela 1. Distribuição anual das detecções de fogo por satélite no estado do Amazonas, no setor sudoeste (45°) e em faixas de distância de Manaus no período de 2023–2025

Ano	Detecções no Amazonas	Setor sudoeste (45°)	Até 100 km	100–250 km	250–50 km
2023	19.601	7.040	1.532	2.991	5.782
2024	25.499	10.615	712	1.893	8.724

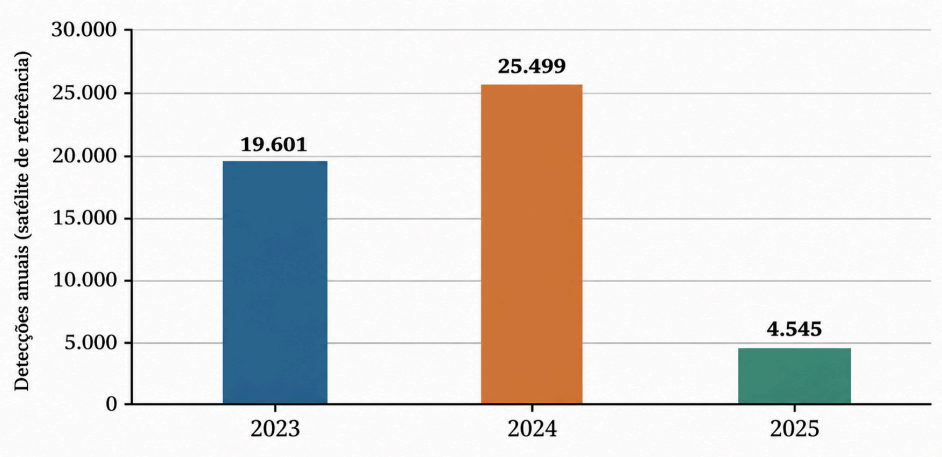
2025	4.545	1.682	280	553	1.370
Total no período	**49.645**	**19.337**	**2.524**	**5.437**	**15.876**

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/territorios-de-fogo-e-qualidade-do-ar-modelagem-exploratoria-de-pm2-5-e-desafios-da-governanca-socioambiental-em-manaus-2023-2025?noblockage

Fonte: elaboração própria com base nos arquivos de detecções do INPE analisados neste estudo (2023–2025).
Nota: os totais representam a soma das detecções registradas nos três anos. os valores correspondem a detecções por satélite, não a incêndios individualizados ou áreas queimadas. O setor sudoeste compreende azimutes de 202,5° a 247,5°, medidos a partir de Manaus. Os recortes por distância são independentes da classificação direcional e não representam trajetórias atmosféricas.

O Gráfico 1 evidencia a variabilidade interanual das detecções de fogo no Amazonas, com aumento de 30,1% entre 2023 e 2024, seguindo de redução de 82,2% entre 2024 e 2025. Essas oscilações não representam, necessariamente, variações proporcionais nas concentrações de $PM_{2,5}$ em Manaus, pois as detecções não expressam diretamente a intensidade das queimadas ou o volume de emissões. A qualidade do ar também depende do transporte e da dispersão atmosférica, das condições meteorológicas e de outras fontes poluidoras, reforçando os limites da utilização isolada desse indicador.

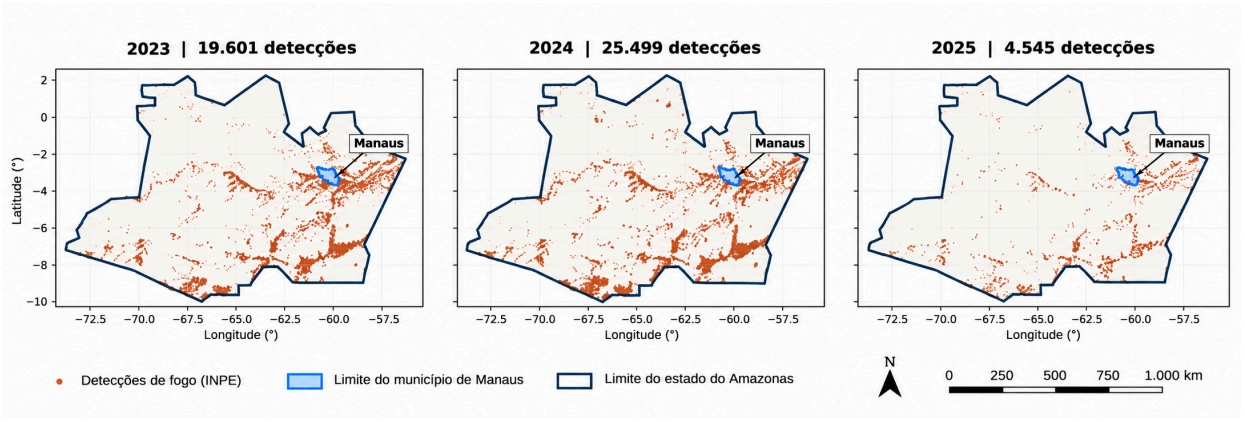
Gráfico 1. Evolução anual do número de detecções de fogo por satélite no estado do Amazonas no período de 2023–2025



