FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS
ESCOLA DE POLÍTICAS PÚBLICAS E GOVERNO

FERNANDA TORRES DA SILVA

DESIGUALDADES SOCIOAMBIENTAIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO À POLUIÇÃO DO AR POR RENDA E RAÇA

BRASÍLIA, DF
2025

FERNANDA TORRES DA SILVA

DESIGUALDADES SOCIOAMBIENTAIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO À POLUIÇÃO DO AR POR RENDA E RAÇA

Dissertação apresentada à Escola de Políticas Públicas e Governo da Fundação Getulio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Políticas Públicas e Governo

Área de concentração: Políticas Públicas e Governo

Orientador: Prof. Dr. Weeberb João Réquia Junior

BRASÍLIA, DF

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas/FGV

Silva, Fernanda Torres da.
Desigualdades socioambientais no Brasil : uma análise da exposição à poluição do ar por renda e raça / Fernanda Torres da Silva. - 2025.
76 f.

Orientador: Weeberb João Réquia Júnior.
Dissertação (mestrado MPPG) – Fundação Getulio Vargas, Escola de Políticas Públicas e Governo.

1. Justiça ambiental. 2. Igualdade. 3. Ar - Poluição. 4. Brasil - Relações raciais. 5. Renda. 6. Disparidades regionais. I. Réquia Júnior, Weeberb João. II. Dissertação (mestrado MPPG) – Escola de Políticas Públicas e Governo. III. Fundação Getulio Vargas. IV. Título.

CDU 316.344

Ficha Catalográfica elaborada por: Isabele Oliveira dos Santos Garcia CRB SP-010191/O

FERNANDA TORRES DA SILVA

DESIGUALDADES SOCIOAMBIENTAIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO À POLUIÇÃO DO AR POR RENDA E RAÇA

Dissertação apresentada à Escola de Políticas Públicas e Governo da Fundação Getulio Vargas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Políticas Públicas e Governo.

Área de Concentração: Políticas Públicas e Governo

Data de aprovação: 12 / 09 / 2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Weeberb João Réquia Junior (orientador)

FGV- Escola de Políticas Públicas e Governo

Prof. Dr. Lizandro Lui

FGV - Escola de Políticas Públicas e Governo

Prof. Dr. Leandro de Carvalho

UNB – Universidade de Brasília

RESUMO

Esta pesquisa analisa, sob a perspectiva da justiça ambiental, a relação entre a exposição ao material particulado fino ($PM_{2.5}$) e as desigualdades socioeconômicas e raciais no Brasil, utilizando dados do Censo Demográfico de 2022 e séries históricas de $PM_{2.5}$ referentes ao período de 2003 a 2024.A análise foi realizada no nível de setor censitário, a menor unidade territorial disponível. Foram conduzidas análises descritivas, teste de correlação de Spearman, modelos de agrupamento (clusters) e Modelos Aditivos Generalizados (GAM), com estratificação por quintis de renda e cor/raça. Os resultados indicam que a renda está fortemente associada aos níveis de $PM_{2.5}$, de modo que aumentos na renda média tendem a se relacionar com maiores concentrações do poluente. Esse padrão reflete a predominância de grupos de maior renda nos grandes centros urbanos, onde também se concentram as principais fontes emissoras. Em relação ao componente racial, os Modelos Aditivos Generalizados demonstraram que a exposição ao $PM_{2.5}$ se manifesta de forma não linear e vinculadas ao território, evidenciando os padrões de vulnerabilidade ambiental estão correlacionados ao perfil racial, à renda e à localização geográfica, reforçando dinâmicas históricas de exclusão e injustiça ambiental que incidem, sobretudo, sobre populações negras, indígenas e periféricas.

Palavras-Chave: injustiça ambiental; $PM_{2.5}$; desigualdade racial; rendimento médio; poluição do ar.

ABSTRACT

This research analyzes, from the perspective of environmental justice, the relationship between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) exposure and socioeconomic and racial inequalities in Brazil, using data from the 2022 Demographic Census and historical $PM_{2.5}$ series covering the period from 2003 to 2024. The analysis was conducted at the census-tract level, the smallest available territorial unit. Descriptive analyses, Spearman correlation tests, cluster models, and Generalized Additive Models (GAM) were performed, with stratification by income and race/color quintiles. The results indicate that income is strongly associated with $PM_{2.5}$ levels, such that increases in average income tend to be related to higher pollutant concentrations. This pattern reflects the predominance of higher-income groups in major urban centers, where the main emission sources are also concentrated. Regarding the racial component, the Generalized Additive Models showed that exposure to $PM_{2.5}$ manifests in a non-linear and territorially conditioned manner, evidencing that patterns of environmental vulnerability are correlated with racial profile, income, and geographic location. These findings reinforce historical dynamics of exclusion and environmental injustice that disproportionately affect Black, Indigenous, and peripheral communities.

Keywords: environmental justice; $PM_{2.5}$; racial inequality; household income; census tracts; air pollution.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recommended annual AQG level and interim targets for $PM_{2.5}$ 23
Tabela 2 – Estatísticas descritivas dos clusters de concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) por setor 54
Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos clusters de renda_*log* e $PM_{2.5}$ 56
Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos clusters raça e $PM_{2.5}$ 58
Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos clusters $PM_{2.5}$, renda e raça 60
Tabela 6 – Modelos Aditivos Generalizados: associação entre quintis de renda e concentração média de $PM_{2.5}$ 62
Tabela 7 – Resultados do Modelo 2B: associação entre quintis da proporção de responsáveis brancos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) 63
Tabela 8 – Resultados do Modelo 2C: associação entre quintis da proporção de responsáveis pretos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) 64
Tabela 9 – Resultados do Modelo 2D: associação entre quintis da proporção de responsáveis pardos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) 65
Tabela 10 – Resultados do Modelo 2E: associação entre quintis da proporção de responsáveis indígenas por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) 65
Tabela 11 – Resultados do Modelo 2F: associação entre quintis da proporção de responsáveis amarelos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) 66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dicionário de dados agregados por setor censitário 31
Figura 2 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ - Norte (2003–2022) 33
Figura 3 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Sul (2003–2022) 37
Figura 4 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Sudeste (2003–2022) 40
Figura 5 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Centro-Oeste (2003–2022) 43
Figura 6 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de PM 2.5 – Nordeste (2003–2022) 46
Figura 7 – Matriz de correlação de Spearman 49
Figura 8 – Distribuição espacial dos clusters de $PM_{2.5}$ 53
Figura 9 – Clusters de concentração média de $PM_{2.5}$ no Brasil (2003–2022) 55
Figura 10 – Clusters ($PM_{2.5}$ + Perfil Racial) 57
Figura 11 – K-means ($PM_{2.5}$ + Perfil Racial + Renda) 59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução histórica do $PM_{2.5}$ - Norte (2003 – 2024) 32
Gráfico 2 – Renda dos responsáveis – Região Norte (por raça predominante) 34
Gráfico 3 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Sul (2003–2024) 36
Gráfico 4 – "Renda dos responsáveis – Região Sul (por raça predominante) 38
Gráfico 5 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Sudeste (2003–2024) 39
Gráfico 6 – Renda dos responsáveis – Região Sudeste (por raça predominante) 41
Gráfico 7 – Renda dos responsáveis – Região Sudeste (por raça predominante) 42
Gráfico 8 – Renda dos responsáveis – Região Centro-Oeste (por raça predominante) 44
Gráfico 9 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Nordeste (2003–2024) 45
Gráfico 10 – Renda dos responsáveis – Região Nordeste (por raça predominante) 47
Gráfico 11 – Elbow – Poluição (amostra 10 000) 52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Padrões de qualidade do ar 23
Quadro 2 – Resultado do teste realizado no R..... 48

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**12**
1.1	PROBLEMA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**	**17**
2.1	JUSTIÇA AMBIENTAL: ORIGEM E CONCEITOS FUNDAMENTAIS	17
2.2	MATERIAL PARTICULADO FINO ($PM_{2.5}$) E SUAS CARACTERÍSTICAS	21
2.3	$PM_{2.5}$ - IMPACTOS PARA A SAÚDE	24
2.4	$PM_{2.5}$ - EFEITOS SOBRE A MOBILIDADE ECONÔMICA E JUSTIÇA SOCIAL	26
3	**METODOLOGIA**	**29**
3.1	DADOS	30
3.2	ANÁLISE DESCRITIVA DAS REGIÕES	31
3.2.1	Região Norte	31
3.2.2	Região Sul	35
3.2.3	Região Sudeste	38
3.2.4	Região Centro-Oeste	41
3.2.5	Região Nordeste	44
4	**INTERAÇÃO ENTRE POLUIÇÃO DO AR, RENDA E RAÇA.**	**48**
4.1	TESTE SHAPIRO-WILK	48
5	**ANÁLISE DE CLUSTER COM VARIÁVEIS SOCIOECONÔMICAS E POLUIÇÃO**	**51**
5.1	ANÁLISE DE CLUSTER - POLUIÇÃO E RENDA	54
5.2	ANÁLISE DE CLUSTER POLUIÇÃO E PERFIL RACIAL	56
5.3	ANÁLISE DE CLUSTER POLUIÇÃO, PERFIL RACIAL E RENDA	59
6	**MODELO ADITIVO GENERALIZADO**	**62**
7	**CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**	**68**
7.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO E SUGESTÕES DE PESQUISAS	71
	REFERÊNCIAS	**72**

1 INTRODUÇÃO

As relações entre desenvolvimento socioeconômico, poluição do ar e justiça ambiental constituem um dos principais desafios da atualidade, especialmente em países marcados por profundas desigualdades sociais históricas. No Brasil, a dinâmica entre crescimento econômico, poluição do ar, degradação ambiental, desigualdades sociais e raciais apresenta padrões distintos entre as regiões. A distribuição dos riscos ambientais e dos benefícios do desenvolvimento econômico também ocorre de forma desigual, refletindo padrões históricos de exclusão que afetam desproporcionalmente grupos populacionais já vulnerabilizados (Acselrad, 2002).

À luz da teoria da justiça como equidade, Rawls defende que uma sociedade é justa quando sua organização assegura, com precedência lexical, liberdades básicas iguais a todas as pessoas. Porém, reconhecendo que as sociedades são desiguais, o autor afirma que estas só se justificam se atenderem ao segundo princípio de sua teoria, composto por duas partes: Justa igualdade de oportunidades, ou seja, cargos e posições não devem ser apenas formalmente abertos, mas efetivamente acessíveis a todos, mediante arranjos que compensem as desvantagens de certos grupos. Já no princípio da diferença o autor defende que arranjos sociais e econômicos devem melhorar ao máximo a situação dos menos favorecidos, definidos pela posse de bens primários sociais. Dessa teoria decorre a necessidade de um compromisso contínuo de aperfeiçoamento institucional e de políticas públicas voltadas a correção das desigualdades, fundamentadas no reconhecimento das diferenças (Rawls, 2016).

Fazendo uma correlação da teoria de Rawls com o campo ambiental, o desenvolvimento econômico sustentável só será justo se as políticas públicas forem desenvolvidas de modo a corrigir desigualdades desproporcionais decorrentes dos impactos ambientais desse processo. Em uma perspectiva rawlsiana, isso implica assegurar que bens e serviços ambientais sejam efetivamente acessíveis a todos, além de priorizar os grupos mais vulneráveis aos efeitos da degradação ambiental na alocação de investimentos, na regulação e no controle de emissões, de forma a reduzir a concentração dos impactos ambientais sobre populações e territórios historicamente vulnerabilizados.

Em contextos como o brasileiro, marcados por desigualdades, os impactos ambientais expõem desproporcionalmente populações historicamente vulnerabilizadas à poluição, à degradação, a condições não ideais de saneamento e moradia, ao mesmo tempo em que fatores econômicos e, não raro, institucionais limitam a capacidade de mitigação e prevenção desses impactos. Nessa direção, a Teoria da Justiça Ambiental nos ajuda a compreender melhor as

relações entre meio ambiente e justiça, ao articular quatro dimensões interdependentes: a distributiva, que busca garantir a repartição equitativa de bens e ônus ambientais; a do reconhecimento das desigualdades, que demanda considerar identidades, territórios e vulnerabilidades historicamente invisibilizadas; a dimensão participativa, que procura assegurar a participação, informação e controle social nas decisões de políticas públicas; e a dimensão reparatória e de capacidades, que envolve medidas de correção, compensação e fortalecimento dos institucionais para a proteção prioritária dos grupos mais expostos. A articulação entre a ideia de igualdade de oportunidades e a prioridade que deve ser dada às populações em situação de maior vulnerabilidade sustenta a criação de políticas públicas voltadas a concentração esforços e recursos nos contextos em que as cargas ambientais e as vulnerabilidades são maiores (Schlosberg, 2007).

Nesse sentido, para a formulação e implementação de públicas mais eficazes, é indispensável que estas sejam orientadas por evidências, o que, no contexto dessa pesquisa, exige identificar onde e quem suporta os maiores impactos da poluição. Assim, este estudo propõe uma contribuição inovadora ao examinar, no contexto brasileiro, a relação entre a exposição ao material particulado fino ($PM_{2.5}$) e as desigualdades socioeconômicas e raciais. Com base em dados no nível de setor censitário (renda média dos responsáveis pelos domicílios, composição racial e médias anuais de $PM_{2.5}$), foram mapeados padrões territoriais de poluição, desigualdades econômicas e raciais. Ao preencher uma lacuna ainda pouco explorada na literatura nacional, os resultados buscam subsidiar políticas públicas voltadas à alocação de recursos e a medidas para melhoria da qualidade do ar especialmente em áreas críticas de modo a priorizar grupos em maior vulnerabilidade.

Diante desse cenário, a hipótese central deste estudo é de que a distribuição da poluição atmosférica por $PM_{2.5}$ no Brasil é condicionada por desigualdades socioeconômicas e raciais que estruturam o território nacional. Parte-se do pressuposto de que regiões mais pobres recebem historicamente menor atenção de políticas públicas voltadas à redução da poluição do ar, o que leva setores censitários de menor renda a apresentem níveis mais elevados de exposição. De modo semelhante, considera-se que a composição racial dos territórios também influencia a qualidade ambiental: áreas com maior presença de populações pretas e pardas, historicamente vulnerabilizadas e menos contempladas por políticas de proteção ambiental, tendem a registrar piores condições de qualidade do ar. Assim, a hipótese que orienta esta pesquisa é a de que a renda e o perfil racial dos territórios influenciam os níveis de poluição,

evidenciando a sobreposição entre desigualdades socioeconômicas, raciais e a insuficiência de políticas públicas efetivas que garantam justiça ambiental.

A opção por investigar os efeitos da exposição ao $PM_{2.5}$ sobre a renda justifica-se pelo fato de esse poluente ser considerado um dos principais problemas ambientais e de saúde pública da atualidade. O $PM_{2.5}$ está associado a uma ampla gama de problemas de saúde, ao aumento da mortalidade, e ao comprometimento da qualidade de vida em escala global (WHO, 2021). Entretanto, seus efeitos não se distribuem de forma homogênea na sociedade, populações socialmente vulnerabilizadas e grupos racializados tendem a estar mais expostos a concentrações elevadas do poluente, acumulando desvantagens que ultrapassam a esfera da saúde e repercutem também no campo socioeconômico (Colmer; Voorheis; Williams, 2022).

Com o objetivo de compreender essa dinâmica, apresenta-se, inicialmente, uma revisão da literatura que reúne evidências sobre os efeitos nocivos do $PM_{2.5}$ na saúde, na economia e nas condições sociais, além de sistematizar as recomendações nacionais e internacionais sobre níveis seguros de exposição ao poluente. Nessa mesma seção, discute-se ainda a teoria da Justiça Ambiental, que fornece o marco analítico para a investigação. Na sequência, detalha-se a metodologia empregada, destacando as técnicas estatísticas e os procedimentos de análise adotados. Posteriormente, realiza-se uma análise descritiva para cada região do país, contemplando a série histórica dos níveis de exposição ao $PM_{2.5}$ entre 2003 e 2024, a composição racial dos responsáveis pelos domicílios e a renda média dos setores censitários, considerando a predominância racial em cada setor. Em seguida, são apresentados os resultados das análises estatísticas, que buscam evidenciar as associações entre níveis de poluição, renda e raça. Por fim, a última seção reúne os principais resultados, discute as limitações do estudo e apresenta sugestões para pesquisas futuras.

1.1 PROBLEMA

Existe ampla produção científica, especialmente em âmbito internacional, que relaciona a exposição ao $PM_{2.5}$ a impactos negativos na saúde. Em menor escala, encontram-se pesquisas que analisam seus efeitos sobre a economia. No contexto brasileiro, porém, são ainda mais escassos os estudos que investigam as relações entre poluição atmosférica, desigualdades socioeconômicas, raciais e territoriais.

Essa lacuna é particularmente preocupante em um país marcado por profundas desigualdades estruturais, onde populações de menor renda e grupos racializados tendem a estar mais expostos a níveis elevados de poluição, seja nos longos deslocamentos cotidianos por áreas

de tráfego intenso, seja no próprio ambiente de trabalho, frequentemente localizado em centros urbanos e industriais. (Brasil, 2021). Soma-se a isso a menor capacidade de mitigação desses grupos, seja pela ausência de infraestrutura adequada, pela precariedade no acesso a serviços essenciais de saúde ou pela omissão histórica do poder público. No contexto brasileiro, essa sobreposição de vulnerabilidades não apenas intensifica os efeitos adversos da poluição atmosférica, mas também contribui para a reprodução e o agravamento das desigualdades socioeconômicas e raciais, comprometendo a efetivação de direitos fundamentais, como saúde, bem-estar e justiça social.

Diante disso, esta pesquisa busca responder à seguinte questão central: de que forma a exposição ao material particulado fino ($PM_{2.5}$) se relaciona com a renda dos responsáveis pelos domicílios no Brasil, considerando as desigualdades raciais e socioeconômicas que estruturam o território brasileiro?

Responder a essa questão envolve compreender, de forma interseccional, as relações entre poluição atmosférica, renda, raça e território. Pretende-se, assim, produzir evidências que orientem a formulação de políticas públicas e fortaleçam estratégias de enfrentamento das desigualdades socioambientais, de maneira mais precisa e alinhada às especificidades regionais e sociais.

1.2 **Objetivos**

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os padrões de associação entre exposição aos $PM_{2.5}$ e renda domiciliar no Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar os níveis médios anuais de exposição ao $PM_{2.5}$ nos setores censitários do Brasil, para o período de 2003 a 2024, bem como a média acumulada entre 2003 e 2022.
- Analisar o perfil racial e de renda dos responsáveis pelos domicílios no Brasil, por setor censitário, no ano de 2022, com base nos dados do Censo Demográfico do IBGE, identificando diferenças na distribuição espacial desses indicadores.
- Analisar a relação entre a exposição ao $PM_{2.5}$ e a renda dos responsáveis pelos domicílios, incorporando interações com variáveis raciais e regionais.

- Identificar padrões de desigualdade socioambiental resultantes da interação entre poluição atmosférica, renda, raça e território, destacando contextos de maior vulnerabilidade.
- Propor recomendações que subsidiem a formulação de políticas públicas intersetoriais, voltadas à mitigação das desigualdades socioambientais aliado ao desenvolvimento social sustentável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os principais marcos teóricos que fundamentam a pesquisa, organizados em três eixos analíticos. O primeiro discute a Teoria da Justiça Ambiental, essencial para compreender como raça, classe social e território se articulam na produção e reprodução das desigualdades socioambientais.

Em seguida, são apresentadas as características do material particulado fino ($PM_{2.5}$), suas principais fontes de emissão e os efeitos adversos decorrentes da exposição prolongada. As evidências científicas apontam impactos significativos sobre a saúde humana, como o aumento da mortalidade prematura e a incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, confirmando que o $PM_{2.5}$ é um dos poluentes atmosféricos mais nocivos à saúde.

Por fim, apresenta-se a produção científica dedicada a investigar a relação entre o $PM_{2.5}$ e as desigualdades socioeconômicas. As evidências apontam que a exposição prolongada ao $PM_{2.5}$ não apenas compromete a saúde, mas também está diretamente relacionada à redução da mobilidade econômica intergeracional, à limitação do desenvolvimento educacional e a menores níveis de produtividade no trabalho. O $PM_{2.5}$ produz impactos que ultrapassam a área ambiental e de saúde. Em níveis elevados, também é um fator estruturante de desigualdades, comprometendo o desenvolvimento socioeconômico justo.

2.1 JUSTIÇA AMBIENTAL: ORIGEM E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A constatação de que a poluição, além de afetar severamente a saúde, pode atuar como um mecanismo de perpetuação das desigualdades socioeconômicas, conforme demonstra a literatura recente, evidencia a necessidade de compreender esses fenômenos sob uma perspectiva ampliada, que vá além dos impactos imediatos à saúde e considere também seus desdobramentos sociais, econômicos e políticos. Nesse sentido, o conceito de justiça ambiental surge como teoria fundamental para explicar a distribuição desigual dos riscos e impactos ambientais entre diferentes grupos populacionais, reconhecendo que tais desigualdades são resultados de processos históricos e estruturais que estruturam as sociedades.

Sendo assim, entre as décadas de 1970 e 1980, surgiu, nos Estados Unidos, o conceito de Justiça Ambiental, formulado como resposta a uma série de mobilizações sociais que denunciavam a distribuição desigual dos riscos ambientais entre diferentes raças. Esse movimento, liderado por comunidades negras, latinas e de baixa renda, evidenciou que os impactos negativos de atividades poluidoras eram sistematicamente direcionados a populações

racializadas, sem que estas tivessem participação efetiva nos processos decisórios que autorizavam à instalação de empreendimentos potencialmente perigosos em seus bairros.

O marco conceitual dessa teoria foram os trabalhos de Robert Bullard (1983, 1993, 1999), reconhecido como referência fundamental na consolidação do campo. Suas pesquisas demonstraram empiricamente como a localização de aterros sanitários, indústrias poluidoras e zonas de sacrifício ambiental seguia padrões de segregação racial e socioeconômica nos Estados Unidos.

No artigo The Threat of Environmental Racism, Bullard (1993) destaca que comunidades racializadas enfrentam, de forma desproporcional, riscos ambientais e à saúde resultantes de políticas públicas e práticas econômicas que além de degradarem o meio ambiente, reforçam padrões históricos de exclusão e desigualdade. O autor analisa a localização de instalações de resíduos tóxicos, as decisões de uso e ocupação do solo e a exclusão sistemática de pessoas negras dos processos de tomada de decisão. O texto enfatiza o caráter histórico e estrutural dessas desigualdades, evidenciando como raça e status econômico se sobrepõem na produção e reprodução das vulnerabilidades sociais e ambientais.

Anos depois, em seu artigo Dismantling Environmental Racism in the USA, publicado em 1999 na revista Local Environment, Bullard (1993) aprofunda essa discussão ao afirmar que desigualdades ambientais e sociais estão entrelaçadas, uma vez que comunidades de baixa renda e grupos racializados são desproporcionalmente afetados por políticas públicas, decisões de planejamento urbano e práticas econômicas que perpetuam a exclusão e a injustiça ambiental. Os riscos ambientais aos quais esse grupo está exposto não se limita ao seu local de moradia, mas também em seus espaços de lazer e trabalho, atravessando diferentes áreas de suas vidas.

Além disso, o autor analisa o papel dos movimentos sociais de base, que nas décadas de 1980 e 1990 começaram a se organizar de forma mais incisiva contra o racismo ambiental. Esses grupos pressionaram o governo federal norte-americano a revisar práticas pouco participativas e a ampliar a participação popular na formulação e fiscalização de políticas ambientais. Bullard (1993) ressalta que, a partir dessas mobilizações, o conceito de ambientalismo passou a incorporar princípios de justiça social e direitos civis, rompendo com a visão tradicional das agendas dos movimentos ambientais.