Fonte: elaboração própria a partir de registros do INPE analisados neste estudo.

A Figura 1 evidencia a distribuição espacial heterogênea das detecções de fogo no Amazonas entre 2023 e 2025, com maior concentração aparente nas porções sul e sudeste do estado, especialmente ao longo de faixas territoriais próximas às divisas com outras unidades federativas. Observam-se também agrupamentos na região centro-oriental e no entorno regional de Manaus, enquanto extensas áreas do norte e noroeste apresentam menor densidade visual de registros. Essa configuração espacial, mais intensa em 2023 e 2024 e reduzida em 2025, sugere diferenças territoriais na ocorrência das detecções, mas não permite, isoladamente, identificar as fontes responsáveis pelas concentrações de $PM_{2,5}$ na capital ou reconstruir trajetórias de transporte atmosférico.

Figura 1. Distribuição espacial das detecções de fogo por satélite no estado do Amazonas, segundo o ano de ocorrência no período de 2023–2025



Fonte: elaboração própria com dados georreferenciados do INPE (2023–2025) e contorno estadual simplificado do conjunto cartográfico br-states (PPKRAUSS, s.d.; https://gist.github.com/PPKRAUSS/0c33364240e841fa23e78b21005f792c). Nota: a estrela indica a localização aproximada de Manaus; cada ponto corresponde a uma detecção por satélite, não necessariamente a um incêndio distinto. Coordenadas geográficas (EPSG:4326). A distribuição não representa trajetórias de fumaça nem comprova a origem do $PM_{2,5}$ observado em Manaus.

4.2. Qualidade do Ar: Cobertura, Concentrações Indicativas e Sazonalidade

A série comparável de $PM_{2,5}$ dos três sensores PurpleAir reuniu 515 dias com pelo menos 18 horas de observações simultâneas válidas, distribuídos em 142 dias em 2023, 181 em 2024 e 192 em 2025. Esses quantitativos corresponderam a coberturas anuais de 38,9%, 49,5% e 52,6%, respectivamente. As médias diárias indicativas foram de 18,07 µg/m³ em 2023, 15,56 µg/m³ em 2024 e 5,43 µg/m³ em 2025, enquanto as medianas alcançaram 11,29, 10,46 e 4,70 µg/m³ (Tabela 2). A diferença entre médias e medianas, especialmente em 2023 e 2024, indica assimetria na distribuição das concentrações observadas, associada à ocorrência de dias com valores elevados. Entretanto, essas estatísticas estão condicionadas à disponibilidade dos sensores e não representam concentrações médias anuais de toda a cidade ou exposição populacional.

Tabela 2. Cobertura temporal e concentrações indicativas de material particulado fino ($PM_{2,5}$) registradas simultaneamente por

três sensores em Manaus no período de 2023–2025

Ano	Dias válidos	Cobertura (%)	Média indicativa (µg/m³)	Mediana indicativa (µg/m³)
2023	142	38,9	18,07	11,29
2024	181	49,5	15,56	10,46
2025	192	52,6	5,43	4,70

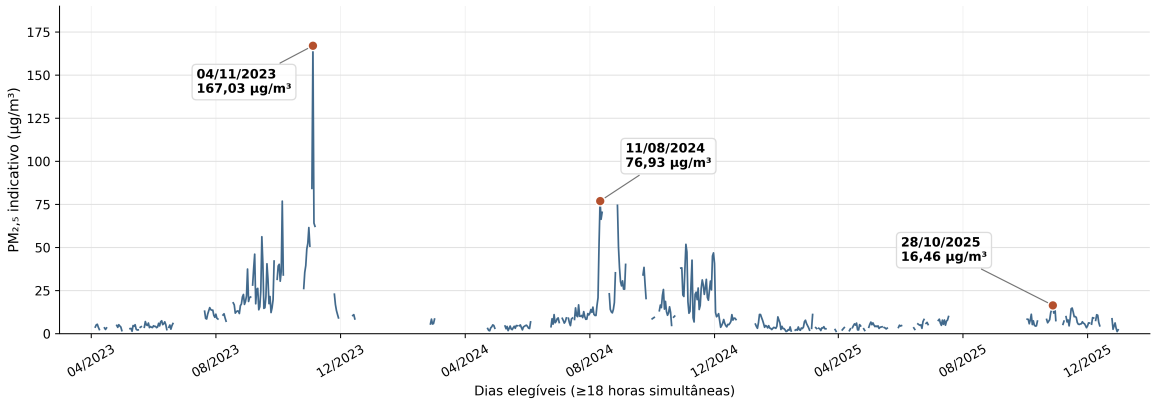
Fonte: elaboração própria a partir das séries PurpleAir processadas neste estudo.
Nota: médias e medianas calculadas a partir dos dias com pelo menos 18 horas simultâneas válidas nos três sensores. A cobertura anual é parcial, e os valores não possuem validação metrológica local documentada nem representatividade espacial para toda a cidade.

A distribuição temporal das concentrações indicativas revela episódios de valores elevados e intervalos sem observações comparáveis (Gráfico 2). Em 2025, não foram identificados dias elegíveis em agosto e setembro, mesmo na base de qualidade do ar com o critério mínimo de 18 horas simultâneas. Essa lacuna impede caracterizar diretamente as concentrações nesses meses e limita a interpretação da sazonalidade anual.

O Gráfico 2 evidencia episódios de elevação das concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ em Manaus, com máximos diários de 167,03 µg/m³ em 4 de novembro de 2023, 76,93 µg/m³ em 11 de agosto de 2024 e 16,46 µg/m³ em 28 de outubro de 2025. Embora os valores observados em 2025 sejam inferiores, a ausência de dias elegíveis em agosto e setembro limita a comparação sazonal e impede

concluir pela melhoria contínua da qualidade do ar. As lacunas não foram interpoladas, e os picos não permitem identificar, isoladamente, as fontes emissoras.

Gráfico 2. Variação diária das concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ em três sensores de Manaus, nos dias com cobertura simultânea elegível no período de 2023–2025



Fonte: elaboração própria com base em leituras PurpleAir; valores sem validação metrológica local documentada.

As correlações de Pearson entre os sensores variaram de 0,979 a 0,990, indicando comportamento temporal semelhante, sem comprovar exatidão metrológica ou representatividade espacial. Sem calibração local documentada, as concentrações permanecem indicativas.

4.3. Circulação Atmosférica, Elegibilidade e Testes Exploratórios

A integração entre as séries de $PM_{2,5}$, as variáveis meteorológicas e as detecções de fogo resultou em 406 dias elegíveis na amostra analítica principal, sendo 273 destinados ao treinamento dos modelos (2023–2024) e 133 ao teste temporal (2025). A seleção exigiu pelo menos 22 horas simultâneas de $PM_{2,5}$ e 18 registros horários de direção do vento válida, com velocidade superior a 0,3 m/s. Uma amostra ampliada, utilizada exclusivamente para análise de

sensibilidade, reuniu 423 dias, dos quais 285 corresponderam ao treinamento e 138 ao teste. Os resultados das duas amostras foram mantidos separados, em razão dos diferentes critérios de elegibilidade.