Outros estudos também buscaram evidenciar a relação entre poluição, desigualdade social e justiça ambiental, destacando os impactos da exposição desigual à poluição atmosférica em populações racializadas e de baixa renda. Entre essas contribuições, o livro de Cole e Foster (2001) analisa criticamente o movimento por justiça ambiental nos Estados Unidos,

demonstrando, por meio de estudos de caso, como comunidades historicamente marginalizadas enfrentam, de forma sistemática, os efeitos de atividades poluidoras. Os autores demonstram que os padrões de injustiça ambiental estão ligadas à segregação racial residencial nos EUA, ao legado das leis de zoneamento urbano e à exclusão das comunidades negras e latinas dos processos decisórios sobre o uso do solo e a localização de empreendimentos poluentes. Ademais, apontam que esse padrão de exclusão é reproduzido devido a concentração de indústrias tóxicas em áreas de baixo valor imobiliário habitadas principalmente por minorias raciais, a pressão de grupos econômicos na formulação das políticas ambientais e a persistente desigualdade de acesso à informação, à justiça e à participação política efetiva.

Complementando essa perspectiva, Mohai, Pellow e Roberts (2009), no artigo Environmental Justice, realizam uma revisão abrangente de estudos de caso centrados na atuação de movimentos sociais por justiça ambiental nos Estados Unidos. Os autores destacam os desafios metodológicos envolvidos na análise da distribuição desigual dos riscos ambientais, especialmente devido à limitação de informações, que na maioria das vezes são provenientes de diferentes fontes e escalas geográficas diferentes, como CEPs, setores censitários ou círculos concêntricos, em torno de instalações poluidoras ou populações expostas. Além disso, argumentam que, embora existam estudos voltados à mensuração dos efeitos da poluição sobre a saúde, ainda são escassas as pesquisas que integram essas dimensões com dados desagregados por raça e renda. Tal lacuna se deve, em grande parte, à dificuldade de acesso a dados adequados e à complexidade de isolar os efeitos da poluição em contextos marcados por múltiplas vulnerabilidades, como habitação precária, insegurança alimentar, violência urbana e limitações no acesso a serviços essenciais.

Nesse sentido, os conceitos de Justiça Ambiental e Racismo Ambiental consolidaram-se como referenciais teóricos centrais para compreender a distribuição desigual de riscos e impactos ambientais entre diferentes grupos sociais. Essas desigualdades podem se expressar tanto na exposição desproporcional de populações racializadas, comunidades de baixa renda e outros grupos vulnerabilizados a níveis mais elevados de poluição quanto na baixa capacidade de mitigação dos efeitos dessa exposição.

No Brasil, essa discussão assume contornos específicos. Autores como Porto, Pacheco e Leroy (2013), Pacheco (2008) e Acselrad, Mello e Bezerra (2009) demonstram que a injustiça ambiental está profundamente ligada às desigualdades históricas de classe, raça e território, refletindo-se na maior exposição de comunidades periféricas e de populações indígenas, negras e ribeirinhas aos riscos ambientais. Esses grupos não apenas enfrentam níveis mais elevados de

poluição e degradação ambiental, como também dispõem de menor capacidade institucional, política e econômica para se proteger e resistir aos agentes responsáveis pela degradação. Assim, o conceito de justiça ambiental, no contexto brasileiro, torna-se central para compreender como processos de urbanização excludente, expansão das fronteiras agrícolas e ausência de políticas ambientais direcionadas aos grupos e regiões mais vulnerabilizadas contribuem para a reprodução de desigualdades.

Na obra O que é justiça ambiental (2009), no capítulo "Indicadores da desigualdade ambiental", os autores destacam o desenvolvimento de pesquisas no Brasil voltadas à identificação de sobreposições entre degradação ambiental e exclusão social. Essas pesquisas têm avançado ao reconhecer que os riscos ambientais afetam de forma mais intensa e se multiplicam em áreas habitadas por populações de baixa renda.

O capítulo também analisa experiências empíricas como o mapeamento das áreas de risco em São Paulo, que revela a forte relação entre altos índices de exclusão social e ocorrência de desastres ambientais, como deslizamentos de terra. Dados do Censo e surveys realizados pelo CEM-Cebrap mostram que domicílios pobres estão desproporcionalmente próximos a cursos d'água e sofrem com piores condições sanitárias e estruturais, como ausência de coleta de lixo, presença de vetores de doenças e falta de saneamento básico. A obra conclui que os riscos ambientais, longe de serem distribuídos aleatoriamente, recaem de forma sistemática sobre populações racializadas e empobrecidas, o que torna urgente o desenvolvimento de indicadores que revelem tais injustiças e orientem políticas públicas mais equitativas.

Outro conceito relevante é o de hiperperiferia, proposto por Torres e Marques (2001), que a define como territórios urbanos marcados por múltiplas camadas de vulnerabilidade, caracterizados por infraestrutura precária, baixa renda, longas distâncias até o trabalho e exposição cumulativa a riscos, como inundações, deslizamentos e desabastecimento de água. Esses estudos evidenciam que o ambiente urbano não é neutro, mas reflete desigualdades estruturais e processos históricos de exclusão.

Assim, ao transpor os conceitos de justiça ambiental para o contexto brasileiro, torna-se possível compreender como as desigualdades históricas de classe, raça e território também se manifestam nos impactos da exposição a poluentes atmosféricos.

Essa perspectiva é particularmente relevante para analisar a relação entre poluição do ar e desigualdade social, pois permite investigar de que forma a exposição acumulada ao $PM_{2.5}$ se relaciona com o rendimento da população e como esses efeitos se distribuem de maneira diferenciada segundo a composição racial predominante nos setores censitários. Essa

abordagem busca evidenciar a interseção entre qualidade do ar e justiça social, reforçando a importância de políticas públicas orientadas para a equidade. Nesse sentido, a justiça ambiental não se limita aos impactos diretos da poluição sobre a saúde humana, mas abrange também processos históricos de exclusão política e de violação de direitos.

2.2 MATERIAL PARTICULADO FINO ($PM_{2.5}$) E SUAS CARACTERÍSTICAS

A poluição atmosférica representa uma das principais ameaças à saúde pública, em razão de sua relevante contribuição para a incidência de múltiplas doenças. Dentre os poluentes presentes na atmosfera, destacam-se o dióxido de nitrogênio (NO_2), o ozônio (O_3), o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de enxofre (SO_2). Entretanto, o $PM_{2.5}$, partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 μm, e o PM_{10} , partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 μm, apresentam impactos muito significativos sobre a saúde, estando associados a uma alta carga de doenças decorrentes tanto da exposição curta quanto da exposição prolongada. Devido ao seu tamanho extremamente reduzido, essas partículas não são visíveis a olho nu, permanecem por longos períodos na atmosfera e podem ser transportadas por grandes distâncias, contribuindo para a poluição atmosférica em escala regional e global (Thangavel; Park; Lee, 2022).

O Material Particulado é classificado em três categorias principais: PM_{10} , $PM_{2.5}$ e partículas ultrafinas, $PM_{0.1}$, menor ou igual a 0,1 μm. O $PM_{2.5}$, devido ao seu reduzido tamanho, possui elevada capacidade de penetração no sistema respiratório, alcançando os alvéolos pulmonares e, em algumas situações, atingindo a corrente sanguínea, o que potencializa seus efeitos tóxicos e graves para a saúde. Sua composição é heterogênea, abrangendo sulfatos, nitratos, metais, carbono elementar, carbono orgânico e diferentes substâncias tóxicas aderidas à superfície das partículas. (Thangavel; Park; Lee, 2022).

O $PM_{2.5}$, apresenta grande área superficial em relação ao volume, o que facilita a absorção de compostos tóxicos e metais pesados no organismo. Além disso, devido ao baixo peso, essas partículas permanecem suspensas por longos períodos, aumentando sua dispersão e, consequentemente, a exposição humana (Thangavel; Park; Lee, 2022).

Quantificar de forma sistemática e contínua os níveis de $PM_{2.5}$ em todas as regiões do país é essencial para subsidiar as estratégias de controle da poluição. No Brasil, o Instituto de Energia e Meio Ambiente desenvolveu a Plataforma da Qualidade do Ar, que organiza e disponibiliza dados para apoiar a tomada de decisão do governo e estimular a produção de evidências sobre o tema. Contudo, é importante destacar que a responsabilidade pelo

monitoramento da qualidade do ar, incluindo o acompanhamento das concentrações de $PM_{2.5}$, recai sobre os órgãos ambientais estaduais, o que gera uma rede fragmentada de informações e dificulta a construção de um diagnóstico nacional completo. Essa limitação reforça a necessidade de planos governamentais que estabeleçam padrões unificados de monitoramento, ampliem a cobertura territorial das estações de medição e assegurem transparência e acesso público às informações.

Conforme o Relatório Anual de Acompanhamento da Qualidade do Ar: 2024, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, vinte Unidades Federativas mantêm sistemas de monitoramento da qualidade do ar sob a responsabilidade de seus respectivos Órgãos Estaduais de Meio Ambiente (Brasil, 2025).

Segundo o relatório, em 2024 foram identificadas 479 estações de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, entre estações monitoradas pelos estados e por empresas privadas. Dentre elas, apenas 164 possuem monitoramento ativo de $PM_{2.5}$, localizadas no Distrito Federal(4), Mato Grosso do Sul (2), Bahia (2), Maranhão(5), Pernambuco(1), Pará (3), Espírito Santo (13), Minas Gerais(43), Rio de Janeiro (47), São Paulo(40), Paraná(3) e Santa Catarina(1). Esse quantitativo revela-se extremamente reduzido diante da dimensão territorial do país, que abrange 5.570 municípios, evidenciando a insuficiência da cobertura para assegurar o acompanhamento adequado da qualidade do ar. A limitação da rede de monitoramento compromete a capacidade de avaliação e dificulta a produção de dados acessíveis e consistentes sobre os padrões de exposição populacional a esse poluente, reconhecidamente nocivo à saúde humana (Brasil, 2025).

Ressalta-se que, no Brasil, os marcos legais referentes aos padrões de qualidade do ar são constituídos pela Lei Federal nº 14.850, de 2 de maio de 2024, que institui a Política Nacional de Qualidade do Ar, e pela Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual estabelece valores de referência e define os padrões nacionais de qualidade do ar, alinhados às diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS).

O Quadro 1, Anexo I da Resolução, informa a estratégia brasileira de gestão progressiva da qualidade do ar, para o Material Particulado.

Quadro 1 – Padrões de qualidade do ar

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF	
		µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual[1]	40	35	30	20	15	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual[1]	20	17	15	10	5	-

Fonte: Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024, Anexo I.

O quadro fixa, para cada poluente, os limites máximos admissíveis de material particulado em níveis progressivos de exigência (PI-1, PI-2, PI-3 e PI-4) e um padrão final (PF), diferenciados ainda por dois períodos de referência: 24 horas e média anual. A ideia de metas graduais busca viabilizar a adaptação dos entes federativos e dos emissores de poluentes até que se alcance o limite de exposição recomendado pela Organização Mundial da Saúde.

A Tabela 1, a seguir, retirada do relatório "WHO global air quality guidelines. Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide"[1], organizado pela Organização Mundial de Saúde (2021), apresenta as recomendações para os níveis anuais de $PM_{2.5}$ no contexto das Diretrizes de Qualidade do Ar (AQG – Air Quality Guidelines).

Tabela 1 – Recommended annual AQG level and interim targets for $PM_{2.5}$

Recommendation	$PM_{2.5}$ (µg/m³)
Interim target 1	35
Interim target 2	25
Interim target 3	15
Interim target 4	10
AQG level	**5**

Fonte: WHO. Global air quality guidelines, 2021, p. 78.

Essas diretrizes estabeleceram o valor de referência anual para $PM_{2.5}$ em 5 µg/m³, baseado em evidências que demonstram efeitos prejudiciais à saúde mesmo em concentrações relativamente baixas. A OMS propõe ainda metas intermediárias e graduais (IT-1 a IT-4), variando entre 35 µg/m³ e 10 µg/m³ até chegar a 5µg/m³. Essas metas graduais contribuem para implementação progressiva de medidas de controle da poluição, levando em conta as diferenças de contexto entre os países. As metas refletem uma estratégia prática para a redução contínua

[1] https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1

desse poluente, reconhecendo que atingir imediatamente o nível mais restritivo pode ser inviável em contextos com elevadas emissões e diferentes níveis econômicos e tecnológicos dos países. Como mencionado anteriormente, no Brasil, a Resolução do CONAMA adota abordagem semelhante ao definir padrões nacionais de qualidade do ar estruturados em níveis intermediários e finais, alinhando-se às recomendações internacionais.

Entretanto, observa-se que, em grande parte do território nacional, especialmente em regiões com intensa atividade agropecuária, queima de biomassa e urbanização desordenada, as concentrações médias anuais de $PM_{2.5}$ permanecem significativamente acima do valor guia da OMS e do CONAMA, o que se mostra um desafios para a formulação de políticas públicas, uma vez que é necessário a integração entre diferentes níveis de governo, fortalecimento das capacidades estatais de monitoramento, ampliação da rede de estações de medição e desenvolvimento de estratégias que conciliem crescimento econômico, uso sustentável do solo e preservação ambiental, a fim de reduzir os riscos associados à alta exposição a poluentes atmosféricos.

2.3 $PM_{2.5}$ - IMPACTOS PARA A SAÚDE

A relevância dos impactos do material particulado e de outros poluentes atmosféricos sobre a saúde humana é corroborada por evidências empíricas em escala nacional e internacional. Um estudo abrangendo 2.872.084 registros de óbitos no Brasil, entre 2003 e 2017, demonstrou associação significativa entre concentrações de $PM_{2.5}$, ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2) e o aumento da mortalidade por causas cardiorrespiratórias. Os resultados indicaram que um aumento de 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ elevou em 2,93% o risco de morte por doenças respiratórias, com efeitos maiores em idosos, enquanto aumentos nos níveis de O_3 e NO_2 também estão associados a maior risco de mortalidade. Ademais, verificou-se que tais efeitos persistem mesmo em concentrações abaixo dos padrões nacionais de qualidade do ar, o que evidencia a necessidade de políticas públicas rigorosas e estratégias preventivas voltadas à redução da poluição atmosférica e à mitigação de seus impactos sobre grupos populacionais mais vulneráveis (Requia *et al*., 2024).

Ainda nessa seara, outros estudos reforçam a complexidade das relações entre a poluição atmosférica e saúde, especialmente no que se refere ao $PM_{2.5}$. Um artigo desenvolvido em Massachusetts, Estados Unidos, analisou 33.387 atendimentos clínicos por asma ou chiado em crianças de 0 a 9 anos e constatou que, embora não tenha sido identificada associação significativa entre a exposição ao $PM_{2.5}$ na amostra geral de pacientes, determinados subgrupos

apresentaram maior vulnerabilidade. Crianças com baixo peso ao nascer e aquelas mais expostas durante períodos mais frios do ano registraram aumento do risco de agravamento dos sintomas da asma e do chiado, mesmo quando as concentrações do poluente estavam abaixo dos limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Esses achados evidenciam que os impactos do $PM_{2.5}$ não são uniformes entre a população, sendo influenciado por condições individuais, o que reforça a necessidade de políticas de proteção específicas para populações mais suscetíveis (Khalili *et al*., 2018).

Além dos efeitos observados em crianças durante a primeira infância, há evidências de que a exposição à poluição atmosférica pode ter impacto ainda no período de gestação. Um estudo abrangendo aproximadamente 9,9 milhões de nascimentos, ocorridos no Brasil entre 2001 e 2018, identificou associação entre a exposição da mãe a poluentes como NO_2, O_3 e $PM_{2.5}$, e o aumento do risco de parto prematuro. Em nível nacional, o estudo demonstrou que o aumento de 1 $\mu g/m^3$ na concentração média de $PM_{2.5}$ esteve associado a um aumento pequeno, mas estatisticamente significativo, na probabilidade de partos prematuros, isso representa um aumento aproximado de 2% a 3% no risco para cada incremento de 10 $\mu g/m^3$. O estudo também demonstrou que esse efeito foi mais evidente na Região Sul (Requia; Moore; Yang, 2024).

Em outro estudo, pesquisadores formaram um coorte a partir de dados hospitalares de nascimentos entre os anos 2000 e 2001, abrangendo cerca de 37.000 partos, em Vancouver, no Canadá. O objetivo da pesquisa foi verificar a relação entre níveis elevados de poluentes, como $PM_{2.5}$ e NO_2, e o desenvolvimento do transtorno de déficit de atenção e hiperatividade (TDAH). As crianças foram acompanhadas durante 7 anos e a identificação do TDAH ocorreu por meio de consultas, registros hospitalares e prescrições médicas. Para avaliar a exposição ambiental, os autores consideraram, entre o nascimento e os três anos de idade, a presença de áreas verdes no entorno de suas residências, os níveis de exposição ao $PM_{2.5}$ e ao NO_2, assim como a exposição a ruído. Durante 7 anos de acompanhamento**,** foram diagnosticados 1.217 casos de TDAH. O estudo mostrou que as crianças que estavam no grupo mais exposto (quartil superior) apresentaram risco 11% maior de desenvolver em comparação às menos expostas, mesmo após o controle de fatores sociais como renda ou escolaridade. O estudo também demonstrou que crianças expostas simultaneamente a altos níveis de $PM_{2.5}$ e baixa cobertura vegetal apresentaram risco 62% maior para TDAH, em comparação àquelas com baixa poluição e alta vegetação. O que evidência os efeitos diretos da exposição ao $PM_{2.5}$ e a importância de características urbanísticas, como áreas verdes, como fator mitigador dos riscos ambientais (Yuchi *et al.*, 2022).

De forma complementar, a revisão sistemática Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis (Chen; Hoek, 2020), reforça e consolida as evidências da gravidade dos efeitos do $PM_{2.5}$ sobre a saúde humana, especialmente para doenças do sistema circulatório, respiratório e câncer de pulmão, evidenciando que não existe nível seguro para exposição a esse poluente.

O estudo baseou-se em 107 pesquisas observacionais conduzidas em diferentes regiões do mundo e aplicou modelos de efeitos aleatórios para estimar o impacto de um incremento de 10 μg/m³ na concentração dos poluentes. Os resultados mostraram que o aumento da exposição ao $PM_{2.5}$ está significativamente associado à elevação da mortalidade por todas as causas, incluindo doenças isquêmicas do coração. A análise demonstrou um elevado grau de robustez das evidências para associação entre o $PM_{2.5}$ e a mortalidade geral, cardiovascular e por câncer de pulmão. Já para doenças respiratórias, o grau de certeza foi menor (Chen; Hoek, 2020).

Sendo assim, as evidências apresentadas demonstram que a exposição ao $PM_{2.5}$ está associada a uma ampla gama de efeitos negativos, que vão desde complicações no período da gravidez e na infância até o aumento do risco de doenças crônicas e mortalidade. Trata-se, portanto, de um poluente com impactos diretos na saúde e que gera custos sociais e econômicos significativos. No contexto brasileiro, tais efeitos se tornam ainda mais críticos diante das desigualdades que moldam nosso país. Os altos níveis de poluição se associam a menor capacidade de mitigação e acesso a serviços de saúde da população de mais baixa renda.

2.4 $PM_{2.5}$ - EFEITOS SOBRE A MOBILIDADE ECONÔMICA E JUSTIÇA SOCIAL

A literatura também tem evidenciado que os efeitos da poluição do ar vão além das implicações para a saúde pública, alcançando também impactos sobre as condições socioeconômicas da população. Estudos demonstram que a exposição prolongada a poluentes está associada à redução da produtividade do trabalho, ao comprometimento do desempenho escolar de crianças e adolescentes e a menores oportunidades econômicas ao longo da vida (Colmer; Voorheis; Williams, 2023; Lam *et al*., 2023; Zivin; Neidell, 2012).

Em 2024, Sophie-An Kingsbury Lee, Luca Merlob e Francesca Dominici publicaram um artigo que analisa os efeitos do $PM_{2.5}$ sobre as oportunidades econômicas nos Estados Unidos. O estudo, intitulado Childhood $PM_{2.5}$ Exposure and Upward Mobility in the United States, evidenciou como a exposição à poluição atmosférica por $PM_{2.5}$ na primeira infância se relaciona com a mobilidade econômica intergeracional. Os autores encontraram uma associação estatisticamente significativa, indicando que um aumento de 1 μg/m³ na concentração de $PM_{2.5}$

em 1982 esteve associado a uma redução média de 1,146% na renda alcançada na vida adulta por filhos de famílias de baixa renda. Essa relação, além de persistente, revelou heterogeneidade espacial, sendo mais acentuada nas regiões Centro-Leste, Sul e Pacífico, onde desigualdades raciais e socioeconômicas são historicamente mais pronunciadas. Os resultados sugerem que a poluição do ar pode atuar como um mecanismo estrutural de perpetuação da pobreza, reforçando barreiras ao direito à igualdade de oportunidades e conectando o debate sobre qualidade ambiental à justiça social. (Lee; Merlo; Dominici, 2024).

Avançando nessa perspectiva, o estudo *Air Pollution and Economic Opportunity in the United States*, desenvolvido por Colmer, Voorheis e Williams (2023), na Universidade do Colorado, aprofunda a análise combinar 36 anos de dados de satélite sobre concentrações de $PM_{2.5}$ com informações administrativas do Censo norte-americano e do Internal Revenue Service, buscando examinar como a exposição desigual à poluição influencia a mobilidade econômica, levando em consideração as desigualdades raciais. Os autores identificaram que a exposição ao $PM_{2.5}$ na infância está entre os cinco principais preditores da mobilidade ascendente nos Estados Unidos. Utilizando as reduções na poluição decorrentes das Emendas do Clean Air Act de 1990 como variação exógena, o estudo demonstrou que a exposição ao $PM_{2.5}$ na infância não afeta apenas a renda futura, mas também atua na reprodução das desigualdades econômicas estruturadas pelo racismo, aprofundando as desigualdades entre grupos raciais. Os resultados revelam que a exposição desigual ao $PM_{2.5}$ explica entre 17% e 26% da disparidade de renda entre pessoas negras e brancas, 5% a 27% da disparidade entre latinos e brancos e até 20% do efeito médio de crescer em determinado bairro sobre os ganhos futuros (Colmer; Voorheis; Williams, 2023).

No contexto europeu, o estudo conduzido por Hewitt, Caramés e Borge (2024) buscou compreender a relação entre renda, desigualdades socioeconômicas e exposição à poluição atmosférica, na cidade de Madri e municípios próximos. Os pesquisadores escolheram Madrid por ser considerado um hotspots para concentrações de NO_2 e $PM_{2.5}$. A pesquisa combinou estimativas do *Community Multiscale Air Quality Model* (CMAQ) com dados de renda domiciliar por setores censitários. Os resultados não confirmaram de forma robusta a hipótese de maior exposição de populações de baixa renda, revelando uma realidade complexa e altamente dependente da geografia da cidade. A heterogeneidade identificada, com correlações positivas e negativas em diferentes áreas, associada à baixa capacidade explicativa dos modelos (R^2 entre 10% e 19%), sugere que a relação entre renda e poluição não é linear nem homogênea. Essa constatação reforça a necessidade de abordagens metodológicas avançadas, como modelos

hierárquicos e métodos de suavização espacial (GAMs), bem como do uso de dados observacionais que permitam captar nuances relacionadas à mobilidade urbana, padrões de uso do solo e localização das fontes poluidoras (Hewitt; Caramés; Borge, 2024).

Em consonância com os estudos internacionais, a literatura brasileira também evidencia especificidades importantes na relação entre desigualdade social e poluição do ar. No artigo "Desigualdades socioeconômicas e exposição aos poluentes gerados pelo tráfego veicular em São Paulo, Brasil", os autores apresentam um aspecto relevante para compreender as relações entre poluição atmosférica e justiça social. Nesse estudo, realizado na cidade de São Paulo, os autores buscaram investigar a relação entre a densidade do tráfego, utilizada como proxy de poluição atmosférica, a renda dos responsáveis pelos domicílios a nível de setor censitário e o percentual de domicílios com acesso à rede de esgoto. Os resultados mostraram que a exposição aos poluentes atmosféricos aumenta conforme a renda aumenta (Habermann *et al*., 2014).