A avaliação preditiva na amostra principal apresentou RMSE de 0,291931 para o modelo de referência M0, composto por controles meteorológicos e temporais; 0,293690 para M1, com acréscimo das detecções totais de fogo; 0,295070 para M2, com detecções no setor sudeste; e 0,291449 para M3, que incorporou a interação entre detecções a sudeste e vento procedente do sudoeste (Tabela 3). Embora M3 tenha apresentado o menor erro, sua vantagem relativa em comparação com M0 foi de aproximadamente 0,17%, magnitude insuficiente para caracterizar melhoria preditiva robusta.

Tabela 3. Comparação do desempenho preditivo de quatro modelos para concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ em Manaus, na amostra principal de teste de 2025

Modelo avaliado	RMSE de log(1 + $PM_{2,5}$), teste 2025
Controles meteorológicos e temporais	0,291931
Controles + total de detecções	0,293690
Controles + detecções a sudeste	0,295070
Controles + interação detecções SE × vento SO	0,291449

Fonte: reprocessamento das matrizes auditadas, com 2025 reservado para teste.
Nota: RMSE calculado na escala log(1 + $PM_{2,5}$), com treinamento em

2023–2024 (273 dias) e teste temporal em 2025 (133 dias). Valores menores indicam menor erro preditivo; diferenças numéricas pequenas não demonstram, isoladamente, superioridade estatisticamente robusta.

A análise de incerteza, realizada por reamostragem mensal pareada com 5.000 replicações, estimou para M3 ganho médio de erro quadrático médio (MSE) de +0,000281 em relação a M0, com intervalo de 95% entre −0,004446 e +0,005114. Como o intervalo abrange zero, não foi demonstrada melhoria preditiva estatisticamente estável. O coeficiente da interação direcional foi positivo (+0,357678), mas não atingiu significância estatística convencional de 5% (p = 0,0763), considerando erros-padrão HAC. A especificação resultou de exploração prévia de setores e filtros, o que recomenda cautela adicional na interpretação inferencial.

Nas especificações examinadas, as variáveis de detecção de fogo e interação direcional não acrescentaram capacidade preditiva robusta aos controles meteorológicos e temporais. Isso não demonstra ausência de transporte de fumaça nem identifica fontes emissoras. A lacuna de agosto e setembro de 2025 limita a avaliação sazonal, e os resultados permanecem exploratórios.

4.4. Síntese Integrada dos Resultados

Os resultados evidenciaram variação interanual e heterogeneidade territorial das detecções de fogo no Amazonas, sem correspondência diretamente demonstrável com as concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ registradas em Manaus. As séries de qualidade do ar apresentaram episódios de valores elevados, mas a cobertura temporal parcial e as limitações instrumentais restringiram a

comparação entre anos, especialmente pela ausência de dias elegíveis em agosto e setembro de 2025.

Na avaliação exploratória, as variáveis de detecção de fogo e interação direcional não produziram melhoria preditiva robusta em relação aos controles meteorológicos e temporais. Em conjunto, as evidências delimitam o alcance da comparação entre distribuição territorial do fogo, condições meteorológicas e concentrações ambientais, fornecendo subsídios à discussão sobre governança dos riscos socioambientais.

5. DISCUSSÃO

5.1. Distribuição Territorial das Queimadas e Interpretação da Qualidade do Ar

A variação das detecções de fogo no Amazonas entre 2023 e 2025 evidencia a heterogeneidade temporal do fenômeno, mas não permite estabelecer correspondência direta com a intensidade das emissões ou com a exposição atmosférica em Manaus. A contagem de detecções representa uma dimensão específica da atividade do fogo, sujeita às características do sistema de observação e às condições ambientais. Além disso, a variabilidade hidroclimática e os processos de circulação atmosférica podem modificar tanto a distribuição das queimadas quanto o transporte dos poluentes. Estudos regionais destacam a importância de considerar conjuntamente as condições de seca, o uso da terra e a dinâmica atmosférica, evitando interpretações baseadas em um único indicador (Longo et al., 2009; Ferrante; Marinho; Fearnside, 2025; Signori et al., 2026).

A hipótese exploratória de dissociação entre os territórios de ocorrência do fogo e aqueles potencialmente afetados pela poluição apresenta plausibilidade física e respaldo na literatura sobre transporte de aerossóis (Heilman et al., 2014; Jang; Jun, 2026). Entretanto, os procedimentos empregados nesta pesquisa não reconstituíram trajetórias atmosféricas nem identificaram a composição ou a contribuição relativa das fontes emissoras. Portanto, a distribuição espacial das detecções e a direção local do vento não demonstram, isoladamente, a origem das partículas registradas em Manaus. Essa distinção impede interpretar a proximidade, a direção ou a coincidência temporal como evidência suficiente de transporte de fumaça entre localidades específicas.

As concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ observadas pelos três sensores permitiram caracterizar parte da variabilidade temporal da qualidade do ar, mas a cobertura incompleta restringe as comparações anuais. A ausência de dias elegíveis em agosto e setembro de 2025 é particularmente relevante, pois impede considerar a menor mediana daquele ano como demonstração de redução generalizada da exposição. Embora a literatura reconheça os efeitos adversos do material particulado fino sobre a saúde, os registros utilizados não autorizam estimar exposição individual, internações, mortalidade ou impactos sanitários atribuíveis às queimadas no município (Pope; Dockery, 2006; Yu et al., 2022). Em investigação distinta, Tadano et al. (2024) examinaram relações entre fumaça de queimadas e desfechos de saúde na bacia amazônica, sem que seus resultados possam ser transferidos diretamente para as amostras e os modelos aqui empregados.

5.2. Modelagem Exploratória e Limites da Inferência Atmosférica

A comparação temporal dos modelos M0–M3 não identificou melhoria preditiva robusta decorrente da inclusão das variáveis exploratórias de detecção de fogo e interação direcional. O modelo com interação apresentou redução relativa de aproximadamente 0,17% no RMSE em comparação ao modelo de controles, enquanto o intervalo de incerteza do ganho em erro quadrático médio incluiu zero. Esses resultados indicam que a especificação investigada não demonstrou vantagem preditiva consistente no período de teste, sem permitir concluir pela inexistência de transporte atmosférico ou pela ausência de contribuição das queimadas à poluição observada.

O resultado inconclusivo delimita o alcance de indicadores agregados de fogo e vento de superfície na representação de processos atmosféricos complexos. A direção registrada por uma estação meteorológica não descreve integralmente a circulação em diferentes altitudes, assim como as detecções por satélite não quantificam diretamente as emissões. Investigações que integrem trajetórias retroativas, reanálises meteorológicas, estimativas de emissões e observações de qualidade do ar poderão examinar com maior especificidade possíveis relações entre áreas emissoras e receptoras. A literatura sobre transporte de fumaça oferece referências metodológicas para esse aprofundamento, mas seus resultados não substituem a demonstração empírica exigida para o recorte desta pesquisa (Longo et al., 2009; Jang; Jun, 2026).

A hipótese exploratória permanece pertinente como possibilidade física, mas sua verificação exigiria procedimentos específicos de atribuição de fontes e reconstrução de trajetórias. A contribuição deste estudo está em diferenciar plausibilidade atmosférica, associação observacional e desempenho preditivo.

5.3. Segurança Humana e Governança Socioambiental dos Riscos

A interpretação dos resultados à luz da segurança humana desloca o debate da simples disponibilidade de informações ambientais para sua relevância na proteção das pessoas. O monitoramento de queimadas, das condições meteorológicas e da qualidade do ar constitui um recurso potencial para a gestão de riscos, mas a produção de dados não comprova, por si só, a emissão de alertas, a adoção de medidas preventivas ou a redução de danos. A abordagem da segurança humana permite reconhecer essa distinção entre informação, decisão e proteção, sem pressupor a efetividade de respostas institucionais que não foram examinadas empiricamente (PNUD, 1994; PNUD, 2022).

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e o Plano Nacional de Segurança Pública e Defesa Social 2021–2030 oferecem referências normativas para a prevenção de riscos, a articulação institucional e a proteção coletiva (Brasil, 2012; Brasil, 2021). No contexto amazônico, iniciativas tecnológicas de integração de sensores e dados de satélite, como a plataforma SELVA apresentada por Lima et al. (2025), ilustram possibilidades de aprimoramento do monitoramento ambiental. Entretanto, a existência de instrumentos normativos ou tecnológicos não demonstra sua cobertura, sua utilização operacional ou seus efeitos protetivos específicos em Manaus.