Esse resultado, apesar de aparentemente ser contraintuitivo é bastante significativo, pois evidencia que o local de residência, por si só, não é capaz de identificar a exposição real da população. Isso ocorre porque, especialmente nos grandes centros urbanos, os deslocamentos pendulares alteram substancialmente os níveis de exposição (Habermann *et al*., 2014). A relevância desse estudo para a presente dissertação está em evidenciar que os efeitos da poluição sobre a população não podem ser compreendidos apenas a partir da exposição associada ao local de residência, sendo necessário considerar múltiplos fatores que influenciam essa relação. As áreas centrais, em geral são mais valorizadas, concentram a maior parte dos empregos, estruturas de lazer, infraestrutura urbana, mas também apresentam tráfego intenso, um dos grandes responsáveis pela poluição do ar. Assim, reforça-se a necessidade de adotar uma perspectiva de justiça ambiental que considere simultaneamente a distribuição territorial dos poluentes e as vulnerabilidades sociais acumuladas.

Em resumo, a literatura revisada demonstra que a relação entre poluição atmosférica e desigualdades socioeconômicas é extremamente complexa e atravessada por condicionantes territoriais, raciais e institucionais. Os resultados das pesquisas citadas evidenciam que os impactos da poluição atmosférica não se distribuem de forma homogênea, mas se relacionam com dinâmicas históricas de exclusão social e econômica. Nesse sentido, reconhecer a poluição como um fator que também influencia a produção e a reprodução das desigualdades sociais permite qualificar as respostas governamentais e orientar a formulação de políticas públicas ambientais mais justas.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa e observacional, com foco na análise da relação entre exposição ao $PM_{2.5}$, rendimento e raça. O estudo utiliza dados socioeconômicos referentes ao ano de 2022 e séries históricas de concentrações médias anuais de $PM_{2.5}$, no período de 2003 a 2022, considerando como unidade de análise os setores censitários.

A pesquisa utiliza como fontes principais os microdados do Censo Demográfico de 2022, produzidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em articulação com dados de satélite do CAMS referentes ao $PM_{2.5}$.

A unidade de análise adotada é o setor censitário, menor divisão territorial utilizada pelo IBGE, o que possibilita captar desigualdades intra e inter-regionais com maior precisão. Essa opção permite a vinculação das informações sobre o rendimento médio dos setores censitários brasileiros, com base no rendimento dos responsáveis pelos domicílios (considerando todas as fontes de rendimento, como trabalho, aposentadoria, Bolsa Família ou outra origem), sua raça/cor, e os níveis médios anuais de concentração de $PM_{2.5}$. atribuídos à mesma localidade.

A amostra da pesquisa é composta pelos setores censitários que, em 2022, apresentavam ao menos um domicílio particular permanentemente ocupado com responsável declarado e com informações sobre raça/cor e rendimento. Nessa etapa, foram excluídos apenas os setores censitários com população total igual a zero.

Inicialmente, foi realizada uma análise descritiva dos dados socioeconômicos e das concentrações de $PM_{2.5}$, organizados por regiões do Brasil. Segundo John E. Freund (2006), em seu livro Estatística Aplicada: Economia, Administração e Contabilidade, a análise descritiva tem como objetivo sumarizar e apresentar as informações de maneira clara e objetiva, sem realizar inferências que extrapolem os próprios dados.

Para essa etapa, foram calculadas as distribuições percentuais dos setores censitários segundo a predominância racial, o que possibilitou identificar o grupo populacional majoritário em cada setor. Além disso, foram realizadas análises descritivas da concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) e do rendimento médio mensal dos setores (2022). Optou-se pela utilização da mediana da renda, uma vez que as distribuições de rendimento tendem a apresentar grande assimetria, com valores muito altos concentrados em poucos setores, o que poderia distorcer a interpretação caso fosse considerada apenas a média.

Além disso, foram estimadas medidas de dispersão, incluindo o intervalo interquartílico (IQR), que indica a amplitude entre o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3). Essa análise possibilitou mensurar as diferenças entre grupos sociais e raciais. Essa etapa descritiva também

incorporou representações gráficas, para retratar a distribuição da renda por predominância racial.

Para complementar a análise descritiva, foram elaborados gráficos das séries históricas que apresentam a evolução da concentração média anual de $PM_{2.5}$ no período de 2003 a 2022 em cada região, conforme estimativas do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

A próxima etapa teve como objetivo definir o método mais adequado para avaliar a correlação entre as variáveis. Para isso, realizou-se a verificação da normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk, considerando as variáveis referentes à concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ no período de 2003 a 2022, à renda média dos responsáveis pelos domicílios nos setores (em forma logaritimica) e às proporções raciais. Em seguida, foi calculado o coeficiente de correlação de Spearman entre as variáveis de interesse.

Na etapa seguinte, realizou-se uma análise de agrupamento por meio de métodos de clustering, com o objetivo de identificar padrões territoriais, demográficos e ambientais semelhantes entre os setores censitários. Foram incluídas análises considerando, separadamente, apenas a poluição, poluição associada à renda, poluição associada ao perfil racial e, por fim, a combinação das três variáveis. Os agrupamentos foram definidos pelo método de *k-means*. Posteriormente, os clusters foram mapeados para permitir a visualização da distribuição e a comparação entre regiões.

Na etapa de modelagem estatística, foram empregados Modelos Aditivos Generalizados (GAMs) para estimar a associação entre os níveis médios de $PM_{2.5}$ e indicadores de renda e de raça, organizados em quintis. Essa abordagem permite capturar relações não lineares entre as variáveis independetes e o $PM_{2.5}$. Em cada modelo, o primeiro quintil foi definido como categoria de referência, possibilitando a comparação com os demais. Assim, cada coeficiente estimado (β) representa a diferença média nos níveis de $PM_{2.5}$ observada nos setores classificados em um determinado quintil, em relação ao quintil 1.

3.1 DADOS

A variável “valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas responsáveis com rendimentos por domicílios particulares permanentes ocupados” refere-se a uma medida socioeconômica divulgada pelo IBGE no âmbito do Censo Demográfico de 2022. Essa variável expressa a média dos rendimentos mensais, em valores nominais, das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes que estavam ocupados no momento da coleta. O rendimento nominal inclui a soma dos rendimentos mensais brutos provenientes do trabalho e

de outras fontes, como aposentadorias, programas sociais, aluguéis, pensões, entre outros (IBGE, 2022).

O indicador é obtido em nível de setor censitário. Cada setor censitário representa uma porção do território nacional delimitada de acordo com os critérios da divisão político-administrativa brasileira. Esses setores são identificados por um geocódigo único e padronizado nacionalmente (IBGE, 2022).

Em relação aos domicílios considerados, a variável contempla apenas os domicílios particulares permanentes ocupados. Um domicílio particular é aquele construído para fins exclusivamente residenciais, ou adaptado para esse fim, e que não funciona como estabelecimento coletivo. Já o termo "permanente ocupado" indica que, na data de referência do Censo, o imóvel estava efetivamente habitado por uma ou mais pessoas, que forneceram informações por meio de entrevista realizada pelo recenseador.

Além da variável de rendimento, esta pesquisa também utilizou a variável cor/raça da pessoa responsável pelo domicílio, categorizada segundo as classificações adotadas pelo IBGE: branca, preta, parda, amarela e indígena.

A Figura 1 apresenta as variáveis utilizadas e seus respectivos códigos segundo IBGE.

Figura 1 – Dicionário de dados agregados por setor censitário

Tema	Variável	Descrição		
Renda do Responsável	V06004	Valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas responsáveis com rendimentos por domicílios particulares permanentes ocupados		
Cor ou Raça	V01332	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é branca		
Cor ou Raça	V01333	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é preta		
Cor ou Raça	V01334	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é amarela		
Cor ou Raça	V01335	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é parda		
Cor ou Raça	V01336	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é indígena		
Cor ou Raça	V01337	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é branca, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é masculino		
Cor ou Raça	V01338	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é branca, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é feminino		
Cor ou Raça	V01339	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é preta, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é masculino		
Cor ou Raça	V01340	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é preta, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é feminino		
Cor ou Raça	V01341	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é amarela, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é masculino		
Cor ou Raça	V01342	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é amarela, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é feminino		
Cor ou Raça	V01343	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é parda, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é masculino		
Cor ou Raça	V01344	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é parda, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é feminino		
Cor ou Raça	V01345	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é indígena, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é masculino		
Cor ou Raça	V01346	Cor ou raça da pessoa responsável pelo domicílio é indígena, Sexo da pessoa responsável pelo domicílio é feminino		

Dados unidos e separados em feminino e masculino para simplificação

Fonte: Dicionário de dados agregados por setores censitários, Censo (2022).

3.2 ANÁLISE DESCRITIVA DAS REGIÕES

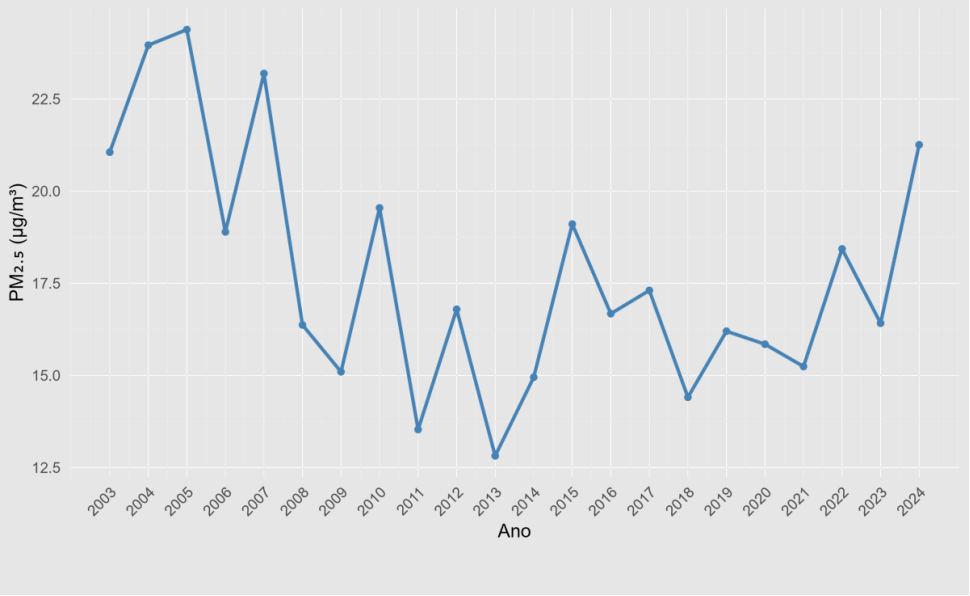
3.2.1 Região Norte

Na Região Norte, foram incluídos na análise 35.366 setores censitários com dados válidos para as variáveis de interesse. Observou-se um predomínio expressivo de setores com maioria de responsáveis pardos, que correspondem a 82,1% do total. Em segundo lugar, aparecem os setores com predominância de responsáveis indígenas (8,35%), o que reforça a relevância demográfica dos povos originários nessa região. Já os setores com maioria de

responsáveis brancos correspondem a 7,2%, enquanto aqueles com predominância de responsáveis pretos representam aproximadamente 2,49%. Não foi identificado nenhum setor em que os responsáveis amarelos constituíssem o grupo predominante.

O Gráfico 1 apresenta a evolução histórica da concentração média anual de $PM_{2.5}$ na Região Norte, no período de 2003 a 2024. Observam-se grandes variações ao longo dos anos. Nos primeiros anos da série, entre 2003 e 2007, registram-se valores elevados, com destaque para os picos de 2004, 2005 e 2007, possivelmente associados ao elevado número de focos de incêndio nesses anos[i], quando as concentrações médias anuais ultrapassaram 22 µg/m³. A partir de 2007, nota-se uma tendência de redução que se estende até 2014, atingindo em 2013 o menor valor da série, em torno de 13 µg/m³. No entanto, o período de 2015 a 2023 caracteriza-se por oscilações anuais sem indicar uma tendência clara de queda ou aumento. Em 2024, verifica-se um aumento expressivo, com a concentração de $PM_{2.5}$ aproximando-se novamente de 21 µg/m³. Nesse mesmo ano, dados do INPE registraram o maior número de focos de incêndio desde 2007, alcançando 3.358 em apenas 24 horas.

Gráfico 1 – Evolução histórica do $PM_{2.5}$ - Norte (2003 – 2024)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

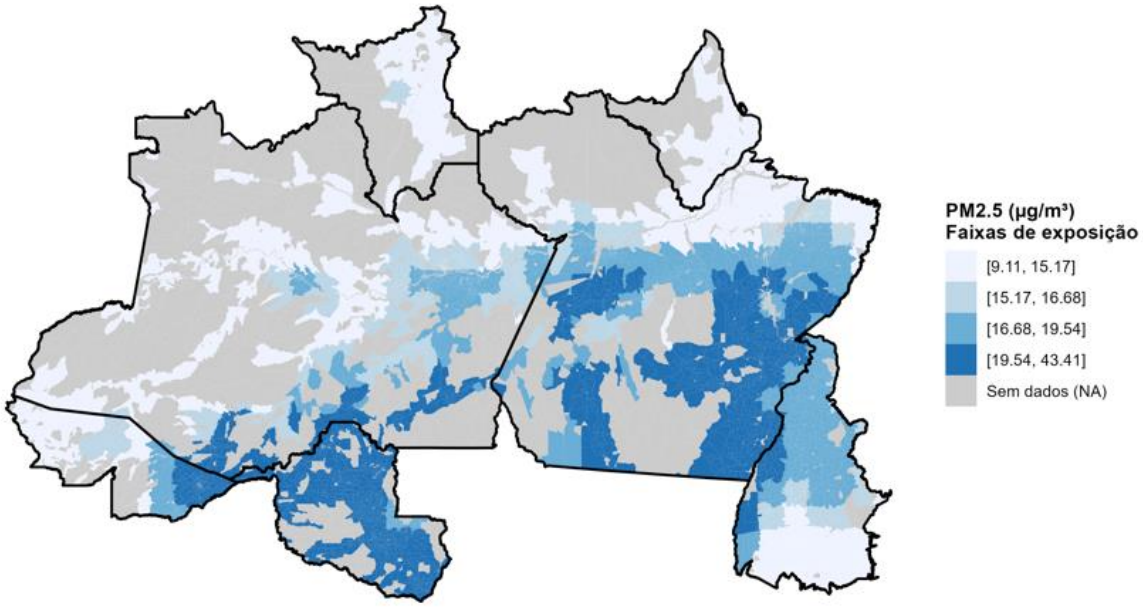
A análise da exposição acumulada ao $PM_{2.5}$, calculada pela média de concentração entre 2003 e 2022, revela heterogeneidade quando os setores são estratificados segundo os grupos populacionais predominantes. Em termos gerais, a exposição média acumulada no período varia de 9,1 a 43,4 µg/m³ nos setores da região.

A média de exposição acumulada foi de 19,0 µg/m³ nos setores com predominância de responsáveis brancos, seguida pelos setores com predominância parda, 18,0 µg/m³, e preta, 17,2

µg/m³. Os setores com predominância de responsáveis indígenas apresentaram a menor média acumulada, 15,4 µg/m³, ainda dentro de uma faixa preocupante.

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial da concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ na Região Norte. Observa-se heterogeneidade territorial com as maiores concentrações localizadas principalmente no leste e sudeste do Pará, no norte do Tocantins, em Rondônia e porções ao sul do Amazonas. Observa-se níveis relativamente menores no Amapá, Roraima e noroeste do Amazonas.

Figura 2 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ - Norte (2003–2022)



Fonte: CAMS (2003–2022). Elaboração própria (2025).

Na análise da variável "rendimento médio mensal dos responsáveis por domicílios particulares permanentemente ocupados" em 2022, calculou-se a mediana por setor censitário segundo a predominância racial. Optou-se pela mediana porque a distribuição de renda é bastante assimétrica e apresenta muitos valores extremos. Nesse sentido, a mediana é mais adequada para lidar com outliers, representando melhor a realidade dos dados. Por fim, como os indicadores foram calculados por setor, e não por indivíduo, a mediana evita que poucos setores com rendas muito altas distorçam a análise. Além disso, foram calculados o primeiro quartil (Q1), o terceiro quartil (Q3) e a amplitude interquartílica (IQR).

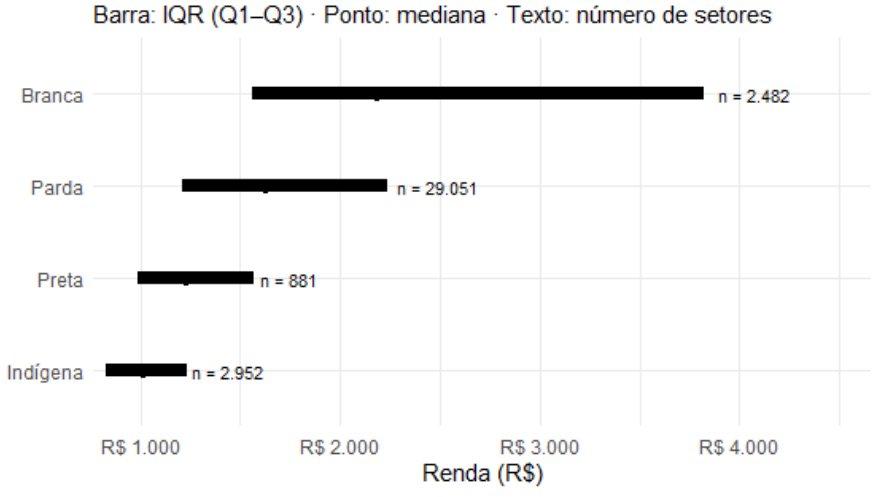
Após a análise, foi possível observar disparidades significativas associadas à composição racial predominante nos setores da região. Nos setores de predominância branca, a mediana do rendimento foi de R$ 2.185,23, superando em R$ 565,02 a observada nos setores de predominância parda, R$ 1.620,21, e em R$ 963,00 a mediana nos setores de predominância

preta, R$ 1.222,23. Quando comparamos com os setores de predominância indígena, mediana 1.012,50, a diferença atinge R$ 1.172,73. Esses contrastes reiteram a centralidade das relações raciais na estruturação das oportunidades econômicas no território, com pessoas brancas concentradas em setores de maior rendimento e povos indígenas e pessoas negras (pretas e pardas) em setores de menor rendimento mediano.

A análise dos quartis reforça esse padrão. Nos setores de predominância de responsáveis pardos metade dos setores tem renda entre R$ 1.212,00 (Q1) e R$ 2.236,48(Q3). Nos setores de predominância preta, entre R$ 987,88 e R$ 1.569,72. Nos de predominância indígena, entre R$ 828,22 e R$ 1.233,33. Nos de predominância branca, entre R$ 1.559,32 e R$ 3.817,53. Em termos de dispersão (IQR), observa-se maior heterogeneidade nos setores de predominância branca, IQR de R$ 2.258,21, equivalente a aproximadamente 103,3% da mediana do próprio grupo, sinal de concentração de setores mais ricos dentro desse estrato. Em seguida, aparecem os setores pardos, IQR de R$ 1.024,48 equivalente a aproximadamente 63,2% da mediana do grupo. Os pretos, IQR R$ 581,84, equivalente a aproximadamente 47,6% da mediana do grupo. E os indígenas com IQR de R$405,11, aproximadamente 40,0% da mediana do grupo, indicando variabilidade mais reduzida onde os rendimentos são mais baixos. Os dados mostram que a Região Norte exibe desigualdade racial de renda em escala setorial: rendas medianas mais altas e mais dispersas em áreas de predominância branca e rendas persistentemente mais baixas e menos dispersas em áreas de predominância indígena e preta, com setores pardos em posição intermediária.

O Gráfico 2 abaixo permite a visualização da mediana, dos quartis e da dispersão dos rendimentos para os setores com predominância de responsáveis pelo domicílio para cada grupo analisado.

Gráfico 2 – Renda dos responsáveis – Região Norte (por raça predominante)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Diante dos dados apresentados, evidencia-se que a região concentra profundas desigualdades socioeconômicas. A desigualdade entre setores de predominância branca, indígena e preta é o mais acentuado, indicando necessidade de alocação diferenciada de recursos e de maior atenção aos territórios onde a renda é sistematicamente mais baixa.

A análise do IQR em setores de predominância indígena e preta sugere padrões persistentes de renda baixa, reforçando a importância de ações continuadas e integradas capazes de articular educação, saúde, saneamento e acesso a mercados de trabalho diversos, de modo a enfrentar as múltiplas dimensões que mantém esses grupos em situação de pobreza.

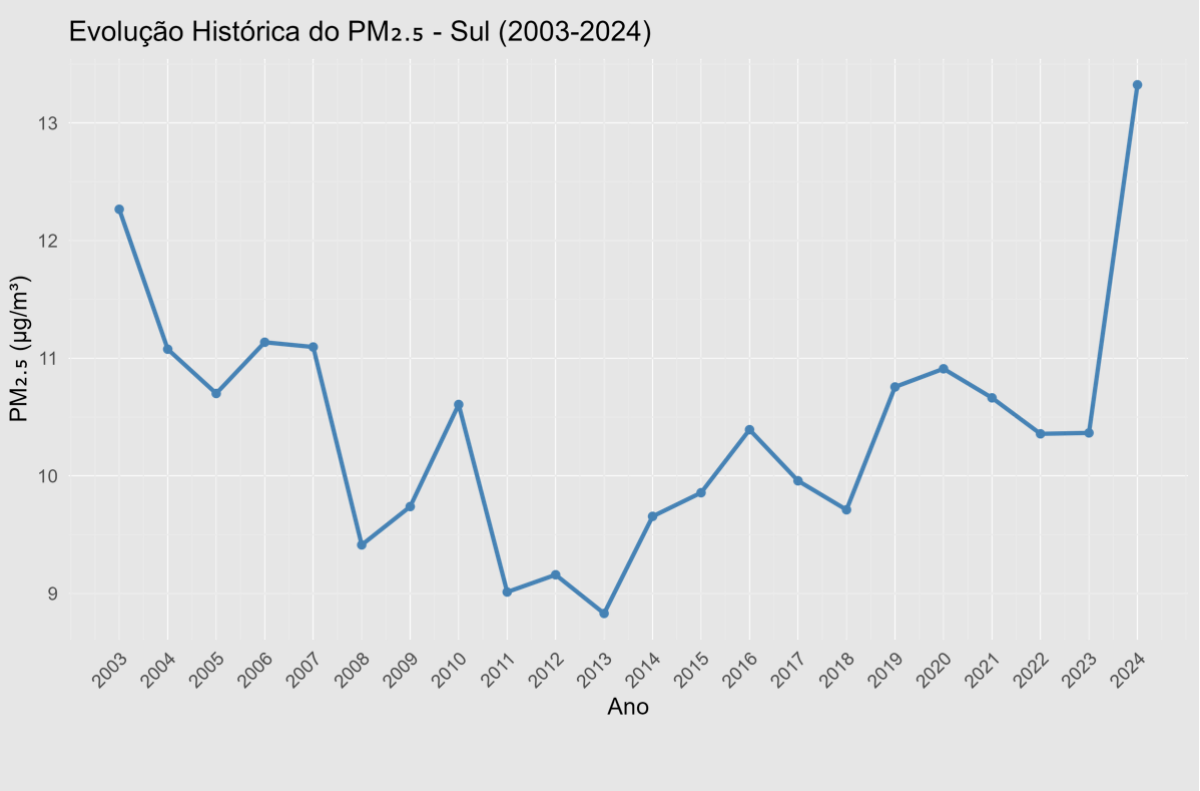
3.2.2 Região Sul

Na Região Sul, foram analisados 64.112 setores censitários. O perfil demográfico revela uma predominância de responsáveis pelos domicílios que se auto declararam brancos, grupo majoritário em aproximadamente 90% dos setores da região. Em contraste, os responsáveis pardos aparecem como grupo predominante em 8,95% dos setores. Os setores de maioria de responsáveis pretos somam apenas 0,63%. Setores com maioria indígena e amarela são extremamente raros, totalizando 0,42% e 0,03 setores, respectivamente.