Os resultados apontam, assim, para a importância de informações ambientais rastreáveis, com documentação de calibração, cobertura temporal e critérios de interpretação. Também fundamentam a recomendação de maior integração entre dados de detecção de fogo, meteorologia e qualidade do ar, acompanhada de

procedimentos transparentes de comunicação dos riscos. Essas recomendações decorrem das limitações identificadas na investigação e não constituem resultados de uma avaliação de políticas públicas.

A principal contribuição interdisciplinar do artigo consiste em demonstrar que os territórios de ocorrência do fogo, os espaços potencialmente afetados pela poluição e os limites administrativos da gestão pública não devem ser tratados como dimensões automaticamente coincidentes. Reconhecer essa distinção é relevante para a segurança humana e para a governança socioambiental, sobretudo quando a interpretação de informações incompletas pode produzir conclusões indevidas sobre a origem dos poluentes, a distribuição dos riscos ou a efetividade da proteção institucional.

6. LIMITAÇÕES E VALIDADE

A principal limitação instrumental decorre da utilização de três sensores PurpleAir sem comprovação de calibração metrológica local contra equipamento de referência. Embora os registros tenham sido submetidos a procedimentos de correção e auditoria, as concentrações de $PM_{2,5}$ devem ser interpretadas como indicativas. A cobertura temporal também foi incompleta: dos 515 dias elegíveis para a caracterização descritiva, 406 integraram a amostra principal de modelagem, sem dias elegíveis em agosto e setembro de 2025. Essa lacuna restringe a comparação entre anos, particularmente durante meses relevantes para a sazonalidade regional.

As detecções de fogo do INPE não quantificam diretamente a área queimada ou as emissões atmosféricas. Da mesma forma, os registros de vento da estação INMET A101 não permitem reconstruir trajetórias tridimensionais de massas de ar. Na ausência de retrotrajetórias, análises de composição química ou procedimentos específicos de atribuição de fontes, não é possível determinar a contribuição de incêndios particulares, normalmente de caráter doméstico, para as concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ observadas em Manaus.

A modelagem teve caráter exploratório, com seleção de variáveis e interações, cobertura desigual das séries e dependência temporal dos registros. O ganho preditivo da especificação direcional não foi robusto. Os dados tampouco permitem estimar exposição individual, efeitos sanitários locais ou a efetividade de medidas institucionais de proteção, dimensões que exigiriam desenhos de pesquisa específicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou exploratoriamente as relações entre detecções de fogo no Amazonas, condições meteorológicas e concentrações indicativas de $PM_{2,5}$ em Manaus, no período de 2023 a 2025. Os resultados evidenciaram variações temporais e territoriais nas detecções, mas não estabeleceram correspondência direta entre sua distribuição espacial e as concentrações observadas na capital. Essa distinção é central para interpretar os riscos socioambientais associados às queimadas sem atribuir às informações disponíveis uma capacidade explicativa superior à efetivamente demonstrada.

As contagens anuais de detecções foram de 19.601 em 2023, 25.499 em 2024 e 4.545 em 2025. A série descritiva de qualidade do ar compreendeu 515 dias elegíveis, enquanto a modelagem principal utilizou 406 dias. Na validação temporal, a inclusão de indicadores de fogo e de interação direcional não produziu melhoria preditiva robusta. Esses achados não demonstram a origem das partículas registradas pelos sensores nem permitem concluir pela ausência de transporte de fumaça.

A hipótese exploratória de dissociação entre os territórios de ocorrência do fogo e aqueles potencialmente afetados pela poluição permanece fisicamente plausível, mas não foi comprovada por atribuição atmosférica no desenho adotado na pesquisa. A principal contribuição científica da investigação consiste em delimitar o alcance das associações observacionais e evidenciar a necessidade de distinguir detecções de fogo, condições meteorológicas locais e concentrações ambientais.

Como encaminhamento, recomenda-se documentar a procedência e a qualidade metrológica dos sensores, ampliar a rede de monitoramento de $PM_{2,5}$ em Manaus e nos municípios da Região Metropolitana e assegurar a continuidade das observações, especialmente nos meses críticos de queimadas. Recomenda-se, ainda, integrar, com rastreabilidade temporal e espacial, os dados de detecções de fogo, meteorologia e qualidade do ar, além de estabelecer registros públicos verificáveis sobre alertas ambientais e providências protetivas.