Esse perfil contrasta fortemente com o observado em outras regiões do país, como o Norte e o Nordeste, e levanta importantes implicações para a formulação de políticas públicas: a concentração racial homogênea pode ocultar desigualdades intra-regionais e reforçar a invisibilidade de grupos minorizados.

O gráfico abaixo mostra a evolução histórica da concentração média anual de $PM_{2.5}$ na região Sul do Brasil entre 2003 e 2024. No início da série, os valores estavam acima de 12 µg/m³, com certa oscilação, mas apresentaram redução gradual até 2013, quando atingem o menor patamar, próximo a 8,8 µg/m³. A partir desse ponto, há oscilações moderadas, mantendo-se em torno de 9 a 11 µg/m³ durante boa parte do período. No entanto, destaca-se um aumento expressivo em 2024, alcançando aproximadamente 13,4 µg/m³, o maior valor da série histórica.

Gráfico 3 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Sul (2003–2024)

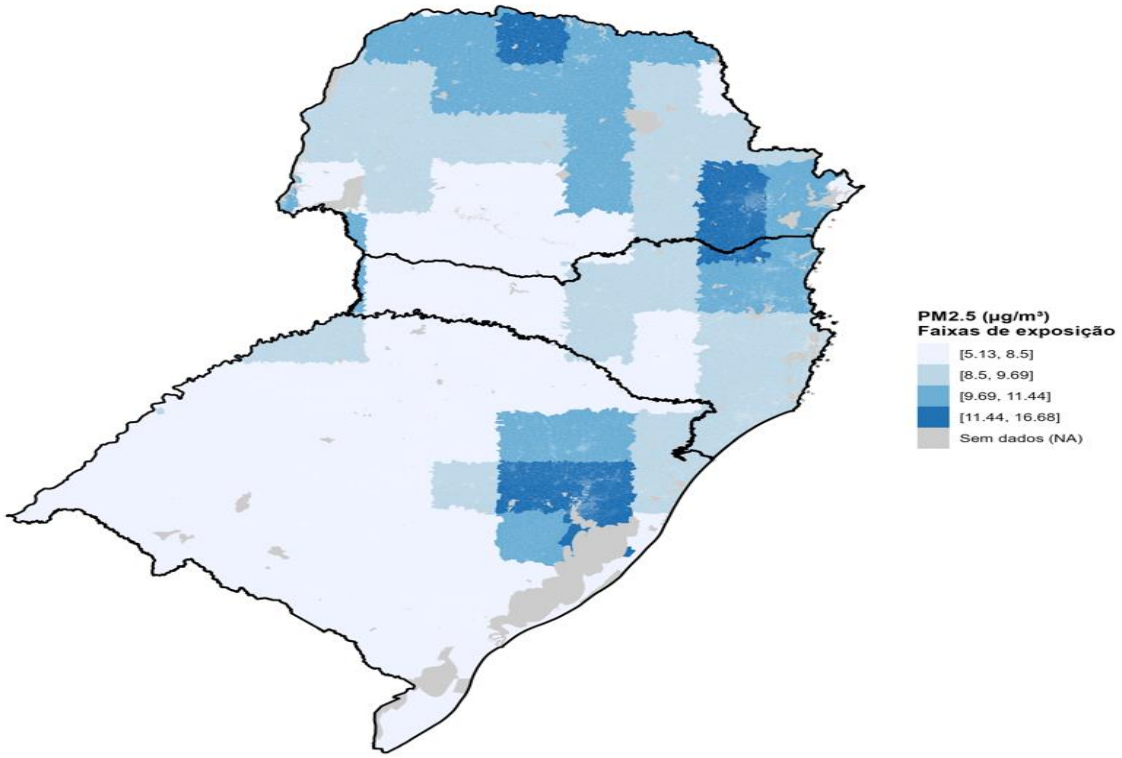


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na Região Sul, a concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ entre 2003 e 2022 variou entre 5,1 µg/m³ e 16,7 µg/m³. Os setores com predominância de responsáveis brancos apresentaram média de exposição de 10,43 µg/m³. Nos setores com predominância de responsáveis pretos, a média foi ligeiramente superior, 11,70 µg/m³, enquanto aqueles com predominância indígena registraram a menor média, 9,27 µg/m³. Já as áreas com maior concentração de responsáveis pardos apresentaram média acumulada de 10,30 µg/m³.

A Figura 3 representa a concentração média acumulada de PM 2.5 entre os anos de 2003 e 2022. O mapa revela maiores concentrações médias de $PM_{2.5}$ no norte do Paraná e em faixas pontuais do Rio Grande do Sul. Os menores níveis de exposição predominam no sul do Rio Grande do Sul e oeste de Santa Catarina.

Figura 3 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Sul (2003–2022)



Fonte: CAMS (2003–2022). Elaboração própria (2025).

A análise do rendimento médio dos responsáveis pelos domicílios na região Sul, foi feita utilizando a mesma metodologia aplicada à Região Norte. Também foram observadas desigualdades relevantes associadas à composição racial. Nos setores de predominância branca, a mediana do rendimento dos responsáveis é de R$ 2.804,12, superando em R$ 631,55 a mediana nos setores de predominância parda, R$ 2.172,57, e em R$ 954,75 a mediana nos setores de predominância preta, R$ 1.849,37. Em comparação aos setores de predominância indígena, R$ 1.108,33, a diferença atinge R$ 1.695,79. Esses contrastes reiteram a centralidade das relações raciais na estruturação das oportunidades econômicas nos territórios com pessoas brancas concentradas em setores de maior rendimento e povos indígenas e pessoas negras (pretas e pardas) em setores de menor rendimento.

No sul os setores com maior percentual de responsáveis amarelos apresenta mediana elevada, R$ 5.465,52, e IQR de R$ 3.712,21, porém com número de setores é de apenas 17.

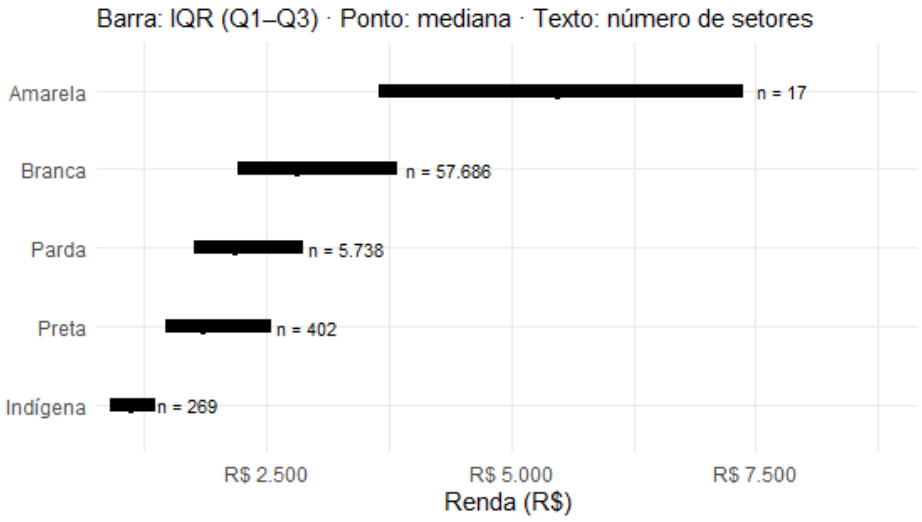
A análise dos quartis reforça as desigualdades entre os grupos raciais na região. Nos setores de predominância parda, metade dos rendimentos se concentra entre R$ 1.757,06 (Q1) e R$ 2.872,26 (Q3), com um IQR de R$ 1.115,21, cerca de 51,3% da mediana do grupo, o que indica desigualdade interna moderada. Nos setores de predominância preta, a faixa interquartílica vai de R$ 1.462,83 a R$ 2.543,77, resultando em um IQR de R$ 1.080,94 (58,5%

da mediana), sugerindo maior dispersão relativa que nos setores pardos. Já nos setores de predominância indígena, a renda está mais concentrada: entre R$ 900,00 e R$ 1.356,66, com um IQR de apenas R$ 456,66 (41,2% da mediana), revelando baixos rendimentos e menor desigualdade interna. Por outro lado, os setores de predominância branca apresentam os maiores valores e também grande dispersão: de R$ 2.206,47 a R$ 3.841,57, com um IQR de R$ 1.635,09 (58,3% da mediana), indicando a presença de setores mais ricos dentro desse grupo.

Portanto os dados mostram que a Região Sul exibe desigualdade racial de renda em escala setorial: rendas medianas mais altas e mais dispersas em áreas de predominância branca, e rendas persistentemente mais baixas e menos dispersas em áreas de predominância indígena e preta, com os setores pardos ocupando posição intermediária.

O gráfico 4 abaixo apresenta as informações citadas acima:

Gráfico 4 – “Renda dos responsáveis – Região Sul (por raça predominante)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Diante desse contexto, observa-se que, embora a Região Sul apresente indicadores econômicos médios mais elevados em comparação a outras regiões do país, tais vantagens não são distribuídas de forma igualitária entre os diferentes grupos populacionais.

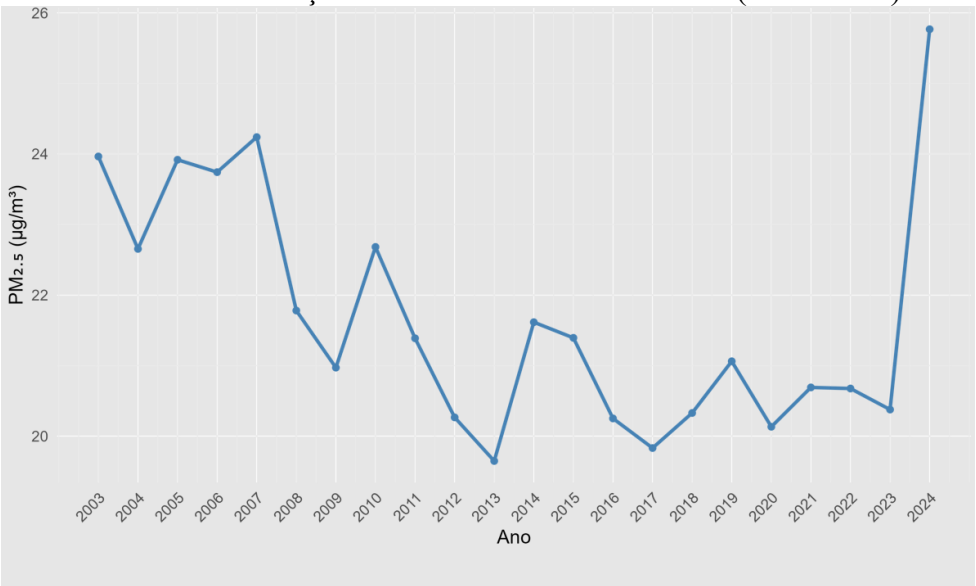
3.2.3 Região Sudeste

A Região Sudeste concentra o maior número de setores censitários do país, totalizando 197.328 unidades analisadas. Os setores com predominância de responsáveis brancos correspondem a 57,83% do total, enquanto os de predominância parda representam 40,50%. Já

os setores com maioria de responsáveis pretos somam 1,50%, e aqueles de predominância indígena e amarela são residuais, com 0,10% e 0,08%, respectivamente.

O próximo gráfico apresenta a evolução histórica da concentração média anual de $PM_{2.5}$ na Região Sudeste. No início da série, os valores permaneciam elevados, próximos a 24 µg/m³, com pequenas oscilações até 2007. A partir desse ponto, verifica-se uma tendência de queda, atingindo o menor valor em 2013, em torno de 19,6 µg/m³. Nos anos seguintes, observa-se uma variação moderada, em torno de 22 µg/m³, até 2023. Em 2024, destaca-se um aumento abrupto, chegando a aproximadamente 25,8 µg/m³, o maior valor da série histórica. Esse aumento pode estar associado à intensificação de queimadas e a condições climáticas adversas, como o agravamento da seca.

Gráfico 5 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Sudeste (2003–2024)



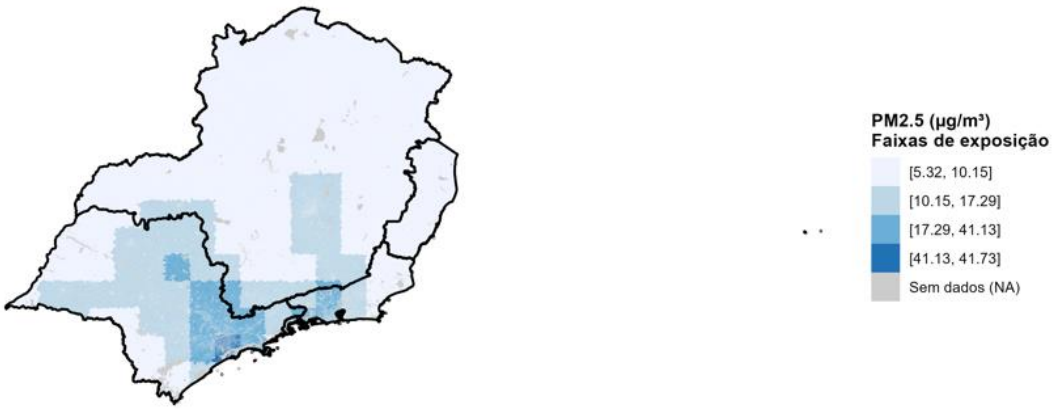
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A concentração média anual acumulada entre 2003 e 2022 de PM 2.5 , nos setores censitários da região varia de 5,32 µg/m³ a 41,73 µg/m³.

Entre os grupos raciais, os setores com maior percentual de responsáveis brancos apresentaram média de 22,80 µg/m³, seguidos por setores com predominância de pessoas pardas, 20,30 µg/m³, pretas, 16,50 µg/m³, indígenas, 14,30 µg/m³ e amarelas 38,20 µg/m³. Essas diferenças podem indicar que setores de predominância branca e parda tendem a se concentrar em núcleos urbanos mais densos e áreas industriais. Já os setores com maioria de responsáveis pretos e indígenas aparecem com uma média de exposição um pouco menor neste recorte temporal, possivelmente por estarem localizados em áreas periféricas, menos densas ou rurais.

Na Figura 4, as maiores faixas de exposição ao $PM_{2.5}$ concentram-se no estado de São Paulo, especialmente no sudeste paulista, marcado pela forte presença industrial, na Região Metropolitana de São Paulo e na Baixada Santista, onde se localiza o maior complexo portuário da América do Sul. O estado do Rio de Janeiro também apresenta níveis elevados de poluição, que se estendem ao longo do eixo São Paulo–Vale do Paraíba–Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Além disso, verificam-se manchas no sul de Minas Gerais, na transição com São Paulo e Rio de Janeiro. Já no interior de Minas Gerais e no Espírito Santo, predominam faixas de menor concentração de $PM_{2.5}$.

Figura 4 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Sudeste (2003–2022)



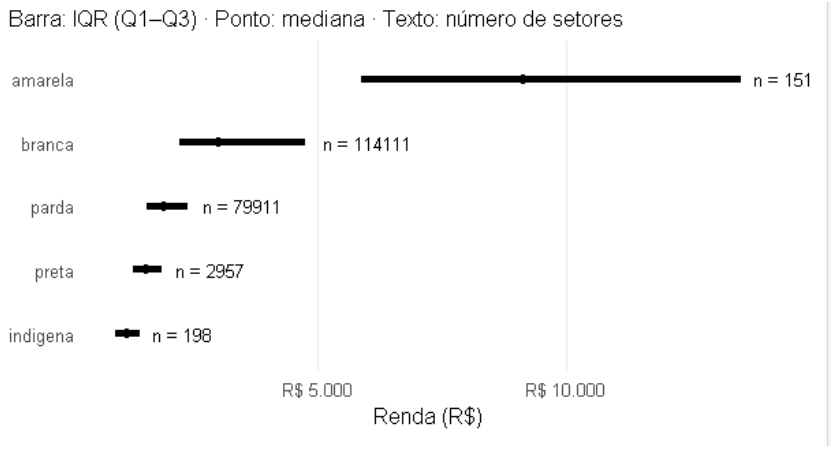
Fonte: CAMS (2003–2022). Elaboração própria (2025).

Quanto a renda, observou-se desigualdades que também estão associadas à raça. Nos setores de predominância de responsáveis brancos, a mediana da renda foi de R$ 3.012,48, superando em R$ 1.101,15, aproximadamente 57,6%, a mediana dos setores de predominância parda, R$ 1.911,33, e em R$ 1.472,61, aproximadamente 95,6%, a dos setores de predominância preta, R$ 1.539,87. Em relação aos setores de predominância indígena, mediana de R$ 1.156,88, a diferença chega a R$ 1.855,60, aproximadamente 160,4%. Os setores com predominância de responsáveis amarelos possuem mediana muito elevada R$ 9.124,57, mas representam apenas 151 setores.

A análise dos quartis reforça o padrão descrito no parágrafo anterior. Nos setores com predominância de responsáveis pardos, 50% situam-se entre R$ 1.567,14 (Q1) e R$ 2.395,00 (Q3), resultando em um IQR de R$ 827,86, equivalente a aproximadamente 43,3% da mediana do grupo. Nos setores com predominância de responsáveis pretos, metade apresenta rendas entre R$ 1.303,98 e R$ 1.874,44, com IQR de R$ 570,46, cerca de 37,0% da mediana. Nos setores com predominância indígena, a faixa interquartílica vai de R$ 945,55 a R$ 1.446,41, com IQR de R$ 500,86, 43,3% da mediana. Já nos setores de predominância branca, metade se

concentra entre R$ 2.243,41 e R$ 4.768,23, com IQR de R$ 2.524,81, equivalente a 83,8% da mediana do grupo. Assim, além de rendas medianas mais altas, os setores com maior percentual de responsáveis brancos apresentam maior heterogeneidade interna. Por outro lado, os setores de predominância preta e indígena combinam rendas medianas mais baixas com menor dispersão, refletindo rendimentos persistentemente inferiores. O Gráfico 6 abaixo apresenta as informações acima:

Gráfico 6 – Renda dos responsáveis – Região Sudeste (por raça predominante)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.4 Região Centro-Oeste

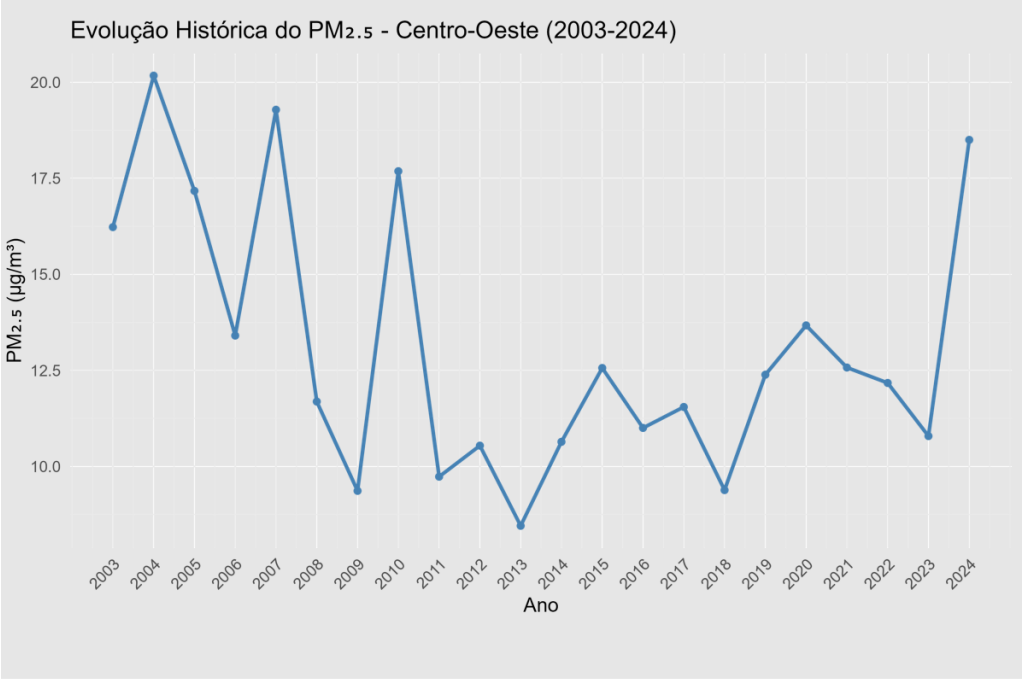
Na Região Centro-Oeste, foram analisados 32.598 setores censitários. Verifica-se a predominância de responsáveis pardos, que constituem o grupo majoritário em 69,05% dos setores. Os responsáveis brancos aparecem em seguida, com 27,85%. Já os setores com maioria de responsáveis pretos e indígenas correspondem, respectivamente, a 0,92% e 2,17%. Nenhum setor censitário apresentou predominância de responsáveis amarelos.

Essa distribuição reforça o papel central da população parda na configuração demográfica da região. A presença de setores com predominância indígena também é um dado relevante, visto que a região concentra importantes territórios de povos originários, em especial no oeste do Mato Grosso e no norte de Mato Grosso do Sul, regiões muitas vezes marcadas por conflitos fundiários.

O Gráfico 7 apresenta a evolução histórica da concentração média anual de $PM_{2.5}$ na região. Nota-se um comportamento com grande variação ao longo da série, com valores elevados no início do período, próximos de 20 µg/m³ em 2004 e 2007, seguidos por grandes oscilações entre 2008 e 2013, ano que registra o menor valor, em torno de 8,5 µg/m³. A partir de 2014, observam-se oscilações entre aproximadamente 10 µg/m³ e 14 µg/m³ até 2023. Em

2024, destaca-se um aumento expressivo, a concentração atinge cerca de 18,7 µg/m³, o maior valor desde 2007. Esse padrão pode estar associado a fatores como intensificação do desmatamento e das queimadas, expansão da fronteira agrícola e condições climáticas desfavoráveis, como o agravamento da seca.

Gráfico 7 – Evolução histórica - Centro Oeste



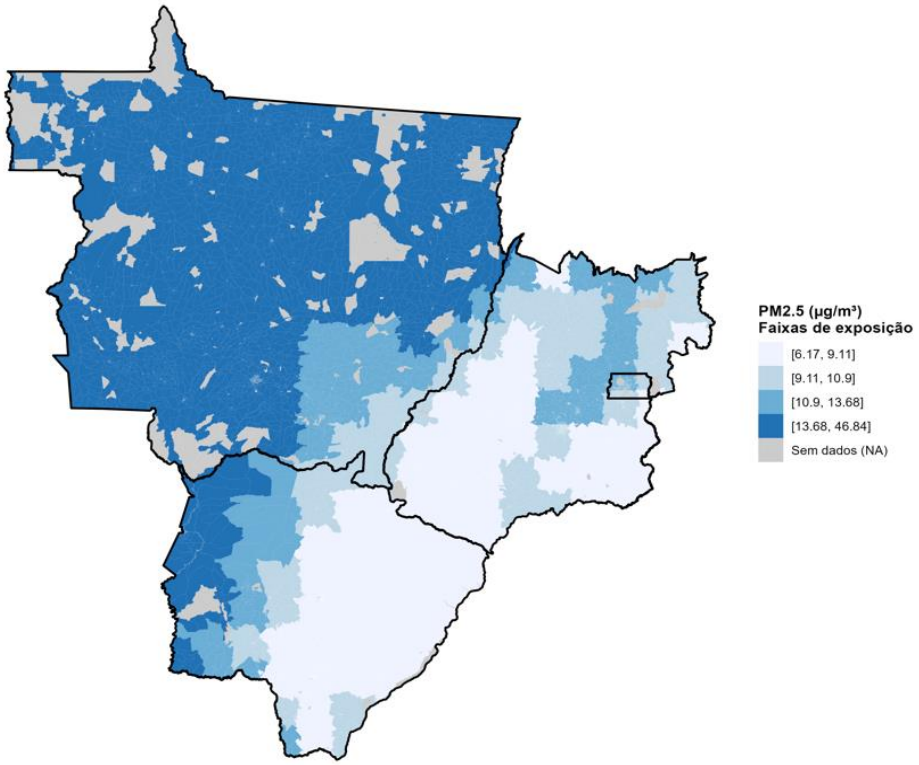
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A concentração média acumulada exposição ao material particulado fino ($PM_{2.5}$) nos setores censitários da Região Centro-Oeste apresenta uma ampla variação, variando entre 6,17 µg/m³ e 46,84 µg/m³.

Dentre os grupos raciais, os setores com predominância de responsáveis indígena apresentam média acumulada de exposição de 16,30 µg/m³. Os setores de maioria preta têm média acumulada de 14,30 µg/m³. Esses valores superam os registrados em setores de predominância parda 13,20 µg/m³ e branca 12,60 µg/m³.

A Figura 5 a seguir representa a exposição média acumulada de PM 2.5 na região Centro-Oeste, entre os anos de 2003 e 2022.

Figura 5 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de $PM_{2.5}$ – Centro-Oeste (2003–2022)



Fonte: CAMS (2003–2022). Elaboração própria (2025).

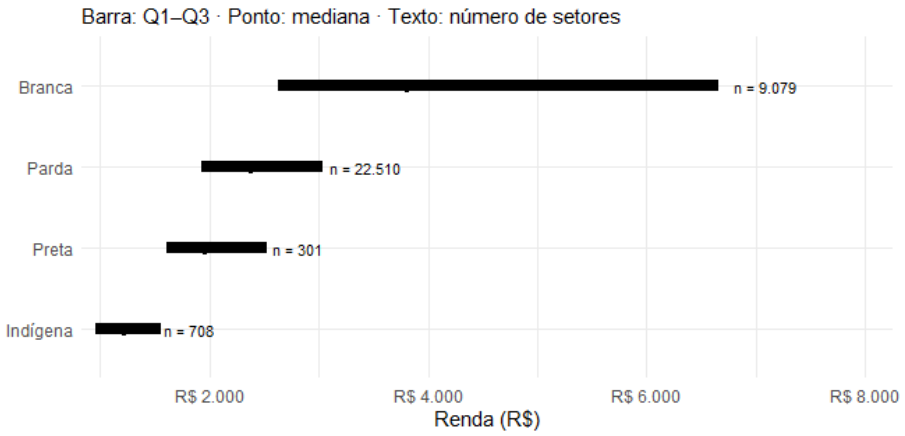
O mapa do Centro-Oeste revela um padrão em que valores intermediários e elevados de $PM_{2.5}$ se distribuem por quase todo o território do Mato Grosso, além de parte do sudoeste do Mato Grosso do Sul e de Goiás, possivelmente associados à produção de cana-de-açúcar e à atividade agropecuária (Bühler et al., 2023).

Quanto à renda, verificou-se que, nos setores com predominância de responsáveis brancos, a mediana foi de R$ 3.795,72. Esse valor é superior em R$ 1.419,06 (59,7%) à mediana dos setores de predominância parda (R$ 2.376,66), em R$ 1.838,06 (93,9%) à dos setores de predominância preta (R$ 1.957,66) e em R$ 2.587,34 (214,1%) à dos setores de predominância indígena (R$ 1.208,38).

A análise dos quartis confirma os padrões do parágrafo anterior. Em setores com predominância de responsáveis pardos, metade situa-se entre R$ 1.929,64 e R$ 3.038,76, com intervalo interquartílico de R$ 1.109,11, equivalente a 46,7% da mediana do grupo. Nos setores de predominância preta, a faixa varia de R$ 1.604,88 a R$ 2.528,37, resultando em um IQR de R$ 923,49 (47,2% da mediana). Nos setores indígenas, metade concentra-se entre R$ 952,70 e R$ 1.554,16, com intervalo interquartílico de R$ 601,46, aproximadamente 49,8% da mediana do grupo. Já nos setores brancos, metade está entre R$ 2.629,36 e R$ 6.661,31, com IQR de R$

4.031,95, correspondente a 106,2% da mediana, o que indica forte heterogeneidade interna. Em síntese, o Centro-Oeste combina rendas medianas mais altas e ampla variação interna nos setores brancos, em contraste com rendas persistentemente mais baixas e variação moderada nos setores com predominância de responsáveis pretos e indígenas. O Gráfico 8 sintetiza essas informações:

Gráfico 8 – Renda dos responsáveis – Região Centro-Oeste (por raça predominante)



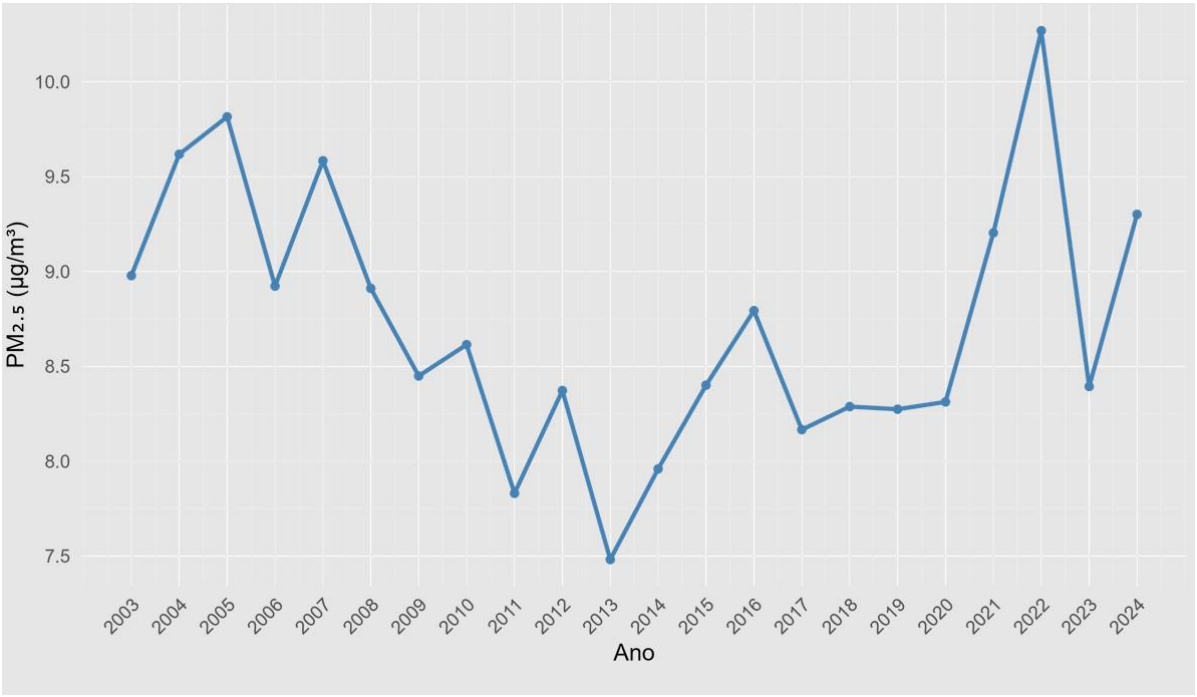
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.5 Região Nordeste

Na Região Nordeste, foram analisados 119.096 setores censitários. Desses, 82,01% apresentam maior percentual de responsáveis pardos, 11,70% de responsáveis brancos, 5,14% de responsáveis pretos e 1,15% de responsáveis indígenas. Foram identificados apenas três setores com maior percentual de responsáveis amarelos.

O Gráfico 9 apresenta a evolução histórica da concentração média anual de $PM_{2.5}$ na região. No início da série, as concentrações variaram entre 9 e 10 µg/m³, com pico em 2005 e, em seguida, tendência de redução a partir de 2007, atingindo o menor valor em 2013. Após esse ponto, observa-se uma recuperação gradual, com oscilações moderadas entre aproximadamente 8 e 9 µg/m³ até 2020. A partir desse ano, verifica-se um aumento expressivo, alcançando em 2022 o maior valor da série, superior a 10 µg/m³, seguido de queda em 2023 e novo crescimento em 2024. Esse aumento pode estar relacionado a eventos de seca prolongada e às queimadas na Caatinga e no Cerrado.

Gráfico 9 – Evolução Histórica do $PM_{2.5}$ – Nordeste (2003–2024)

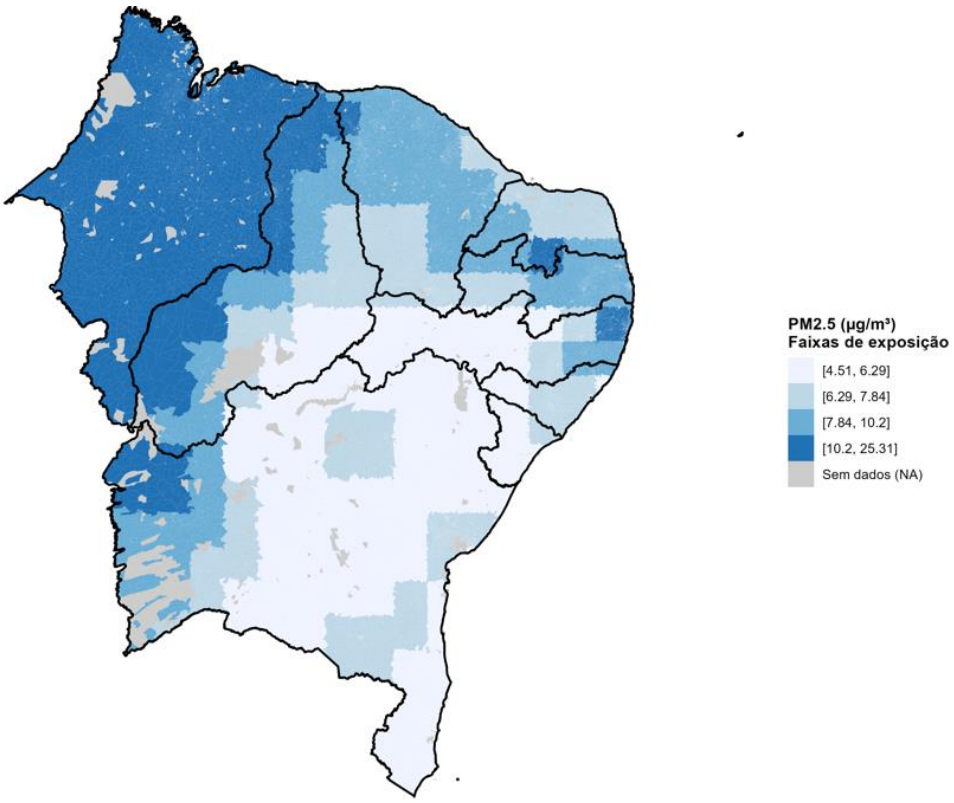


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Quanto à exposição acumulada ao PM 2.5, nos setores com predominância de responsáveis brancos, a média durante todo o período foi de 8,57 µg/m³. Nos setores com predominância preta e parda, as médias foram de 7,95 µg/m³ e 8,75 µg/m³, respectivamente. A média mais alta de exposição foi registrada nos setores com predominância indígena, atingindo 11,60 µg/m³, esse resultado pode estar relacionado ao aumento das queimadas em territórios indígenas nos últimos anos. Segundo levantamento do IPAM, apenas entre janeiro e agosto de 2024, a área queimada nesses territórios aumentou 76%, agravando problemas respiratórios, sobretudo entre crianças e idosos, e comprometendo a segurança alimentar e a infraestrutura básica desses povos (Prazeres, 2024).

A Figura 6 abaixo apresenta a distribuição espacial da concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ nos setores censitários da Região Nordeste entre 2003 e 2022.

Figura 6 – Distribuição Espacial da Concentração Média acumulada de PM 2.5 – Nordeste (2003–2022)



Fonte: CAMS (2003–2022). Elaboração própria (2025).

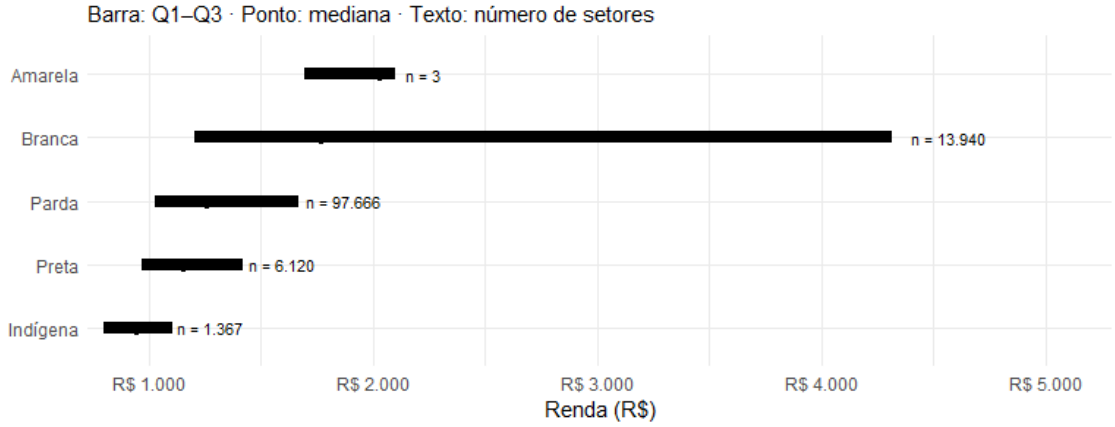
O mapa indica níveis elevados de exposição no Maranhão, que concentra a maior área com valores altos de $PM_{2.5}$ da região, estendendo-se para o norte do Piauí. As concentrações intermediárias se distribuem ao longo do litoral, com destaque para Ceará, Paraíba, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Alagoas. Valores mais baixos predominam no interior semiárido, sobretudo no interior da Bahia e no sul do Piauí, com zonas de transição intermediária entre o litoral e o sertão.

Em relação à renda na região, nos setores com predominância de responsáveis brancos, a mediana atinge 1.764,38 reais, superior em R$ 507,95 à mediana dos setores pardos (R$ 1.256,43). Quando comparados aos setores de predominância preta (R$ 1.152,70), a diferença é de R$ 611,68. Já em relação aos setores indígenas (R$ 941,52), a mediana dos setores brancos apresenta acréscimo de R$ 822,86, correspondendo a aproximadamente 87,7%.

A análise dos quartis evidencia essas desigualdades. Nos setores com maioria de responsáveis pardos, metade situa-se entre R$ 1.028,78 e R$ 1.667,45, com intervalo interquartílico de R$ 638,68, equivalente a 50,08% da mediana do grupo. Nos setores de maioria preta, a metade central varia de R$ 970,26 a R$ 1.415,43, resultando em intervalo de R$ 445,17, cerca de 38,06% da mediana. Entre os setores indígenas, a faixa vai de R$ 800,00 a

R$ 1.104,26, com intervalo de R$ 304,26, aproximadamente 32,03% da mediana. Já nos setores brancos, a mediana é mais elevada e com grande heterogeneidade: a metade central situa-se entre R$ 1.202,45 e R$ 4.311,45, com intervalo interquartílico de R$ 3.108,99. O Gráfico 10 abaixo apresenta essas informações:

Gráfico 10 – Renda dos responsáveis – Região Nordeste (por raça predominante)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os dados da Região Nordeste evidenciam a persistência de desigualdades estruturais marcadas por recortes raciais Os setores com predominância de pessoas brancas concentram os rendimentos mais elevados e apresentam maior variabilidade interna, enquanto os setores majoritariamente indígenas e pretos ocupam as posições mais vulneráveis, com rendas medianas significativamente inferiores e menor dispersão.

4 INTERAÇÃO ENTRE POLUIÇÃO DO AR, RENDA E RAÇA.

Esta seção apresenta as análises estatísticas realizadas com o objetivo de investigar as associações entre renda, perfil racial e exposição ao $PM_{2.5}$ nos setores censitários. As etapas incluíram a aplicação de testes de normalidade das variáveis, para a escolha dos métodos de correlação mais adequados e a interpretação dos resultados. Além disso, foram aplicadas quatro análises de clusters, incluindo: a primeira considerando apenas os níveis de poluição; a segunda incorporando poluição e renda; a terceira, poluição e composição racial; e a quarta integrando poluição, renda e raça.

Em seguida, foram ajustados cinco modelos aditivos generalizados (GAMs) com o objetivo de avaliar a associação entre variáveis socioeconômicas e poluição. Em todos eles, a concentração de $PM_{2.5}$ foi definida como variável dependente, enquanto renda e composição racial foram consideradas variáveis independentes. Para melhor capturar padrões de heterogeneidade, os modelos foram aplicados de forma estratificada por quintis, o que possibilitou analisar como a relação entre poluição e características sociais varia ao longo da distribuição.

4.1 TESTE SHAPIRO-WILK

A avaliação da distribuição das variáveis é uma etapa fundamental em estudos estatísticos, pois garante a adequação dos métodos análiticos a serem aplicados. Para essa verificação, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. Embora seja mais recomendado para amostras pequenas e médias, esse teste também pode ser utilizado em bases de dados extensas, desde que observado o limite de até 5.000 observações por execução. Para contornar o limite do teste, foi realizado sorteio aleatório, garantindo a representatividade da distribuição.

O quadro a seguir mostra o resultado do teste realizado no R:

Quadro 2 – Resultado do teste realizado no R

Variável	**W**	**p-valor**	**Interpretação**
renda_log	0.9602	5.90e-35	Não normal
pm25_medio_2003_2022_c	0.7746	7.27e-64	Não normal
porc_branca	0.9465	2.95e-39	Não normal
porc_preta	0.8529	6.39e-56	Não normal
porc_parda	0.9556	1.59e-36	Não normal
porc_indigena	0.0685	3.53e-94	Extremamente não normal

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

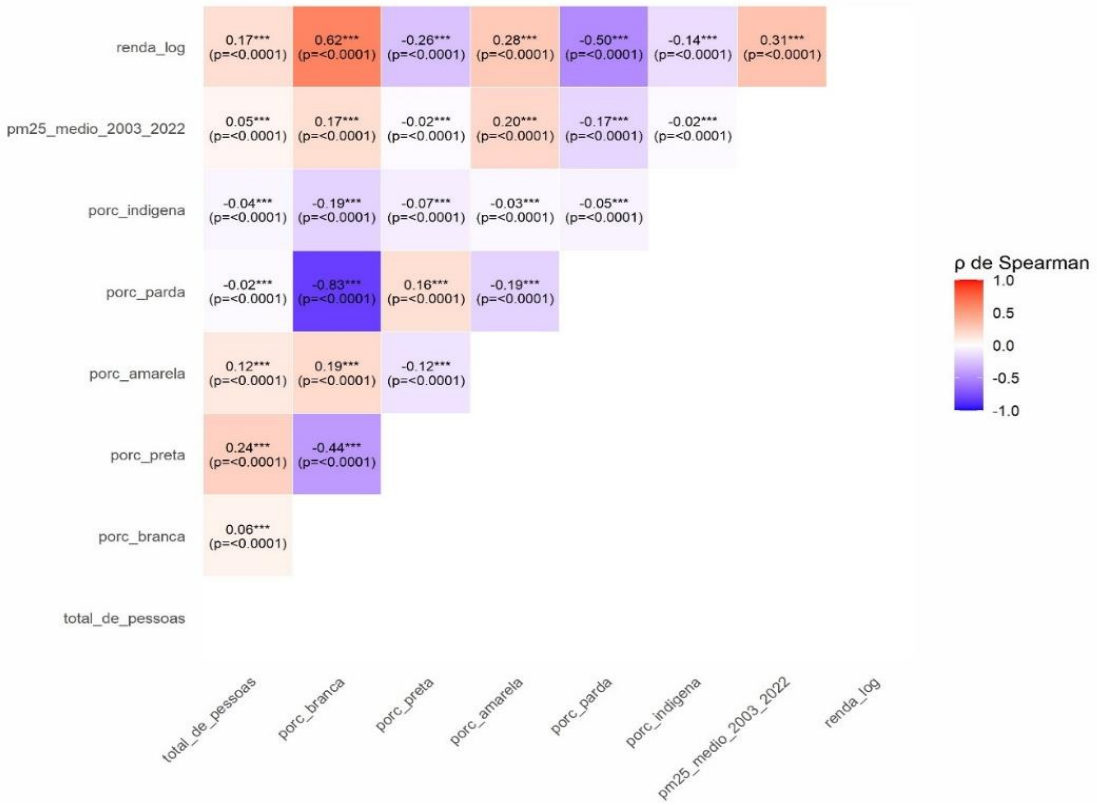
Os resultados apresentados no Quadro 2 indicam que todas as variáveis analisadas possuem p-valores inferiores 0,05, rejeitando a hipótese nula de normalidade. Isso significa que as distribuições de renda, $PM_{2.5}$ e das proporções raciais não seguem uma distribuição normal. Por esse motivo, optou-se pelo uso do coeficiente de Spearman, medida não paramétrica apropriada para dados que não atendem ao pressuposto da normalidade.

Para cada par de variáveis, foi estimado o coeficiente de correlação de Spearman (ρ), que quantifica a força e a direção da relação monotônica entre essas duas variáveis. O coeficiente varia de –1 a 1, sendo que valores positivos indicam que, à medida que uma variável aumenta, a outra tende a aumentar e valores negativos indicam que, à medida que uma cresce, a outra tende a diminuir. Também foi calculado o respectivo p valor, que indica se há ou não evidência de correlação. Valores baixos de p indicam que a correlação observada dificilmente ocorreria se não existisse correlação.

A análise considerou a renda logarítmica dos responsáveis pelo domicílio por setor, a média acumulada de exposição ao $PM_{2.5}$ e os percentuais da composição racial (branca, preta, parda, amarela e indígena).

A Figura 7 resume as associações entre renda, exposição ao $PM_{2.5}$ e perfil racial dos setores censitários.

Figura 7 – Matriz de correlação de Spearman



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na matriz, é possível observar que a renda apresenta correlação positiva forte com a proporção de responsáveis brancos e correlações negativas com as proporções de pardos e pretos. Para indígenas e amarelos, a associação é muito fraca. Esses resultados indicam que setores censitários com maior presença de população branca tendem a apresentar rendas médias mais elevadas, enquanto aqueles com predominância de população parda e preta registram rendas mais baixas, evidenciando desigualdades socioeconômicas estruturais associadas a raça.

A concentração média de $PM_{2.5}$ apresentou correlação positiva e moderada com a renda, ρ 0,31, sugerindo que os setores de maior renda tendem a localizar-se nas áreas centrais dos grandes centros urbanos, onde se observa maior concentração do poluente. Esse padrão pode ser explicado pela intensa atividade econômica e pelo tráfego veicular característico dessas regiões, que elevam os níveis de poluição atmosférica.

Por fim, as relações entre $PM_{2.5}$ e composição racial apresentaram coeficientes próximos de zero: brancos ($\rho = 0,17$), pardos ($\rho = -0,17$), pretos ($\rho = -0,02$), indígenas ($\rho = -0,02$) e amarelos ($\rho = 0,20$). A associação negativa entre $PM_{2.5}$ e a presença de responsáveis pretos e pardos pode refletir desigualdades de renda e padrões de urbanização, uma vez que parcela expressiva desses grupos reside em áreas periféricas de menor valor monetário, mais distantes dos centros urbanos, onde os níveis de poluição tendem a ser menores. No entanto, grande parte dessa população realiza deslocamentos diários prolongados para centros urbanos e polos industriais, seja para trabalhar ou estudar, percorrendo longas distâncias em áreas de tráfego intenso e alta emissão. Nesses contextos, a exposição pessoal ao $PM_{2.5}$ tende a ser mais elevada.

5 ANÁLISE DE CLUSTER COM VARIÁVEIS SOCIOECONÔMICAS E POLUIÇÃO

Para explorar padrões territoriais de exposição ao $PM_{2.5}$ em associação com características socioeconômicas e demográficas dos setores censitários, foi utilizada uma abordagem de análise de clusters. Essa técnica possibilita identificar grupos semelhantes a partir da similaridade das variáveis consideradas, contribuindo para revelar padrões territoriais relevantes no contexto da exposição à poluição atmosférica.

Para a análise foram realizadas quatro análises distintas de clusters utilizando diferentes combinações de variáveis:

1. Apenas poluição (considerando exclusivamente a média acumulada de $PM_{2.5}$,de 2003 a 2022.
2. Poluição e renda média.
3. Poluição e perfil racial.
4. Poluição, perfil racial e renda média.

Para determinar o número ótimo de clusters (k), utilizou-se o método *Within-cluster Sum of Squares* - WSS, que avalia o grau de homogeneidade interna dos agrupamentos formados. Contudo, devido às limitações computacionais impostas pelo tamanho da base de dados, o cálculo do WSS em todos os setores censitários excedia a capacidade de memória do computador disponível. Como alternativa foi selecionada uma amostra aleatória de 10.000 setores censitários para estimar o número ideal de clusters. A partir dessa análise preliminar, constatou-se que a definição de quatro clusters era a mais adequada.

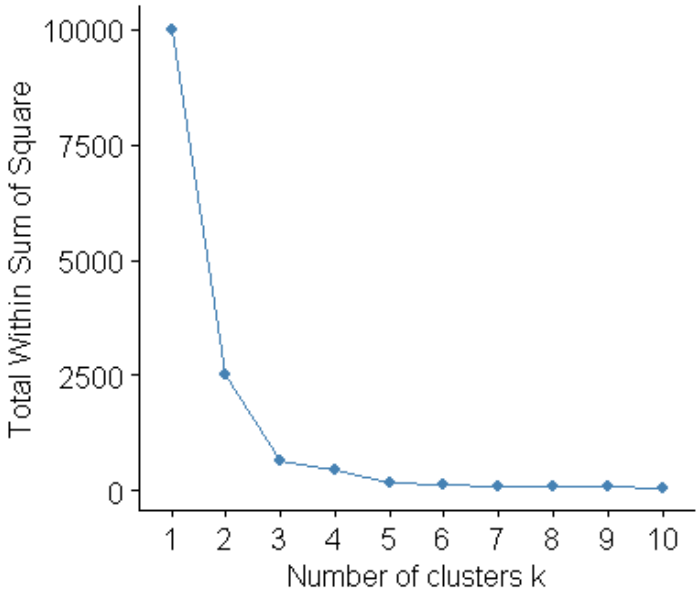
Com o número ótimo de clusters estabelecido, foi aplicado o método *k-means*, separadamente para cada um dos quatro conjuntos descritos acima. Antes da execução foi realizada uma etapa de limpeza dos dados, na qual foram excluídos os setores censitários que continham valores ausentes.

Após a definição dos clusters, foram criados mapas no software R, utilizando os pacotes ggplot2 e cowplot para a apresentação dos resultados. Os mapas exibem, por meio de diferentes cores, a distribuição territorial dos setores censitários agrupados segundo as combinações de variáveis consideradas.

O gráfico 11 apresent o método *Elbow*, utilizado para a definição do número ideal de clusters na análise de agrupamento realizada neste estudo. O método consiste em identificar o ponto em que a redução do WSS passa a ser pequena, gerando uma desaceleração visível na curva, que se assemelha a um cotovelo. Observando a curva obtida com a amostra de 10.000

observações, considerando somente a variável poluição, é possível identificar que a redução significativa do WSS ocorre até k = 4. A partir deste ponto, o ganho em homogeneidade passam a ser pequenos. Por isso, definiu-se quatro clusters como o número ideal para as análises subsequentes.

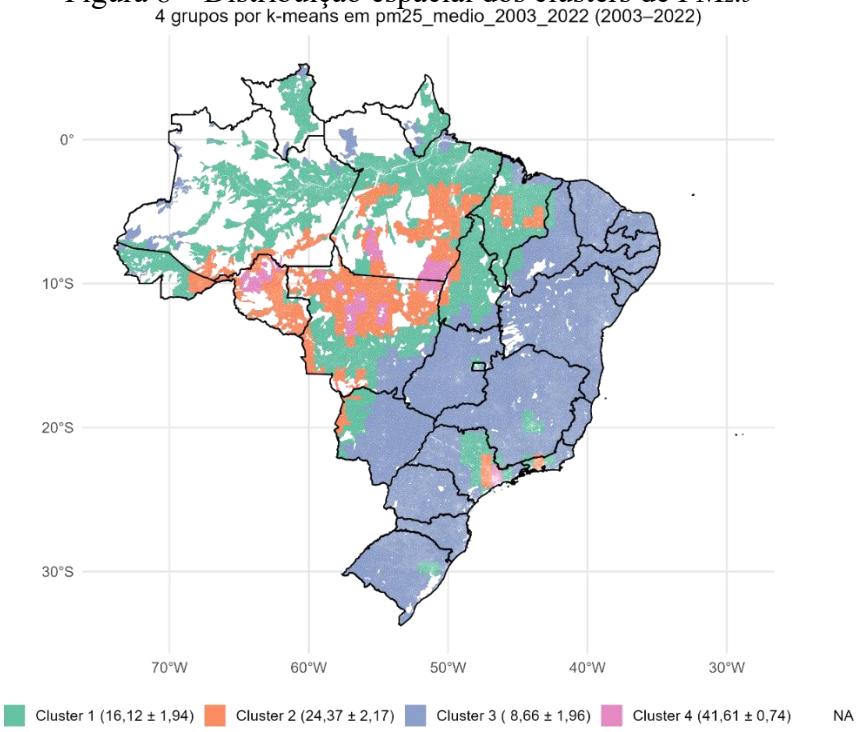
Gráfico 11 – Elbow – Poluição (amostra 10 000)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 8 apresenta a distribuição territorial dos setores censitários agrupados em quatro clusters distintos, com base exclusivamente nos níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$ no período de 2003 a 2022. Cada cor no mapa representa um dos grupos identificados pela análise *k-means*.

Figura 8 – Distribuição espacial dos clusters de $PM_{2.5}$



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Cluster 1, com 94.017 setores, apresenta uma concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ de aproximadamente 16,09 µg/m³, desvio padrão 1,94 µg/m³, representando um nível intermediário de exposição. Concentra-se em áreas dispersas pelo território nacional, refletindo um padrão relativamente homogêneo de poluição.

O Cluster 2, composto por 50.496 setores, apresenta concentrações médias mais elevadas de $PM_{2.5}$, em torno de 24,38 µg/m³, desvio padrão 2,17 µg/m³, indicando regiões com exposição elevada. Observa-se que este cluster tem uma forte presença nas regiões central e sudeste do país, destacando áreas possivelmente mais urbanizadas ou industrializadas, com atividades emissoras significativas.

O Cluster 3, que abrange o maior número de setores censitários, 256.107 setores, é caracterizado por apresentar as menores médias de concentração de $PM_{2.5}$, cerca de 8,66 µg/m³, desvio padrão 1,96 µg/m³. Geograficamente, esses setores predominam em grande parte do território brasileiro.

O Cluster 4, por sua vez, corresponde ao grupo com níveis mais altos de média de concentração de $PM_{2.5}$, 41,61 µg/m³, embora com menor desvio padrão, 0,74 µg/m³, indicando homogeneidade dentro do grupo em relação a essa variável. Os setores deste cluster concentram-se no Norte, Centro-Oeste e Sudeste, sugerindo grande presença de fontes de poluição. No Norte e Centro-Oeste, possivelmente ligadas a queimadas e mudanças de uso do

solo e, no Sudeste por ser o maior parque urbano industrial e possuir a maior frota veicular do país.

A tabela a seguir apresenta as principais estatísticas descritivas, número de setores, média, desvio-padrão, valores mínimo, máximo e mediana, para cada um dos quatro clusters de concentração média de $PM_{2.5}$ no período 2003–2022.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas dos clusters de concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) por setor

Cluster	n	mean_pm25	sd_pm25	min_pm25	max_pm25	median_pm25
Cluster 1	94.017	16,12	1,94	12,40	20,24	16,55
Cluster 2	50.496	24,37	2,17	20,29	32,86	24,45
Cluster 3	256.107	8,66	1,96	4,51	12,39	8,56
Cluster 4	51.371	41,61	0,74	33,10	46,84	41,73

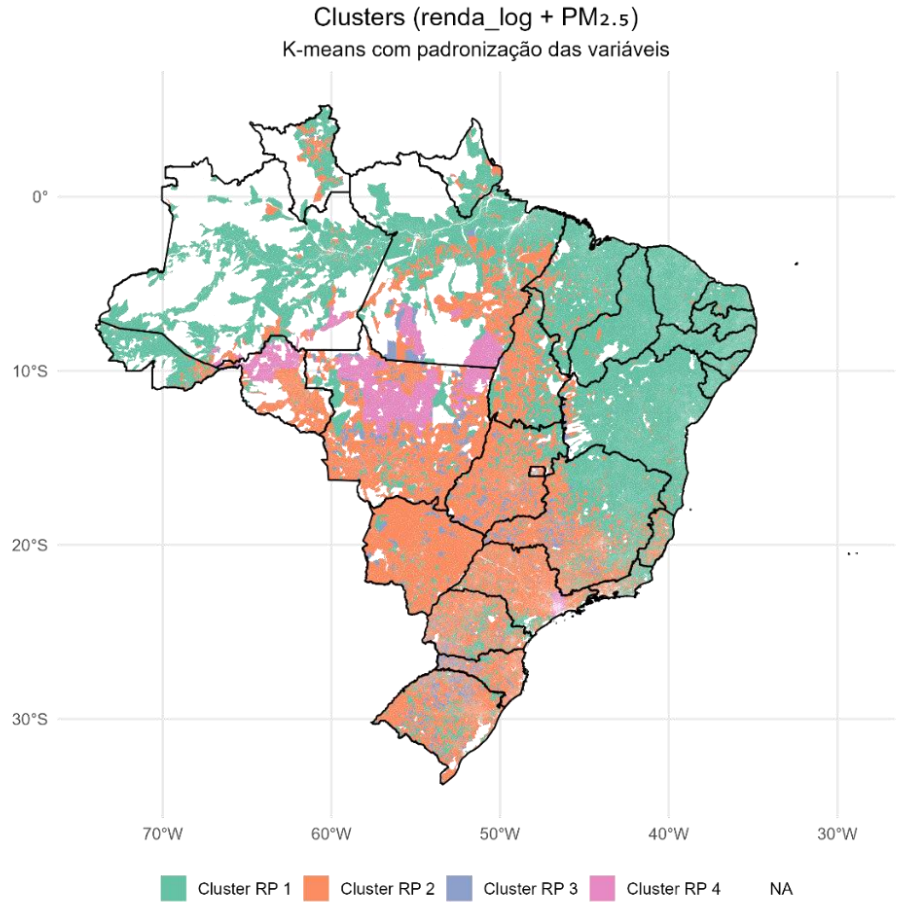
Elaboração própria, a partir de dados de $PM_{2.5}$ (2003–2022).

A análise dos quatro clusters pode ser um instrumento para a criação de políticas públicas que priorize as regiões mais críticas. Por exemplo, setores do Cluster 3 apresentam a menor média dentre os clusters, o que demanda políticas que reduzam ou mantenham esses patamares de baixa concentração, com fiscalização das fontes emissoras e proteção de vegetação. Já os Clusters 2 e 4 exigem maior prioridade do governo, como maior controle de emissões industriais, gestão eficiente de frotas veiculares, com inspeção veicular e zonas de baixas emissões, logística de transporte mais limpos e maiores incentivos à substituição tecnológica por veículos e modais de baixa e zero emissão. Considerando especificidades regionais, no Norte/Centro-Oeste a ênfase deve ser na prevenção e combate ao fogo, ordenamento do uso do solo e alternativas produtivas de baixa emissão.

5.1 ANÁLISE DE CLUSTER - POLUIÇÃO E RENDA

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial dos setores censitários brasileiros agrupados em quatro clusters, definidos a partir das variáveis concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ e renda média dos setores.

Figura 9 – Clusters de concentração média de $PM_{2.5}$ no Brasil (2003–2022)



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados de concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022).

O Cluster 1, representado pela cor verde no mapa, é formado por 154.527 setores, distribuído sobretudo no Nordeste e em porções do Norte. Apresenta as menores concentrações médias acumuladas de PM2,5 entre os clusters (média 10,05; mediana 8,56). Em renda, exibe a menor mediana, R$ 1.258,70. Isso indica a necessidade de políticas voltadas à manutenção de baixos níveis de poluição e à proteção de populações de menor renda.

Cluster 2, laranja, é formado por 190.383 setores, predominante na região Sul, no interior do Sudeste e em parte do Centro-Oeste. Apresenta média de $PM_{2.5}$ de 13,62 µg/m³ e mediana de 11,48 µg/m³, valores um pouco mais elevados que os observados no Cluster 1. O cluster apresenta setores com renda mínima de R$ 1292,33 e máxima de R$ 4.042,74.

O Cluster 3, roxo, reúne 53.701 setores. Apresenta as rendas mais altas entre os clusters, com média de R$ 7.236,00 e mediana de R$ 5.788,86. A concentração de $PM_{2.5}$ também é superior à observada nos Clusters 1 e 2, com média de 14,1 µg/m³ e mediana de 12,20 µg/m³. Esse agrupamento está presente principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. A combinação desses fatores sugere a presença de grandes centros urbanos e eixos econômicos

marcados pela concentração de atividades industriais e agroindustriais, nos quais tanto a renda quanto os níveis de poluição são mais elevados.

O Cluster 4, rosa, é formado por 53.380 setores. Distribui-se principalmente no Sudeste, concentrado em São Paulo, no Centro-Oeste, especialmente no sul do Mato Grosso e em pontos do Norte (RO, PA, AM, TO, AC). Entre 2003 e 2022, apresenta as maiores concentrações médias acumuladas de $PM_{2.5}$ entre os clusters, média 41,20 µg/m³ e mediana 41,73 µg/m³. A renda média nesses setores é de R$ 4.270,14, e a mediana é a segunda mais alta entre os clusters, R$ 2.756,76. Deve ser prioridade nas ações do governo, tendo em vista os níveis elevados de poluição, com metas de redução anual, fortalecimento das redes de monitoramento, ampliação dos alertas em saúde, controle rigoroso de emissões industriais e do agronegócio.

A Tabela 3 abaixo apresenta as estatísticas descritivas detalhadas dos quatro clusters obtidos na análise *k-means:*

Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos clusters de renda *log* e $PM_{2.5}$

cluster	n	mean_pm25	sd_pm25	min_pm25	max_pm25	median_pm25	mean_renda	sd_renda	min_renda	max_renda	median_renda
1	154527	10,05497244	4,515532435	4,505464787	34,30813111	8,559825543	1258,695063	291,803047	80	1952,34	1245,35
2	190383	13,61764095	5,855710061	4,505464787	29,57923012	11,47836595	2512,477598	603,3091842	1292,33	4042,74	2403,47
3	53701	14,08509889	6,200492574	4,721149085	41,73125856	12,17607773	7236,384014	4363,170624	3908,74	177068,09	5788,86
4	53380	41,19694127	2,196759847	26,71217171	46,84003047	41,73125856	4270,135587	3859,954216	366,67	31514,77	2756,755

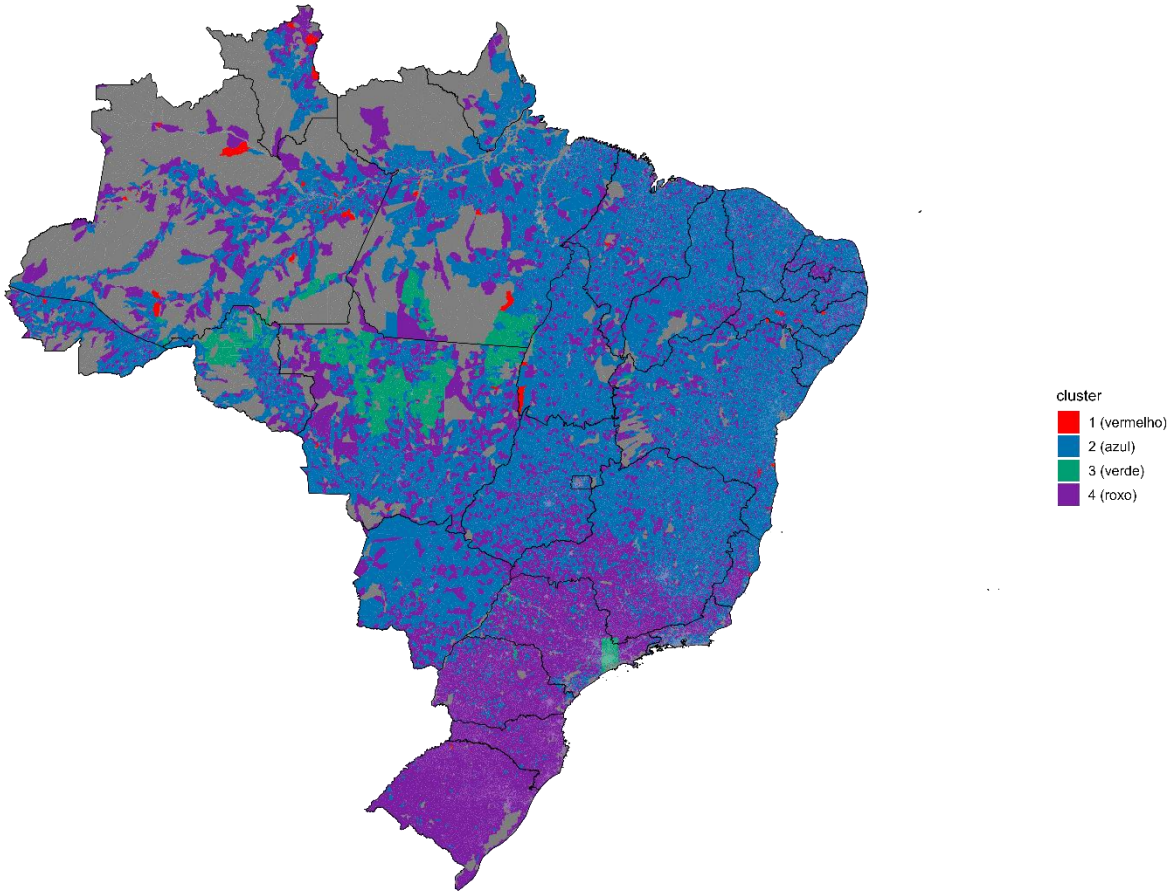
Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados de concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022) e renda.

Em resumo, a análise da combinação entre renda e $PM_{2.5}$ evidencia especificidades regionais. O Cluster 1 demanda políticas voltadas à manutenção e redução adicional dos níveis de poluição, associadas à proteção social para populações de menor renda. O Cluster 2 requer ações localizadas no Sul, interior do Sudeste e faixas do Centro-Oeste, com foco nos setores acima da mediana de 11,48 µg/m³. Já os Clusters 3 e 4 devem ser priorizados com políticas de redução dos níveis de $PM_{2.5}$, dada a maior concentração do poluente.

5.2 ANÁLISE DE CLUSTER POLUIÇÃO E PERFIL RACIAL

A Figura 10 apresenta a distribuição dos quatro clusters que reúnem as variáveis relacionadas à concentração média de $PM_{2.5}$ e à composição racial dos setores censitários.

Figura 10 – Clusters ($PM_{2.5}$ + Perfil Racial)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Cluster verde, é composto por 55.853 setores censitários e contém os setores com maiores níveis médios acumulados de concentração $PM_{2.5}$, entre todos os grupos analisados. A média de concentração é de 39,36 µg/m³, e desvio padrão de 5,50.

Em relação à composição racial, apresenta certa diversidade, embora ainda predomine a população branca (45,47%), seguida por pardos (32,13%) e pretos (9,41%). As proporções de indígenas (0,023%) e amarelos (0,41%) são muito reduzidas .

O Cluster azul, contém o maior número de setores, 202.819, amplamente distribuídos pelo território nacional. Apresenta média relativamente baixa de $PM_{2.5}$, de 11,72 µg/m³, com desvio padrão de 5,73 µg/m³. A amplitude dos valores, variando entre 4,50 µg/m³ e 37,89

µg/m³, revela significativa variabilidade interna, abrangendo desde áreas relativamente menos poluídas até aquelas com concentrações elevadas, geralmente em regiões urbanizadas.

No que se refere ao perfil racial, o Cluster azul apresenta a maior proporção média de responsáveis por domicílios pardos (58,42%), além de percentuais relevantes de pretos (14,48%) e indígenas (0,15%), valores superiores aos observados nos demais grupos. A média de responsáveis brancos, por sua vez, é de 21,83%, a mais baixa entre os quatro clusters, enquanto os responsáveis amarelos representam apenas 0,02% do total. Esses dados evidenciam que esse cluster é composto predominantemente por setores censitários habitados por grupos racializados, com forte presença da população negra (pardas e pretas), além de indígenas, ainda que em proporções menores.

O Cluster vermelho no mapa, abrange um total de 5.493 setores censitários, constituindo o grupo de menor representatividade territorial entre os clusters analisados. A concentração média de $PM_{2.5}$ nesses setores é de 32,78 µg/m³, com desvio padrão de 13,52 µg/m³, o que indica elevada variabilidade interna.

Do ponto de vista racial, o Cluster vermelho apresenta uma composição distinta dos demais. A média de responsáveis brancos é de 65,56%, a mais elevada entre os clusters, seguida por 14,53% de pardos e 2,87% de pretos. Destaca-se ainda a presença de 10,20% de responsáveis amarelos, também a maior proporção entre os grupos analisados, além de uma participação residual de indígenas (0,60%).

Por fim, o Cluster roxo é composto por 184.335 setores censitários. Em termos de poluição atmosférica, apresenta concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ de 12,41 µg/m³, com desvio padrão de 5,24 µg/m³.

Quanto à composição racial, destaca-se pela predominância de responsáveis brancos (49,91%), seguidos por pardos (18,50%), pretos (4,44%), indígenas (0,60%) e amarelos (0,11%).

A Tabela 4 abaixo apresenta as estatísticas descritivas detalhadas dos quatro clusters.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos clusters raça e $PM_{2.5}$

Estatisticas descritivas dos clusters raça e PM2.5										
cluster	n	mean_pm25	sd_pm25	min_pm25	max_pm25	mean_branca	mean_preta	mean_amarela	mean_parda	mean_indigena
Verde	55853	39,3627989	5,50332775	22,1686325	46,8400305	45,4754803	9,41382773	0,41984209	32,1377443	0,02355057
Azul	202819	11,7287076	5,73310899	4,50546479	37,8913178	21,8350621	14,4897687	0,02767196	58,427229	0,15119999
Vermelho	5493	32,7842168	13,5276785	5,41198896	41,7312586	65,5691116	2,87625341	10,2905553	14,5332168	0,00684143
Roxo	184335	12,4141963	5,2478391	4,50546479	41,7312586	49,9136166	4,44558836	0,11577487	18,5099296	0,60502335

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

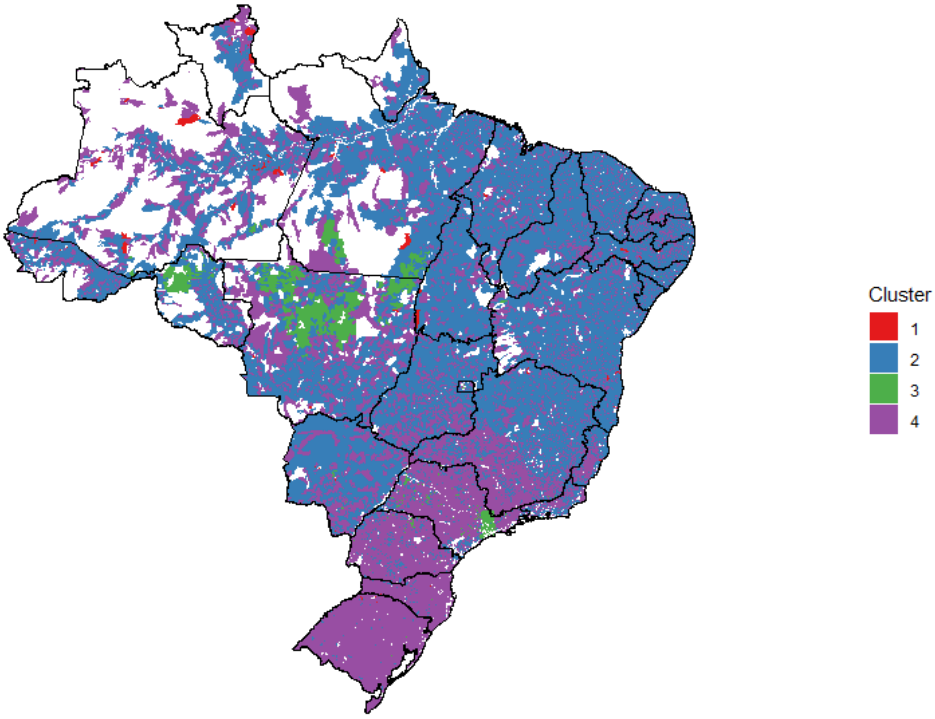
A análise de clusters sugere que a distribuição da poluição atmosférica por $PM_{2.5}$ no Brasil está interseccionada com marcadores raciais, de modo que populações negras se concentram

em setores censitários que, além menores rendas, registram, em muitos casos, níveis altos de exposição ao $PM_{2.5}$, como no Cluster 2. Esse resultado reforça a persistência das desigualdades ambientais no país, nas quais grupos historicamente vulnerabilizados enfrentam simultaneamente desvantagens econômicas e riscos ambientais mais elevado.

5.3 ANÁLISE DE CLUSTER POLUIÇÃO, PERFIL RACIAL E RENDA

O mapa abaixo apresenta a distribuição dos quatro clusters, considerando simultaneamente as variáveis concentração média acumulada de $PM_{2.5}$, composição racial e renda média dos setores censitários no Brasil.

Figura 11 – K-means ($PM_{2.5}$ + Perfil Racial + Renda)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O Cluster 1, vermelho, contém apenas 807 setores, o único cluster com predominância de responsáveis i ndígenas (73%), seguido por pardos (20%), brancos (4%) e pretos (2%). Apresenta concentração média de $PM_{2.5}$ de 11,24 µg/m³, com desvio padrão de 5,05 µg/m³. Está concentrado no Norte do país e possui a menor renda média entre os clusters. Trata-se de um grupo pequeno, marcado por baixa renda e níveis médios reduzidos de poluição, embora alguns setores registrem picos elevados, chegando a 41,73 µg/m³.

O Cluster 2, azul , composto por 202.687 setores censitários, apresenta concentração média de $PM_{2.5}$ de 12,05 µg/m³ e desvio padrão de 6,3 µg/m³. Renda média de R$ 1.795,56

com desvio padrão de R$ 869,75. Esse cluster apresenta grande heterogeneidade racial, responsáveis brancos somam 22%, pretos 15% e pardos 58% e baixas proporções das demais categorias raciais. Esses setores predominam na maior parte do país, com menor presença nas regiões Sul e Sudeste.

O Cluster 3, verde, contém 62.368 setores e concentra a maior carga de $PM_{2.5}$, 37,66µg/m³ e desvio padrão de 8,60 µg/m³. Também concentra a maior renda média entre os clusters, R$ 5.555,95 com desvio padrão de R$ 5.342,16, indicando uma grande variação interna. Nesse cluster predomina os responsáveis brancos, 51%, seguido de pardos, 28%, pretos, 8%, amarelos, 1% e indígena residual.

O Cluster 4, roxo, caracteriza-se por níveis médios de poluição de baixa a moderada. Formado por 182.638 setores censitários, com concentração média acumulada de $PM_{2.5}$ de 12,29 µg/m³ e desvio padrão de 5,20 µg/m³. A renda média é de R$ 3.133,63, com desvio padrão de R$ 2.101,77. Em termos raciais, predominam responsáveis brancos (49%), seguidos por pardos (19%) e pretos (5%). Esses setores localizam-se principalmente nas regiões Sul e Sudeste.

A Tabela 5 a seguir apresenta os resultados das análises descritas acima:

Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos clusters $PM_{2.5}$, renda e raça

cluster	n	mean_pm25	sd_pm25	min_pm25	max_pm25	mean_renda	sd_renda	mean_porc_branca	mean_porc_preta	mean_porc_amarela	mean_porc_parda	mean_porc_indigena
1	807	11,24	5,05	4,70	41,73	1160,18	376,20	4%	2%	0%	20%	73%
2	202687	12,05	6,30	4,51	43,41	1795,56	869,75	22%	15%	0%	58%	0%
3	62368	37,66	8,60	4,72	46,84	5555,95	5342,16	51%	8%	1%	28%	0%
4	182638	12,29	5,20	4,51	34,64	3133,63	2101,77	49%	5%	0%	19%	0%

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para o Cluster 1, onde predominam populações indígenas em situação de baixa renda e maior vulnerabilidade socioeconômica, é fundamental fortalecer políticas de proteção territorial e ambiental, garantindo a demarcação e fiscalização de terras, bem como investimentos em saúde ambiental e infraestrutura básica adaptada às especificidades culturais. O Cluster 2, majoritariamente composto por populações negras de baixa renda, demanda políticas com foco no controle da poluição em áreas periféricas, ampliação do saneamento e acesso a transporte coletivo de baixa emissão. O Cluster 3, que combina altos níveis de poluição com maior renda média e predominância de população branca, aponta a necessidade de políticas regulatórias mais rígidas sobre emissões industriais e veiculares, além de instrumentos econômicos, como tributos verdes, que responsabilizem grandes emissores. Por fim, o Cluster 4, localizado sobretudo nas regiões Sul e Sudeste, com renda intermediária e maioria branca, sugere a adoção de políticas de prevenção e mitigação que combinem investimentos planejamento urbano ecológico, transição energética e fortalecimento da governança ambiental local.

6 MODELO ADITIVO GENERALIZADO

Para compreender as desigualdades ambientais de forma mais precisa, foram utilizados modelos aditivos generalizados (GAMs) aplicados aos quintis de renda e de perfil racial. Esses modelos permitem avaliar a associação entre os níveis médios de poluição atmosférica por $PM_{2.5}$ e diferentes grupos populacionais, considerando variações não lineares e controlando a autocorrelação espacial por meio de splines de latitude e longitude. A transformação das variáveis socioeconômicas e raciais em quintis possibilita comparações mais robustas entre grupos, identificando padrões de maior ou menor exposição em diferentes contextos. No presente estudo, essa abordagem mostra-se útil por evidenciar a distribuição desigual da poluição entre grupos de renda e raciais, subsidiando a discussão sobre justiça ambiental e a formulação de políticas públicas mais direcionadas.

Nos Modelos Aditivos Generalizados utilizou-se $PM_{2.5}$ como variável dependente e os indicadores econômicos e raciais como independentes.

No primeiro modelo, foi avaliada a relação entre os níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$ e os quintis de renda, tendo como referência o grupo de menor renda (quintil 1). Os resultados são apresentados na tabela a seguir..

Tabela 6 – Modelos Aditivos Generalizados: associação entre quintis de renda e concentração média de $PM_{2.5}$

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf)	IC95% (sup	signif
Quintis de renda (renda_log)	1	0				0	0	
Quintis de renda (renda_log)		0,0818	0,012529	6,529023	6,63E-11	0,057244	0,106357	***
Quintis de renda (renda_log)		0,155713	0,010545	14,76721	2,45E-49	0,135046	0,17638	***
Quintis de renda (renda_log)		0,141157	0,009847	14,33506	1,35E-46	0,121857	0,160457	***
Quintis de renda (renda_log)		0,003425	0,009669	0,354222	0,723172	-0,01553	0,022377	

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os quintis intermediários (2, 3 e 4) apresentam coeficientes positivos e estatisticamente significativos, o que indica que setores censitários com renda média e média-alta estão associados a maiores níveis de poluição atmosférica quando comparados ao grupo de menor renda. Em contrapartida, o quintil 5, que representa os setores de maior renda, não apresentou associação estatisticamente significativa, o que aponta para uma relação não linear entre renda e exposição ao $PM_{2.5}$. Esses achados reforçam a importância de considerar a heterogeneidade socioeconômica na análise da distribuição da poluição, uma vez que a maior exposição não recai exclusivamente sobre os grupos de menor renda, mas se concentra também em áreas de renda intermediária, frequentemente localizadas em centros urbanos com maior densidade

populacional, marcados por elevado nível de atividades econômicas e intenso tráfego de veículos.

O objetivo do Modelo 2B foi investigar a associação entre a proporção de responsáveis pelos domicílios brancos nos setores censitários, classificada em quintis, e os níveis médios acumulados de $PM_{2.5}$ no período de 2003 a 2022. A utilização dos quintis possibilita identificar se a poluição atmosférica se distribui de forma desigual conforme o aumento da proporção de responsáveis brancos nos territórios. A tabela baixa apresenta os resultados:

Tabela 7 – Resultados do Modelo 2B: associação entre quintis da proporção de responsáveis brancos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022)

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf	C95% (sup	signif
Quintis de raça (branca)	1	0				0	0	
Quintis de raça (branca)		-0,25846	0,012086	-21,3852	2,1E-101	-0,28215	-0,23477	***
Quintis de raça (branca)		-0,2932	0,010833	-27,0657	3,4E-161	-0,31443	-0,27197	***
Quintis de raça (branca)		0,11669	0,010317	11,3099	1,18E-29	0,096468	0,136912	***
Quintis de raça (branca)		0,16548	0,009812	16,86507	8,51E-64	0,146248	0,184712	***

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados indicam uma associação não linear entre a proporção de responsáveis pelos domicílios brancos nos setores censitários e os níveis de poluição atmosférica por $PM_{2.5}$. Observa-se que os quintis 2 e 3 apresentam coeficientes negativos e estatisticamente significativos ($\beta = -0,25$ e $\beta = -0,29$), sugerindo que setores com presença intermediária de população branca tendem a registrar concentrações mais baixas de poluição em comparação ao quintil 1, utilizado como referência. Em contrapartida, os quintis 4 e 5 apresentam coeficientes positivos e significativos ($\beta = 0,11$ e $\beta = 0,16$), indicando que áreas com forte predominância de população branca estão associadas a maiores níveis de $PM_{2.5}$.

Esse resultado corrobora com as discussões já desenvolvidas ao longo deste trabalho. Conforme verificado nas análises anteriores, as áreas de maior renda também correspondem aos espaços de maior exposição ao $PM_{2.5}$. Ademais, observou-se que a população branca apresenta, em média, os maiores níveis de renda. Assim, a associação positiva identificada nos quintis 4 e 5 pode refletir precisamente essa sobreposição entre elevada concentração de população branca, alta renda e localização em regiões urbanas densas, nas quais a pressão ambiental decorrente do tráfego e da expansão urbana tende a aumentar os níveis de $PM_{2.5}$. e outros poluentes.

Já no modelo 2C foi investigada a associação entre a proporção de responsáveis pelos domicílios pretos, estratificada em quintis, e os níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$. Os resultados foram apresentados na tabela a seguir:

Tabela 8 – Resultados do Modelo 2C: associação entre quintis da proporção de responsáveis pretos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022)

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf	IC95% (sup	signif
Quintis de raça (preta)	1	0				0	0	
Quintis de raça (preta)		0,571765	0,010973	52,10635	0	0,550258	0,593272	***
Quintis de raça (preta)		0,138489	0,010011	13,83306	1,64E-43	0,118867	0,158112	***
Quintis de raça (preta)		0,121169	0,00978	12,38963	3,01E-35	0,102	0,140337	***
Quintis de raça (preta)		-0,10694	0,009667	-11,0617	1,94E-28	-0,12588	-0,08799	***

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Considerando o o quintil 1 como referência, os resultados mostram que os quintis 2, 3 e 4 apresentam coeficientes positivos e são estatisticamente significantes, indicando que os setores com maior proporção de responsáveis pretos estão associados a maiores níveis de poluição em relação aos de menor composição. O quintil 2 se sobressai na análise, pois apresenta o coeficiente mais elevado ($\beta = 0,57$), sugerindo que áreas com presença moderada de população preta concentram os níveis mais altos de exposição. Por outro lado, o quintil 5 apresentou coeficiente negativo ($\beta = -0,10$), indicando que territórios de predominância muito elevada desse grupo não registram necessariamente os maiores níveis de poluição.

Esse resultado pode refletir o fato de que setores com maior presença de pessoas pretas localizam-se, em muitos casos, em áreas mais afastadas e periféricas. Assim, a análise também revela uma relação não linear, em que os setores de composição intermediária frequentemente localizados em regiões altamente urbanizadas e de alta circulação concentram maior exposição, enquanto as áreas periféricas de forte predominância preta, embora marcadas por outras dimensões de desigualdade, não estão necessariamente entre as mais expostas ao $PM_{2.5}$ no local de residência. Porém, é importante destacar que a população residente desses territórios periféricos frequentemente enfrenta longos deslocamentos diários por vias de tráfego intenso até as regiões centrais, o que eleva substancialmente seus níveis de exposição individual à poluição. Essa dinâmica evidencia uma dupla vulnerabilidade: por um lado, a concentração de poluentes em áreas urbanas centrais e por outro, a sobrecarga de exposição cotidiana associada à mobilidade urbana, sem que essas populações disponham das ferramentas e recursos necessários para mitigar os impactos negativos sobre sua saúde e bem-estar. Vale ressaltar, ainda, que as análises anteriores desta pesquisa demonstraram que a população preta apresenta, em média, os menores níveis de renda.

O modelo 2D buscou avaliar a associação entre os quintis de responsáveis pelos domicílios pardo e os níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$. A tabela abaixo apresenta os resultados:

Tabela 9 – Resultados do Modelo 2D: associação entre quintis da proporção de responsáveis pardos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022)

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf	IC95% (sup	signif
Quintis de raça (parda)	1	0				0	0	
Quintis de raça (parda)		0,166332	0,011982	13,88146	8,38E-44	0,142847	0,189818	***
Quintis de raça (parda)		-0,00575	0,011276	-0,51031	0,609835	-0,02786	0,016347	
Quintis de raça (parda)		-0,24277	0,010253	-23,6773	7,4E-124	-0,26287	-0,22268	***
Quintis de raça (parda)		0,007373	0,009775	0,754352	0,450638	-0,01178	0,026532	

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados referentes aos responsáveis pardos evidenciam uma relação não linear entre sua presença nos setores censitários e os níveis de poluição por $PM_{2.5}$. Enquanto o quintil 2 apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo ($\beta = 0,16$), indicando maior concentração de poluentes em setores com presença moderada de responsáveis pardos, o quintil 3 não apresentou significância estatística. Já o quintil 4 apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo ($\beta = -0,24$), sugerindo que áreas com maior presença de população parda podem registrar menores níveis de poluição em comparação ao quintil de referência, ao passo que o quintil 5 também não apresentou significância estatística. Uma explicação plausível para esse padrão é o fato de que a população parda representa 45,3% da população brasileira, segundo o Censo do IBGE de 2022, constituindo o maior grupo demográfico do país. Como demonstrado na análise dos clusters, a ampla presença desse grupo em todo o território nacional faz com que esteja distribuído tanto em grandes centros urbanos e industrializados, caracterizados por maiores níveis de exposição ao $PM_{2.5}$, quanto em regiões rurais e periféricas, onde os níveis de emissão tendem a ser menores. Essa heterogeneidade nos territórios contribui para a relação não linear observada nos resultados, demostrando que a população parda vivencia diferentes contextos de exposição conforme o território em que está inserida..

O Modelo 2E teve como objetivo avaliar a associação entre os quintis de responsáveis pelos domicílios indígenas e os níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$, cujos resultados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 10 – Resultados do Modelo 2E: associação entre quintis da proporção de responsáveis indígenas por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022)

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf	IC95% (sup	signif
Quintis de raça (indígena)	1	0				0	0	
Quintis de raça (indígena)		0,082914	0,024415	3,396038	0,000684	0,035061	0,130767	***
Quintis de raça (indígena)		-0,36059	0,028817	-12,5131	6,42E-36	-0,41707	-0,30411	***
Quintis de raça (indígena)		-0,06071	0,019042	-3,18802	0,001433	-0,09803	-0,02338	**
Quintis de raça (indígena)		0,168957	0,013791	12,25124	1,68E-34	0,141927	0,195987	***

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados do modelo evidenciam uma associação heterogênea entre a proporção de responsáveis indígenas e os níveis de poluição atmosférica por $PM_{2.5}$. O quintil 2 apresentou

coeficiente positivo e estatisticamente significativo (β = 0,08), indicando maior exposição em setores com presença relativamente baixa desse grupo. Em contrapartida, os quintis 3 e 4 exibiram coeficientes negativos e significativos (β = –0,36 e β = –0,06, respectivamente), sugerindo que setores com proporção intermediária de população indígena tendem a registrar menores concentrações de poluentes em relação ao grupo de referência. Já o quintil 5 apresentou coeficiente positivo e significativo (β = 0,17), apontando que áreas com forte predominância indígena estão associadas a níveis mais elevados de $PM_{2.5}$. Esse padrão não linear reforça a importância da localização territorial, uma vez que parte da população indígena vive em regiões remotas, com baixa pressão de fontes poluidoras, enquanto outras comunidades estão inseridas em contextos marcados por atividades de alto impacto ambiental, como desmatamento, mineração e queimadas, o que contribui para a associação positiva observada no quintil superior

Esses resultados precisam ser interpretados em conjunto com as especificidades da população indígena. Muitos povos indígenas vivem em territórios de difícil acesso, frequentemente afastados de centros urbanos, o que implica em acesso restrito a hospitais e a outros serviços básicos de saúde fundamentais para mitigar os efeitos adversos da poluição. Além disso, uma parcela é formada por povos isolados ou de contato recente, cuja vulnerabilidade é ainda maior diante de atividades extrativistas e exploratórias que atingem seus territórios, como o garimpo ilegal, a extração de madeira, a mineração e o avanço do desmatamento. Essas práticas não apenas degradam o meio ambiente, mas também intensificam a exposição à poluição e ameaçam diretamente a sobrevivência desses povos. Sendo assim, a análise deve ser articulada às demais formas de vulnerabilidade a que os povos indígenas estão expostos, como a violência ambiental e territorial que afeta diretamente seus modos de vida, exigindo políticas públicas específicas que considerem, de forma integrada, as múltiplas dimensões de violência ambiental que incidem sobre esses povos.

No Modelo 2F, foi analisada a associação entre os quintis dos responsáveis pelos domicílios amarelos e os níveis médios de concentração de $PM_{2.5}$. Os resultados encontram-se apresentados na tabela a seguir:

Tabela 11 – Resultados do Modelo 2F: associação entre quintis da proporção de responsáveis amarelos por domicílios e a concentração média de $PM_{2.5}$ (2003–2022)

Modelo	Quintil	Beta	Erro Padrão	t value	p-valor	IC95% (inf	C95% (sup	signif
Quintis de raça (amarela)	1	0				0	0	
Quintis de raça (amarela)		-0,25931	0,032854	-7,89297	2,96E-15	-0,32371	-0,19492	***
Quintis de raça (amarela)		-0,10738	0,025569	-4,19981	2,67E-05	-0,1575	-0,05727	***
Quintis de raça (amarela)		0,469451	0,018834	24,92511	4,9E-137	0,432535	0,506366	***
Quintis de raça (amarela)		0,28936	0,014234	20,32926	7,8E-92	0,261462	0,317258	***

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Embora o modelo 2F aponte uma associação positiva significativa nos quintis 4 e 5 indicando que setores com maior presença de responsáveis pelos domicílios amarelos apresentam níveis mais elevados de $PM_{2.5}$, é importante destacar que esse grupo populacional representa uma parcela muito pequena da composição demográfica brasileira, estando fortemente concentrada em áreas urbanas específicas, como a região metropolitana de São Paulo. Esse fator pode distorcer a análise, uma vez que, por um lado, a alta concentração desse grupo em grandes centros urbanos ajuda a explicar os coeficientes positivos observados e por outro, a baixa representatividade numérica dificulta a generalização dos achados e torna os dados mais sensíveis a variações locais.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Os resultados desta pesquisa demonstram que a desigualdade ambiental no Brasil não pode ser compreendida a partir da análise isolada de uma variável, como o nível de exposição ao $PM_{2.5}$. Pelo contrário, a poluição atmosférica deve ser entendida como um dos elementos que integram o complexo quadro de desigualdades estruturais do país, articulando-se de forma profunda com renda, raça e território.

A análise evidenciou que, entre 2003 e 2024, os níveis de exposição ao $PM_{2.5}$ mantiveram-se consistentemente acima dos valores recomendados pela OMS em grande parte do território nacional. Nesse contexto, destaca-se a importância da ampliação da rede de monitoramento da qualidade do ar em todo o território brasileiro, uma vez que atualmente as estações de monitoramento não são suficientes para cobrir todo o território nacional, concentrando-se em regiões metropolitanas. Sendo assim, a construção de uma rede ampla, que incorpore tanto tecnologias de ponta quanto monitores de baixo custo, é fundamental para democratizar o acesso à informação, identificar desigualdades territoriais de exposição e orientar políticas específicas voltadas à proteção das populações mais vulnerabilizadas.

Os resultados desta pesquisa também evidenciam que os níveis de $PM_{2.5}$ no Brasil apresentam padrões regionais distintos. No Norte, por exemplo, as localidades com maiores níveis de poluição atmosférica estão associadas as dinâmicas de desmatamento e queimadas, sendo necessário o fortalecimento dos mecanismos de fiscalização e de proteção dos territórios tradicionais. No Centro-Oeste, a elevação recente das concentrações de $PM_{2.5}$ também reforça a necessidade de políticas voltadas ao combate às queimadas, com monitoramento mais rigoroso das atividades agrícolas e incentivos à adoção de práticas produtivas menos poluentes. Já no Sudeste, onde a poluição se concentra em áreas urbanas e industriais, destaca-se a importância de políticas de mobilidade urbana sustentável, ampliação do transporte coletivo limpo e regulação mais eficiente das emissões veiculares e industriais

Em todas as regiões, observa-se um padrão de desigualdade de renda entre grupos raciais: setores censitários de predominância branca apresentam rendas medianas significativamente mais altas que aqueles com predominância parda, preta e indígena. Essa desigualdade implica diretamente na capacidade de mitigação dos impactos ambientais por parte desses grupos, tornando necessárias políticas públicas que incorporem a dimensão da justiça ambiental como princípio estruturante e priorizem a proteção das populações mais vulneráveis. Isso inclui a criação de mecanismos de compensação e apoio às comunidades mais

expostas, investimentos em infraestrutura urbana que reduzam a exposição diária à poluição e a garantia de que os recursos públicos priorizem os territórios em maior situação de risco.

A análise de clusters realizada neste estudo demonstrou que a exposição ao $PM_{2.5}$ no Brasil não segue um padrão simples de associação linear entre pobreza, raça e poluição, mas reflete dinâmicas territoriais e produtivas que devem ser consideradas no desenho de políticas públicas. O Cluster 3, por exemplo, combina alta renda com os maiores níveis de poluição, evidenciando que populações de maior poder aquisitivo, localizadas em áreas urbanas e produtivas, também estão fortemente expostas. Esse resultado reforça a necessidade de políticas de mobilidade urbana sustentável, de controle mais efetivo das emissões industriais e de regulação mais rigorosa sobre setores econômicos poluentes.

Já os Clusters 1 e 2, caracterizados por baixa renda e maior presença de populações indígenas, pardas e pretas, evidenciam vulnerabilidades socioambientais históricas, nas quais a menor renda se articula à desigualdade racial, reforçando a necessidade de ações de justiça ambiental direcionadas. Entre elas, destacam-se a proteção de territórios tradicionais, a ampliação de políticas de monitoramento da qualidade do ar, a instalação de monitores portáteis de baixo custo para a medição contínua de poluentes em todas as regiões, bem como políticas sociais integradas que articulem saúde, educação ambiental, habitação e mobilidade, a fim de reduzir desigualdades estruturais e ampliar a capacidade de mitigação das populações mais vulnerabilizadas. Isso inclui o fortalecimento da atenção primária em saúde ambiental, programas habitacionais voltados à melhoria das condições de moradia em áreas expostas, investimentos em transporte público de qualidade que reduzam a exposição cotidiana à poluição, além de políticas de inclusão produtiva que ofereçam alternativas econômicas sustentáveis.

O Cluster 4, por sua vez, com poluição mais baixa e predominância branca em setores de renda intermediária, demonstra que é possível manter níveis reduzidos de poluição em determinadas regiões, o que reforça a importância do diálogo entre os diferentes entes federativos e da difusão de políticas públicas bem-sucedidas. Esse cenário evidencia que a coordenação entre União, estados e municípios pode consolidar estratégias preventivas de controle da qualidade do ar, integradas ao planejamento urban. A experiência desses territórios pode servir como referência para a formulação de políticas nacionais, com foco na preservação de áreas verdes, no ordenamento do uso do solo e na priorização de modais de transporte menos poluentes. Além disso, a difusão de boas práticas , como programas locais de monitoramento ambiental, incentivos à mobilidade sustentável e mecanismos de governança participativa, pode

contribuir para reduzir desigualdades territoriais e garantir que regiões hoje menos impactadas não avancem para estágios de maior degradação.

Por fim, ao integrar renda e perfil racial em conjunto com a poluição, a análise revelou regimes socioambientais distintos que sustentam a noção de injustiça ambiental no Brasil. Nessa análise é de grande importância destacar que setores com predominância de responsáveis pelo domicílio indígenas, possuem baixa renda e poluição média, nesse sentido, as políticas públicas devem priorizar a proteção territorial e o fortalecimento das estruturas de saúde e vigilância ambiental em áreas remotas. A presença de picos de poluição em alguns setores indica a pressão de atividades econômicas nocivas ao meio ambiente, como desmatamento, queimadas e garimpo ilegal, o que demanda ações articuladas de fiscalização ambiental, combate às práticas ilegais e apoio a alternativas produtivas sustentáveis para as comunidades locais. Além disso, é fundamental garantir acesso diferenciado a serviços de saúde e programas de prevenção de riscos ambientais, respeitando as especificidades culturais e sociais dos povos indígenas e populações tradicionais.

Quanto aos Modelos Aditivos Generalizados, os resultados confirmam que a exposição ao $PM_{2.5}$ no Brasil se distribui de forma desigual entre diferentes grupos socioeconômicos e raciais, mas de maneira não linear e fortemente condicionada pelo território. Observou-se que a maior exposição não recai exclusivamente sobre os grupos de menor renda, mas se concentra também em setores de renda intermediária e em grandes centros urbanos, evidenciando a necessidade de superar análises simplistas que associam automaticamente pobreza e poluição. No caso da população branca, a associação positiva nos quintis superiores indica que a maior renda e a concentração em grandes centros urbanos elevam os níveis de exposição. Para a população preta e parda, os resultados mostram que os quintis intermediários concentram maiores níveis de poluição, enquanto os quintis superiores não correspondem necessariamente às áreas mais críticas em relação ao $PM_{2.5}$. A análise da população indígena revelou contrastes marcantes: parte localizada em regiões de baixa pressão poluidora e outra parcela fortemente exposta em áreas de avanço do desmatamento, do garimpo ilegal e das queimadas, o que evidencia que a poluição se soma à violência ambiental que ameaça diretamente a sobrevivência desses povos. Por fim, os resultados referentes à população amarela, ainda que estatisticamente significativos, devem ser interpretados com cautela, devido à pequena representatividade numérica e à forte concentração em contextos urbanos específicos, como a região metropolitana de São Paulo.

De forma geral, os modelos GAM demonstram que a desigualdade ambiental no Brasil deve ser compreendida como resultado da interação entre renda, raça e território. Essa abordagem evidencia como diferentes grupos populacionais vivenciam padrões distintos de exposição: alguns pela localização em áreas de alta concentração de atividades econômicas, outros pela sobreposição entre vulnerabilidade racial e precariedade urbana, e outros ainda pela pressão exploratória sobre territórios tradicionais. Nesse sentido, os achados desta pesquisa reforçam a centralidade do conceito de justiça ambiental, indicando que políticas públicas voltadas ao controle da poluição atmosférica precisam ser desenhadas de forma intersetorial e territorialmente diferenciada.

7.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E SUGESTÕES DE PESQUISAS

Apesar da relevância desse estudo, é necessário expor as limitações da pesquisa. O estudo contou com um conjunto limitado de variáveis socioeconômicas e demográficas, deixando de fora fatores que poderiam enriquecer a análise, como acesso a serviços de saúde, indicadores de saneamento básico, qualidade habitacional, indicadores ocupacionais e variáveis ambientais adicionais, como cobertura vegetal, proximidade de áreas industriais. A ausência dessas variáveis pode reduzir a capacidade explicativa dos modelos e restringir a compreensão da relação entre poluição e desigualdades socioeconômicas.

Também é importante destacar que as análises se basearam na exposição medida na área de residência, a partir do setor censitário, sem considerar a mobilidade cotidiana da população. Esse aspecto é particularmente relevante para grupos racializados e de menor renda, que muitas vezes vivem em áreas periféricas, afastadas e relativamente menos poluídas, mas enfrentam longos deslocamentos por vias de tráfego intensamente poluídas, o que eleva substancialmente sua exposição real ao $PM_{2.5}$.

Futuras pesquisas sobre exposição ao $PM_{2.5}$ e desigualdades socioeconômicas e raciais no Brasil podem avançar ao aprofundar a análise nos territórios, explorando como mudanças na renda média e na composição racial dos territórios ao longo de séries históricas se relacionam com variações na poluição atmosférica. Isso permitiria compreender de forma mais clara os efeitos cumulativos da exposição e identificar tendências associadas a processos de urbanização, gentrificação e expansão agrícola.

Outra sugestão para pesquisas futuras é a incorporação da dimensão da mobilidade cotidiana. A integração de dados de transporte e fluxos de deslocamento permitiria estimar a exposição ao longo do dia, ampliando a precisão dos resultados.

Por fim, pesquisas futuras poderiam investigar o impacto de políticas públicas específicas, como a inspeção veicular, a expansão do transporte público de baixa emissão, programas de reflorestamento urbano e iniciativas de proteção territorial indígena e quilombola na redução da poluição em territórios com diferentes perfis raciais e socioeconômicos. Essa perspectiva contribuiria para aproximar os achados acadêmicos da formulação de estratégias concretas de mitigação das desigualdades ambientais, reforçando o papel das evidências na promoção da justiça social e ambiental no Brasil

REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H. **Ambientalização das lutas sociais: o caso do movimento por justiça ambiental**. Estudos Avançados, v. 24, n. 68, p. 103–119, 2010.

ACSELRAD, H**. Justiça ambiental e construção social do risco. Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, n. 5, p. 49-60, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.5380/dma.v5i0.22116.

ACSELRAD, Henri; MELLO, Cecília Campello do A.; BEZERRA, Gustavo das Neves. **O que é justiça ambiental**. Rio de Janeiro: Garamond Universitária, 2009.

AKOTIRENE, Carla. **Interseccionalidade.** São Paulo: Sueli Carneiro; Pólen, 2019. 152 p. (Feminismos Plurais; coordenação de Djamila Ribeiro). ISBN 978-85-98349-69-5.

ANDRADE, M. D. de; MIRANDA, R. M. de; FORNARO, A.; KERR, A.; OYAMA, B.; ANDRE, P. A. de; SALDIVA, P. Vehicle emissions and $PM_{2.5}$ mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 79-88, mar. 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s11869-010-0104-5.

BANZHAF, S.; MA, L.; TIMMINS, C. Environmental justice: the economics of race, place, and pollution. **The Journal of Economic Perspectives**, v. 33, n. 1, p. 185–208, 2019. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/26566983.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama no 506, de 05 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação**. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 09 jul. 2024b, p. 133. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827. Acesso em: 20 de junho de 2025.

BRASIL. Lei nº 14.850, de 2 de maio de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, p. 2, 3 maio 2024. Publicação original.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. **Poluição atmosférica na ótica do Sistema Único de Saúde**: vigilância em saúde ambiental e qualidade do ar. Brasília: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/poluicao_atmosferica_SUS_saude_ambiental.pdf. Acesso em: 15 de junho de 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar: 2024**. Brasília, DF: MMA, 2025. 63 p. ISBN 978-85-7738-462-4.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Seção 1, ed. 130, p. 133, 09 jul. 2024.

BRYANT, B. **Environmental justice**: **issues, policies and solutions**. Washington, DC: Island Press, 1995.

BÜHLER, H. F.; HACON, S. de S.; OLIVEIRA, B. F. A. de; IGNOTTI, E.; TEIXEIRA, K. R.; RAMOS, A. R. dos S. **Os impactos socioambientais e na saúde decorrente da cadeia produtiva do etanol no Centro-Oeste do Brasil**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 10865-10884, 2023. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv9n3-131

BULLARD, R. D. Dismantling environmental racism in the USA. **Local Environment**, v. 4, n. 1, p. 5–19, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1080/13549839908725577A

BULLARD, R. D. Environmental racism and land use. Land Use Forum: **A Journal of International Law**, v. 18, p. 6–11, 1993.

BULLARD, R. D. The threat of environmental racism. **Natural Resources & Environment**, v. 7, n. 3, p. 23–56, 1993. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/40923229.

BULLARD, Robert D. (ed.). **The quest for environmental justice**: **human rights and the politics of pollution**. [S.l.]: Sierra Club Books, 2005. Prefácio de Maxine Waters.

BULLARD, R. D. **Unequal protection: environmental justice and communities of color**. San Francisco: Sierra Club Books, 1996.

BULLARD, R. D.; WRIGHT, B. H. **The politics of pollution: implications for the black community**. Phylon, v. 47, n. 1, p. 71–78, 1986. DOI: https://doi.org/10.2307/274696. Acesso em: 04 de maio de 2025.

BULLARD, Robert D. **Dumping in Dixie**: **Race, Class, and Environmental Quality**. 3. ed. New York: Routledge, 2019. 260 p.

CHEN, Jie; HOEK, Gerard**. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis**. Environment International, v. 143, p. 105974, 2020. DOI**:** https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020319292. Acesso em: 15 de junho de 202.

COLMER, J.; VOORHEIS, J.; WILLIAMS, B. **Air pollution and economic opportunity in the United States**. *2023*. Disponível em: https://www.colorado.edu/economics/sites/default/files/attached-files/colmer.pdf. Acesso em: 20 ago. 2024.

CRENSHAW, K. **Mapping the margins: intersectionality, identity politics, and violence against women of color.** Stanford Law Review, v. 43, n. 6, p. 1241–1299, 1991. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1229039. Acesso em: 04 de maio de 2025.

DA MOTTA SINGER, J.; SALDIVA DE ANDRÉ, C. D.; AFONSO DE ANDRÉ, P. *et al*. **Assessing socioeconomic bias of exposure to urban air pollution: an autopsy-based study in São Paulo, Brazil**. Lancet Regional Health – Americas, v. 22, p. 100500, 1 maio 2023. DOI: 10.1016/j.lana.2023.100500. Disponível em: https://www.thelancet.com/journals/lana/article/PIIS2667-193X(23)00090-9/fulltext. Acesso em: 04 de maio de 2025.

DOMINICI, F. *et al*. **Assessing adverse health effects of long-term exposure to low levels of ambient air pollution**: implementation of causal inference methods. ("Air Pollution and Mortality at the Intersection of Race and Social ...") Boston: Health Effects Institute, 2022. (Research Report, 2022), p. 1–56.

GARDIN, Thiago N.; REQUIA, Weeberb J. **Air quality and individual-level academic performance in Brazil: a nationwide study of more than 15 million students between 2000 and 2020.** Environmental Research, v. 226, 115689, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115689. Acesso em: 04 de maio de 2025.

GOUVEIA, N.; SLOVIC, A. D.; KANAI, C. M. *et al*. **Air pollution and environmental justice in Latin America: where are we and how can we move forward?** Current Environmental Health Reports, v. 9, p. 152–164, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40572-022-00341-z. Acesso em: 04 de maio de 2025.

GREIFER, N**. WeightIt**: **weighting for covariate balance in observational studies**. R package version February 24, 2025. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=WeightIt. Acesso em: 04 de maio de 2025.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE. PM 2,5. **State of Global Air**. Disponível em: https://www.stateofglobalair.org/pollution-sources/pm25. Acesso em: 04 de maio de 2025.

HEWITT, Richard J.; CARAMÉS, Eduardo; BORGE, Rafael. **Is air pollution exposure linked to household income? Spatial analysis of Community Multiscale Air Quality Model results for Madrid.** Heliyon, v. 10, n. 5, e27117, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27117. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024031487. Acesso em: 04 de maio de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE**. Censo Demográfico 2022: malha de setores censitários**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102138.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2022***:* **resultados.** Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=downloads.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas de Gênero: indicadores sociais das mulheres no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101760.pdf. Acesso em: 04 de maio de 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Qualidade do ar**. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar/. Acesso em: 26 ago. 2025.

KHALILI, R.; BARTELL, S. M.; HU, X.; LIU, Y.; CHANG, H. H.; BELANOFF, C.; STRICKLAND, M. J.; VIEIRA, V. M. Early-life exposure to $PM_{2.5}$ and risk of acute asthma clinical encounters among children in Massachusetts: a case-crossover analysis. **Environmental Health**, v. 17, n. 1, p. 20, 2018. DOI: 10.1186/s12940-018-0361-6. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12940-018-0361-6. Acesso em: 04 de maio de 2025.

LAM, P. H.; ZANG, E.; CHEN, D.; LIU, R.; CHEN, K. **Long-term exposure to fine particulate matter and academic performance among children in North Carolina**. *JAMA* Network Open, v. 6, n. 10, e2340928, 2023. DOI: https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2023.40928. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10618843. Acesso em: 10 maio de 2025.

LEE, Sophie-An Kingsbury; MERLO, Luca; DOMINICI, Francesca. **Childhood $PM_{2.5}$ exposure and upward mobility in the United States.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 121, n. 38, e2401882121, 9 set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2401882121. Disponível em: https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2401882121. Acesso em: 04 de maio de 2025.

LUMLEY, Thomas**. Survey**: **analysis of complex survey samples**. Versão 4.2. 2023. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/survey/index.html. Acesso em: 04 de maio de 2025.

MANISALIDIS, I.; STAVROPOULOU, E.; STAVROPOULOS, A.; BEZIRTZOGLOU, E. **Environmental and health impacts of air pollution: a review. ("Air pollution and public health in Latin America and the Caribbean (LAC ...")** Frontiers in Public Health, [S. l.], v. 8, p. 14, 2020. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014. Disponível em: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2020.00014/full. Acesso em: 7 jun. 2025.

MARCONDES, M. J. A. **Cidade e natureza: proteção dos mananciais e exclusão social.** São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; Edusp; Studio Nobel, 1999.

MARTINEZ-ALIER, J. Justiça ambiental (local e global). In: CAVALCANTI, C. (org.). **Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas**. 2. ed. São Paulo: Cortez Editora, 1999. p. 215–231.

MOHAI, Paul; PELLOW, David; ROBERTS, J. Timmons**.** Environmental justice. **Annual Review of Environment and Resources**, [S.l.], v. 34, p. 405–430, 2009.

MURRAY, C. J. et al. **Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the global burden of disease study 2019**. The Lancet, [S.l.], v. 396, p. 1223–1249, 2020.

O'BRIEN, R. L.; NEMAN, T.; RUDOLPH, K.; CASEY, J.; VENKATARAMANI, A. **Prenatal exposure to air pollution and intergenerational economic mobility: Evidence from U.S. county birth cohorts**. Social Science & Medicine, v. 217, p. 92–96, 2018.

PACHECO, Tânia. **Inequality, environmental injustice and racism in Brazil: beyond the question of colour.** Development in Practice, v. 18, n. 6, p. 713–725, 2008. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/27751978. Acesso em: 04 de maio de 2025.

PEREIRA, G. M.; TEINILÄ, K.; CUSTÓDIO, D.; SANTOS, A. G.; XIAN, H.; HILLAMO, R.; ALVES, C. A.; ANDRADE, J. B.; ROCHA, G. O.; KUMAR, P.; BALASUBRAMANIAN, R.; ANDRADE, M. D. F.; VASCONCELLOS, P. C**. Particulate pollutants in the Brazilian city of São Paulo: 1-year investigation for the chemical composition and source apportionment**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 17, p. 11943-11969, 2017. DOI: https://doi.org/10.5194/acp-17-11943-2017. Acesso em: 04 de maio de 2025.

PEREIRA, Guilherme Martins; KAMIGAUTI, Leonardo Yoshiaki; PEREIRA, Rubens Fabio; SANTOS, Djacinto Monteiro dos; SANTOS, Thayná da Silva; MARTINS, José Vinicius; ALVES, Célia; GONÇALVES, Cátia; RIENDA, Ismael Casotti; KOVÁTS, Nora; NOGUEIRA, Thiago; RIZZO, Luciana; ARTAXO, Paulo; MIRANDA, Regina Maura de; YAMASOE, Marcia Akemi; FREITAS, Edmilson Dias de; VASCONCELLOS, Pérola de Castro; ANDRADE, Maria de Fatima. **Source apportionment and ecotoxicity of $PM_{2.5}$ pollution events in a major Southern Hemisphere megacity: influence of a biofuel-impacted fleet and biomass burning**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 25, n. 8, p. 4587-4616, 2025. DOI: https://doi.org/10.5194/acp-25-4587-2025.

PORTO, M. F.; PACHECO, T.; LEROY, J. P. (org.). **Injustiça ambiental e saúde no Brasil**: **o mapa de conflitos**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2013. 306 p. ISBN 978-85-7541-576-4. Disponível em: https://books.scielo.org/id/468vp/pdf/porto-9788575415764.pdf. Acesso em: 12 de maio de 2025.

PRAZERES, Leandro. **Como queimadas em terras indígenas aumentaram 76% e deixaram crianças e anciãos 'sufocados'**. BBC News Brasil, 26 set. 2024. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/articles/c9819351gq4o. Acesso em: 29 ago. 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD**. How gender inequality and climate change are interconnected**. Global Climate Promise, 21 abr.

2025. Disponível em: https://www.undp.org/publications/how-gender-inequality-and-climate-change-are-interconnected. Acesso em: 04 de maio de 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – PNUMA**. Gênero e ação climática**. Disponível em: https://www.unep.org/pt-br/topics/gender/gender-and-climate-action.

RAWLS, John. **Uma teoria da justiça**. Tradução de Jussara Simões; revisão técnica e da tradução de Álvaro de Vita. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes – selo Martins, 2016. 816 p.

REQUIA, Weeberb J.; MOORE, Julia Placido; YANG, Jun. **Air pollution exposure during pregnancy and preterm birth in Brazil**. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 285, p. 117116, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117116. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651324011928. Acesso em: 04 de maio de 2025.

REQUIA, Weeberb J.; VICEDO-CABRERA, Ana Maria; AMINI, Heresh; SCHWARTZ, Joel D. **Short-term air pollution exposure and mortality in Brazil: Investigating the susceptible population groups**. Environmental Pollution, v. 340, p. 122797, 2024.

ROCHA, D. F. da; PORTO, M. F. de S.; PACHECO, T. *et al.* **The map of conflicts related to environmental injustice and health in Brazil**. Sustainability Science, v. 13, p. 709–719, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11625-017-0494-5. Acesso em: 04 de maio de 2025.

RODRIGUES, A. V. de A.; COSTA, D. M.; SALLES-COSTA, R. **Desigualdades de gênero e renda das famílias brasileiras: implicações para a segurança alimentar e nutricional**. Ciência & Saúde Coletiva, v. 30, n. 5, p. e11662023, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1413-81232025305.11662023. Acesso em: 04 de maio de 2025.

SCHLOSBERG, David. **Defining environmental justice: theories, movements, and nature**. Oxford: Oxford University Press, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199286294.001.0001. Acesso em: 26 de junho de 2025

SILVA, Reizane Maria Damasceno da; CASTELHANO, Francisco Jablinski; SITOE, Gina Amélia Albino; HOINASKI, Leonardo; AMINI, Heresh; SALDIVA, Paulo Hilario Nascimento; REQUIA, Weeberb J. **The mediating role of air pollution in the relationship between greenspace and cardiorespiratory admissions in Brazil**. Environmental Pollution, [S. l.], v. 330, 2025. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.125849. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125849. Acesso em: 04 de maio de 2025.

THANGAVEL, P.; PARK, D.; LEE, Y. C. **Recent insights into particulate matter ($PM_{2.5}$)-mediated toxicity in humans: an overview**. International Journal of Environmental Research and Public Health, [S. l.], v. 19, n. 12, p. 7511, 19 jun. 2022. DOI: 10.3390/ijerph19127511. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph19127511. Acesso em: 04 de maio de 2025.

TORRES, H. da G.; MARQUES, E. C. **Reflexões sobre a hiperperiferia: novas e velhas faces da pobreza no entorno municipal.** Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, *[S. l.]*, n. 4, p. 49, 2001. DOI: 10.22296/2317-1529.2001n4p49. Disponível em: https://rbeur.anpur.org.br/rbeur/article/view/57. Acesso em: 04 de maio de 2025.

UNITED NATIONS. **Global population growth and sustainable development**. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2021. (UN DESA/POP/2021/TR/NO. 2)

VEGETABILE, Brian G.; GRIFFIN, Beth Ann; COFFMAN, Donna L.; CEFALU, Matthew; ROBBINS, Michael W.; MCCAFFREY, Daniel F. **Nonparametric estimation of population average dose-response curves using entropy balancing weights for continuous exposures.** Health Services and Outcomes Research Methodology, v. 21, n. 1, p. 69–110, mar. 2021. DOI: 10.1007/s10742-020-00236-2

WE, Yewande Aramide; LARSEN, Bjorn Klavdy; SANCHEZ-TRIANA, Ernesto**. The Global Health Cost of $PM_{2.5}$ Air Pollution**: A Case for Action Beyond 2021. Washington, D.C.: World Bank Group, 2022. (International Development in Focus). Disponível em: http://documents.worldbank.org/curated/en/455211643691938459. Acesso em: 8 ago. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines**: **particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Geneva: World Health Organization, 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Disponível em: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1.

YE, T.; XU, R.; YUE, X. *et al*. **Short-term exposure to wildfire-related $PM_{2.5}$ increases mortality risks and burdens in Brazil**. Nature Communications, v. 13, p. 7651, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-35326-x.

YUCHI, Weiran; BRAUER, Michael; CZEKAJLO, Agatha; DAVIES, Hugh W.; DAVIS, Zoë; GUHN, Martin; JARVIS, Ingrid; JERRETT, Michael; NESBITT, Lorien; OBERLANDER, Tim F.; SBIHI, Hind; SU, Jason; VAN DEN BOSCH, Matilda. **Neighborhood environmental exposures and incidence of attention deficit/hyperactivity disorder: A population-based cohort study**. Environment International, v. 161, p. 107120, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107120. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022000460. Acesso em: 06 de junho de 2025.

ZIVIN, J. G.; NEIDELL, M. **The impact of pollution on worker productivity**. American Economic Review, v. 102, n. 7, p. 3652–3673, dez. 2012. DOI: https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3652. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4576916/. Acesso em: 16 ago. 2025.

[i] https://g1.globo.com/tudo-sobre/inpe/