Como contribuição propositiva, introduz-se neste artigo a denominação Escudo Biocibernético de Proteção Socioambiental, o “Domo Verde”, um ecossistema sociotécnico de alerta antecipado,

dispersão dinâmica e mitigação baseada na natureza (NbS), alimentado pela Internet da Natureza (Internet of Nature - IoN) e modelagem micrometeorológica. A proposta articula a expansão territorial de sensores, a interoperabilidade entre bases ambientais e mecanismos de comunicação de riscos, com a finalidade de subsidiar respostas preventivas orientadas à segurança humana. Trata-se de uma formulação conceitual ainda não implementada ou validada, cuja viabilidade dependerá de estudos específicos sobre distribuição espacial dos equipamentos, confiabilidade metrológica, infraestrutura tecnológica, governança de dados, articulação institucional e sustentabilidade operacional.

Estudos posteriores poderão combinar modelos de transporte atmosférico, medições de referência, indicadores domiciliares e documentação institucional para investigar a origem das partículas e avaliar a tempestividade, a cobertura e a efetividade das respostas públicas. Essas recomendações decorrem das lacunas identificadas na investigação e não constituem evidência de que medidas específicas tenham sido omitidas ou executadas pelos órgãos competentes.

Declaração de Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial

Em observância às diretrizes de integridade científica previstas na Portaria CNPq nº 2.664/2026, declara-se a utilização de ferramentas de inteligência artificial no processo de elaboração deste artigo (Brasil, 2026a). As plataformas Jenni AI e SciSpace foram utilizadas como apoio à identificação de literatura científica; Grammarly, à revisão linguística; Gemini, à avaliação da coerência argumentativa; e ChatGPT (OpenAI), à organização textual, revisão acadêmica, discussão estrutural e padronização preliminar das referências. A

seleção das fontes, a validação das informações, as interpretações científicas e a responsabilidade integral pelo conteúdo final permaneceram sob responsabilidade dos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARKJOHN, Karoline K.; GANTT, Brett; CLEMENTS, Andrea L. Development and application of a United States-wide correction for PM2.5 data collected with the PurpleAir sensor. **Atmospheric Measurement Techniques,** v. 14, p. 4617–4637, 2021. DOI: https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021.

BRASIL. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026.** Institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 47, p. 4, 11 mar. 2026. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-cnpq-n-2.664-de-6-de-marco-de-2026-691779232. Acesso em: 05 nov. 2026.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 03 nov. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012.** Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: 03 nov. 2026.

BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública. **Plano Nacional de Segurança Pública e Defesa Social 2021–2030.** Brasília, DF:

Ministério da Justiça e Segurança Pública, 2021.

FERRANTE, Lucas; MARINHO, Rogerio Ribeiro; FEARNSIDE, Philip Martin. The 2023 Manaus smoke crisis and the role of highway BR-319 in a new Amazon fire cycle. **Discover Sustainability,** v. 6, art. 909, 2025. DOI: 10.1007/s43621-025-01850-1.

HEILMAN, Warren E.; LIU, Yongqiang; URBANSKI, Shawn; KOVALEV, Vladimir; MICKLER, Robert. Wildland fire emissions, carbon, and climate: plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes. **Forest Ecology and Management,** v. 317, p. 70–79, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.001.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) e dados de estações automáticas.** Brasília, DF: Instituto Nacional de Meteorologia, [s.d.]. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/. Acesso em: 03 nov. 2026.

INPE. **Programa Queimadas: monitoramento de focos de fogo ativo por satélite.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [s.d.]. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/. Acesso em: 03 nov. 2026.

JANG, Yu-Woon; JUN, Juram. Urban Air Quality Deterioration in Manaus During the 2023 Drought: Long-Range Wildfire Smoke Transport and Urban Sustainability. **Sustainability,** v. 18, n. 12, art. 6146, 2026. DOI: 10.3390/su18126146.

LIMA, Gustavo de A. et al. Uma aplicação de Internet da Natureza para monitoramento de queimadas e da qualidade do ar na Amazônia. In: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO

DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA), 2025. **Anais** [...]. Sociedade Brasileira de Computação, 2025. DOI: https://doi.org/10.5753/wcama.2025.8825.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; YOKELSON, R.; ARTAXO, P. Biomass Burning in Amazonia: Emissions, Long-Range Transport of Smoke and Its Regional and Remote Impacts. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (ed.). **Amazonia and Global Change.** Washington, DC: American Geophysical Union, 2009. DOI: 10.1029/2008GM000717.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228. Acesso em: 04 nov. 2026.

PNUD. **Human Development Report 1994: New Dimensions of Human Security.** New York: Oxford University Press, 1994.

PNUD. **New threats to human security in the Anthropocene: Demanding greater solidarity.** New York: United Nations Development Programme, 2022.

POPE III, C. Arden; DOCKERY, Douglas W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. **Journal of the Air & Waste Management Association,** v. 56, n. 6, p. 709–742, 2006. DOI: https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485.

PPKRAUSS. **br-states: conjunto cartográfico de unidades federativas brasileiras.** GitHub Gist, [s.d.]. Disponível em:

https://gist.github.com/PPKRAUSS/0c33364240e841fa23e78b21005f792c. Acesso em: 03 nov. 2026.

PURPLEAIR. **PurpleAir map: community air quality monitoring.** [S. l.]: PurpleAir, [s.d.]. Disponível em: https://map.purpleair.com/. Acesso em: 03 nov. 2026.

REID, Colleen E. et al. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. **Environmental Health Perspectives,** v. 124, n. 9, p. 1334–1343, 2016. DOI: https://doi.org/10.1289/ehp.1409277.

SIGNORI, Renato Trevisan et al. How climate variability modes influenced the fires in South America during the extreme droughts of 2023–2024. **Science of the Total Environment,** v. 1028, art. 181705, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181705.

TADANO, Yara de Souza et al. Predicting health impacts of wildfire smoke in Amazonas basin, Brazil. **Chemosphere,** v. 367, art. 143688, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143688.

YU, Pei et al. Loss of life expectancy from PM2.5 in Brazil: A national study from 2010 to 2018. **Environment International,** v. 166, art. 107350, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107350.

---

[1] Mestrando em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos pela Universidade do Estado do Amazonas - PPGSP/UEA. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação. Especialista em Segurança Pública. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0533-2459. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Mestranda em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos (PPGSP/UEA); Especialista em Licitações e Contratos – IPOG. Especialista em Direito Civil e Processo Civil – ESA-OAB/AM. Graduada em Direito pelo Centro Universitário do Norte. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3098-7772

[3] Mestrando em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos pela Universidade do Estado do Amazonas - PPGSP/UEA. Bacharel em Administração e em Direito (UNINORTE). Especialista (lato sensu) em Direito Processual pelo Centro Universitário de Ensino Superior do Amazonas (CIESA). ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2132-1451. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Mestranda em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos (PPGSP/UEA). Licenciada em Língua – Portuguesa (UFAM). Bacharel em Direito (CIESA). Ciências Militares e Segurança Pública (UEA). Especialista em Gestão Pública Aplicada à Segurança (UEA). ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1549-7737. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[5] Mestranda em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos (PPGSP/UEA). Bacharel em Direito (UNINORTE). Ciências Militares e Segurança Pública (UEA). Especialista em Gestão Pública Aplicada à Segurança (UEA). ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0716-0811. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[6] Aluna Especial do Curso de Mestrado em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos pela Universidade do Estado do Amazonas - PPGSP/UEA. Graduada em Direito pela Universidade Paulista. Especialista em Direito Processual pela Universidade do Sul

de Santa Catarina. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[7] Mestrando em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos pela Universidade do Estado do Amazonas - PPGSP/UEA. Graduado em Filosofia, Direito e Segurança Pública e do Cidadão. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5213-4584. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[8] Professor permanente do Programa de Pós-graduação em Segurança Pública, Cidadania e Direitos Humanos (PPGSP/UEA). Pós-Doutor UniSalento (Itália-2024), Doutor em Direito. Doutor em Direito (UFMG). Mestre em Direito Ambiental (PPGDA/UEA). Graduado em Direito pela Universidade da Amazônia (UNAMA/PA). ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5903-4203. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail