



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**QUALIDADE DO AR EM MINAS GERAIS: ANÁLISE DA CONFORMIDADE
COM PADRÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Augusto César Dionísio Batista

**Belo Horizonte
2024**

Augusto César Dionísio Batista

**QUALIDADE DO AR EM MINAS GERAIS: ANÁLISE DA CONFORMIDADE COM
PADRÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Profa. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken

Belo Horizonte
2025

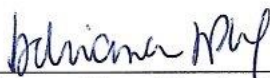
AUGUSTO CÉSAR DIONÍSIO BATISTA

**QUALIDADE DO AR EM MINAS GERAIS: ANÁLISE DA CONFORMIDADE COM
PADRÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Ambiental e
Sanitarista.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2025.

Banca examinadora:



Prof. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken – Presidente da Banca Examinadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG - Orientadora



Prof. Dra. Daniela Patrícia Freire Bonfim
Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais
(CTNano/UFGM)



Prof. Dr. Tiago Borges Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

AGRADECIMENTOS

"Eu sou porque nós somos."

Este trabalho não é apenas meu. Ele carrega pedaços de muitas mãos, vozes e passos que vieram antes de mim. É a continuação de histórias que se entrelaçam, de sonhos que começaram em outras gerações e que, de alguma forma, encontraram um lar em mim. Cada linha escrita aqui é herança de lutas silenciosas, de olhares esperançosos e de sorrisos que acreditaram antes mesmo que eu pudesse entender o caminho.

Aos meus pais, minha gratidão não se explica em palavras. Vocês me ofereceram o que não tiveram, e isso, por si só, é um gesto que ecoa mais alto do que qualquer conquista. Sei o peso que carregaram para que eu pudesse caminhar mais leve. Sei das noites em claro e das renúncias que nunca foram ditas. Obrigado por cada oportunidade plantada e por serem o chão firme onde meus sonhos puderam crescer. Tudo o que sou tem um pouco de vocês.

Ao meu pai (*in memoriam*), guardo com carinho a lembrança do seu sorriso quando soube da minha aprovação na universidade. Naquele momento, você acreditou o suficiente por nós dois. Sei que muito do que faço hoje é, de alguma forma, um jeito de manter viva a alegria que você sentiu por mim. Você segue presente, em cada detalhe.

Mãe, você é a força que nunca me deixou cair. Obrigado por ser luz nos dias em que eu precisei enxergar além do medo e da insegurança. Seu amor e confiança foram a bússola que me guiou até aqui. Sem o seu abraço constante e o seu olhar firme, nada disso faria sentido.

A vocês, dedico não só este trabalho, mas tudo o que ainda há por vir.

RESUMO

BATISTA, AUGUSTO CÉSAR DIONÍSIO. **Qualidade do Ar em Minas Gerais: Análise Da Conformidade Com Padrões Nacionais E Internacionais**. 2025. 110 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

A qualidade do ar é um fator determinante para a saúde pública e a preservação ambiental, sendo alvo de diversas legislações nacionais e internacionais que visam mitigar os impactos da poluição atmosférica. Este trabalho tem como objetivo analisar a conformidade da qualidade do ar em Minas Gerais. A qualidade do ar é um fator determinante para a saúde pública e a preservação ambiental, sendo regulada por diversas legislações nacionais e internacionais que estabelecem padrões para limitar as concentrações de poluentes atmosféricos. Este trabalho tem como objetivo analisar a conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos em Minas Gerais em relação aos padrões de qualidade do ar e, considerando os padrões estabelecidos pelas resoluções do CONAMA (nº 506/2024) e COPAM (nº 248/2023), além de legislações da União Europeia, USEPA (Estados Unidos) e as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS). A pesquisa se baseou em dados de estações automáticas de monitoramento distribuídas em diferentes regiões do estado, coletados durante o ano de 2023. A metodologia adotada incluiu a análise estatística descritiva de poluentes atmosféricos, como PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, O₃ e CO, comparando as concentrações medidas com os limites estabelecidos por cada legislação. A conformidade foi avaliada tanto em nível regional, abrangendo o Norte de Minas, Zona da Mata, Noroeste, Vale do Rio Doce e Região Metropolitana, quanto em um panorama estadual consolidado. Os resultados indicaram que, em geral, as concentrações na maioria dos poluentes e PM₁₀ e PM_{2.5} estão em conformidade com as normas nacionais. No entanto, observou-se uma significativa discrepância em relação aos padrões mais rigorosos da OMS e da União Europeia, especialmente nas medições anuais. As regiões Zona da Mata e Vale do Rio Doce apresentaram os melhores índices de conformidade, enquanto o Norte de Minas revelou os maiores desafios, com baixa conformidade nas medições anuais de PM₁₀. Além disso, a pesquisa evidenciou que o Norte de Minas e o Noroeste devem ser priorizados em ações de gestão da qualidade do ar devido aos baixos índices de conformidade com os padrões da OMS, seguidos pelo Vale do Rio Doce e a Região Metropolitana. Esses resultados reforçam a necessidade de intervenções regionais estratégicas para reduzir as emissões e melhorar a

qualidade do ar. A análise estatística destacou a variabilidade das concentrações de poluentes, com picos esporádicos que, apesar de não comprometerem a conformidade diária, indicam a ocorrência de episódios de poluição que podem impactar negativamente a saúde da população. A Região Metropolitana, por exemplo, apresentou altos valores máximos de PM_{10} , embora sua média anual estivesse próxima aos limites estabelecidos. O estudo evidencia a necessidade de fortalecer o monitoramento em regiões menos assistidas e de adotar medidas mais rigorosas de controle de emissões, alinhadas às recomendações internacionais. Os resultados fornecem subsídios para a formulação de políticas públicas mais eficazes e contribuem para a compreensão do cenário atual da qualidade do ar em Minas Gerais, reforçando a importância da continuidade dos esforços em prol da redução da poluição atmosférica.

Palavras-chave: Qualidade do ar. Poluentes atmosféricos. Minas Gerais. CONAMA. OMS. Monitoramento ambiental.

ABSTRACT

BATISTA, AUGUSTO CÉSAR DIONÍSIO. **Air Quality in Minas Gerais: Analysis of Compliance with National and International Standards**. 2025. 110 p. Undergraduate Thesis (Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Air quality is a critical factor for public health and environmental preservation, being the target of various national and international legislations aimed at mitigating the impacts of air pollution. This study aims to analyze the compliance of air pollutant concentrations in Minas Gerais with air quality standards, considering the thresholds established by CONAMA Resolution No. 506/2024, COPAM Resolution No. 248/2023, as well as the legislations of the European Union, USEPA (United States), and the World Health Organization (WHO) guidelines. The research was based on data from automatic monitoring stations distributed across different regions of the state, collected during 2023. The adopted methodology included a descriptive statistical analysis of atmospheric pollutants such as PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, O₃, and CO, comparing the measured concentrations to the limits set by each regulation. Compliance was evaluated at both regional levels—covering the North of Minas, Zona da Mata, Northwest, Vale do Rio Doce, and the Metropolitan Region—and within a consolidated state-level overview. The results indicated that, in general, the concentrations of most pollutants, including PM₁₀ and PM_{2.5}, complied with national standards. However, significant discrepancies were observed regarding the stricter standards of the WHO and the European Union, particularly in annual measurements. The Zona da Mata and Vale do Rio Doce regions showed the highest compliance indices, while the North of Minas revealed significant challenges, with low compliance in annual PM₁₀ measurements. Additionally, the research highlighted the North of Minas and Northwest regions as priorities for air quality management actions due to their low compliance rates with WHO standards, followed by Vale do Rio Doce and the Metropolitan Region. These findings underscore the need for strategic regional interventions to reduce emissions and improve air quality. The statistical analysis revealed variability in pollutant concentrations, with sporadic peaks that, while not compromising daily compliance, indicate pollution episodes that could negatively impact public health. For instance, the Metropolitan Region exhibited high PM₁₀ maximum values, even though its annual average was close to the established limits. The study highlights the need to strengthen

monitoring efforts in less-supported regions and adopt stricter emission control measures aligned with international recommendations. The results provide valuable insights for the formulation of more effective public policies and contribute to the understanding of the current air quality scenario in Minas Gerais, reinforcing the importance of sustained efforts to reduce air pollution.

Keywords: Air quality; Atmospheric pollutants. Minas Gerais. CONAMA. WHO. Environmental monitoring.

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	18
	2.1 Objetivo Geral	18
	2.2 Objetivos Específicos.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
	3.1 A Importância da Qualidade do Ar: Implicações para Saúde e Meio Ambiente ...	19
	3.2 Poluentes.....	21
	<i>3.2.1 Material Particulado (MP).....</i>	<i>22</i>
	<i>3.2.1.1 Partículas Totais em Suspensão (PTS).....</i>	<i>23</i>
	<i>3.2.1.2 Partículas Inaláveis (PM₁₀).....</i>	<i>23</i>
	<i>3.2.1.3 Partículas Inaláveis Finas (PM_{2.5}).....</i>	<i>23</i>
	<i>3.2.2 Dióxido de Enxofre (SO₂).....</i>	<i>23</i>
	<i>3.2.3 Monóxido de Carbono (CO).....</i>	<i>24</i>
	<i>3.2.4 Ozônio (O₃).....</i>	<i>24</i>
	<i>3.2.5 Óxidos de Nitrogênio (NO_x).....</i>	<i>24</i>
	3.3 Breve Histórico e Contexto da Qualidade do Ar no Brasil.....	24
	3.4 Breve Histórico e Contexto da Qualidade do Ar em Minas Gerais	26
	3.5 Normativas e Padrões de Qualidade do Ar	26
	<i>3.5.1 Legislação Nacional Brasileira.....</i>	<i>27</i>
	<i>3.5.1.1 Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981</i>	<i>27</i>
	<i>3.5.1.2 Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989</i>	<i>27</i>
	<i>3.5.1.3 Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990</i>	<i>27</i>
	<i>3.5.1.4 Resolução CONAMA nº 491, de 28 de novembro de 2018.....</i>	<i>28</i>
	<i>3.5.1.5 Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024</i>	<i>29</i>
	<i>3.5.2 Legislação Estadual de Minas Gerais.....</i>	<i>31</i>
	<i>3.5.2.1 Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM) nº 01, de 26 de maio de 1981</i>	<i>31</i>
	<i>3.5.2.2 Deliberação Normativa COPAM nº 248, de 23 de novembro de 2023</i>	<i>31</i>
	<i>3.5.3 Legislação Europeia.....</i>	<i>34</i>
	<i>3.5.4 Legislação Estadunidense</i>	<i>36</i>

3.5.5 Padrões de Qualidade do Ar da OMS.....	38
3.6 Monitoramento da Qualidade do Ar em Minas Gerais	40
3.6.1 Estrutura da Rede de Monitoramento	41
3.6.2 Métodos de análise	41
3.6.3 Divulgação de dados	42
3.7 Trabalhos que reportam a qualidade do ar atual no estado de Minas Gerais.....	42
4 METODOLOGIA.....	45
4.1 – Área de estudo e coleta de dados.....	45
4.2 Avaliação de Conformidade Legal e Análise Estatística.....	53
4.2.1 Avaliação da Conformidade Legal.....	53
4.2.2 Análise Estatística	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Comparação entre os Padrões de Qualidade do Ar	55
5.1.1 PM_{10} e $PM_{2.5}$	58
5.1.2 PTS	59
5.1.3 SO_2	60
5.1.4 NO_2	61
5.1.5 CO.....	61
5.1.6 O_3	62
5.2 Análise da Conformidade das Concentrações de Poluentes Atmosféricos em Minas Gerais com as normas	62
5.2.1 Norte de Minas	63
5.2.2 Zona da Mata	66
5.2.3 Noroeste.....	70
5.2.4 Vale do Rio Doce.....	74
5.2.5 Metropolitana	79
5.2.6 Estadual.....	84
5.3 Análise Comparativa Regional e Estadual da Qualidade do Ar em Minas Gerais	88
5.3.1 PM_{10}	89

5.3.2	<i>PM_{2.5}</i>	90
5.3.3	<i>PTS</i>	91
5.3.4	<i>SO₂</i>	92
5.3.5	<i>NO₂</i>	92
5.3.6	<i>CO</i>	93
5.3.7	<i>O₃</i>	93
5.3.8	<i>Priorização Regional para Ações de Gerenciamento da Qualidade do Ar</i>	94
6	CONCLUSÃO	97
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICES	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aba de acesso aos dados de qualidade do ar.....	45
Figura 2 – Exemplo da Aba de dados por cidade e por estação, nesse caso: “Acaiaca” e “Estação Acaiaca – 2023”.	46
Figura 3 – Exemplo de planilha de dados de qualidade do ar baixadas, nesse caso: “Estação Acaiaca – 2023”	47
Figura 4 – Mapa de Localização das Estações de Qualidade do Ar com dados disponíveis. .	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões de Qualidade do Ar da Resolução CONAMA nº 506/2024.....	29
Tabela 2 – Padrões de Qualidade do Ar da Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023. ..	32
Tabela 3 – Padrões de Qualidade do Ar da União Europeia	35
Tabela 4 – Padrões de Qualidade do Ar da Environmental Protection Agency (USEPA)	37
Tabela 5 – Padrões de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde (OMS).....	39
Tabela 6 – Informações sobre as estações de monitoramento da Qualidade do Ar	50
Tabela 7 – Tempo mínimo de amostragem para que os dados obtidos sejam considerados representativos.....	52
Tabela 8 – Tabela Unificada com os Padrões de Qualidade do Ar que serão utilizados nas análises	57
Tabela 9 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Norte de Minas do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.....	63
Tabela 10 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Norte de Minas do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	65
Tabela 11 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Zona da Mata do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.....	67
Tabela 12 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Zona da Mata do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	69
Tabela 13 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Noroeste do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	70
Tabela 14 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Noroeste do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	72
Tabela 15 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Vale do Rio Doce do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	74

Tabela 16 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Vale do Rio Doce do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	78
Tabela 17 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Metropolitana do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.....	79
Tabela 18 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Metropolitana do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.	82
Tabela 19 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023..	84
Tabela 20 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.....	87
Tabela 21 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar nas Regiões do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023, em comparação com os padrões de qualidade do ar da OMS	94

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica, fenômeno caracterizado pela presença nociva de gases e partículas sólidas no ar, emerge primordialmente de atividades industriais específicas (como as siderúrgicas, petroquímicas e cimenteiras) e da combustão de carvão e petróleo em usinas, veículos e sistemas de aquecimento (LEITE, 2005; COOPER; ALLEY, 2002; THEODORE, 2008; SCHIFFTNER, 2002; WARK et al., 1998). Este problema é acentuado em regiões com significativa atividade industrial e de mineração (CHUNGSANGUNSIT; GHEEWALA; PATUMSAWAD, 2009), como é o caso de Minas Gerais no Brasil, onde indústrias metalúrgicas, mineração, produção de cimento e cal e o transporte rodoviário contribuem significativamente para a degradação da qualidade do ar.

Essas fontes, juntamente com a expansão urbana, podem comprometer a qualidade do ar, resultando em danos à saúde pública e ao meio ambiente (FREITAS et al., 2013; RADICCHI, 2012). Tal contexto impõe desafios à gestão da qualidade do ar, demandando soluções eficazes, uma vez que a qualidade do ar influencia na saúde pública, pois está associada a uma alta incidência de doenças respiratórias, como câncer, doenças cardíacas, acidente vascular cerebral e asma (TO et al., 2016).

De acordo com estimativas da *American Lung Association*, quase 134 milhões de pessoas estão em risco devido à poluição do ar (PARK; KWAN, 2017). Embora esses efeitos venham da exposição a longo prazo, a poluição do ar também pode causar problemas agudos, como espirros e tosse, desconforto ocular, dor de cabeça e tontura (LAWRENCE; KHAN; AZAD, 2019). Partículas menores que 10 microns, classificadas como Partículas Inaláveis (PM_{10}) ou Partículas Inaláveis Finas ($PM_{2.5}$), representam maiores riscos à saúde porque podem ser respiradas profundamente nos pulmões e entrar na corrente sanguínea, onde os poluentes atmosféricos e as nanopartículas têm impacto direto na saúde humana (IDARRAGA et al., 2020).

Nos últimos anos, diversos países têm desenvolvido e implementado legislações rigorosas para garantir a qualidade do ar e proteger a saúde pública (BRITO et al., 2013). No Brasil, a Resolução CONAMA nº 506/2024 estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar, alinhados parcialmente com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS), que é considerada referência global na temática (BRASIL, 2024a; WHO, 2021). Similarmente, países mais desenvolvidos e grupos econômicos, como a União Europeia (UE) e os Estados Unidos

(EUA), também possuem legislações específicas que buscam regulamentar e mitigar os impactos da poluição atmosférica, com limites estabelecidos para diversos poluentes (CLARITY, 2021). A OMS, por exemplo, revisou suas diretrizes em 2021, recomendando padrões ainda mais rígidos para substâncias como $PM_{2.5}$, reconhecendo a necessidade de um controle mais eficaz para reduzir os impactos adversos à saúde causados pela poluição do ar (WHO, 2021).

Uma pesquisa realizada no Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Lavras (UFLA) destaca a urgência de atualizar as legislações sobre qualidade do ar em Minas Gerais e no Brasil como um todo. O estudo comparou os padrões nacionais de qualidade do ar de $PM_{2.5}$, PM_{10} e O_3 , estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com as diretrizes da OMS, e revelou que a legislação brasileira está consideravelmente defasada (BOARI; PEDRUZZI; VIEIRA-FILHO, 2023). Outros estudos também compararam os padrões de qualidade do ar nacionais com padrões internacionais (MEDEIROS, 2022).

Ao analisar concentrações de poluentes como o ozônio (O_3) e material particulado (MP) em diversas cidades, dentre elas Belo Horizonte, Boari, Pedruzzi e Vieira-Filho (2023) constatou que os níveis de poluição frequentemente ultrapassam os limites seguros, especialmente quando comparados aos valores recomendados pela OMS. A pesquisa encontrou mais de 20.000 violações dos padrões para PM_{10} e $PM_{2.5}$ quando avaliados com base nas diretrizes da OMS, em contraste com as 377 violações detectadas sob a legislação nacional nas cidades de Belo Horizonte, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

De acordo com a nota técnica “Qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte”, as médias anuais de MP nas estações de monitoramento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) estiveram, no período de 2000 a 2021, consistentemente acima dos níveis recomendados pelas diretrizes de qualidade do ar da OMS (MINAS GERAIS, 2023c).

Embora existam estudos anteriores, há uma carência de detalhamento de comparativos de padrões de qualidade do ar estadual e nacional com padrões internacionais, além de poucos estudos comparativos de dados de qualidade do ar com esses padrões, no que se refere ao estado de Minas Gerais.

Dessa forma, este trabalho busca avaliar a eficácia das legislações ambientais vigentes em Minas Gerais, tanto no âmbito nacional quanto estadual, e compará-las com padrões internacionais, especialmente de países desenvolvidos e com políticas ambientais avançadas. Ademais, o objetivo fundamental desta análise comparativa é discernir a capacidade regulatória existente para enfrentar os desafios impostos pela poluição atmosférica. Além disso, o estudo se propõe a coletar e analisar dados de monitoramento da qualidade do ar em Minas Gerais, comparando esses resultados com as legislações ambientais de diferentes jurisdições. Assim, será possível compreender a posição do estado de Minas Gerais no panorama nacional e internacional em termos de políticas ambientais.

Estudos mais detalhados, como o proposto neste trabalho, podem embasar políticas públicas capazes de mitigar os impactos da poluição atmosférica na saúde pública mineira. Além disso, conforme sugerem estudos recentes, a combinação de políticas de qualidade do ar e ação climática, quando orientadas por ferramentas e avaliações detalhadas, pode maximizar os benefícios para a saúde pública, especialmente em regiões específicas, como Minas Gerais (MIT NEWS, 2022).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Analisar a qualidade do ar em Minas Gerais em relação ao atendimento aos padrões estabelecidos para os principais poluentes atmosféricos nas legislações estadual, nacional e internacional.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar e comparar os padrões de qualidade do ar dos principais poluentes atmosféricos estabelecidos nas legislações de Minas Gerais, do Brasil, da UE, dos EUA e recomendado pelas diretrizes da OMS.
- Avaliar a conformidade dos dados de monitoramento da qualidade do ar em Minas Gerais com os padrões estabelecidos nas normas analisadas.
- Identificar as regiões do estado que apresentam menor percentual de conformidade com padrões mais restritivos, de modo a mapear as áreas cujas ações no gerenciamento da qualidade do ar deverão ser priorizadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Importância da Qualidade do Ar: Implicações para Saúde e Meio Ambiente

A qualidade do ar é um fator crucial para a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. Em um mundo cada vez mais industrializado, as emissões de poluentes atmosféricos têm aumentado, resultando em sérias consequências para a saúde humana e o meio ambiente (DUCHIADE, 1992). Este capítulo discute a importância da qualidade do ar, abordando suas implicações para a saúde e o meio ambiente, com foco especial nas fontes de poluição e seus impactos.

A atmosfera é um sistema dinâmico, constantemente sujeito a alterações que dão origem a fenômenos climáticos diversos. As emissões de poluentes de uma região não apenas impactam a qualidade do ar local, mas também podem influenciar a dinâmica atmosférica em escala global (SEINFELD; PANDIS, 2016). A composição básica da atmosfera provém de emissões de gases por várias fontes naturais, como florestas, oceanos e vulcões. No entanto, as emissões de fontes antrópicas, isto é, resultantes da atividade humana, podem alterar significativamente as concentrações de alguns gases, provocando mudanças substanciais no comportamento climático da atmosfera, exacerbando efeitos locais e globais (HEALD; SPRACKLEN, 2015).

As fontes emissoras antrópicas dividem-se em duas categorias principais: móveis e estacionárias. As fontes móveis incluem veículos automotores, como carros, caminhões e tratores. Já as fontes estacionárias são originadas de processos industriais, frequentemente associadas a chaminés de caldeiras, fornos, termoelétricas e sistemas de exaustão (CASTRO; ARAÚJO e SILVA, 2013). Assim, atividades como processos industriais e de geração de energia, a frota veicular e as queimadas são as maiores responsáveis pela emissão de substâncias poluentes na atmosfera, muitas das quais são tóxicas para a saúde humana e danosas à flora e aos materiais.

De acordo com Mota (2003), a poluição atmosférica pode ser definida como qualquer forma de matéria ou energia que, em intensidade, concentração, tempo ou características, torne o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade e à qualidade de vida da comunidade. Em termos gerais, conforme indicado pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2019), a qualidade do ar resulta da interação de um conjunto

complexo de fatores, entre os quais se destacam a magnitude das emissões, a topografia e as condições meteorológicas da região, que podem favorecer ou dificultar a dispersão dos poluentes.

A degradação da qualidade do ar é um problema enfrentado sobretudo nos grandes centros urbanos, onde se concentram as maiores fontes de emissão de poluentes de origem veicular e industrial, causando prejuízos ao meio ambiente e à sociedade (O'LEARY; PARR; EL-SAYED, 2022). Veículos automotores representam uma importante fonte de poluição do ar, responsáveis por uma quantidade expressiva de emissões de poluentes gasosos e partículas na atmosfera das grandes cidades (FERREIRA E OLIVEIRA, 2016). Segundo a Secretaria Nacional de Trânsito, a frota brasileira de veículos automotores cresceu cerca de 3,2% em 2021 em comparação ao ano anterior (BRASIL, 2022).

A poluição do ar ocasiona doenças agudas e crônicas, redução da expectativa de vida, prejuízos às funções respiratórias, nervosas e sensoriais, além de aumentar os níveis de mortalidade decorrentes da piora da qualidade do ar (DERISIO, 2012). Markozannes et al. (2022), em uma revisão sistemática e meta-análise, observaram que os níveis de mortalidade por acidente vascular cerebral e pneumonia, bem como as hospitalizações por asma e hipertensão, possuem forte relação com o grau de poluição do ar em ambientes urbanos.

Estudos adicionais têm consistentemente demonstrado que poluentes atmosféricos como $PM_{2.5}$, PM_{10} , dióxido de nitrogênio (NO_2) e O_3 estão associados a uma variedade de problemas de saúde graves, incluindo doenças respiratórias e cardiovasculares, além de contribuírem para a mortalidade prematura (POPE III et al., 2002; WHO, 2013). Por exemplo, Pope III et al. (2002), em um estudo longitudinal, associaram a exposição prolongada a $PM_{2.5}$ com um aumento significativo no risco de eventos cardiovasculares e mortalidade, sugerindo uma forte ligação entre a poluição do ar e a saúde cardiovascular. Este estudo é um marco na literatura sobre os efeitos da qualidade do ar na saúde.

Além disso, a poluição atmosférica está entre os dez principais fatores de risco que contribuem para o número total de anos de vida perdidos ajustados por incapacidade em todas as idades combinadas (GBD, 2019). Diversos estudos epidemiológicos mostram que a poluição do ar pode causar doenças crônicas, agravar patologias existentes e aumentar a morbidade e mortalidade cardiovascular e respiratória, além de ocasionar mortes prematuras, afetando a

saúde das populações e contribuindo para o aumento dos gastos públicos com atendimentos médicos (AGUILERA et al., 2021; BURNETT et al., 2018; RAJAGOPALAN, 2018).

No Brasil, Abe E Miraglia (2016) estimaram que o custo das mortes prematuras causadas pela poluição do ar em 29 capitais brasileiras resulta em uma perda de aproximadamente US\$ 1,7 bilhão anualmente. A magnitude desse dado já demonstra sua relevância, mas acredita-se que o valor esteja subestimado, pois o montante que poderia deixar de ser gasto pelos cofres públicos poderia ser ainda maior se fossem considerados outros eventos, além da morte prematura, como internações por causas respiratórias, absenteísmo no trabalho e custos intangíveis, como qualidade e expectativa de vida. Isso mostra que a poluição do ar, além de ser uma questão importante de saúde pública, é também uma questão econômica.

Além dos impactos na saúde humana, a qualidade do ar afeta diretamente os ecossistemas. Poluentes como o O_3 , por exemplo, podem causar danos significativos à vegetação, incluindo redução no crescimento e na produtividade das plantas, o que afeta a biodiversidade e a funcionalidade dos ecossistemas (ASHMORE, 2005). Em um estudo detalhado, Ashmore (2005) descreve como o O_3 interfere nos processos fisiológicos das plantas, potencialmente levando a consequências econômicas e ecológicas adversas.

Ademais, a acidificação causada por deposição ácida resultante da presença de SO_2 e NO_x no ar pode alterar a química do solo e das águas superficiais, afetando adversamente a fauna e a flora aquáticas e terrestres (LIKENS et al., 1996). LIKENS et al. (1996) documentaram as transformações a longo prazo em ecossistemas florestais devido à deposição ácida, destacando a interconexão entre a qualidade do ar e a saúde do ecossistema.

Em resumo, a qualidade do ar é essencial para a saúde pública e a preservação ambiental. A poluição atmosférica, proveniente principalmente de fontes antrópicas, tem impactos profundos na saúde humana, causando uma variedade de doenças e aumentando a mortalidade. Além disso, os poluentes do ar afetam os ecossistemas, danificando a vegetação e alterando a química do solo e da água. Portanto, é crucial que medidas sejam tomadas para controlar e reduzir a poluição do ar, visando melhorar a qualidade de vida das populações e em escala global.

3.2 Poluentes

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), uma agência governamental reconhecida nacionalmente por sua excelência no monitoramento e gestão da qualidade do ar, considera-se poluente qualquer substância presente no ar que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconvenientes ao bem-estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora, ou prejudicando a segurança, o uso e gozo da propriedade e as atividades normais da comunidade. A poluição atmosférica é medida pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar, que podem ser vastas e variadas, dificultando a classificação. Para simplificar, os poluentes são divididos em duas categorias: poluentes primários e poluentes secundários. Poluentes primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão, enquanto poluentes secundários são formados na atmosfera por reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera (USEPA, 2021; CETESB, 2024).

3.2.1 Material Particulado (MP)

O MP é um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e outros tipos de materiais sólidos e líquidos que permanecem suspensos na atmosfera devido ao seu tamanho pequeno. As principais fontes de emissão de particulado para a atmosfera incluem veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa e ressuspensão de poeira do solo (CETESB, 2024). O MP pode também se formar na atmosfera a partir de gases como SO_2 , NO_x e compostos orgânicos voláteis (COVs), emitidos principalmente em atividades de combustão e transformados em partículas líquidas por reações químicas no ar (WHO, 2021; KAMPA & CASTANAS, 2008).

As variações do MP são influenciadas por diversos fatores, incluindo localização geográfica, condições meteorológicas e fontes de emissão (CETESB, 2024). Segundo estudo de Kim, Kabir E Kabir (2015), as concentrações de $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} podem variar sazonalmente, sendo geralmente mais altas em áreas urbanas devido à maior densidade de fontes de poluição, como veículos e indústrias. O estudo de Cesari et al. (2016) investiga as variações sazonais do material particulado (MP) e destaca a influência de diferentes fontes e processos na composição do $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} , apontando que fatores como a advecção de poeira, a queima de biomassa e o transporte de longo alcance podem impactar as concentrações de MP ao longo do ano. Além disso, evidencia que processos atmosféricos, como a ressuspensão de poeira local, desempenham um papel crucial na dinâmica desses poluentes.

Compreender os diferentes tipos de poluentes atmosféricos e seus impactos é fundamental para o desenvolvimento de políticas eficazes de controle da poluição e para a mitigação dos efeitos adversos na saúde pública e no meio ambiente (CETESB, 2024). Estudos contínuos são necessários para monitorar as mudanças nas concentrações de poluentes e adaptar as estratégias de gerenciamento de qualidade do ar às novas realidades e desafios. Segundo estudo de Watson et al. (2014), a caracterização química detalhada dos poluentes é essencial para identificar fontes específicas de poluição e desenvolver estratégias de controle mais direcionadas.

3.2.1.1 Partículas Totais em Suspensão (PTS)

PTS são definidas como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 μm . Parte dessas partículas é inalável e pode causar problemas à saúde, enquanto outra parte pode afetar desfavoravelmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade (USEPA, 2021).

3.2.1.2 Partículas Inaláveis (PM_{10})

PM_{10} possuem um diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 μm . Dependendo da distribuição de tamanho, essas partículas podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares. Estudos indicam que a exposição prolongada ao PM_{10} está associada a doenças respiratórias e cardiovasculares (POPE & DOCKERY, 2006).

3.2.1.3 Partículas Inaláveis Finas ($PM_{2.5}$)

$PM_{2.5}$ têm um diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 μm . Devido ao seu tamanho diminuto, essas partículas podem penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e causando sérios problemas de saúde, como doenças respiratórias crônicas, câncer de pulmão e doenças cardiovasculares (WHO, 2021).

3.2.2 Dióxido de Enxofre (SO_2)

O SO_2 resulta principalmente da queima de combustíveis contendo enxofre, como óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina (USEPA, 2021). É um dos principais formadores da chuva ácida e pode reagir com outras substâncias presentes no ar, formando partículas de sulfato que são responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera (USEPA, 2021). O SO_2 tem impactos significativos na saúde humana, especialmente no sistema respiratório, causando ou agravando doenças como asma e bronquite crônica (POPE & DOCKERY, 2006).

3.2.3 Monóxido de Carbono (CO)

O CO é um gás incolor e inodoro que resulta da queima incompleta de combustíveis de origem orgânica, como combustíveis fósseis e biomassa (USEPA, 2021). Em geral, é encontrado em maiores concentrações nas cidades, sendo emitido principalmente por veículos automotores (USEPA, 2021). Altas concentrações de CO podem ser encontradas em áreas de intensa circulação de veículos. Este gás é particularmente perigoso porque se liga à hemoglobina no sangue, reduzindo a capacidade do sangue de transportar oxigênio e podendo causar envenenamento (RAUB et al., 2000).

3.2.4 Ozônio (O₃)

Os oxidantes fotoquímicos, como o O₃, são formados por reações químicas entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis na presença de luz solar, dessa forma, é um poluente secundário (USEPA, 2021). O O₃, quando presente na troposfera (a camada mais baixa da atmosfera), é tóxico e pode causar danos à saúde humana e à vegetação (WHO, 2021). O O₃ troposférico, também conhecido como "mau ozônio", é um dos principais componentes do smog fotoquímico, que reduz a visibilidade e pode causar irritação nos olhos e no sistema respiratório (MOLINA & MOLINA, 2004).

3.2.5 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os NO_x, incluindo o óxido nítrico (NO) e o NO₂, são formados durante processos de combustão, especialmente em altas temperaturas. Em grandes cidades, os veículos são geralmente os principais responsáveis pela emissão de NO₂. O NO pode se oxidar na presença de luz solar, formando NO₂, que tem um papel crucial na formação de oxidantes fotoquímicos como o O₃. Dependendo das concentrações, o NO₂ pode causar danos à saúde, incluindo inflamação das vias aéreas e redução da função pulmonar (WHO, 2021).

3.3 Breve Histórico e Contexto da Qualidade do Ar no Brasil

Segundo a OMS, a qualidade do ar é um tema central nas discussões ambientais contemporâneas, devido aos seus impactos diretos na saúde pública e no meio ambiente (OMS, 2024). No Brasil, a preocupação com a poluição do ar ganhou relevância nas últimas décadas, impulsionada por um crescimento urbano acelerado e por atividades industriais intensivas (BRASIL, 2009).

Nesse sentido, o controle da qualidade do ar no Brasil começou a ganhar estrutura a partir da década de 1970, com a criação da Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA) em 1973, conforme destaca Ferraz (2018). Este período marcou o início de uma conscientização mais ampla sobre os problemas ambientais no país. A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, influenciou significativamente a política ambiental brasileira, levando à promulgação de leis específicas para o controle da poluição atmosférica (BRASIL, 2013).

Dessa maneira, o Brasil adotou a Lei nº 6.938 de 1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, a qual estabeleceu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e a obrigatoriedade do licenciamento ambiental para atividades potencialmente poluidoras, implementando o controle da poluição atmosférica como um de seus objetivos principais (BRASIL, 1981).

A Resolução CONAMA nº 05/1989 desempenhou um papel fundamental ao instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) (BRASIL, 1989). Este marco normativo foi responsável por estabelecer as diretrizes iniciais para a proteção da qualidade do ar no Brasil, promovendo a criação de mecanismos para o controle das emissões de poluentes atmosféricos, cujo intuito foi de viabilizar o progresso econômico e social do país de maneira ambientalmente responsável, mediante a restrição dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica, com o objetivo de melhorar a qualidade do ar, cumprir os padrões estabelecidos e preservar a qualidade do ar em regiões que ainda não foram impactadas negativamente (BRASIL, 1989).

Posteriormente, as normas de qualidade do ar no Brasil foram instituídas e baseadas nos padrões estabelecidos pelo CONAMA, especificamente na Resolução CONAMA nº 03/1990 e posteriores atualizações. Estes padrões visam proteger a saúde pública e o meio ambiente, estabelecendo limites para concentrações de poluentes como PM_{10} e $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , O_3 e NO_2 (BRASIL, 1990).

A Resolução CONAMA nº 491/2018, por exemplo, atualizou os padrões de qualidade do ar no Brasil, alinhando-os às diretrizes da OMS e estabelecendo metas progressivas para a melhoria da qualidade do ar (BRASIL, 2018). A qual, em 2024 foi amplamente revogada pela Resolução CONAMA nº 506/2024, que manteve padrões semelhantes, mas definiu os prazos para o cumprimento das metas progressivas de melhoria ao longo do tempo (BRASIL, 2024a).

3.4 Breve Histórico e Contexto da Qualidade do Ar em Minas Gerais

Minas Gerais tem implementado diversas políticas e programas para o controle da poluição do ar. A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) é a principal agência responsável pelo monitoramento e controle da qualidade do ar no estado. A FEAM gerencia a Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar, que coleta dados em tempo real sobre a concentração de poluentes em diferentes regiões do estado, permitindo uma ação rápida em casos de níveis críticos de poluição (FEAM, 2022).

Programas de controle de emissões veiculares e industriais também são parte das ações estaduais. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o Programa de Controle de Poluição de Fontes Estacionárias são exemplos de iniciativas que visam reduzir as emissões de poluentes atmosféricos no país (MMA, 2021).

Embora tenham sido feitos progressos significativos, Minas Gerais ainda enfrenta desafios consideráveis na gestão da qualidade do ar. A expansão urbana desordenada, o aumento da frota veicular e a atividade industrial contínua são fatores que contribuem para níveis elevados de poluição do ar. A efetiva implementação e fiscalização das normas ambientais, bem como a conscientização pública, são essenciais para melhorar a qualidade do ar (FEAM, 2022).

3.5 Normativas e Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar são critérios estabelecidos por legislações ambientais em esferas municipal, estadual, nacional ou internacional, definindo os limites máximos aceitáveis de concentração de poluentes atmosféricos para proteger a saúde humana e o meio ambiente. Esses padrões são um importante instrumento de gestão de riscos e política ambiental e servem para orientar políticas e ações de controle da poluição do ar, assegurando que as concentrações de poluentes não excedam níveis que possam causar danos à saúde humana, ao bem-estar público e aos ecossistemas (OMS, 2021).

Nesse sentido, as legislações ambientais, tanto no Brasil quanto no cenário internacional, têm registrado avanços notáveis, refletindo um compromisso crescente com a proteção ambiental e a saúde pública (BRASIL, 2024b). Esse progresso é evidenciado pela implementação de padrões mais restritivos e atualizados, em conformidade com as diretrizes internacionais estabelecidas por órgãos como a OMS (OMS, 2021). A evolução normativa inclui a adoção de limites mais rigorosos para a concentração de poluentes atmosféricos críticos, como $PM_{2.5}$, SO_2 ,

NO₂, CO e O₃. Enquanto algumas normas mais antigas ainda prevalecem em certas regiões, a tendência global é adotar critérios mais avançados e cientificamente embasados, que consideram os impactos adversos dos poluentes sobre a saúde humana e os ecossistemas (OMS, 2021).

3.5.1 Legislação Nacional Brasileira

3.5.1.1 Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981

Um dos pilares da legislação ambiental brasileira é a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente. Ela tem como objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana (BRASIL, 1981). Esta lei criou o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), cuja estrutura de gestão ambiental do Brasil, formada por órgãos e entidades da União, Estados, Distrito Federal e Municípios, cujo objetivo é proteger, melhorar e recuperar a qualidade ambiental do país (BRASIL, 1981). Entre os instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, destaca-se o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental, que são critérios técnicos e científicos para a manutenção da qualidade dos recursos ambientais, garantindo o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 1981).

3.5.1.2 Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989

A Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1989, foi um dos primeiros passos significativos na criação de um marco regulatório para a qualidade do ar no Brasil. Esta resolução estabeleceu o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), que delineia estratégias para a definição de limites máximos de emissão de poluentes por fontes emissoras, a adoção de padrões nacionais de qualidade do ar, a implementação de sistemas de monitoramento da qualidade do ar, dentre outras medidas (BRASIL, 1989). Cabe frisar que, alguns dos instrumentos utilizados pelo programa incluem limites máximos de emissão, padrões de qualidade do ar, o PROCONVE e o Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial (PRONACOP), dentre outros (BRASIL, 1989).

3.5.1.3 Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990

Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990, definiu padrões nacionais de qualidade do ar, estabelecendo limites máximos para a concentração de poluentes como PTS, PM₁₀ e PM_{2.5}, SO₂, CO, O₃ e NO₂ (BRASIL, 1990). Ademais, a resolução também estipulou métodos

de amostragem e análise dos poluentes, bem como o monitoramento da qualidade do ar, que ficou a cargo dos estados. Além disso, estabeleceu níveis de atenção, alerta e emergência para episódios críticos de poluição do ar, definindo medidas a serem tomadas em caso de alta concentração de poluentes, com o objetivo de prevenir riscos graves à saúde pública (BRASIL, 1990).

Com a publicação da Resolução CONAMA nº 491/2018, a Resolução nº 003/1990 foi integralmente revogada. A nova resolução estabeleceu padrões de qualidade do ar mais restritivos, definidos em padrões intermediários (PI-1, PI-2, PI-3) e padrão final (PF), os quais seriam implementados em etapas progressivas, começando imediatamente no PI-1, até atingir o PF, o mais restritivo, visando melhorar continuamente a qualidade do ar no Brasil (BRASIL, 2018).

3.5.1.4 Resolução CONAMA nº 491, de 28 de novembro de 2018

A Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, restringiu os padrões de qualidade do ar no Brasil, revogando toda a Resolução nº 003/1990 (BRASIL, 2018). A resolução estabeleceu limites mais restritivos em comparação com a anterior, para poluentes como PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ e CO (BRASIL, 2018).

Os PI-1, PI-2 e PI-3 foram padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas e o PF os valores guia definidos pela OMS em 2005 (BRASIL, 2018). Cabe frisar que, os PI's são estabelecidos com o objetivo de proporcionar uma transição suave e factível dos padrões antigos para os novos, mais rigorosos (CETESB, 2013). Dessa forma, são menos restritivos inicialmente, permitindo que os estados e municípios adaptem suas políticas e medidas de controle da poluição atmosférica gradualmente, até atingir o PF, que é o valor alvo (SICILIANO et al., 2020).

Os PFs correspondem aos limites de qualidade do ar que devem ser alcançados em um prazo mais longo e representam os objetivos finais da legislação. Esses padrões são mais restritivos e têm como base as diretrizes da OMS em 2005 para a proteção da saúde pública (BRASIL, 2018). O alcance dos padrões finais implica um nível de poluição atmosférica significativamente menor e uma melhoria substancial na qualidade do ar (BRASIL, 2018).

Os artigos 1º ao 8º que estabeleciam os padrões de qualidade do ar e os métodos de monitoramento, 12 a 14, que tratavam das responsabilidades dos órgãos ambientais estaduais e

distritais na elaboração de planos de controle de emissões e relatórios de avaliação da qualidade do ar e o Anexo I, que detalhava os padrões de qualidade do ar intermediários e finais, foram revogados pela Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024 (BRASIL, 2024a).

3.5.1.5 Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024

Em 2024, o Brasil implementou a Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024, que estabelece padrões nacionais de qualidade do ar com o objetivo de proteger a saúde pública e o meio ambiente (BRASIL, 2024a). Esta resolução é parte integrante da Política Nacional de Qualidade do Ar, instituída pela Lei nº 14.850, de 2 de maio de 2024 (BRASIL, 2024c), a qual determina diretrizes e instrumentos para o controle e a gestão da qualidade do ar em todo o território nacional. Um dos objetivos desta lei é proteger a saúde pública e a qualidade ambiental, promovendo a redução progressiva das emissões e concentrações de poluentes atmosféricos (BRASIL, 2024c).

Dessa forma, a Resolução nº 506/2024 revogou os arts. 1º ao 8º, os arts. 12 a 14 e o Anexo I da Resolução CONAMA nº 491/2018, definindo novos padrões nacionais de qualidade do ar, que serão implementados em cinco etapas intermediárias até atingir os valores finais das diretrizes de 2021 da OMS. Nesse sentido, há algumas diferenças em relação aos padrões da Resolução nº 491/2018 para a Resolução nº 506/2024, uma vez que a primeira segue as diretrizes estipuladas pela OMS em 2005, enquanto a segunda se alinha com as diretrizes globais de qualidade do ar de 2021 da OMS; que representam um avanço em relação às diretrizes de 2005, pois são mais restritivas (ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE, 2021).

Ademais, a resolução estabelece um calendário de implementação que se inicia com a fase PI-1, vigente até 31 de dezembro de 2024, seguida pela PI-2, que entra em vigor em 1º de janeiro de 2025, PI-3, em vigor a partir de 1º de janeiro de 2033, e PI-4, a partir de 1º de janeiro de 2044, com possibilidade de antecipação ou prorrogação de até quatro anos. Os PFs terão sua data de implementação definida posteriormente pelo CONAMA (BRASIL, 2024a). Os padrões de qualidade do ar vigentes no Brasil podem ser evidenciados na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrões de Qualidade do Ar da Resolução CONAMA nº 506/2024.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ppm	Método de Cálculo
----------------------	-----------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	-----	-------------------

Material Particulado - PM₁₀	24 horas	120	100	75	50	45	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-	Média Aritmética Anual
Material Particulado - PM_{2.5}	24 horas	60	50	37	25	15	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	20	17	15	10	5	-	Média Aritmética Anual
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	125	50	40	40	40	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	30	20	20	20	-	Média Aritmética Anual
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora ²	260	240	220	200	200	-	Máxima Média Horária Obtida no Dia
	Anual ¹	60	50	45	40	10	-	Média Aritmética Anual
Ozônio - O₃	8 horas ³	140	130	120	100	100	-	Máxima Média Móvel Obtida no Dia
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-	Média Aritmética Anual
continua								
Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 (µg/m³)	PI-2 (µg/m³)	PI-3 (µg/m³)	PI-4 (µg/m³)	PF (µg/m³)	ppm	Método de Cálculo

Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	-	9	Máxima Média Móvel Obtida no Dia
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	-	240	-	Média Aritmética diária
	Anual ⁴	-	-	-	-	80	-	Média Geométrica Anual
Chumbo - Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	-	0.5	-	Medido nas Partículas Totais em Suspensão
¹ Média aritmética anual								
² Máxima média horária obtida no dia								
³ Máxima média móvel obtida no dia								
⁴ Média geométrica anual								
⁵ Medido nas partículas totais em suspensão								

Fonte: Adaptado de BRASIL (2024a).

3.5.2 Legislação Estadual de Minas Gerais

3.5.2.1 Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM) nº 01, de 26 de maio de 1981

A preocupação com a qualidade do ar em Minas Gerais remonta aos anos 1980, quando o crescimento industrial e urbano começou a impactar significativamente o meio ambiente. A DN COPAM nº 01/1981 estabeleceu parâmetros e diretrizes para o controle da poluição atmosférica no estado (MINAS GERAIS, 1981). Esta deliberação instituiu padrões de qualidade do ar baseados em poluentes atmosféricos prioritários, como PTS, SO₂, CO e NO₂ (MINAS GERAIS, 1981). Foram definidos limites para a concentração desses poluentes, visando proteger a saúde pública e o meio ambiente, e estabelecidos procedimentos para a medição e monitoramento da qualidade do ar, além de mecanismos de controle e fiscalização das fontes emissoras (MINAS GERAIS, 1981). Essa resolução foi revogada pela DN COPAM nº 248/2023 (MINAS GERAIS, 2023d).

3.5.2.2 Deliberação Normativa COPAM nº 248, de 23 de novembro de 2023

Com o avanço tecnológico e o aumento das preocupações ambientais, tornou-se necessária a atualização das normas existentes. A DN COPAM nº 248/2023 traz diretrizes mais restritivas para a definição de padrões de qualidade do ar no estado de Minas Gerais e revoga as disposições da DN COPAM nº 01/1981 (MINAS GERAIS, 2023d). Os limites de concentração de poluentes foram padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas e o PF os valores guia definidos seguindo as diretrizes de 2005 OMS (MINAS GERAIS, 2023d). A Tabela 2 apresenta os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela DN COPAM nº 248/2023.

Tabela 2 – Padrões de Qualidade do Ar da Deliberação Normativa COPAM nº 248/2023.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 (µg/m³)	PI-2 (µg/m³)	PI-3 (µg/m³)	PF (µg/m³)	ppm	Método de Cálculo
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	120	100	75	50	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	35	30	20	-	Média Aritmética Anual
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	20	17	15	10	-	Média Aritmética Anual
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	125	50	30	20	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	30	20	-	-	Média Aritmética Anual
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora ²	260	240	220	200	-	Máxima Média Horária Obtida no Dia
	Anual ¹	60	50	45	40	-	Média Aritmética Anual
Ozônio - O₃	8 horas ³	140	130	120	100	-	Máxima Média Móvel Obtida no Dia
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-	Média Aritmética diária
	Anual ¹	40	35	30	20	-	Média Aritmética Anual
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9	Máxima Média Móvel Obtida no Dia
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-	Média Aritmética diária
	Anual ⁴	-	-	-	80	-	Média Geométrica Anual
Chumbo - Pb⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-	Medido nas Partículas Totais em Suspensão
Partículas Sedimentáveis - PS - áreas industriais	30 dias	-	-	-	10	-	g/m².30 dias
continua							
Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 (µg/m³)	PI-2 (µg/m³)	PI-3 (µg/m³)	PF (µg/m³)	ppm	Método de Cálculo

Partículas Sedimentáveis - PS - demais áreas inclusive residenciais e comerciais	30 dias	-	-	-	5	-	g/m ² .30 dias
¹ Média aritmética anual							
² Máxima média horária obtida no dia							
³ Máxima média móvel obtida no dia							
⁴ Média geométrica anual							
⁵ Medido nas partículas totais em suspensão							

Fonte: Adaptado de MINAS GERAIS (2023d).

3.5.3 Legislação Europeia

A qualidade do ar tem sido uma preocupação crescente ao longo das décadas, levando a UE a desenvolver uma série de legislações destinadas a proteger a saúde humana e o meio ambiente. Desde os anos 1970, a UE vem aprimorando suas políticas de qualidade do ar, resultando em uma estrutura regulatória abrangente. As primeiras iniciativas legislativas da UE para a qualidade do ar focaram em poluentes específicos. Nos anos 1980, a Diretiva 80/779/CEE estabeleceu limites para SO₂ e PTS (EUROPEAN COMMISSION, 1980). Em 1985, a Diretiva 85/203/CEE introduziu limites para NO₂ (EUROPEAN COMMISSION, 1985).

Durante a década de 1990, houve uma integração maior das políticas ambientais com a introdução do Tratado de Amsterdã em 1999, que reforçou a proteção ambiental como um objetivo independente da UE. Este período também testemunhou o desenvolvimento de políticas mais abrangentes, como a Diretiva 96/62/CE, que estabeleceu as bases para a avaliação e gestão da qualidade do ar na Europa (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

Na década de 2000, a Diretiva 2008/50/CE consolidou e substituiu diretivas anteriores, estabelecendo um quadro mais unificado para o controle da qualidade do ar. Essa diretiva introduziu padrões mais rigorosos para uma série de poluentes, incluindo PM_{2.5} e O₃, e definiu requisitos para a monitoramento, avaliação e gestão da qualidade do ar (EUROPEAN COMMISSION, 2008). Esta diretiva é a peça central da legislação atual da UE sobre qualidade do ar, estabelecendo limites para SO₂, NO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}, Pb, benzeno e CO, visando proteger a saúde humana e o meio ambiente (EUROPEAN COMMISSION, 2008).

Um componente fundamental da estratégia atual da UE é o "*Zero Pollution Action Plan*", lançado em maio de 2021. Este plano faz parte do *European Green Deal* e tem como objetivo alcançar níveis de poluição que não sejam prejudiciais à saúde humana e aos ecossistemas

naturais até 2050. As ações previstas incluem a redução da poluição do ar, água e solo, a promoção de práticas de produção e consumo mais sustentáveis e o reforço da legislação existente sobre poluição (EUROPEAN COMMISSION, 2021). O plano estabelece metas específicas para reduzir a poluição do ar, alinhando-se aos mais recentes padrões científicos e de saúde pública, e promove uma maior cooperação entre os Estados-Membros para a implementação de medidas eficazes (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

A Tabela 3 apresenta os padrões de qualidade do ar mais atualizados da União Europeia, conforme estabelecido nas diretrizes supracitadas.

Tabela 3 – Padrões de Qualidade do Ar da União Europeia

Poluente Atmosférico	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite	Método de Cálculo	Excedências Permitidas por Ano
----------------------	-----------------------	---------	--------------	-------------------	--------------------------------

Material Particulado - PM₁₀	24 horas	µg/m ³	50	Média aritmética diária	35
	Anual	µg/m ³	40	Média aritmética anual	0
Material Particulado - PM_{2.5}	Anual	µg/m ³	25	Média aritmética anual	0
Dióxido de Enxofre - SO₂	1 hora	µg/m ³	350	Média aritmética por hora	24
	24 horas	µg/m ³	125	Média aritmética diária	3
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	µg/m ³	200	Média aritmética por hora	18
	Anual	µg/m ³	40	Média aritmética anual	0
Ozônio - O₃	8 horas	µg/m ³	120	Média máxima móvel obtida no dia	25 dias, em média, por ano, em um período de 3 anos
Monóxido de Carbono - CO	Máxima média móvel de 8 horas	mg/m ³	10	Média máxima móvel obtida no dia	0
Chumbo - Pb	Anual	µg/m ³	0.5	Média aritmética anual	0
Benzeno	Anual	µg/m ³	5	Média aritmética anual	0
Arsênio	Anual	ng/m ³	6	Média aritmética anual	0
Cádmio	Anual	ng/m ³	5	Média aritmética anual	0
Níquel	Anual	ng/m ³	20	Média aritmética anual	0

Fonte: Adaptado de *EUROPEAN COMMISSION* (2008).

3.5.4 Legislação Estadunidense

A primeira legislação federal significativa nos EUA foi o *Air Pollution Control Act* de 1955, que financiou pesquisas federais sobre poluição do ar. Em seguida, o *Clean Air Act* de 1963 estabeleceu um programa federal dentro do Serviço de Saúde Pública dos EUA, autorizando pesquisas sobre técnicas de monitoramento e controle da poluição do ar (USEPA, 2024a).

O *Air Quality Act* de 1967 expandiu ainda mais as atividades do governo federal, permitindo a execução de procedimentos de fiscalização em áreas sujeitas ao transporte interestadual de poluentes. Esse ato foi fundamental para o desenvolvimento de inventários de emissão de poluentes, técnicas de monitoramento ambiental e inspeções de fontes estacionárias (USEPA, 2024a).

Uma mudança significativa na política de qualidade do ar ocorreu com a promulgação do *Clean Air Act de 1970*. Esse ato autorizou o desenvolvimento de regulamentações federais e estaduais abrangentes para limitar as emissões de fontes estacionárias e móveis. Quatro programas regulatórios principais foram iniciados: os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (NAAQS), os Planos de Implementação Estadual (SIPs), os Padrões de Desempenho para Novas Fontes (NSPS) e os Padrões Nacionais de Emissão para Poluentes Perigosos do Ar (NESHAPs). A criação da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) em 1970 foi essencial para a implementação desses requisitos (ROGERS, 1990; HOLST, 2024).

As emendas ao *Clean Air Act* de 1977 introduziram provisões para a Prevenção da Deterioração Significativa (PSD) da qualidade do ar em áreas que já atendiam aos padrões NAAQS e estabeleceram requisitos rigorosos de permissão para garantir a manutenção desses padrões. Em 1990, novas emendas ampliaram significativamente a autoridade e a responsabilidade do governo federal, autorizando programas regulatórios para controle de deposição ácida (chuva ácida), emissão de poluentes tóxicos e proteção da camada de O₃ estratosférico (USEPA, 2024a).

Além disso, o *Clean Air Act* de 1990 estabeleceu um programa nacional de licenciamento operacional e fortaleceu a autoridade de execução para garantir uma melhor conformidade com a lei. Essas emendas também revisaram as provisões relacionadas ao controle de poluentes tóxicos do ar, estabelecendo padrões de tecnologia de controle máximo (MACT) para fontes principais e certas fontes regionais (USEPA, 2024a).

Um componente essencial da legislação de qualidade do ar nos Estados Unidos é a definição dos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (NAAQS), que estabelecem limites para seis poluentes comuns: PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, SO₂, NO₂, CO e Pb. A Tabela 4 apresenta os padrões de qualidade do ar vigentes, aplicáveis nacionalmente nos EUA (USEPA, 2024b).

Tabela 4 – Padrões de Qualidade do Ar da Environmental Protection Agency (USEPA)

Poluente Atmosférico	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite	Forma de Atendimento	Excedências Permitidas por Ano
----------------------	-----------------------	---------	--------------	----------------------	--------------------------------

Material Particulado - PM₁₀	24 horas	µg/m ³	150	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano, em média durante 3 anos	1
Material Particulado (PM_{2.5})	Anual	µg/m ³	9	Média aritmética anual, média de 3 anos	0
	24 horas	µg/m ³	35	98º percentil, média de 3 anos	0
Dióxido de Enxofre (SO₂)	1 hora	ppb	75	99º percentil, média de 3 anos	0
	3 horas	ppm	0,5	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano (padrão secundário)	0
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	1 hora	ppb	100	98º percentil, média de 3 anos	0
	Anual	ppb	53	Média aritmética anual	0
Ozônio (O₃)	8 horas	ppm	0,07	4ª maior concentração diária de 8 horas, média de 3 anos	0
Monóxido de Carbono (CO)	8 horas	ppm	9	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano	1
	1 hora	ppm	35	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano	1
Chumbo (Pb)	3 meses	µg/m ³	0,15	Média aritmética de 3 meses	0

Fonte: Adaptado de *ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY* (USEPA) (2024b).

3.5.5 Padrões de Qualidade do Ar da OMS

A OMS desempenha um papel crucial na definição de padrões globais de qualidade do ar, com o objetivo de proteger a saúde pública e o meio ambiente. Desde os anos 1950, a OMS publica diretrizes baseadas em evidências científicas para orientar políticas e ações globais sobre a qualidade do ar. Essas diretrizes são amplamente reconhecidas e utilizadas por governos e organizações internacionais na formulação de regulamentações e metas de gestão da qualidade do ar (WHO, 2021).

A evolução das diretrizes de qualidade do ar da OMS reflete o avanço das evidências científicas sobre os impactos da poluição do ar na saúde humana. A primeira edição global dessas diretrizes

foi lançada em 1987, com revisões subsequentes em 1997, 2005 e, mais recentemente, em 2021 (WHO, 2021). Cada atualização incorpora novas descobertas científicas, resultando em recomendações mais rigorosas para níveis de exposição segura a vários poluentes atmosféricos.

A atualização de 2021 das Diretrizes Globais de Qualidade do Ar da OMS introduziu níveis guia revisados para vários poluentes-chave, incluindo PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂ e CO. Essas diretrizes refletem a crescente quantidade de evidências que mostram os efeitos adversos da poluição do ar na saúde humana, mesmo em concentrações mais baixas do que se pensava anteriormente (WHO, 2021).

Por exemplo, a OMS estabeleceu que a exposição a PM_{2.5} deve ser limitada a uma média anual de 5 µg/m³ e a uma média de 24 horas de 15 µg/m³, valores significativamente reduzidos em relação à diretriz anterior (2005). Para o NO₂, o limite foi estabelecido em uma média anual de 10 µg/m³ e uma máxima média horária obtida no dia de 200 µg/m³ (WHO, 2021).

Essas diretrizes são desenvolvidas através de um processo rigoroso de revisão e avaliação de evidências, envolvendo grupos de especialistas e revisões sistemáticas de literatura. Mais de 500 artigos científicos foram considerados na elaboração das diretrizes de 2021, garantindo que as recomendações sejam baseadas nas evidências mais recentes e robustas disponíveis (WHO, 2021).

Destarte, as diretrizes de qualidade do ar da OMS são essenciais não apenas para orientar políticas nacionais e internacionais, mas também para conscientizar a sociedade civil sobre os riscos da poluição do ar e promover ações para reduzir a exposição a poluentes atmosféricos. Dessa forma, a OMS busca para ampliar o entendimento sobre os efeitos da poluição do ar na saúde e desenvolver ferramentas e estratégias para mitigar esses impactos, enfatizando a importância de uma abordagem integrada que considere múltiplos poluentes e suas interações no ambiente (WHO, 2021). A Tabela 5 apresenta os padrões de qualidade do ar em vigor, estabelecidos pela mesma na diretriz de 2021 (WHO, 2021).

Tabela 5 – Padrões de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde (OMS)

Poluente Atmosférico	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite	Método de Cálculo
Material Particulado (PM₁₀)	24 horas	µg/m ³	45*	Média aritmética diária
	Anual	µg/m ³	15	Média aritmética anual
Material Particulado (PM_{2.5})	24 horas	µg/m ³	15*	Média aritmética diária
	Anual	µg/m ³	5	Média aritmética anual
Dióxido de Enxofre (SO₂)	24 horas	µg/m ³	40*	Média aritmética diária
	10 minutos	µg/m ³	500	Média máxima móvel de 10 minutos
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	Anual	µg/m ³	10	Média aritmética anual
	24 horas	µg/m ³	25*	Média aritmética diária
	1 hora	µg/m ³	200	Máxima média horária obtida no dia
Ozônio (O₃)	8 horas	µg/m ³	100*	Média máxima móvel de 8 horas
Monóxido de Carbono (CO)	24 horas	mg/m ³	4*	Média aritmética diária
	8 horas	mg/m ³	10	Média máxima móvel de 8 horas
	1 hora	mg/m ³	35	Média máxima móvel de 1 hora

* Utiliza-se percentil 99, ou seja, permite até 4 ultrapassagens de limite por ano.

Fonte: Adaptado de *WORLD HEALTH ORGANIZATION* (2021).

3.6 Monitoramento da Qualidade do Ar em Minas Gerais

O monitoramento da qualidade do ar é uma atividade essencial para garantir a saúde pública e a proteção do meio ambiente, sendo crucial para a gestão ambiental em qualquer região urbana ou rural. Em Minas Gerais, essa responsabilidade é gerida pela FEAM que opera uma extensa rede de estações automáticas de monitoramento distribuídas por diversas regiões do estado. A importância deste monitoramento está amplamente documentada em estudos recentes, destacando a correlação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias, cardiovasculares e outras condições de saúde (WHO, 2021; SOUZA; MORAIS, 2024).

De acordo com o estudo de Ribeiro, Galvão e Albuquerque (2023), a análise da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, revelou a importância dos dados

de monitoramento na formulação de políticas públicas. O estudo demonstrou que a falta de melhorias nas concentrações de poluentes como o PM_{10} e $PM_{2.5}$ exige uma revisão das políticas ambientais existentes e a implementação de novas estratégias. Tais políticas incluem medidas como a restrição do tráfego de veículos em áreas urbanas e a criação de zonas de baixa emissão para mitigar os impactos na saúde pública

O monitoramento da qualidade do ar em Minas Gerais segue diretrizes nacionais que definem os padrões de qualidade do ar no Brasil. A manutenção e calibração prévia das estações de monitoramento da qualidade do ar é fundamental para assegurar que as medições e os relatórios de qualidade do ar sejam precisos e confiáveis, conforme corroborado por estudos de implementação de políticas ambientais (MINAS GERAIS, 2023c).

3.6.1 Estrutura da Rede de Monitoramento

Minas Gerais possui uma rede abrangente de monitoramento da qualidade do ar, composta por 56 estações automáticas distribuídas em 18 municípios, responsáveis por medir continuamente os níveis de diversos poluentes atmosféricos, incluindo PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , SO_2 e CO, sendo que não são todas as estações que monitoram todos os poluentes mencionados (MINAS GERAIS, 2023a). Esses dados são utilizados para calcular o Índice de Qualidade do Ar (IQAr), um indicador que facilita a interpretação dos níveis de poluentes para o público em geral (MINAS GERAIS, 2023a). Estudos recentes indicam que a cobertura geográfica e a densidade dessas estações são adequadas para fornecer uma representação precisa da qualidade do ar em regiões urbanas e industriais do estado (SILVA; QUADROS, 2016).

3.6.2 Métodos de análise

As estações automáticas de monitoramento em Minas Gerais estão equipadas com diversos tipos de sensores e analisadores que medem as concentrações dos poluentes atmosféricos (MINAS GERAIS, 2010). Os métodos de análise incluem analisadores de gases para medir concentrações de NO_2 , SO_2 e CO, monitores de MP para PM_{10} e $PM_{2.5}$, e sensores meteorológicos que coletam dados sobre temperatura, umidade, velocidade e direção do vento (MINAS GERAIS, 2010). Ribeiro, Galvão e Albuquerque (2023), em seu estudo na cidade de Denver, EUA evidência que essas variáveis meteorológicas supracitadas são essenciais para interpretar os dados de poluição do ar, pois influenciam diretamente a dispersão e concentração dos poluentes (RIBEIRO; GALVÃO; ALBUQUERQUE, 2023).

Ademais, a precisão e a confiabilidade desses métodos de monitoramento são frequentemente validadas por estudos comparativos e calibrações regulares. A calibração regular dos sensores é essencial para manter a precisão dos dados coletados. Desouza et al. (2022) destacam que a calibração deve ser realizada periodicamente para garantir a qualidade dos dados. Além disso, a manutenção das estações é fundamental para evitar falhas e assegurar a continuidade do monitoramento (MARGARITIS et al., 2021).

Embora a rede de monitoramento da qualidade do ar em Minas Gerais seja bem estruturada, existem desafios e limitações que precisam ser abordados. Dificuldades na manutenção das estações, problemas de financiamento e desafios na comunicação dos dados ao público são questões que impactam a eficácia do sistema de monitoramento (MINAS GERAIS, 2023c).

3.6.3 Divulgação de dados

A rede de monitoramento da qualidade do ar do estado de Minas Gerais está interligada à plataforma MonitorAr, desenvolvida pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), que integra e divulga os dados em uma interface acessível ao público, permitindo a consulta em tempo real das condições da qualidade do ar. A interface pública da plataforma MonitorAr facilita não apenas o acesso aos dados, mas também promove a conscientização sobre a importância da qualidade do ar para a saúde pública e o meio ambiente (MINAS GERAIS, 2023b).

Os dados do monitoramento são divulgados diariamente através do Boletim da Qualidade do Ar, disponível no portal da FEAM e na plataforma MonitorAr. Este boletim apresenta os índices de qualidade do ar calculados para cada estação de monitoramento, destacando os poluentes que apresentam os maiores níveis de concentração. A divulgação transparente e acessível dos dados permite que a população esteja informada sobre a qualidade do ar em sua região, promovendo ações de prevenção e mitigação de riscos à saúde (MINAS GERAIS, 2023b).

3.7 Trabalhos que reportam a qualidade do ar atual no estado de Minas Gerais

O ar em Minas Gerais tem se tornado uma preocupação crescente devido aos seus impactos na saúde pública e no meio ambiente, especialmente em áreas com alta concentração industrial e atividades de mineração. Um estudo realizado por Queiroz, Jacomino e Menezes (2007) abordou a composição e as fontes geradoras de PM₁₀ em Sete Lagoas, Minas Gerais. A pesquisa identificou que elementos como Alumínio (Al), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Potássio (K), Magnésio (Mg) e Sódio (Na) são predominantes nas partículas suspensas no ar, enquanto

a presença de Sódio (Na), Bário (Ba), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Európio (Eu), Ferro (Fe) e Samário (Sm) nas partículas menores, com diâmetro inferior a 10 µm, sugere que a poeira do solo e as indústrias de cerâmica e ferro-gusa são as principais responsáveis pela degradação da qualidade do ar na região. Esses achados ressaltam a importância de implementar políticas ambientais mais rigorosas para mitigar a poluição atmosférica em áreas industriais.

Ribeiro, Galvão e Albuquerque (2023) realizaram uma análise detalhada das tendências da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) ao longo de quase três décadas. Usando técnicas estatísticas avançadas, o estudo observou uma preocupante estabilidade nas concentrações de poluentes, sem melhorias significativas na qualidade do ar. Esse cenário reflete as dificuldades na implementação de políticas ambientais eficazes e a ausência de aplicação de tecnologias mais rigorosas de controle de emissões, como filtros eletrostáticos e coletores mecânicos, especialmente em áreas industriais.

Outro estudo relevante, de Brandão e Foroutan (2021), explorou os efeitos das medidas de lockdown durante a pandemia de COVID-19 sobre a qualidade do ar na região Sudeste do Brasil, incluindo Minas Gerais. As evidências indicaram uma redução temporária nos níveis de NO₂ e MP, resultado da diminuição das atividades econômicas. Esses achados sublinham o papel significativo das atividades humanas na degradação da qualidade do ar e sugerem que políticas de controle de emissões podem ter um impacto positivo na melhoria da qualidade do ar em Minas Gerais (AGÊNCIA MINAS, 2023).

Complementando essa análise, Souza e Morais (2024) conduziram um estudo em Coromandel, Minas Gerais, utilizando bioindicadores para avaliar a qualidade do ar. Os pesquisadores examinaram a cobertura de líquens foliosos em *Mangifera indica* (mangueira) como um indicador da poluição atmosférica. Os resultados indicaram uma baixa cobertura desses líquens, o que sugere que a qualidade do ar na região pode estar comprometida.

Santos, Silva e Oliveira (2022) investigaram a relação entre a exposição prolongada a níveis elevados de PM_{2.5} e o aumento das internações hospitalares em Minas Gerais. O estudo demonstrou uma correlação significativa entre essa exposição e o aumento de casos de doenças respiratórias, como asma e bronquite, especialmente entre crianças e idosos, ressaltando a necessidade urgente de melhorar a qualidade do ar na região.

De forma semelhante, Santos et al. (2019) avaliaram a influência das condições meteorológicas na concentração de $PM_{2.5}$ em Belo Horizonte. O estudo, que utilizou dados amostrados entre o inverno de 2007 e o outono de 2008, identificou que as concentrações de $PM_{2.5}$ variam significativamente entre os períodos seco e chuvoso, com maiores concentrações observadas durante o período seco. Além disso, o estudo mostrou uma correlação significativa entre a concentração de $PM_{2.5}$ e parâmetros meteorológicos, como precipitação e umidade relativa do ar. Esses achados destacam a importância de considerar as condições climáticas no monitoramento da qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas onde a poluição atmosférica pode ter impactos diretos na saúde pública.

Adicionalmente, Vormittag et al. (2021) forneceram uma análise abrangente sobre a rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil, com um foco especial em Minas Gerais. Apesar de melhorias recentes, ainda há lacunas significativas na cobertura, especialmente em áreas rurais e menos desenvolvidas. O estudo destaca a necessidade de expandir e fortalecer essa rede para alcançar uma avaliação mais precisa e abrangente da qualidade do ar.

Gouveia et al. (2019) investigaram os impactos da poluição do ar na saúde pública na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. O estudo revelou que a exposição a altos níveis de poluentes, especialmente PM_{10} e $PM_{2.5}$, está fortemente associada a um aumento nas internações hospitalares por doenças respiratórias, particularmente em crianças e idosos. Essas ocorrências são frequentemente exacerbadas por condições climáticas adversas, como inversões térmicas, que agravam a concentração de poluentes no ar. A pesquisa destaca a importância de políticas públicas e intervenções que integrem monitoramento contínuo e estratégias de mitigação para reduzir os impactos na saúde pública.

Nesse contexto, Vormittag et al. (2021) discutem os desafios e avanços no monitoramento da qualidade do ar em várias regiões do Brasil, incluindo Minas Gerais, destacando a necessidade de políticas públicas mais eficazes e a implementação de tecnologias avançadas para a medição da poluição. Esse trabalho é crucial para entender o panorama geral do monitoramento da qualidade do ar no país e identificar áreas que necessitam de melhorias.

Estudos mais recentes, como o de Santos et al. (2019), demonstram que as condições geográficas e as atividades industriais em Belo Horizonte, Minas Gerais, contribuem significativamente para a poluição do ar. A pesquisa identificou e quantificou emissões atmosféricas de grandes fontes estacionárias, como chaminés industriais, observando que

poluentes como NO_x, PM₁₀ e PM_{2.5} têm impactos relevantes na qualidade do ar da região. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas eficazes para mitigar a poluição nas áreas urbanas industriais.

4 METODOLOGIA

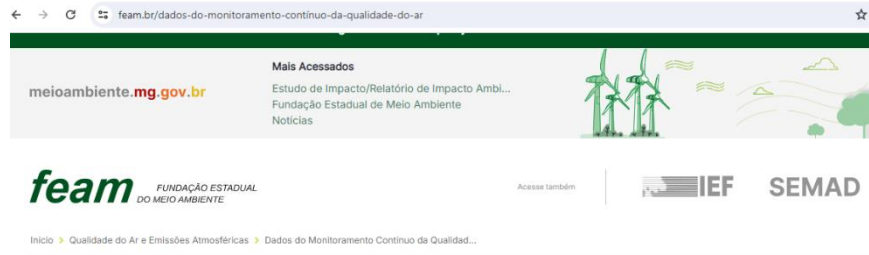
4.1 – Área de estudo e coleta de dados

Neste trabalho foram utilizados dados de qualidade do ar de todas as Estações Automáticas de Qualidade do Ar do Estado de Minas Gerais do ano de 2023. Os dados de concentração dos poluentes monitorados em Minas Gerais (PTS, PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂ e CO) foram comparados com os padrões nacionais e internacionais mencionados anteriormente.

Estes foram coletados a partir de repositórios públicos disponibilizados pelo órgão responsável pela gestão do monitoramento da qualidade do ar no estado, a FEAM. Dessa forma, os dados foram disponibilizados e obtidos no site da FEAM, especificamente na aba "Dados do Monitoramento Contínuo da Qualidade do Ar" (Minas Gerais, 2024; Figura 1). A escolha do ano de 2023 para a análise dos dados foi baseada na relevância temporal e na disponibilidade das informações mais recentes, permitindo uma avaliação atualizada e precisa das variáveis em estudo, refletindo as condições contemporâneas do cenário analisado.

Além disso, essa coleta de dados foi baseada no acesso a repositórios públicos, o que pode envolver desafios relacionados à disponibilidade e à qualidade dos dados. Esses desafios foram considerados no momento da análise, mitigando possíveis lacunas ou inconsistências que surgiram.

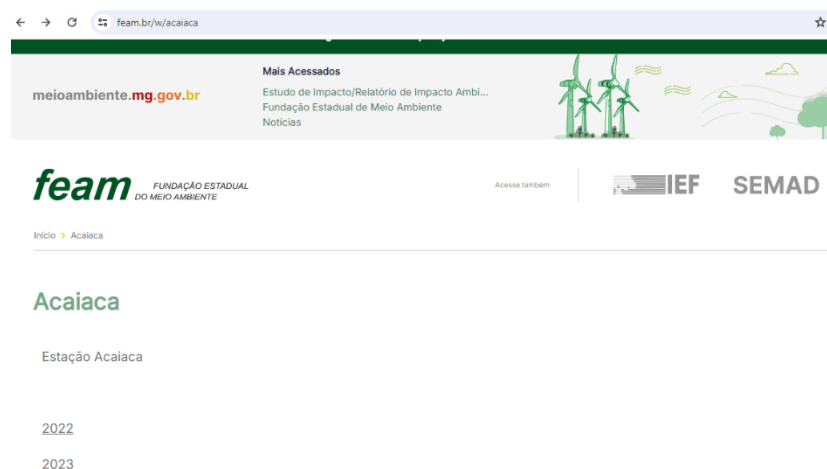
Figura 1 – Aba de acesso aos dados de qualidade do ar.



Fonte: MINAS GERAIS (2024).

Para o ano de 2023, o ano mais recente com disponibilidade de dados nos repositórios públicos, foram baixadas planilhas individuais em formato (.xlsx) para cada estação de monitoramento de qualidade do ar presente nas diferentes cidades cobertas pela rede de monitoramento (Minas Gerais, 2024; Figura 2), totalizando 52 planilhas correspondentes às 52 estações de monitoramento. Cada planilha continha os registros de concentrações horárias dos poluentes atmosféricos medidos naquela estação, com medições validadas oficialmente pela SEMAD (Minas Gerais, 2024; Figura 3). O período de coleta abrangeu desde 01/01/2023 às 00:30:00 até 31/12/2023 às 23:30:00. No entanto, nem todos os horários possuíam dados disponíveis, devido a possíveis interrupções ou falhas no monitoramento.

Figura 2 – Exemplo da Aba de dados por cidade e por estação, nesse caso: “Acaiaca” e “Estação Acaiaca – 2023”.



Fonte: MINAS GERAIS (2024).

Figura 3 – Exemplo de planilha de dados de qualidade do ar baixadas, nesse caso: “Estação Acaiaca – 2023”.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Estação Acaiaca																			
2		PM10																		
3		µg/m³																		
4	01/01/2023 00:30	38																		
5	01/01/2023 01:30	42																		
6	01/01/2023 02:30	34																		
7	01/01/2023 03:30	32																		
8	01/01/2023 04:30	32																		
9	01/01/2023 05:30	27																		
10	01/01/2023 06:30	19																		
11	01/01/2023 07:30	10																		
12	01/01/2023 08:30	10																		
13	01/01/2023 09:30	4																		
14	01/01/2023 10:30	7																		
15	01/01/2023 11:30	10																		
16	01/01/2023 12:30	12																		
17	01/01/2023 13:30																			
18	01/01/2023 14:30	20																		
19	01/01/2023 15:30	2																		
20	01/01/2023 16:30	19																		
21	01/01/2023 17:30	8																		
22	01/01/2023 18:30	14																		
23	01/01/2023 19:30	14																		
24	01/01/2023 20:30	13																		
25	01/01/2023 21:30	3																		

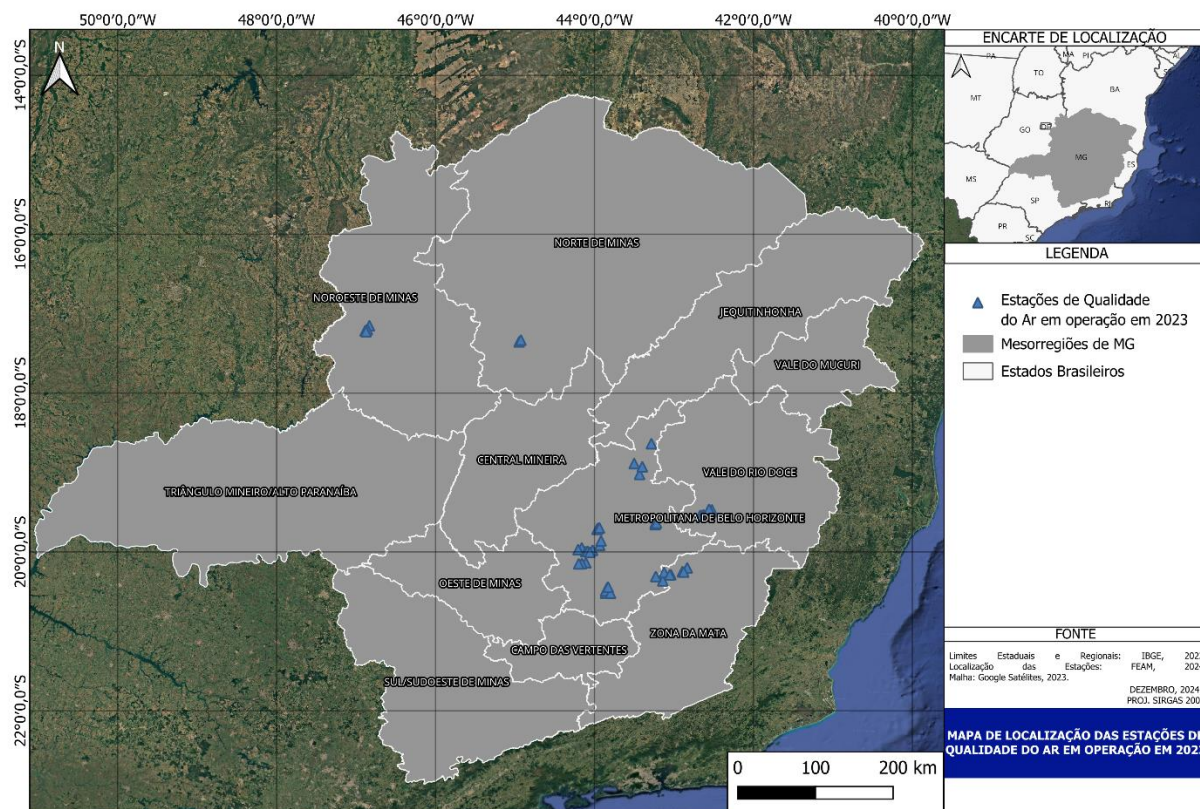
Fonte: FEAM (2024).

É importante salientar que nem todas as estações monitoram todos os sete poluentes mencionados anteriormente. A capacidade de monitoramento varia conforme a infraestrutura de cada estação, o que significa que os dados disponíveis podem variar de estação para estação em relação aos poluentes monitorados.

Dessa forma, foram considerados os dados provenientes de todas as estações automáticas de qualidade do ar operadas pela FEAM que continham dados de medição para o ano de 2023 e estejam distribuídas geograficamente por Minas Gerais.

Esses dados coletados foram georreferenciados, permitindo a criação de um mapa (Figura 4) que ilustra a localização exata de cada estação de monitoramento em funcionamento. Este mapeamento é crucial para a visualização da distribuição espacial das estações e para a análise comparativa dos dados de qualidade do ar em diferentes regiões do estado.

Figura 4 – Mapa de Localização das Estações de Qualidade do Ar com dados disponíveis.



Fonte: próprio autor (2024).

As comparações dos dados obtidos (concentrações de poluentes) foram realizadas através do agrupamento das estações de monitoramento presentes em diferentes regiões de Minas Gerais. Para este estudo, as estações foram agrupadas com base nas divisões geográficas das mesorregiões do estado, conforme estabelecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (MINAS GERAIS, 2022). Essas mesorregiões são subdivisões territoriais que levam em conta aspectos socioeconômicos, geográficos e culturais, sendo amplamente utilizadas para análises regionais e planejamento territorial (MINAS GERAIS, 2022). A delimitação espacial das mesorregiões foi realizada a partir de um arquivo *shapefile* obtido no IDE SISEMA, assegurando a integração de dados espaciais confiáveis (MINAS GERAIS, 2025a). As regiões incluídas no estudo, por possuírem estações com dados disponíveis, são: Norte de Minas, Zona da Mata, Noroeste, Vale do Rio Doce e Metropolitana.

Algumas regiões de Minas Gerais não foram incluídas na análise devido à ausência de redes públicas de monitoramento de qualidade do ar operadas pela FEAM. Essa limitação se deve à inexistência de estações automáticas nessas áreas, e não à falta de dados disponíveis nas regiões

com monitoramento ativo. A análise foi conduzida apenas nas regiões onde há infraestrutura consolidada de monitoramento, garantindo a confiabilidade e a representatividade dos dados obtidos.

A Tabela 6 fornece uma visão detalhada das estações de monitoramento de qualidade do ar disponíveis em Minas Gerais. Na Região Noroeste, há 5 estações; no Norte de Minas, 2 estações; na Zona da Mata, 7 estações; na Região Metropolitana, 29 estações; e no Vale do Rio Doce, 9 estações. É importante frisar que nem todas as estações monitoram todos os tipos de poluentes atmosféricos. Ademais, a Tabela 6 especifica quais poluentes são monitorados por cada estação, permitindo uma compreensão clara das capacidades de monitoramento em cada região.

Tabela 6 – Informações sobre as estações de monitoramento da Qualidade do Ar

Região	Município	Nome da estação	Coordenadas Geográficas		Parâmetros monitorados
Noroeste	Paracatu	Estação Clube da União	17°12'56.46"S	46°53'11.97"O	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Copasa	17°12'19.79"S	46°52'27.40"O	PTS; PM ₁₀
		Estação Lagoa Trindade Rodrigues	17° 9'1.47"S	46°49'58.50"W	PTS; PM ₁₀
		Estação São Domingos	17°11'53.92"S	46°51'32.18"O	PTS; PM ₁₀
		Estação Sérgio Ulhoa	17°13'28.35"S	46°52'30.73"O	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
Norte de Minas	Pirapora	Estação SAAE	17°21'10.9"S	44°56'58.6"W	PM ₁₀
		Estação FUNAM	17°19'50.14"S	44°55'36.67"W	PM ₁₀
Zona da Mata	Acaiaca	Estação Acaiaca	20°21'37''S	43°08'32''O	PM ₁₀
	Barra Longa	Estação Centro	20°16'57.25"S	43° 2'25.23"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS
		Estação Gesteira	20°15'25.95"S	43° 7'27.83"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Volta da Capela	20°17'15.95"S	43° 3'17.68"O	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Rio Doce	Estação Santana do Deserto	20°11'53.39"S	42°50'3.54"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Rio Doce	-20,24663300	-42,8960230	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Santa Cruz do Escalvado	Estação Novo Soberbo	-20,25036172	-42,87867027	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
Metropolitana	Congonhas	Estação Pires	20°26'49.50"S	43°50'28.28"O	PTS; PM ₁₀
		Estação Basílica	20°30'54.60"	43°51'39.60"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS ; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; NO _x ;
		Estação Novo Plataforma	20°29'18.82"S	43°51'41.44"O	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Lobo Leite	625257.19E	7730729.28S	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS ; NO ₂ ;O ₃ ; SO ₂ ; CO
	Dom Silvério	Estação Dom Silvério	20°09'59,3''S	42°58'10,6''O	PM ₁₀
	Ibirité	Cascata	19°59'15.31"S	44° 5'10.73"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
		Piratininga	20° 0'14.27"S	44° 3'34.89"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
continua					
Região	Município	Nome da estação	Coordenadas Geográficas		Parâmetros monitorados

Vale do Rio Doce	Itabira	Estação Pará	19°37'10.00"S	43°13'50.85"W	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Major Lage	19°38'9.48"S	43°14'14.81"O	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Panorama	19°38'4.10"S	43°13'19.10"W	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Félix	19°39'15.00"S	43°14'14.68"W	PTS; PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Mariana	Estação Paracatu de Baixo	20°18'23"S	43°13'47.31"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Ouro Preto	Estação Mottas	20°26'30.67"S	43°49'44.25"O	PM ₁₀ ; PTS
	São José da Lapa	Estação Filinha Gama	19°42'47.45"S	43°57'50.73"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Jardim Encantado	19°42'45.00"S	43°58'7.91"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação Centro	19°42'0.61"S	43°57'36.71"O	PM ₁₀ e PM _{2.5}
		Estação Célvia (Vespasiano)	19°41'49.21"S	43°56'17.33"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Coronel Fabriciano	Estação Senac	19°31'51.55"S	42°37'40.18"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
	Ipatinga	Estação Bom Retiro	19°30'42.35"S	42°33'25.54"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
		Estação Cariru	19°29'28.92"S	42°31'43.46"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
		Estação Veneza	19°28'1.84"S	42°31'30.11"O	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
		Estação Cidade Nobre	19°27'40.22"S	42°33'36.74"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; PTS; NO ₂ ; O ₃ ; SO ₂ ; CO
	Timóteo	Estação Cecília Meireles	19°32'47.00"S	42°39'23.00"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; NO ₂ ; O ₃
		Estação Hospital Vital Brasil	19°33'0.37"S	42°38'38.84"W	PM _{2.5}
		Estação Escola Sementinha	19°32'12.00"S	42°40'16.00"W	PM ₁₀ ; PM _{2.5}
		Estação SENAI	746854	7838061	PTS; PM ₁₀

Fonte: Adaptado de MINAS GERAIS (2025).

Os dados brutos foram organizados e adequados para que pudessem ser comparados aos padrões de qualidade do ar.

O processo de adequação consistiu na aplicação de fórmulas específicas a cada conjunto de dados de concentração de poluentes, considerando os períodos de referência de curto e longo prazo. O objetivo foi transformar os dados horários obtidos da FEAM em informações agregadas, alinhadas aos formatos exigidos para avaliação e comparação.

No que se refere ao curto prazo, as concentrações dos poluentes PM_{10} , PTS, $PM_{2.5}$ e SO_2 foram calculadas com base na média aritmética de 24 horas, permitindo avaliar as variações diárias desses poluentes. Já para o NO_2 , adotou-se a máxima média horária obtida no dia, refletindo os picos de concentração durante o período. Para os poluentes O_3 e CO, foi aplicada a máxima média móvel de 8 horas, que permite identificar momentos críticos de exposição ao longo do dia.

Em relação ao longo prazo, a avaliação foi conduzida por meio da média aritmética anual para os poluentes PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 e SO_2 , o que possibilita uma análise das tendências e variações ao longo do ano. Para o PTS, foi empregada a média geométrica anual, proporcionando uma medida mais representativa das concentrações desse poluente em relação ao seu comportamento ao longo do tempo.

Todas as fórmulas utilizadas no processo de adequação seguiram as diretrizes estabelecidas no Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (BRASIL, 2019), que define procedimentos rigorosos para garantir a representatividade temporal dos dados. Esse critério é essencial para assegurar que os resultados obtidos reflitam com precisão as condições reais da qualidade do ar nas regiões monitoradas.

A representatividade temporal desempenha um papel fundamental, pois falhas nesse aspecto podem comprometer a interpretação dos resultados e a confiabilidade da análise. Dados coletados de forma incompleta ou irregular podem gerar distorções, dificultando a comparação com os padrões vigentes. De acordo com o guia técnico, somente são considerados representativos os dados de redes de monitoramento que atendem, no mínimo, às exigências descritas na Tabela 7. Cabe frisar que, nos casos de dados incompletos ou ausentes, foi realizada a exclusão de séries não representativas, conforme os critérios de representatividade dessa mesma tabela.

Tabela 7 – Tempo mínimo de amostragem para que os dados obtidos sejam considerados representativos

Tipo de Média	Critérios de Validação
Média horária	3/4 das medidas válidas na hora
Média diária	2/3 das médias horárias válidas no dia
Média mensal	2/3 das médias diárias válidas no mês
Média anual	1/2 das médias diárias válidas obtidas em cada quadrimestre.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2019).

Esse método de tratamento e adequação assegurou a consistência e a representatividade dos dados coletados, resultando em um conjunto confiável para a avaliação da qualidade do ar nas diferentes regiões analisadas no ano de 2023.

4.2 Avaliação de Conformidade Legal e Análise Estatística

Após a preparação e adequação dos dados coletados, foi realizada uma análise estatística detalhada com o objetivo de avaliar o comportamento das concentrações de poluentes nas diferentes regiões monitoradas e verificar a conformidade com os padrões de qualidade do ar estabelecidos. Além das análises regionais, também foi analisado o conjunto de dados de todas as estações de monitoramento de qualidade do ar de Minas Gerais.

4.2.1 Avaliação da Conformidade Legal

Após a adequação dos dados às exigências normativas e a transformação das medições horárias em valores consolidados, foi avaliada a conformidade das concentrações de poluentes, em cada região, às normas estudadas.

Foi calculada a percentagem de conformidade de cada poluente monitorado, com base na comparação entre as concentrações observadas e os padrões de qualidade do ar estabelecidos. Para garantir a representatividade da análise, foi levado em consideração que cada região possui diferentes estações de monitoramento, e que nem todas as estações registram todos os poluentes. Assim, para cada poluente, foram avaliados apenas os dados provenientes das estações que o monitoraram, evitando que lacunas ou ausência de medições influenciassem negativamente os resultados.

De mesmo modo, foi analisado um cenário com as conformidades globais, reunindo todas as estações de monitoramento de Minas Gerais.

Durante a análise comparativa das legislações de qualidade do ar, observou-se que algumas normativas, em especial a legislação dos Estados Unidos (USEPA), adotam formas de atendimento baseadas em percentis trianuais (como o percentil 98 ou 99) ou excedências anuais controladas. No entanto, para fins desta pesquisa, a conformidade foi avaliada de forma mais direta, considerando dentro dos limites os dados que se enquadram nos valores máximos estabelecidos por cada legislação e fora dos limites aqueles que ultrapassarem esses valores.

Essa premissa foi adotada em razão das limitações do conjunto de dados disponível, que não permite o cálculo preciso de percentis trianuais, por exemplo. Embora essa simplificação possa resultar em uma análise mais conservadora, ela garante maior clareza e viabilidade na comparação direta entre as regiões monitoradas e os padrões normativos estabelecidos.

Dessa forma, as análises de conformidade seguiram o critério de comparação direta com os valores-limite diários ou anuais de cada legislação, assegurando uma interpretação objetiva dos dados coletados, sem comprometer a integridade dos resultados.

4.2.2 Análise Estatística

Após o cálculo da conformidade regional, foi realizada uma análise estatística complementar para descrever o comportamento das concentrações de poluentes em cada região e também um cenário estadual considerando o conjunto de todas as estações de monitoramento de qualidade do ar de Minas Gerais. Essa etapa utilizou parâmetros estatísticos para fornecer uma visão mais detalhada das variações e padrões registrados durante o período de estudo.

As ferramentas utilizadas foram:

- **Média Aritmética:** Representa o valor central das concentrações de um poluente ao longo de um período, calculada somando todos os valores e dividindo pelo número total de medições. A média é útil para descrever o comportamento geral do poluente, porém pode ser influenciada por valores extremos (muito altos ou baixos).
- **Mediana:** Refere-se ao valor que divide o conjunto de dados ao meio, de forma que metade das medições sejam menores ou iguais a ela e a outra metade maiores ou iguais. A mediana é particularmente útil quando os dados apresentam valores extremos, pois oferece uma visão mais representativa do "valor típico" observado.

- **Desvio Padrão:** Mede a dispersão das concentrações em relação à média, indicando o grau de variabilidade dos dados. Um desvio padrão baixo significa que os valores estão concentrados próximos à média, enquanto um desvio padrão alto indica maior variabilidade. Essa métrica ajuda a identificar regiões com comportamentos mais estáveis ou com maiores flutuações na qualidade do ar.
- **Valores Mínimos e Máximos:** Representam os extremos das concentrações registradas durante o período analisado. O valor mínimo indica a menor concentração observada, enquanto o máximo reflete o maior pico de poluição. Esses valores são essenciais para entender os limites das condições de qualidade do ar em cada região.

Esses cálculos foram realizados para cada região e para o cenário global, e contemplaram os períodos de curto prazo e longo prazo, de acordo com os padrões de qualidade do ar estudados. A análise respeitou as particularidades de cada poluente e as estações de monitoramento disponíveis em cada região, garantindo uma avaliação precisa e representativa da qualidade do ar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comparação entre os Padrões de Qualidade do Ar

A comparação entre as legislações de qualidade do ar do Brasil (Resoluções CONAMA nº 506/2024 e DN COPAM nº 248/2023), da UE, dos EUA e as diretrizes da OMS revela um alinhamento progressivo em direção aos padrões recomendados pela OMS. É importante reiterar que, embora a OMS não atue como uma entidade reguladora, suas recomendações se baseiam em extensos estudos epidemiológicos e científicos, tornando-se uma referência que diversos países buscam seguir para proteger a saúde pública (WHO, 2021).

A OMS estabelece limites mais rigorosos para os principais poluentes atmosféricos, com o objetivo de minimizar os impactos na saúde humana, mesmo em concentrações relativamente baixas. As legislações nacionais e internacionais, por sua vez, muitas vezes adotam padrões mais permissivos em função de fatores econômicos, sociais e estruturais, implementando uma redução gradual dos limites ao longo do tempo.

Dessa forma, para facilitar a comparação dos padrões nacionais e internacionais, foi criada uma Tabela Unificada com os Padrões de Qualidade do Ar (Tabela 8), que serviu como referência para a comparação dos dados coletados.

Cabe frisar que para compor as comparações, em relação aos limites nacionais, foi considerado o PI-2 da Resolução CONAMA nº 506/2024, que entrou em vigor a partir de 01/01/2025 e permanecerá válido até 2033. Em contrapartida, para a Resolução COPAM, utilizou-se o PI-1, que permanece em vigor em 2025, uma vez que Minas Gerais ainda não implementou uma nova resolução alinhada aos prazos para o avanço dos padrões intermediários, como os definidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024. É relevante destacar que o PI-1 da COPAM possui os mesmos valores do PI-1 da CONAMA, sendo, portanto, equivalentes. Assim, essa análise assegura uma comparação consistente e abrangente dos dados de qualidade do ar, tanto para o PI-1 quanto para o PI-2 da Resolução CONAMA nº 506/2024.

Tabela 8 – Tabela Unificada com os Padrões de Qualidade do Ar que serão utilizados nas análises

Poluente	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite				
			Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	µg/m ³	100	120	50	150	45
	Anual ¹	µg/m ³	35	40	40	-	15
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	µg/m ³	50	60	-	35	15
	Anual ¹	µg/m ³	17	20	25	9	5
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	µg/m ³	50	125	125	- ²	40
	Anual ¹	µg/m ³	30	40	-	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora ²	µg/m ³	240	260	200	188 ¹	200
	Anual ¹	µg/m ³	50	60	40	100 ¹	10
Ozônio - O₃	8 horas ³	µg/m ³	130	140	120	137 ¹	100
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	ppm	9 ³	9	9 ¹	9 ¹	9 ¹

continua

Poluente	Período de Referência	Unidade	Valor-Limite				
			Resolução CONAMA nº 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM nº 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	µg/m³	240³	240³	-	-	-
	Anual ⁴	µg/m³	80³	80³	-	-	-

¹ A conversão de unidades de medida foi realizada para possibilitar a comparação com os demais valores de outras legislações, uma vez que a unidade original era diferente das demais, padronizou-se as unidades de medida em ppm para CO e µg/m³ para os demais poluentes. As conversões de concentrações de poluentes atmosféricos entre unidades de ppm (partes por milhão), ppb (partes por bilhão), mg/m³ (miligrama por metro cúbico) e µg/m³ (micrograma por metro cúbico) foram realizadas com base no volume molar de gases em condições padrão de temperatura e pressão (25 °C e 1 atm), que corresponde a 24,45 L/mol. O peso molecular dos poluentes foi usado conforme segue: CO (28,01 g/mol), SO₂ (64,07 g/mol), NO₂ (46,01 g/mol) e O₃ (48 g/mol).

² O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

³ Os poluentes PTS (partículas totais em suspensão) e CO (monóxido de carbono) possuem valores únicos estabelecidos como Padrão Final (PF) na Resolução CONAMA nº 506/2024 e COPAM nº 248/2023. Diferentemente de outros poluentes, que possuem Padrões Intermediários (PIs) com metas progressivas, os valores de PF para PTS e CO são aplicáveis em todas as etapas de implementação dos padrões de qualidade do ar.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2024a), MINAS GERAIS (2023d), *EUROPEAN COMMISSION* (2008), *WORLD HEALTH ORGANIZATION* (2021) e *ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY* (USEPA) (2024b).

5.1.1 PM_{10} e $PM_{2.5}$

Os padrões para PM_{10} e $PM_{2.5}$ apresentam divergências consideráveis entre as legislações analisadas. A OMS recomenda valores mais restritivos, estabelecendo um limite de 45 µg/m³ para PM_{10} em 24 horas e 15 µg/m³ anuais (Tabela 8). Para $PM_{2.5}$, os valores são ainda mais rigorosos: 15 µg/m³ (24h) e 5 µg/m³ (anual) (Tabela 8). Em relação aos valores anuais, a forma de atendimento é direta, sem permitir excedências (Tabela 5). Em relação aos limites de curto prazo (24 horas) considera que, em um ano, é aceitável que ocorram até 4 dias em que os níveis de poluentes ultrapassem o limite, porque esses picos são eventos raros e não representam a condição geral da qualidade do ar (Tabela 5).

Na UE, os limites são menos severos, com um padrão de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} em 24 horas e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anuais (Tabela 8). O valor de 24 horas pode ser excedido até 35 vezes por ano, demonstrando maior flexibilidade no controle de picos esporádicos (Tabela 3). Para $\text{PM}_{2.5}$, o valor anual é de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sem margem para excedências (Tabela 3).

Nos EUA, a USEPA impõe um limite de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} em 24 horas, com a condição de que esse valor não deve ser excedido mais de uma vez por ano, considerando a média de três anos (Tabela 4). Para $\text{PM}_{2.5}$, o limite de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h) e $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) segue uma forma de atendimento baseada no percentil 98 e 99, permitindo pequenos picos ocasionais, desde que a média geral permaneça abaixo do limite (Tabela 8; Tabela 4).

No Brasil, a abordagem adotada pela Resolução CONAMA e DN COPAM envolve uma progressão por fases (PI-1 a PF). Inicialmente, o limite para PM_{10} é de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas), reduzindo gradualmente até alcançar $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), em conformidade com a OMS (Tabela 1; Tabela 2; Tabela 8). O limite de 24h do PI-2 (vigente) da CONAMA ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é mais permissivo que o da União Europeia ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e mais restritivo que o da USEPA ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabela 8). Em relação ao limite anual, o padrão da CONAMA ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é próximo ao da União Europeia ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), enquanto a USEPA não apresenta limite anual (Tabela 8).

Para $\text{PM}_{2.5}$, o valor inicial de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) diminui progressivamente até $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor da OMS) (Tabela 1; Tabela 2; Tabela 8). A forma de atendimento da CONAMA e DN COPAM é sem permissões explícitas para excedências (Tabela 1; Tabela 2). Em relação ao PI-2 (vigente), para o período de 24 horas, o limite da CONAMA ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é mais permissivo que o da USEPA ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e não há padrão definido pela União Europeia (Tabela 8). Em relação ao anual, o limite da CONAMA ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) é inferior ao da União Europeia ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mas mais permissivo que o da USEPA ($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Tabela 8).

5.1.2 PTS

A regulamentação de PTS varia significativamente entre as legislações analisadas, sendo um poluente que ainda recebe atenção na legislação brasileira, mas que não é diretamente abordado por outras jurisdições internacionais.

A OMS não estabelece limites específicos para PTS, concentrando suas recomendações nos poluentes PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$, que representam frações menores do MP e têm maior impacto na saúde

pública devido à capacidade de penetração nos pulmões e na corrente sanguínea. Da mesma forma, a UE segue a abordagem da OMS e não define padrões próprios para PTS, reforçando a regulamentação de partículas finas.

Nos EUA, a USEPA também não estipula valores-limite para PTS, focando no controle das frações menores e mais prejudiciais, como $PM_{2.5}$ e PM_{10} .

No entanto, o Brasil adota uma abordagem diferenciada. As resoluções CONAMA nº 506/2024 e COPAM nº 248/2023 mantêm a regulação para PTS, estabelecendo um limite (PF) de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 24 horas e uma média geométrica anual de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 8).

A justificativa para a manutenção desses limites no Brasil reflete a necessidade de controle em áreas industriais, mineradoras e regiões onde atividades de construção civil e queima de biomassa contribuem significativamente para a emissão de partículas maiores, que podem afetar a saúde respiratória e degradar a qualidade ambiental (SOUZA et al., 2017). Ademais, cabe frisar que nem todas as regiões dispõem de um sistema eficaz de monitoramento para partículas finas, o que também pode influenciar na definição desses limites.

5.1.3 SO_2

Os limites para SO_2 variam significativamente entre as diferentes legislações. A OMS recomenda um limite mais restritivo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas (Tabela 8). A forma de atendimento é realizada por percentil 99, espera-se que haja 3 a 4 dias por ano em que as concentrações de poluentes possam ultrapassar o limite, ainda assim considerando o sistema dentro dos padrões regulatórios (Tabela 5).

A UE adota um padrão mais permissivo, com $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas (Tabela 8) e $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma hora. A forma de atendimento permite até 3 excedências por ano no valor de 24 horas, enquanto o valor de 1 hora não deve ser excedido mais do que 24 vezes por ano (Tabela 3).

Nos EUA, a USEPA fixa um limite de 75 ppb (aproximadamente $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para uma hora, calculado com base no percentil 99 em três anos, permitindo flexibilidade em eventos esporádicos, mas mantendo o controle rigoroso na média geral (Tabela 3; Tabela 8). Há também um limite secundário de 0,5 ppm (aproximadamente $1.310 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para 3 horas, com a condição de que não deve ser excedido mais de uma vez por ano (Tabela 3).

O Brasil segue uma trajetória iniciando com $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas e convergindo para $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), em alinhamento com a OMS (Tabela 1; Tabela 2). A forma de atendimento é baseada na média aritmética diária, sem previsão de excedência.

5.1.4 NO_2

O NO_2 é tratado de forma distinta entre as legislações. A OMS recomenda um limite de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anuais, sem permitir excedências em ambos (Tabela 5; Tabela 8).

A UE estabelece um limite de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para uma hora e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anuais, sendo o de curto prazo alinhado à OMS (Tabela 6). Diferentemente da OMS, a forma de atendimento para o valor de 1 hora permite até 18 excedências por ano, enquanto o valor anual não admite excedências (Tabela 3).

Nos EUA, a USEPA adota um limite de 100 ppb (aproximadamente $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para uma hora, com base no percentil 98 em três anos, e um limite anual de 53 ppb (aproximadamente $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), calculado por média aritmética (Tabela 4; Tabela 8).

O Brasil parte de um limite de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PI-1) para uma hora, reduzindo para $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no PF, e adota o valor anual de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PF), alinhando-se à OMS (Tabela 1; Tabela 2). A forma de atendimento segue o modelo de média aritmética diária e anual, sem excedências permitidas explicitamente (Tabela 1; Tabela 2).

5.1.5 CO

Os padrões para CO apresentam certa uniformidade entre as legislações analisadas, com variações mínimas nos valores-limite e nas formas de atendimento.

A OMS estabelece limites de 9 ppm para 8 horas (Tabela 8), sem permitir excedências (Tabela 5). A forma de atendimento é direta, com base na média máxima móvel, o que significa que qualquer valor acima do limite já caracteriza não conformidade.

Na UE, o limite para CO é de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ para 8 horas ou aproximadamente 9 ppm (Tabela 8), também calculado pela média móvel, sem excedências permitidas. Essa uniformidade reflete a adoção de padrões preventivos para proteger populações urbanas expostas à poluição veicular.

Nos EUA (USEPA), o padrão para CO é de 9 ppm (aproximadamente 10 mg/m³) para 8 horas (Tabela 8). A forma de atendimento permite que esses valores não sejam excedidos mais de uma vez por ano, o que oferece flexibilidade em situações de picos isolados (Tabela 4).

No Brasil (CONAMA e COPAM), o limite é 9 ppm (8 horas) (Tabela 8). Do mesmo modo que a OMS, a forma de atendimento é direta, com base na média máxima móvel, o que significa que qualquer valor acima do limite já caracteriza não conformidade.

5.1.6 O₃

O O₃ é um dos poluentes regulados de forma mais semelhante entre as legislações internacionais, com limites próximos, mas diferenças na forma de atendimento e cálculo das excedências.

A OMS recomenda um limite de 100 µg/m³ para 8 horas, baseado na média máxima móvel de 8 horas obtida no dia (Tabela 8). A forma de atendimento permite até 4 excedências por ano (Tabela 5).

Na UE, o limite é de 120 µg/m³ para 8 horas (Tabela 8), permitindo até 25 excedências por ano (Tabela 3). A forma de atendimento, portanto, é mais permissiva do que a da OMS.

A USEPA (EUA) adota um limite de 0,07 ppm (aproximadamente 137 µg/m³ para 8 horas) (Tabela 8). A forma de atendimento considera a quarta maior concentração anual, com base em uma média de três anos (Tabela 4). Essa metodologia permite variações ocasionais, mas impõe limites rigorosos na recorrência de altas concentrações.

O Brasil (CONAMA e COPAM) estabelece inicialmente um limite de 140 µg/m³ (PI-1), reduzindo gradualmente para 100 µg/m³ (PF), em alinhamento com a OMS (Tabela 1; Tabela 2). A forma de atendimento é semelhante à média móvel da OMS, mas sem previsão de excedências (Tabela 1; Tabela 2).

5.2 Análise da Conformidade das Concentrações de Poluentes Atmosféricos em Minas Gerais com as normas

Os resultados apresentados a seguir refletem a análise da conformidade regional das concentrações de poluentes atmosféricos em Minas Gerais, com base nos padrões estabelecidos na Tabela 8 e das estações de monitoramento descritas na Tabela 6. Além do cálculo de médias,

medianas, desvios padrão e identificação de valores máximos e mínimos, será apresentada a porcentagem de conformidade de cada região em relação aos diferentes padrões normativos. O memorial de cálculo com as planilhas utilizadas encontra-se disponível no Apêndice A.

5.2.1 Norte de Minas

A Tabela 9 apresenta os percentuais de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações localizadas no Norte de Minas durante o ano de 2023, com base nos padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais analisadas (Tabela 8).

Tabela 9 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Norte de Minas do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	98,9%	100,0%	64,8%	100,0%	52,0%
	Anual	0,0%	0,0%	0,0%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	-	-	*	-	-
	Anual	-	-	-	-	-
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	-	-	-	#	-
	Anual	-	-	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	-	-	-	-	-
	Anual	-	-	-	-	-
Ozônio - O₃	8 horas	-	-	-	-	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	-
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	*	*	*
	Anual	-	-	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio Autor (2025).

A análise da qualidade do ar na região do Norte de Minas revela uma discrepância significativa entre os padrões nacionais e internacionais em relação ao PM₁₀, o único poluente monitorado nessa região. A conformidade com as resoluções nacionais – CONAMA (PI-2) e COPAM (PI-1) – foi elevada nas medições de 24 horas, atingindo 98,9% e 100%, respectivamente (Tabela 9). Essa alta percentagem de conformidade se deve aos limites nacionais serem menos restritivos que aos padrões internacionais (UE e OMS, com exceção da USEPA).

A conformidade também foi 100% de acordo com a USEPA, que adota um limite de 150 µg/m³ para PM₁₀ em medições diárias (Tabela 8). No entanto, quando os dados são analisados sob a perspectiva de padrões mais rigorosos, como os da UE (50 µg/m³) e da OMS (45 µg/m³),

observa-se uma queda expressiva na conformidade, atingindo apenas 64,8% e 52,0%, respectivamente (Tabela 8; Tabela 9). Essa diferença evidencia que, apesar de atender aos limites nacionais e norte-americanos, a qualidade do ar na região ainda está distante dos valores recomendados pela UE e OMS, considerados os mais protetivos para a saúde pública.

Nas medições anuais de PM_{10} , a situação se mostra mais crítica. A conformidade foi 0% em todas as legislações aplicáveis (CONAMA, COPAM, UE e OMS) (Tabela 9). Esse resultado reflete uma incapacidade da região de manter as concentrações médias anuais de PM_{10} dentro dos limites recomendados de longo prazo, sugerindo uma exposição contínua à poluição. O limite anual estabelecido pelo CONAMA é de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto o padrão da OMS, significativamente mais rigoroso, é de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 8).

Cabe frisar que essa discrepância entre os altos percentuais de conformidade em medições diárias e a ausência de conformidade nas médias anuais (Tabela 9) pode ser explicada por fatores como a presença de picos pontuais de poluição que não comprometem os valores de 24 horas, mas contribuem para elevações consistentes nas médias anuais. Dessa forma, exposições de curto prazo a elevados níveis de poluição, como as representadas por medições diárias, estão associadas a efeitos agudos à saúde, como irritações respiratórias, exacerbações de doenças cardiovasculares e crises de asma (WHO, 2021). Por outro lado, exposições de longo prazo, estão ligadas a efeitos crônicos, incluindo doenças respiratórias crônicas, câncer de pulmão e aumento da mortalidade por doenças cardiovasculares, por exemplo (WHO, 2021). Nesse sentido, essa diferença é explicada pela natureza cumulativa dos efeitos de longo prazo, em que a exposição contínua a concentrações de poluentes contribui para o agravamento progressivo da saúde humana.

A Tabela 10 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações do Norte de Minas durante o ano de 2023.

Tabela 10 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Norte de Minas do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m³)	Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m³)	Ozônio - O ₃ (µg/m³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m³)
Média aritmética de curto prazo	47,3	-	-	-	-	-	-
Mediana	44,5	-	-	-	-	-	-
Desvio Padrão	16,6	-	-	-	-	-	-
Máximo	119,0	-	-	-	-	-	-
Mínimo	10,7	-	-	-	-	-	-
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística das concentrações de PM₁₀ revela uma média aritmética (24h) de 47,3 µg/m³ (Tabela 10), valor inferior aos limites diários de todas as normativas analisadas (Tabela 8).

A mediana de 44,5 µg/m³ indica que a maior parte das medições ficou ligeiramente abaixo da média, sugerindo a presença de valores mais elevados que influenciaram o aumento do valor médio. O desvio padrão de 16,6 µg/m³ reflete uma variação considerável nas concentrações de PM₁₀ ao longo do período, o que é confirmado pela diferença significativa entre o valor máximo (119 µg/m³) e o valor mínimo (10,7 µg/m³) (Tabela 10).

O valor máximo registrado de 119 µg/m³ (Tabela 10) aproxima-se do limite diário do COPAM (120 µg/m³) (Tabela 8), o que reforça que, embora a conformidade diária seja alta, há momentos críticos em que as concentrações se aproximam dos valores-limite. A ocorrência de valores mínimos de 10,7 µg/m³ (Tabela 10) demonstra que, em algumas ocasiões, a qualidade do ar foi significativamente melhor, mas a amplitude entre os extremos evidencia uma variabilidade que merece atenção.

5.2.2 Zona da Mata

A Tabela 11 apresenta os percentuais de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações localizadas na Zona da Mata durante o ano de 2023, com base nos padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais analisadas (Tabela 8).

Tabela 11 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Zona da Mata do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	100,0%	100,0%	99,6%	100,0%	99,0%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	100,0%	100,0%	*	100,0%	97,5%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	-	-	-	#	-
	Anual	-	-	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	-	-	-	-	-
	Anual	-	-	-	-	-
Ozônio - O₃	8 horas	-	-	-	-	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	-
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100,0%	100,0%	*	*	*
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio autor (2025).

A análise da qualidade do ar na Zona da Mata revela um desempenho positivo nas medições de MP, com alta conformidade em relação às legislações nacionais e internacionais.

Para PM₁₀ (24 horas), a conformidade atingiu 100% para a Resolução CONAMA (PI-2) (Tabela 11), e DN COPAM (PI-1) e USEPA, enquanto a UE apresentou uma leve variação, com 99,6% (Tabela 11). A OMS indicou uma conformidade de 99,0% (Tabela 11), evidenciando que,

mesmo sob critérios mais rigorosos, as concentrações diárias de PM_{10} permaneceram, na maioria dos casos, dentro dos limites recomendados.

Nas medições anuais de PM_{10} , o cenário se manteve favorável para as legislações nacionais e da UE, com 100% de conformidade (Tabela 11). Entretanto, o padrão da OMS não foi atingido, registrando 0% de conformidade (Tabela 11), o que reforça que, embora os limites diários tenham sido respeitados, os níveis médios anuais ainda ultrapassam o valor estabelecido pela organização ($15 \mu g/m^3$) (Tabela 11).

Nesse sentido, a discrepância entre a alta conformidade no limite diário da OMS e a ausência de conformidade no limite anual pode ser atribuída a picos pontuais de poluição que não comprometem os valores de 24 horas, mas contribuem para elevações consistentes nas médias anuais. Enquanto o limite diário protege contra exposições de curto prazo, associadas a efeitos agudos, como crises respiratórias e cardiovasculares, o limite anual, que é o mais restritivo entre as normativas analisadas, visa prevenir os efeitos cumulativos da exposição prolongada, como doenças respiratórias crônicas, problemas cardiovasculares e aumento da mortalidade (WHO, 2021). Dessa forma, esses resultados sugerem a necessidade de atenção às médias anuais para garantir a proteção da saúde pública em longo prazo.

Para $PM_{2.5}$ (24 horas), a conformidade também foi de 100% para a CONAMA, COPAM, e USEPA, enquanto a OMS indicou 97,5% (**Tabela 11**). O resultado sugere uma pequena margem de ocasiões em que as concentrações ultrapassaram os $15 \mu g/m^3$ estipulados pela OMS (Tabela 11; Tabela 8). No entanto, nas medições médias aritméticas anuais de $PM_{2.5}$, a conformidade com as normas nacionais e internacionais atingiu 100%, com exceção da OMS, onde a conformidade foi 0%, novamente reforçando desafios em relação às médias anuais mais rigorosas, o que reflete o impacto cumulativo da exposição prolongada a concentrações menores, evidenciando a necessidade de controle contínuo para proteção da saúde pública em longo prazo (WHO, 2021).

Para PTS (Partículas Totais em Suspensão), as medições diárias e médias anuais apresentaram 100% de conformidade em todas as legislações nacionais (Tabela 11).

A Tabela 12 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações da Zona da Mata durante o ano de 2023.

Tabela 12 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Zona da Mata do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m³)	Material Particulado - PM _{2,5} (µg/m³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m³)	Ozônio - O ₃ (µg/m³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m³)
Média aritmética de curto prazo	21,4	7,8	-	-	-	-	37,5
Mediana	20,2	7,3	-	-	-	-	35,3
Desvio Padrão	7,5	2,7	-	-	-	-	13,3
Máximo	65,8	28,6	-	-	-	-	117,0
Mínimo	5,2	2,5	-	-	-	-	9,4
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística revela uma média aritmética (24h) de 21,4 µg/m³ para PM₁₀, valor significativamente abaixo dos limites diários estabelecidos por CONAMA (100 µg/m³) e COPAM (120 µg/m³), e também inferior ao limite da UE (50 µg/m³) e da OMS (45 µg/m³) (Tabela 12; Tabela 8).

A mediana de 20,2 µg/m³ indica que metade das medições ficou abaixo desse valor, reforçando a estabilidade na distribuição das concentrações. O desvio padrão de 7,5 µg/m³ (Tabela 12) sugere uma variabilidade moderada nas medições de PM₁₀ ao longo do período. O valor máximo registrado de 65,8 µg/m³ (Tabela 12) está bem abaixo do limite diário nacional, o que demonstra que, mesmo nos picos de poluição, os níveis de PM₁₀ se mantiveram dentro de um intervalo seguro segundo a legislação brasileira, mas inferior às legislações internacionais mais restritivas (UE e OMS) (Tabela 8).

Para PM_{2,5}, a média aritmética (24h) foi de 7,8 µg/m³, valor inferior a todos os limites de 24h das normativas nacionais e internacionais (Tabela 12; Tabela 8). A mediana de 7,3 µg/m³ indica que as medições se concentraram próximas à média, com um desvio padrão de 2,7 µg/m³, revelando pouca variação. O valor máximo de 28,6 µg/m³ demonstra que, em momentos de maior poluição, o nível de PM_{2,5} superou o limite diário da OMS, o que explica a não conformidade de 100% em medições diárias (Tabela 12; Tabela 8).

Em relação às Partículas Totais em Suspensão (PTS), a média aritmética foi de 37,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto o valor máximo atingiu 117,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando episódios pontuais de elevação, mas ainda menores que os limites nacionais (Tabela 8), embora o valor mínimo registrado tenha sido de apenas 9,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12).

5.2.3 Noroeste

A Tabela 11 apresenta os percentuais de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações localizadas na Região Noroeste durante o ano de 2023, com base nos padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais analisadas (Tabela 8).

Tabela 13 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Noroeste do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	100,0%	100,0%	87,4%	100,0%	82,1%
	Anual	80,0%	80,0%	80,0%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	99,8%	100,0%	*	99,8%	78,6%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	-	-	-	#	-
	Anual	-	-	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	-	-	-	-	-
	Anual	-	-	-	-	-
Ozônio - O₃	8 horas	-	-	-	-	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	-
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100,0%	100,0%	*	*	*
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio autor (2025).

A análise da qualidade do ar na Região Noroeste aponta uma alta conformidade com as legislações nacionais e internacionais para as medições diárias de MP.

Para PM₁₀ (24 horas), a conformidade foi de 100% em todas as legislações nacionais (CONAMA e COPAM) e na USEPA. No entanto, a conformidade com o padrão da UE foi inferior, de 87,4%, enquanto a conformidade com o padrão da OMS foi de 82,1% (Tabela 13). Esses resultados indicam que, embora as medições diárias tenham sido satisfatórias em relação às normas nacionais, as diretrizes mais rigorosas da OMS e UE ainda representam um desafio.

Nas médias aritméticas anuais de PM_{10} , a conformidade foi de 80% para CONAMA, COPAM e UE, mas 0% para a OMS (Tabela 13). A ausência de conformidade com o padrão da OMS reflete dificuldades em manter as concentrações médias anuais de PM_{10} abaixo dos $15 \mu g/m^3$ estabelecidos pela organização (Tabela 8). Esses resultados reforçam a dificuldade de atender a padrões mais restritivos em longo prazo, evidenciando a exposição contínua a concentrações superiores às recomendadas para a saúde pública (WHO, 2021).

Para $PM_{2.5}$ (24 horas), a conformidade foi quase total, atingindo 100% para COPAM, 99,8% para CONAMA e USEPA e 78,6% para a OMS (Tabela 13). A análise das médias aritméticas anuais revela 100% de conformidade em todas as legislações nacionais e para a UE, enquanto para a USEPA e OMS, a conformidade foi de 0%. Esse resultado evidencia novamente a dificuldade de controlar a exposição prolongada a concentrações de poluentes que têm impactos cumulativos e significativos e estão associadas a efeitos crônicos na saúde, como doenças respiratórias e cardiovasculares (WHO, 2021; Tabela 13).

As medições de PTS indicaram 100% de conformidade com as legislações nacionais, tanto nas medições diárias quanto anuais (Tabela 13).

A Tabela 14 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações da Região Noroeste durante o ano de 2023.

Tabela 14 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Noroeste do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m ³)	Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m ³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m ³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m ³)	Ozônio - O ₃ (µg/m ³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m ³)
Média aritmética de curto prazo	31,9	11,4	-	-	-	-	54,4
Mediana	29,4	10,3	-	-	-	-	49,6
Desvio Padrão	15,0	6,0	-	-	-	-	26,9
Máximo	95,8	59,8	-	-	-	-	176,8
Mínimo	6,3	2,3	-	-	-	-	10,2
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística revela uma média aritmética (24h) de 31,9 µg/m³ para PM₁₀, valor significativamente abaixo dos limites diários estabelecidos por CONAMA (100 µg/m³) e COPAM (120 µg/m³), e também inferior ao limite da UE (50 µg/m³) e da OMS (45 µg/m³) (Tabela 14; Tabela 8). O valor máximo registrado de 95,8 µg/m³ demonstra que, em algumas ocasiões, os níveis de PM₁₀ se aproximaram do limite diário estabelecido pelo CONAMA (100 µg/m³), mas ainda abaixo do limite do COPAM (120 µg/m³) (Tabela 14; Tabela 8).

A mediana de 29,4 µg/m³ indica que a maioria das medições se manteve próxima à média, reforçando uma distribuição equilibrada. O desvio padrão de 15,0 µg/m³ revela uma variação moderada, refletindo episódios de picos de concentração ao longo do período monitorado (Tabela 14).

Para PM_{2.5}, a média aritmética anual foi de 11,4 µg/m³, valor inferior a todos os limites de 24h das normativas nacionais e internacionais (Tabela 14; Tabela 8). O valor máximo de 59,8 µg/m³ indica que, em determinadas situações, a concentração de PM_{2.5} ultrapassou significativamente os limites diários da OMS, o que pode explicar a menor conformidade registrada (Tabela 14; Tabela 13).

Em relação a PTS, a média aritmética foi de 54,4 µg/m³, com um valor máximo de 176,8 µg/m³, evidenciando picos expressivos. O valor mínimo de 10,2 µg/m³ demonstra que, em momentos de menor poluição, as concentrações foram reduzidas significativamente (Tabela 14).

5.2.4 Vale do Rio Doce

A Tabela 15 apresenta os percentuais de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações localizadas no Vale do Rio Doce durante o ano de 2023, com base nos padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais analisadas (Tabela 8).

Tabela 15 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Vale do Rio Doce do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	99,8%	99,9%	92,3%	100,0%	88,8%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	100,0%	100,0%	*	99,8%	71,6%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	100,0%	100,0%	100,0%	#	100,0%
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	Anual	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%
Ozônio - O₃	8 horas	99,0%	99,2%	98,7%	99,2%	96,1%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	100,0%	100,0%	*	*	*
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio autor (2025).

A análise da qualidade do ar na região do Vale do Rio Doce demonstra que grande parte dos poluentes apresentam níveis compatíveis com os limites estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais, especialmente no que diz respeito ao PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, CO e O₃.

Para o PM₁₀ (24 horas), a conformidade foi próxima de 100% em todas as legislações, com destaque para 99,8% (CONAMA) e 99,9% (COPAM) e 100% USEPA (Tabela 15). Os dados analisados mostraram uma conformidade de 92,3% em relação aos limites da UE e 88,8% em relação aos padrões mais rigorosos da OMS, evidenciando uma leve dificuldade em atender a estes últimos. Nas medições médias aritméticas anuais, a conformidade foi de 100% para CONAMA, COPAM e UE, mas 0% para a OMS, evidenciando o desafio de manter as

concentrações médias anuais abaixo dos $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecidos pela organização (Tabela 15; Tabela 8), o que destaca o desafio de controlar exposições prolongadas a níveis que podem ter impactos cumulativos, crônicos e significativos na saúde pública (WHO, 2021).

A análise de $\text{PM}_{2.5}$ (24 horas) indica um cenário bastante favorável, com 100% de conformidade nas normativas nacionais (CONAMA e COPAM) e 99,8% para a USEPA. Entretanto, os dados analisados indicaram uma conformidade de 71,7% em relação ao padrão da OMS, o que revela uma disparidade considerável em relação às demais legislações. A conformidade das médias aritméticas anuais de $\text{PM}_{2.5}$ foi total para os padrões das legislações nacionais e internacionais, exceto para a OMS e para a USEPA, que apresentou 0% de conformidade em ambos, reforçando o rigor dessas normativas em seus padrões anuais de $\text{PM}_{2.5}$ (Tabela 15; Tabela 8).

No que se refere ao SO_2 , tanto as medições diárias quanto anuais mostraram 100% de conformidade com os padrões nacionais e internacionais disponíveis, destacando a baixa ocorrência de episódios críticos de poluição por SO_2 na região (Tabela 15). Esse desempenho pode estar associado a fatores como o controle exercido sobre as emissões de fontes fixas na região e à melhoria da qualidade dos combustíveis, com redução progressiva do teor de enxofre tanto no setor industrial quanto no automotivo, como observado na cidade de São Paulo, onde também foi evidenciada uma redução significativa nas concentrações de SO_2 (SÃO PAULO, 2023).

As medições de NO_2 (1 hora) foram igualmente satisfatórias, atingindo 100% de conformidade em todas as legislações analisadas, inclusive na OMS (Tabela 15). Em relação às medições anuais, atingiu-se 100% de conformidade em todas as normativas, com exceção à OMS, que atingiu 0% de conformidade (Tabela 15). Essa diferença pode ser interpretada considerando as características distintas dos padrões de curto e longo prazo. Os padrões horários são projetados para capturar picos momentâneos de poluição, enquanto os padrões anuais avaliam a exposição acumulada ao longo do tempo. De acordo com a OMS (WHO, 2021), o limite anual para NO_2 é mais rigoroso, dado que exposições prolongadas, mesmo em concentrações moderadas, estão associadas a impactos adversos na saúde, como doenças respiratórias e cardiovasculares.

Exemplificando, no contexto de São Paulo, as fontes móveis, como veículos automotores, e as fontes fixas, como indústrias, contribuem significativamente para as emissões de NO_2 , especialmente em áreas urbanas densamente povoadas, como a Região Metropolitana de São Paulo (SÃO PAULO, 2023). Embora os padrões de curto prazo sejam atendidos em razão de

condições meteorológicas favoráveis que promovem a dispersão dos poluentes, as médias anuais refletem um cenário de emissões contínuas que podem dificultar a conformidade com os padrões mais rigorosos da OMS.

Além disso, é possível inferir que o progresso em medidas como o uso de combustíveis com menor teor de enxofre e a renovação tecnológica de frotas automotivas tenham contribuído para o atendimento dos limites horários. No entanto, a persistência de fontes emissoras ao longo do tempo pode dificultar a redução das médias anuais, o que exige uma abordagem integrada de gestão de qualidade do ar, conforme recomendado pela WHO (2021) e pela CETESB (SÃO PAULO, 2023).

Para o O₃, 8 horas, a conformidade foi elevada, variando de 96,1% (OMS) a 99,2%, o que indica que, embora existam momentos em que os níveis de O₃ ultrapassam os limites da OMS, a maioria das medições esteve dentro dos padrões (Tabela 15). Essa conformidade pode ser atribuída, em parte, ao controle de emissões de precursores, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, e a condições meteorológicas favoráveis, que contribuem para a dispersão do ozônio. No caso de São Paulo, a combinação entre a redução de emissões veiculares e ações de gestão de qualidade do ar tem sido citada como fator relevante para resultados similares (SÃO PAULO, 2023). Adicionalmente, a OMS aponta que, mesmo com altos índices de conformidade em curto prazo, episódios de ultrapassagem podem ocorrer em situações de intensa radiação solar e altas temperaturas, reforçando a importância de esforços contínuos no controle de fontes emissoras (WHO, 2021).

A análise do CO revela 100% de conformidade em todas as legislações, indicando que os níveis de CO monitorados estiveram consistentemente abaixo dos limites estabelecidos (Tabela 15). De acordo com a OMS, o controle efetivo de fontes emissoras, como veículos automotores e processos industriais, associado à melhoria na qualidade dos combustíveis, desempenha um papel importante na manutenção de baixos níveis de CO (WHO, 2021). Esses fatores, alinhados com medidas regulares de monitoramento, têm sido fundamentais para evitar ultrapassagens dos limites recomendados para proteção da saúde.

A conformidade com relação às PTS foi de 100% para as normativas nacionais, tanto em medições diárias quanto médias aritméticas anuais (Tabela 15).

A Tabela 16 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações do Vale do Rio Doce durante o ano de 2023.

Tabela 16 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Vale do Rio Doce do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m ³)	Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m ³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m ³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m ³)	Ozônio - O ₃ (µg/m ³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m ³)
Média aritmética de curto prazo	29,2	12,9	2,2	27,5	58,6	0,37	43,5
Mediana	26,3	12,2	2,1	24,4	54,9	0,34	38,6
Desvio Padrão	13,3	5,0	1,4	12,5	20,4	0,17	21,5
Máximo	163,2	44,0	14,9	91,8	194,0	1,5	235,3
Mínimo	6,7	2,0	0,02	2,3	16,0	0,06	10,1
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística indica que a média aritmética (24h) de PM₁₀ foi de 29,2 µg/m³, valor inferior aos limites diários de todas as normativas analisadas (Tabela 16; Tabela 8). O valor máximo registrado de 163,2 µg/m³ demonstra episódios de concentração significativamente elevados, o que pode justificar a queda na conformidade com os padrões mais rigorosos da OMS (Tabela 16; Tabela 15).

A mediana de 26,3 µg/m³ sugere que a maioria das medições permaneceu ligeiramente abaixo da média, enquanto o desvio padrão de 13,3 µg/m³ revela uma variação moderada nas concentrações de PM₁₀ ao longo do ano (Tabela 16).

Para PM_{2.5}, a média aritmética (24h) de 12,9 µg/m³ se manteve dentro de todos os padrões nacionais e internacionais de curto prazo (Tabela 16; Tabela 8). O valor máximo de 44,0 µg/m³ indica que, em determinados períodos, as concentrações diárias ultrapassaram significativamente os limites mais rigorosos (USEPA e OMS).

Em relação ao SO₂, a média (24h) foi de 2,2 µg/m³, muito abaixo dos limites diários pelas legislações nacionais e internacionais, refletindo baixos níveis de poluição por esse poluente na região (Tabela 16; Tabela 8). O valor máximo registrado de 14,9 se encontra abaixo de todos os limites analisados (Tabela 16; Tabela 8).

A análise de NO₂ revela uma média aritmética (1h) de 27,5 µg/m³, dentro dos padrões nacionais e internacionais (Tabela 16; Tabela 8). O valor máximo de 91,8 µg/m³ indica que, embora existam picos de concentração, a conformidade de curto prazo foi mantida em todas as normativas ao longo do ano (Tabela 16; Tabela 8).

Para o O₃, a média aritmética (8 horas) de 58,6 µg/m³ está abaixo dos limites diários, enquanto o valor máximo de 194,0 µg/m³ reflete episódios de pico que ultrapassam os limites de todas as normativas analisadas (Tabela 16; Tabela 8).

O CO apresentou uma média de 0,4 ppm, com valores máximos de 1,5 ppm, bem abaixo dos limites de 9 ppm estabelecidos por todas as legislações analisadas (Tabela 16; Tabela 8).

Por fim, as medições de PTS indicaram uma média de 43,5 µg/m³, com um valor máximo de 235,3 µg/m³, apontando picos significativos em algumas ocasiões, embora dentro do limite nacionais (Tabela 16; Tabela 8).

5.2.5 Metropolitana

A Tabela 17 apresenta os percentuais de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações localizadas na Região Metropolitana durante o ano de 2023, com base nos padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais analisadas (Tabela 8).

Tabela 17 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar na Região Metropolitana do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	99,4%	99,8%	89,3%	100,0%	85,8%
	Anual	80,8%	88,5%	88,5%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	100,0%	100,0%	*	99,8%	82,7%
	Anual	95,2%	100,0%	100,0%	33,3%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	99,7%	100,0%	100,0%	#	99,7%
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	Anual	100,0%	100,0%	72,7%	100,0%	0,0%
Ozônio - O₃	8 horas	97,3%	98,6%	95,9%	98,3%	90,3%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	99,5%	99,5%	*	*	*
	Anual	86,7%	86,7%	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio autor (2025).

A análise dos dados da Região Metropolitana revela um cenário de conformidade elevado em relação às resoluções nacionais (CONAMA e COPAM), com percentuais acima de 99% para a maioria dos poluentes, especialmente em medições de curto prazo (Tabela 17). A conformidade com o padrão da USEPA também se mostrou alta, atingindo 100% para PM₁₀, NO₂ e CO (Tabela 17). Entretanto, ao considerar as legislações mais rigorosas, como as da União Europeia e OMS, observa-se uma leve redução na conformidade (Tabela 17).

Para PM₁₀, a conformidade com a OMS atinge 85,8% em medições diárias, enquanto as medições anuais não registraram conformidade (0%) (Tabela 17). Essa diferença pode ser explicada pela natureza dos padrões avaliados. Os limites diários consideram variações

momentâneas e picos ocasionais de partículas, enquanto os limites anuais refletem a exposição acumulada ao longo do tempo, sendo mais rigorosos em relação ao impacto na saúde humana.

De acordo com a OMS (WHO, 2021), concentrações elevadas de partículas em longo prazo estão diretamente associadas a problemas respiratórios e cardiovasculares, exigindo controles mais abrangentes para reduzir emissões de fontes móveis, industriais e de poeira em suspensão. Em regiões com atividade industrial intensa ou tráfego significativo, como observado em áreas urbanas de São Paulo, as emissões persistentes dificultam o cumprimento das médias anuais, mesmo quando os limites diários são amplamente atendidos (SÃO PAULO, 2023).

Para PM_{2.5}, a conformidade diária foi expressiva, atingindo 100% na norma CONAMA e 99,8% na USEPA (Tabela 17). Contudo, a conformidade anual de PM_{2.5} apresentou uma discrepância significativa: 95,2% em relação ao CONAMA, mas 0% frente à OMS, evidenciando novamente a dificuldade em atingir padrões mais exigentes (Tabela 17). Reitera-se que essa diferença pode ocorrer, pois os padrões diários são projetados para limitar exposições de curto prazo a concentrações elevadas, enquanto os padrões anuais avaliam impactos acumulativos na saúde, sendo mais exigentes. De acordo com a OMS (WHO, 2021), exposições prolongadas a PM_{2.5} estão associadas a doenças respiratórias, cardiovasculares e ao aumento da mortalidade por causas relacionadas ao sistema circulatório.

Além disso, a dificuldade em alcançar os padrões anuais está relacionada à persistência de fontes emissoras, como tráfego veicular, processos industriais e queimadas. No caso de São Paulo, o relatório da CETESB (SÃO PAULO, 2023) aponta que fontes de combustão, especialmente veículos e indústrias, são as principais responsáveis por essas emissões constantes. Adicionalmente, fatores meteorológicos, como baixa dispersão atmosférica em determinados períodos, e o transporte de poluentes entre regiões contribuem para manter concentrações anuais elevadas.

O SO₂ apresentou conformidade elevada nas medições de 24 horas, com 99,7% e 100% nas legislações nacionais e internacionais (Tabela 17). Já as medições anuais mostraram 100% de conformidade com as resoluções nacionais, mas não possuem valores regulamentados nas legislações europeias e da OMS (Tabela 17).

A conformidade do NO₂ foi uniforme, com 100% para medições horárias e anuais nas normas nacionais e USEPA (Tabela 17). No entanto, a conformidade com os padrões anuais mostrou

uma significativa discrepância: 0% na OMS e 72,7% na União Europeia (Tabela 17). Essa diferença reflete a maior exigência dos padrões anuais, que avaliam os efeitos cumulativos de longas exposições ao poluente. De acordo com a OMS (WHO, 2021), o NO₂ é emitido principalmente em processos de combustão, sendo o tráfego veicular e as atividades industriais as maiores fontes emissoras. Além de causar irritação respiratória, o NO₂ é precursor de poluentes secundários, como ozônio e nitratos, que contribuem para o material particulado fino na atmosfera (WHO, 2021; SÃO PAULO, 2023). Ademais, estudos também indicam que exposições prolongadas ao NO₂, mesmo em concentrações moderadas, estão associadas a aumentos na mortalidade por causas respiratórias e cardiovasculares (WHO, 2021).

A dificuldade em atender aos padrões anuais pode ser atribuída à persistência dessas fontes emissoras e à influência de fatores meteorológicos, que favorecem a dispersão dos poluentes em curto prazo, mas não mitigam os efeitos acumulados ao longo do ano. Em São Paulo, por exemplo, as estações próximas a vias de tráfego apresentaram concentrações mais altas de NO₂ em 2023, reforçando o impacto das emissões veiculares no padrão anual (SÃO PAULO, 2023).

O O₃ também apresentou bons índices, com conformidade de 97,3% em relação ao CONAMA e 90,3% em comparação com a OMS, podendo refletir um controle eficiente das emissões de precursores, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, aliado a condições meteorológicas favoráveis que contribuem para a dispersão do poluente (Tabela 17; WHO, 2021).

Por fim, o CO obteve conformidade total (100%) em todas as legislações, indicando que este poluente não representa um desafio significativo para a qualidade do ar na Região Metropolitana (Tabela 17).

A Tabela 18 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados nas estações da Região Metropolitana durante o ano de 2023.

Tabela 18 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar da Região Metropolitana do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m³)	Material Particulado - PM _{2.5} (µg/m³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m³)	Ozônio - O ₃ (µg/m³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m³)
Média aritmética de curto prazo	28,4	10,5	4,8	35,7	62,3	0,72	53,3
Mediana	23,9	9,5	3,8	32,3	56,5	0,60	43,3
Desvio Padrão	17,5	5,4	5,2	18,9	27,8	0,55	36,4
Máximo	148,8	76,9	69,2	166,2	210,4	6,69	383,6
Mínimo	0,92	0,94	0,06	0,38	7,0	0,06	4,1
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística dos poluentes reforça as tendências observadas na conformidade. A média aritmética (24h) de PM₁₀ foi de 28,4 µg/m³ valor inferior aos limites diários de todas as normativas analisadas (Tabela 18; Tabela 8). A mediana de 23,9 µg/m³ indica uma distribuição equilibrada, mas o desvio padrão de 17,5 µg/m³ evidencia certa variabilidade nas concentrações (Tabela 18; Tabela 8). O valor máximo registrado foi de 148,79 µg/m³, superando os limites diários, o que sugere episódios esporádicos de poluição elevada (Tabela 18; Tabela 8).

Para PM_{2.5}, a média (24h) foi de 10,5 µg/m³, com desvio padrão de 5,4 µg/m³ e um máximo de 76,9 µg/m³, reforçando a existência de picos de poluição, mas valores médios que se mantêm relativamente próximos aos limites diários da OMS (15 µg/m³) (Tabela 18; Tabela 8).

O NO₂ apresentou uma média (1 hora) de 35,7 µg/m³, com desvio padrão de 18,9 µg/m³ e picos de até 166,2 µg/m³, inferior a todos os limites de curto prazo das normativas analisadas. Isso sugere que, apesar da conformidade geral (com exceção da OMS), há momentos de elevação nas concentrações desse poluente que podem afetar a saúde pública (Tabela 17; Tabela 18; Tabela 8).

O O₃ teve uma média aritmética (8 horas) de 62,3 µg/m³, próximo ao limite da OMS (100 µg/m³), com um desvio padrão de 27,8 µg/m³ e valores máximos que atingiram até 210,4 µg/m³, destacando a necessidade de monitoramento constante (Tabela 18; Tabela 8).

A análise do CO revelou uma média de 0,7 ppm, bem abaixo do limite de 9 ppm, com desvio padrão de 0,6 ppm. O valor máximo de 6,7 ppm confirma que o poluente permanece sob controle na maior parte do tempo (Tabela 18; Tabela 8).

As PTS apresentaram uma média de 53,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com desvio padrão de 36,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e um valor máximo expressivo de 383,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando flutuações significativas ao longo do período analisado (Tabela 18; Tabela 8). A amplitude entre o mínimo (4,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e o máximo reforça a necessidade de atenção aos períodos de maior emissão (Tabela 8).

5.2.6 Estadual

A Tabela 19 apresenta o percentual de conformidade das concentrações de poluentes atmosféricos monitorados em todas as estações de Minas Gerais durante o ano de 2023. Os resultados foram comparados com os padrões estabelecidos por diferentes legislações nacionais e internacionais (Tabela 8).

Tabela 19 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023.

Poluente	Tipo de Medição	Resolução CONAMA n° 506/2024 - PI-2	Resolução COPAM n° 248/2023 - PI-1	União Europeia	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)	Organização Mundial da Saúde (OMS)
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	99,6%	99,9%	90,3%	100,0%	86,7%
	Anual	83,0%	87,2%	87,2%	*	0,0%
Material Particulado - PM_{2,5}	24 horas	100,0%	100,0%	*	99,8%	82,9%
	Anual	97,1%	100,0%	100,0%	37,1%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	99,8%	100,0%	100,0%	#	99,8%
	Anual	100,0%	100,0%	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	Anual	100,0%	100,0%	80,0%	100,0%	0,0%
Ozônio - O₃	8 horas	97,8%	98,7%	96,7%	98,5%	91,9%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	99,7%	99,7%	*	*	*
	Anual	92,6%	92,6%	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa;
 # O valor é referente a um período de 1 hora, enquanto todas as demais legislações utilizam um período de referência de 24 horas, o que impossibilitaria uma comparação efetiva.

Fonte: próprio autor (2025).

A análise global das estações de monitoramento de Minas Gerais revela uma alta taxa de conformidade para a maioria dos poluentes (em curto prazo), especialmente em relação às legislações nacionais (CONAMA e COPAM). O PM₁₀ nas medições de 24 horas apresentou 99,6% e 99,9% de conformidade com as resoluções do CONAMA e COPAM, respectivamente (Tabela 19). Esses resultados indicam que, de forma geral, os valores de PM₁₀ no estado mantêm-se dentro dos limites nacionais.

No entanto, quando a análise é estendida para os padrões mais rigorosos da União Europeia (90,3%) e da OMS (86,7%), observa-se uma redução na conformidade (Tabela 19). Esse padrão

reflete a dificuldade do estado em atingir os limites mais restritivos, especialmente aqueles que priorizam a proteção à saúde em níveis mais baixos de concentração.

Para o PM_{10} em medições anuais, a conformidade caiu significativamente, com 83,0% de acordo com o CONAMA e 87,2% para o COPAM e União Europeia, enquanto a OMS não apresentou conformidade (0%) (Tabela 19). Isso destaca um desafio contínuo em manter os níveis anuais dentro dos parâmetros mais exigentes, o que implica em exposição prolongada a concentrações mais elevadas, que estão diretamente associadas a problemas respiratórios e cardiovasculares, exigindo controles mais abrangentes para reduzir emissões de fontes móveis, industriais e de poeira em suspensão (WHO, 2021).

Em relação ao $PM_{2.5}$, as medições de 24 horas mostraram uma alta taxa de conformidade, alcançando 100% e 100% para o CONAMA e COPAM, respectivamente (Tabela 19). Porém, quando comparado aos padrões da OMS, essa taxa foi reduzida para 82,9%. Essa discrepância ressalta que, embora a qualidade do ar esteja dentro dos limites nacionais, há margem para melhorias que se alinhem aos padrões internacionais mais protetivos.

As medições anuais de $PM_{2.5}$ seguiram um padrão semelhante, com 97,1% de conformidade para o CONAMA e 100% para o COPAM, mas apenas 37,1% de acordo com a USEPA e 0% conforme a OMS (Tabela 19). A falta de conformidade com a OMS evidencia o desafio em manter baixos níveis anuais de $PM_{2.5}$ e exalta a importância de implementar medidas de mitigação de emissão de MP finos, uma vez que exposições prolongadas de $PM_{2.5}$ podem causar doenças respiratórias e cardiovasculares, além de aumentar a mortalidade por problemas circulatórios na população (WHO, 2021).

O SO_2 apresentou conformidade elevada em 24 horas (99,8% para CONAMA e 100% para COPAM), refletindo o controle eficiente desse poluente (Tabela 19). As medições anuais de SO_2 também registraram 100% de conformidade em todas as legislações aplicáveis (Tabela 19).

O NO_2 se destacou com 100% de conformidade em medições de 1 hora e anuais, de acordo com todas as legislações, à exceção da União Europeia e OMS, que apresentou 80% e 0,0% de conformidade nas medições anuais, respectivamente (Tabela 19). O que pode evidenciar um problema a longo prazo, uma vez que estudos também indicam que exposições prolongadas ao NO_2 , mesmo em concentrações moderadas, estão associadas a aumentos na mortalidade por causas respiratórias e cardiovasculares (WHO, 2021).

A análise do O₃ mostra uma taxa de conformidade de 97,8% para o CONAMA e 98,8% para o COPAM, enquanto a OMS apresentou uma taxa de 91,9% (Tabela 19). A menor conformidade com a OMS indica que, apesar dos bons resultados, o controle do O₃ ainda pode ser aprimorado.

O CO atingiu 100% de conformidade em todas as legislações analisadas, evidenciando o sucesso na manutenção dos níveis desse poluente abaixo dos limites estabelecidos (Tabela 19).

Para as PTS, a conformidade foi de 99,7% nas medições de 24 horas, enquanto nas medições anuais esse valor caiu para 92,6% (Tabela 19).

A Tabela 20 apresenta as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes monitorados nas estações de Minas Gerais em 2023.

Tabela 20 – Estatísticas Descritivas das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023

Poluente	Material Particulado - PM ₁₀ (µg/m³)	Material Particulado - PM _{2,5} (µg/m³)	Dióxido de Enxofre - SO ₂ (µg/m³)	Dióxido de Nitrogênio - NO ₂ (µg/m³)	Ozônio - O ₃ (µg/m³)	Monóxido de Carbono - CO (ppm)	Partículas Totais em Suspensão - PTS (µg/m³)
Média aritmética de curto prazo	28,5	10,5	4,0	33,2	61,3	0,6	50,4
Mediana	24,4	9,5	3,0	29,7	55,9	0,5	42,5
Desvio Padrão	16,2	5,2	4,5	17,7	26,1	0,5	32,6
Máximo	163,2	76,9	69,2	166,2	210,4	6,7	383,6
Mínimo	0,9	0,9	0,0	0,4	7,0	0,1	4,1
- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos.							

Fonte: próprio autor (2025).

A análise estatística dos dados globais do estado revela que o PM₁₀ apresentou uma média aritmética (24h) de 28,5 µg/m³, valor inferior aos limites diários de todas as normativas analisadas (Tabela 20; Tabela 8). A mediana de 24,4 µg/m³ indica uma leve assimetria nos dados, sugerindo a presença de valores mais altos que elevaram a média (Tabela 20).

O desvio padrão de 16,2 µg/m³ reflete uma considerável variabilidade nas concentrações de PM₁₀, com um valor máximo registrado de 163,2 µg/m³, o que excede amplamente os limites

estabelecidos (Tabela 20). Esse resultado demonstra que, apesar da conformidade na maioria dos dias, há episódios críticos de alta concentração que podem impactar negativamente a saúde da população.

O $\text{PM}_{2.5}$ apresentou uma média (24h) de $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor inferior aos limites diários de todas as normativas analisadas (Tabela 20; Tabela 8). A mediana de $9,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o desvio padrão de $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicam uma distribuição relativamente uniforme, com valores máximos alcançando até $76,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 20).

Para o SO_2 , a média (24h) de $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reflete um nível baixo, com um máximo de $69,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando picos de emissão que podem ser associados a fontes industriais ou eventos esporádicos (Tabela 20).

O NO_2 apresentou uma média (1 hora) de $33,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com desvio padrão de $17,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, revelando uma alta variabilidade nas medições (Tabela 20). O valor máximo de $166,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ultrapassa significativamente os padrões diários (Tabela 20; Tabela 8).

O O_3 registrou uma média (8 horas) de $61,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um máximo de $210,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sugerindo que há episódios de concentração elevada, especialmente em dias mais quentes e secos, quando a formação de O_3 tende a ser intensificada (Tabela 20).

O CO apresentou uma média (8 horas) de $0,6 \text{ ppm}$, com valores que variaram de $0,1$ a $6,7 \text{ ppm}$, indicando que, apesar da conformidade geral, há situações em que as concentrações se aproximam do limite superior (Tabela 20).

PTS apresentou uma média (24h) de $50,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um desvio padrão de $32,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, revelando uma ampla dispersão nos dados e um máximo de $383,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o que sugere episódios críticos de poluição (Tabela 20).

5.3 Análise Comparativa Regional e Estadual da Qualidade do Ar em Minas Gerais

Neste capítulo foi realizada uma comparação das concentrações de poluentes atmosféricos entre as regiões de Minas Gerais (Norte de Minas, Zona da Mata, Noroeste, Vale do Rio Doce e Região Metropolitana), com base nos dados de conformidade e nas estatísticas descritivas apresentados anteriormente (Tabela 9 a Tabela 20). A análise foi conduzida por poluente, a fim de destacar áreas que apresentam maior ou menor conformidade com os padrões estabelecidos.

5.3.1 PM_{10}

A análise de PM_{10} destaca uma forte conformidade nas medições de 24 horas, especialmente em relação às normativas nacionais do CONAMA e COPAM. A Zona da Mata e o Noroeste alcançaram 100% de conformidade para ambos os padrões (Tabela 11; Tabela 13), evidenciando um controle eficiente nas concentrações diárias. O Vale do Rio Doce apresentou um desempenho ligeiramente inferior (99,8%; Tabela 15), mas ainda dentro de níveis satisfatórios. A Região Metropolitana (99,4%; Tabela 17) e o Norte de Minas (98,9%; Tabela 9) apresentaram pequenas variações, indicando a ocorrência de eventos pontuais de poluição que elevaram temporariamente as concentrações, comprometendo a conformidade total em padrões diários. Essa alta conformidade com padrões de curto prazo reflete a capacidade de dispersão em períodos específicos, mas pode mascarar desafios relacionados à persistência de fontes emissoras, como observado na análise dos padrões anuais.

Por outro lado, quando analisamos a conformidade em relação aos padrões mais rigorosos da União Europeia (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 8) e da OMS (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 8), percebe-se uma queda significativa. A Zona da Mata liderou a conformidade com 99,6% (UE; Tabela 11) e 99,0% (OMS; Tabela 11). A Região Metropolitana (89,3% UE; 85,8% OMS; Tabela 17) e o Vale do Rio Doce (92,3% UE; 88,8% OMS; Tabela 15) apresentaram valores intermediários. A situação mais crítica ocorreu no Norte de Minas, com apenas 64,7% de conformidade segundo a UE e 52,0% de acordo com a OMS (Tabela 9), o que demonstra que as condições meteorológicas e a influência de fontes emissoras, como tráfego veicular e atividades locais, ainda representam um desafio significativo para a região.

Os dados de conformidade anual de PM_{10} revelam discrepâncias ainda mais evidentes. A Zona da Mata; Noroeste; e Vale do Rio Doce alcançaram 100% de conformidade com os padrões nacionais (Tabela 11; Tabela 13; Tabela 15), enquanto o Norte de Minas registrou 0% de conformidade (Tabela 9), indicando que, apesar da capacidade de atender aos limites diários, as emissões contínuas e os episódios críticos de poluição elevam a média anual para valores acima dos limites permitidos (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pelo CONAMA e 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pelo COPAM; Tabela 8). A Região Metropolitana apresentou uma situação intermediária, com 80,8% de conformidade com o CONAMA e 88,5% com o COPAM (Tabela 17). A ausência de conformidade anual segundo a OMS (0% em todas as regiões; Tabela 9; Tabela 11; Tabela 13; Tabela 15; Tabela 17) reflete não apenas o rigor de seu limite anual de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 8), mas também a necessidade de estratégias de redução das emissões de partículas finas ao longo do tempo.

Os dados estatísticos reforçam as variações observadas na conformidade. O Vale do Rio Doce apresentou a maior média de PM_{10} ($29,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 16), indicando concentrações mais elevadas de poluentes, possivelmente associadas à presença de atividades industriais, mineradoras e fontes móveis. A Região Metropolitana registrou uma média próxima ($28,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18), sugerindo que o tráfego veicular intenso também desempenha um papel importante no cenário de emissões. A Zona da Mata, em contrapartida, apresentou a menor média ($21,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 12), sugerindo que a região possui uma atmosfera menos impactada por fontes de MP.

A variabilidade também foi marcante, com o Vale do Rio Doce registrando o valor máximo de $163,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 16), contrastando com o mínimo de $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na Zona da Mata (Tabela 12). Esse contraste sugere episódios críticos de poluição intercalados com períodos de ar mais limpo. O desvio padrão mais elevado foi registrado no Norte de Minas ($16,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 10), reforçando a ocorrência de eventos esporádicos de altas concentrações que influenciam negativamente os valores médios anuais e dificultam a estabilidade das medições.

5.3.2 $PM_{2.5}$

Os resultados de $PM_{2.5}$ mostram uma elevada conformidade em medições de 24 horas para padrões nacionais. A Zona da Mata; Noroeste; e Vale do Rio Doce obtiveram 100% de conformidade com o CONAMA e COPAM (Tabelas 11; 13; 15), enquanto a Região Metropolitana apresentou ligeira variação (100% CONAMA e 100% COPAM; Tabela 17). Esses valores sugerem que, em termos de $PM_{2.5}$, as regiões monitoradas conseguem manter as concentrações diárias sob controle.

No entanto, a conformidade com a OMS, que estabelece um limite diário de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 8), é significativamente menor. A Zona da Mata apresentou o melhor desempenho (97,5%; Tabela 11), enquanto o Vale do Rio Doce (71,7%; Tabela 15) e o Noroeste (78,6%; Tabela 13) mostraram maior dificuldade em alcançar esse patamar.

A conformidade anual de $PM_{2.5}$ é mais homogênea nas medições das normativas nacionais, com todas as regiões monitoradas (Zona da Mata; Vale do Rio Doce; e Noroeste), exceto na Região Metropolitana (95,2% de conformidade; Tabela 17), apresentando 100% de conformidade (Tabelas 11; 13; 15). O panorama estadual consolidou esse resultado com 97,1% (Tabela 19). A conformidade com a OMS, no entanto, foi nula (0%) em todas as regiões

(Tabelas 11; 13; 15; 17; 19), o que evidencia o desafio de atingir o rigoroso limite anual de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 8) e reforça a necessidade de ações para reduzir as emissões de partículas finas ao longo do ano.

A maior média de $\text{PM}_{2.5}$ foi observada no Vale do Rio Doce ($12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 16), seguida pelo Noroeste ($11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 14) e Região Metropolitana ($10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18). A Zona da Mata apresentou a menor média ($7,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 12), indicando uma menor exposição da população residente a partículas finas, que podem ser provenientes de fontes como tráfego veicular e atividades industriais.

O valor máximo foi registrado na Região Metropolitana ($76,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18), enquanto o Noroeste apresentou um valor de $59,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14). Essa variabilidade destaca a importância do controle contínuo de $\text{PM}_{2.5}$, visto que populações próximas às áreas com emissões mais altas estão mais suscetíveis aos impactos diretos desse poluente na saúde respiratória e cardiovascular.

5.3.3 PTS

O monitoramento de PTS foi realizado em quatro das cinco regiões. A Zona da Mata; o Noroeste; e o Vale do Rio Doce apresentaram 100% de conformidade com os padrões diários (24 horas) do CONAMA e COPAM (Tabela 11; Tabela 13; Tabela 15). A Região Metropolitana registrou 99,5% (Tabela 17), evidenciando uma leve discrepância, mas ainda mantendo alta conformidade.

Nas medições anuais, as regiões com monitoramento (Zona da Mata; Noroeste; e Vale do Rio Doce) atingiram 100% de conformidade (Tabela 11; Tabela 13; Tabela 15), enquanto a Região Metropolitana registrou 86,7% (Tabela 17). Essa diferença nos resultados anuais indica que, apesar da alta conformidade diária, existem flutuações nas concentrações de PTS ao longo do ano, possivelmente causadas por eventos pontuais, como queimadas, emissões industriais ou períodos de condições meteorológicas adversas, que elevam as médias anuais.

A Região Metropolitana apresentou a maior média de PTS ($53,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18), com um valor máximo de $383,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 18). O Noroeste registrou uma média de $54,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e um pico de $176,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 14). Na Zona da Mata, a média foi de $37,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um máximo de $117,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 12). Esses dados refletem variações regionais significativas,

com a Região Metropolitana se destacando por picos de concentração mais elevados, que, mesmo sendo pontuais, podem causar impactos agudos na saúde da população exposta, incluindo irritações respiratórias, aumento de hospitalizações e agravamento de doenças preexistentes.

5.3.4 SO_2

A conformidade do SO_2 foi registrada apenas no Vale do Rio Doce e na Região Metropolitana, refletindo a distribuição do monitoramento desse poluente. Ambas as regiões apresentaram 100% de conformidade com os padrões do CONAMA e COPAM, tanto nas medições diárias (24 horas) quanto nas anuais (Tabela 15; Tabela 17). Esse resultado pode estar associado à diminuição progressiva do teor de enxofre em combustíveis industriais e automotivos, além do controle de emissões em fontes fixas, como indústrias e usinas, por exemplo.

No entanto, a conformidade com os padrões da OMS, mais rigorosos, apresentou leve variação. Enquanto o Vale do Rio Doce atingiu 100% (Tabela 15), a Região Metropolitana registrou 99,7% (Tabela 17), o que indica que, embora o desempenho geral seja satisfatório, há pequenos desvios ocasionais que merecem atenção.

No Vale do Rio Doce, a média de SO_2 foi de $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um valor máximo de $14,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 16). Esses resultados apontam para uma estabilidade nas concentrações do poluente, com variações limitadas. A Região Metropolitana apresentou uma média superior ($4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18), e o valor máximo foi de $69,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 18), indicando maior variabilidade e episódios esporádicos de concentrações elevadas, embora dentro dos limites da maioria das normativas.

5.3.5 NO_2

O NO_2 foi monitorado apenas no Vale do Rio Doce e na Região Metropolitana, com 100% de conformidade em ambas as regiões para os padrões do CONAMA e COPAM, tanto para medições horárias (1 hora) quanto anuais (Tabela 15; Tabela 17). A análise frente aos padrões da OMS revela discrepâncias. O Vale do Rio Doce apresentou 0% de conformidade nas medições anuais, enquanto a Região Metropolitana atingiu 72,7% (Tabela 15; Tabela 17).

A média de NO_2 no Vale do Rio Doce foi de $27,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com um valor máximo de $91,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 16). Esses valores indicam episódios pontuais de elevação. Na Região Metropolitana,

a média foi de 35,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 18), com um valor máximo de 166,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 18), refletindo uma maior densidade veicular e atividade industrial. As diferenças nos valores máximos e na média reforçam a necessidade de medidas específicas para reduzir as emissões em momentos de alta concentração.

5.3.6 CO

O CO foi monitorado no Vale do Rio Doce, Zona da Mata e Região Metropolitana. A conformidade com os padrões do CONAMA, COPAM e da OMS foi de 100% em todas as regiões (Tabela 11; Tabela 15; Tabela 17), indicando que as concentrações de CO estão consistentemente dentro dos limites estabelecidos. Esse resultado reflete o impacto positivo de medidas como a modernização de veículos automotores, a utilização de combustíveis mais limpos e o controle de emissões em processos industriais.

A Região Metropolitana apresentou a maior média de CO (0,7 ppm; Tabela 18), com um valor máximo de 6,7 ppm (Tabela 18). No Vale do Rio Doce, a média foi de 0,4 ppm, com um pico de 1,5 ppm (Tabela 16). Esses dados indicam uma baixa variabilidade nas concentrações de CO, com desvios padrão reduzidos, mesmo em áreas com maior densidade populacional e industrial, o que reforça o controle eficiente das fontes emissoras.

5.3.7 O₃

O O₃ foi monitorado na Zona da Mata, Vale do Rio Doce e Região Metropolitana. A conformidade com o CONAMA foi elevada em todas as regiões, com 100% na Zona da Mata, 99,1% no Vale do Rio Doce e 97,3% na Região Metropolitana (Tabela 11; Tabela 15; Tabela 17). Apesar dos altos percentuais, as medições demonstram a ocorrência de episódios de elevação pontual das concentrações.

Com relação à OMS, a conformidade foi um pouco menor. A Zona da Mata manteve 100%, enquanto o Vale do Rio Doce registrou 96,1% e a Região Metropolitana 90,3% (Tabela 11; Tabela 15; Tabela 17). Esses dados indicam que, mesmo com bons índices de conformidade, eventos específicos de formação de O₃ podem ocorrer, demandando monitoramento contínuo.

A média de O₃ foi mais elevada na Região Metropolitana (62,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Tabela 18), com um pico de 210,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 18). No Vale do Rio Doce, a média foi de 58,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e o valor máximo atingiu 194,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabela 16). Esses números sugerem que, embora as concentrações médias

estejam geralmente controladas, episódios críticos de alta concentração são uma realidade, possivelmente associados a condições meteorológicas favoráveis à formação de O₃.

5.3.8 Priorização Regional para Ações de Gerenciamento da Qualidade do Ar

Os limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) foram escolhidos como referência para determinar as regiões prioritárias para ações de gerenciamento da qualidade do ar devido ao seu caráter mais rigoroso em comparação com outras normativas analisadas na **Tabela 8**. Esses padrões são baseados em evidências científicas atualizadas, que consideram os impactos à saúde mesmo em concentrações relativamente baixas de poluentes atmosféricos. De acordo com o documento oficial da OMS (WHO, 2021), esses limites visam minimizar os riscos de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de reduzir a mortalidade associada à exposição prolongada a poluentes.

Dessa forma ao adotar os critérios da OMS, é possível identificar com maior precisão as áreas que exigem atenção imediata e intervenções eficazes para proteger a saúde pública. Nesse sentido, com base na Tabela 21, foi possível identificar as regiões prioritárias para ações de gerenciamento da qualidade do ar.

,

Tabela 21 – Percentual de conformidade das Concentrações de Poluentes Monitorados nas Estações Automáticas de Qualidade do Ar nas Regiões do Estado de Minas Gerais para o Ano de 2023, em comparação com os padrões de qualidade do ar da OMS

Poluente	Tipo de Medição	Região				
		Norte De Minas	Zona da Mata	Noroeste	Vale do Rio Doce	Metropolitana
Material Particulado - PM₁₀	24 horas	52,0%	99,0%	82,1%	88,8%	85,8%
	Anual	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Material Particulado - PM_{2.5}	24 horas	-	97,5%	78,6%	71,6%	82,7%
	Anual	-	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	-	-	-	100,0%	99,7%
	Anual	*	*	*	*	*
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	-	-	-	100,0%	100,0%
	Anual	-	-	-	0,0%	0,0%
Ozônio - O₃	8 horas	-	-	-	96,1%	90,3%
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	100,0%	100,0%
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	*	*	*	*	*
	Anual	*	*	*	*	*

- Indica a ausência de medições ou a insuficiência de dados representativos para análise de conformidade;
 * reflete a ausência de regulamentação específica para o poluente em questão na respectiva normativa.

Para o PM₁₀ (24 horas), a Zona da Mata apresenta a maior conformidade (99%; Tabela 21), seguida pelo Vale do Rio Doce (88,8%; Tabela 21), Metropolitana (85,8%; Tabela 21), Noroeste (82,1%; Tabela 21) e, por último, a Norte de Minas (52%; Tabela 21). Esses dados sugerem que a Zona da Mata possui menores concentrações em relação aos padrões da OMS, enquanto a região Norte enfrenta desafios significativos. Contudo, quando analisados os padrões anuais da OMS (15 µg/m³ para PM₁₀ e 5 µg/m³ para PM_{2.5}; Tabela 8), observa-se que não há conformidade. Essa discrepância entre a conformidade em padrões de curto prazo e a ausência de conformidade nos padrões anuais reflete o impacto acumulado das emissões contínuas. Embora concentrações diárias possam permanecer controladas em alguns momentos, as fontes emissoras constantes contribuem para elevações das médias anuais. Isso reforça a necessidade de estratégias integradas que considerem o perfil das emissões ao longo do tempo (WHO, 2021), o que evidencia a necessidade de estratégias para controle das emissões contínuas.

Para o PM_{2.5} (24 horas), a Zona da Mata também lidera (97,5%; Tabela 21), seguida pela Metropolitana (82,7%; Tabela 21), Noroeste (78,6%; Tabela 21) e Vale do Rio Doce (71,6%; Tabela 21), com ausência de medições para a Norte de Minas. Os padrões anuais da OMS (5 µg/m³; Tabela 8) também não são atendidos por nenhuma das regiões. Essa disparidade entre padrões de curto e longo prazo pode indicar que episódios esporádicos de altas concentrações

impactam diretamente as médias anuais, especialmente em áreas urbanas ou industriais, onde as emissões são contínuas e de múltiplas fontes (WHO, 2021). Estudos sugerem que fontes fixas, como indústrias, e fontes móveis, como transporte rodoviário, contribuem significativamente para a manutenção de concentrações médias anuais elevadas, o que reforça a importância de uma abordagem integrada para mitigar as emissões persistentes (WHO, 2021). A menor conformidade no Vale do Rio Doce e Noroeste pode estar relacionada a episódios pontuais de emissões industriais e queima de biomassa, considerando fatores similares observados no estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2023).

No caso do SO₂ (24 horas), apenas o Vale do Rio Doce e a Metropolitana possuem dados, com conformidades de 100% e 99,7%, respectivamente (Tabela 21). Os padrões anuais estabelecidos pela OMS (40 µg/m³ para SO₂; Tabela 5) indicam que a conformidade com os limites diários não é suficiente para proteger a saúde a longo prazo. Concentrações prolongadas de dióxido de enxofre, mesmo em níveis moderados, podem causar impactos cumulativos na saúde respiratória, conforme documentado em estudos internacionais (WHO, 2021). Destacam que concentrações prolongadas de dióxido de enxofre podem exacerbar doenças respiratórias, especialmente em populações vulneráveis, como crianças e idosos (WHO, 2021); e por outras normativas não foram avaliados devido à ausência de medições anuais. A conformidade nas medições diárias pode refletir medidas eficazes de controle de emissões em fontes fixas e a redução do teor de enxofre em combustíveis, conforme relatado pela OMS e também observado em estudos realizados em São Paulo (WHO, 2021; SÃO PAULO, 2023).

Para o NO₂ (1 hora), as mesmas duas regiões apresentam conformidade total (100%; Tabela 21). No entanto, os padrões anuais da OMS (10 µg/m³) não são atendidos pelo Vale do Rio Doce (0%) e são parcialmente atendidos pela Metropolitana (72,7%). A concentração média de NO₂ foi de 27,5 µg/m³ no Vale do Rio Doce e 35,7 µg/m³ na Metropolitana, sugerindo que fontes veiculares podem desempenhar um papel relevante nessas áreas, como é amplamente documentado em outras regiões urbanas (SÃO PAULO, 2023).

O O₃ (8 horas) também apresenta elevados percentuais de conformidade nessas regiões, com 96,1% no Vale do Rio Doce e 90,3% na Metropolitana (Tabela 21). Apesar disso, as médias e picos observados revelam uma dificuldade em manter o controle prolongado das concentrações de ozônio. A conformidade em padrões diários pode mascarar episódios críticos que elevam os

níveis médios, muitas vezes impulsionados por condições meteorológicas específicas, como alta radiação solar e estagnação atmosférica (WHO, 2021).

Por fim, o CO (8 horas) alcança 100% de conformidade em ambas as regiões, mas não há medições para as demais. A modernização da frota veicular e o uso de combustíveis mais limpos são fatores que podem contribuir para esses resultados, conforme observado também no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2023).

Nesse sentido, a Norte de Minas é a região com pior desempenho, apresentando baixa conformidade para PM_{10} (52%; Tabela 21) e ausência de dados para os demais poluentes, sendo, assim, a prioridade principal para intervenções. A Noroeste, com índices reduzidos para PM_{10} (82,1%; Tabela 21) e $PM_{2.5}$ (78,6%; Tabela 21) e ausência de medições para outros poluentes, ocupa a segunda posição. Além disso, a ausência de monitoramento para SO_2 , NO_2 , O_3 e CO nessas regiões dificulta uma avaliação mais abrangente de sua qualidade do ar.

Apesar de conformidades satisfatórias em SO_2 , NO_2 , O_3 e CO, o Vale do Rio Doce apresenta baixa conformidade para $PM_{2.5}$ (71,6%; Tabela 21) e não atende aos padrões anuais. Isso o destaca como a terceira prioridade. A Metropolitana, embora tenha resultados semelhantes ao Vale do Rio Doce, apresenta índices ligeiramente melhores para PM_{10} e $PM_{2.5}$, mas também não atende aos padrões anuais. Por outro lado, a Zona da Mata demonstra o melhor desempenho, com elevados percentuais de conformidade para PM_{10} (99%; Tabela 21) e $PM_{2.5}$ (97,5%; Tabela 21), apesar da ausência de medições para outros poluentes.

Conclui-se que a Norte de Minas e a Noroeste devem ser as áreas prioritárias para ações de gestão da qualidade do ar. Recomenda-se também ampliar as redes de monitorização em todas as regiões, especialmente para PM_{10} e $PM_{2.5}$ nos padrões anuais, e incluir os poluentes ainda não monitorados.

6 CONCLUSÃO

A comparação entre os padrões do CONAMA, COPAM, União Europeia, USEPA e as recomendações da OMS permitiu uma avaliação abrangente do nível de poluição atmosférica e dos desafios enfrentados pelas diferentes regiões.

Os resultados obtidos demonstraram que, de maneira geral, as concentrações de poluentes, especialmente PM_{10} e $PM_{2.5}$, estão em conformidade com os limites estabelecidos pelas legislações nacionais (CONAMA e COPAM). No entanto, ao considerar os padrões mais rigorosos da União Europeia e, principalmente, da OMS, observou-se que algumas regiões apresentaram dificuldades em atender a esses critérios, revelando que há espaço para aprimoramento nas medidas de controle da poluição.

A análise regional evidenciou disparidades significativas. Regiões como a Metropolitana e o Vale do Rio Doce apresentaram maior variabilidade nas concentrações de poluentes, enquanto a Zona da Mata manteve resultados mais homogêneos e estáveis. A ausência de medições contínuas de alguns poluentes, como SO_2 e NO_2 , em determinadas regiões, também foi um fator limitante para uma avaliação mais completa, reforçando a necessidade de ampliação da rede de monitoramento ambiental.

Outro ponto relevante foi a análise estatística das concentrações, que revelou picos esporádicos em algumas regiões, mesmo com altas taxas de conformidade nas medições diárias. Esse cenário indica que há episódios de poluição que podem representar riscos à saúde pública e exigem atenção.

Como contribuição prática, este trabalho fornece subsídios para a formulação de políticas públicas mais eficazes, orientadas para a redução da poluição atmosférica em Minas Gerais. A análise comparativa das legislações destaca a necessidade de priorizar os padrões mais restritivos da OMS, particularmente para as concentrações anuais de PM_{10} e $PM_{2.5}$, devido aos baixos índices de conformidade registrados em todas as regiões avaliadas. Dessa forma, o estudo aponta a importância de focar ações em regiões mais vulneráveis, como o Norte de Minas, Noroeste e Vale do Rio Doce, que apresentaram os menores percentuais de conformidade em padrões diários e anuais. Ademais, a implementação de estratégias específicas, como a redução de emissões de poeira fugitiva, o controle do tráfego em vias não pavimentadas e a modernização de fontes móveis e industriais, pode contribuir significativamente para melhorar a qualidade do ar e atender às recomendações internacionais.

Dentre as limitações do estudo, destaca-se a ausência de dados em algumas regiões, o que compromete uma avaliação completa do estado. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a expansão do monitoramento de poluentes em áreas com menor cobertura, além do aprofundamento na análise dos impactos da poluição atmosférica na saúde da população.

Por fim, este estudo reforça a importância do monitoramento contínuo e da adoção de padrões mais rigorosos para garantir a proteção ambiental e a qualidade de vida da população mineira.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA MINAS. **Feam abre consulta pública para planejamento de melhorias da qualidade do ar em Minas**, 2023. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/feam-abre-consulta-publica-para-planejamento-de-melhorias-da-qualidade-do-ar-em-minas>. Acesso em: 19 ago. 2024.

AGUILERA, R.; CORRINGHAM, T. W.; GERSHUNOV, A.; BENMARHIA, T. **Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California**. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 1493, 5 mar. 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-21708-0.

ALMEIDA, J.; SILVA, A.; SANTOS, T. **The Role of Air Quality Monitoring in Urban Health: Insights from Brazilian Cities**. *Urban Climate*, v. 32, p. 100623, 2020.

ASHMORE, M. **Assessing the future global impacts of ozone on vegetation**. Plant, Cell & Environment, v. 28, p. 949-964, 2005.

AZUAGA, D. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

BABBIE, E. **The Practice of Social Research**. 13th ed. Belmont, CA: Wadsworth, Cengage Learning, 2013.

BOARI, Arthur; PEDRUZZI, Rizzieri; VIEIRA-FILHO, Marcelo. **Air pollution trends and exceedances: ozone and particulate matter outlook in Brazilian highly urbanized zones**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 195, p. 1058, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11654-3>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRANDÃO, R.; FOROUTAN, H. **Air Quality in Southeast Brazil during COVID-19 Lockdown: A Combined Satellite and Ground-Based Data Analysis**. Atmosphere, v. 12, n. 5, p. 583, 2021. DOI: 10.3390/atmos12050583. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos12050583>. Acesso em: 1 set. 2024.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Institui a Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 11 jun. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 5, de 15 de junho de 1989**. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 jun. 1989.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990**. Estabelece padrões de qualidade do ar no Brasil e define métodos de amostragem e análise de poluentes atmosféricos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 jun. 1990.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Compromisso pela Qualidade do Ar e Saúde Ambiental**. Brasília, DF, 2009. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/compromisso2_163.pdf. Acesso em: 5 jun. 2024.

BRASIL. **Relatório da Delegação do Brasil à Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente**. Volume I. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2013/12/estocolmo_72_Volume_I.pdf. Acesso em: 5 jun. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 nov. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Guia técnico para qualidade do ar**. Brasília: MMA, 2019.

BRASIL. **Frota de Veículos – 2020 e 2021**. Ministério da Infraestrutura, Brasil, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran?b_start:int=20. Acesso em: 12 jul. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024**. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Revoga os arts. 1º ao 8º, os arts. 12 a 14 e o Anexo I da Resolução Conama nº 491, de 19 de novembro de 2018; e os itens 2.2.1 e 2.3 da Resolução Conama nº 5, de 15 de junho de 1989. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 jul. 2024a. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 17 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Saúde e Meio Ambiente discutem estratégias para enfrentamento à poluição do ar**. Agência Brasil, 2024b. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202408/saude-e-meio-ambiente-discutem-estrategias-para-enfrentamento-a-poluicao-do-ar#:~:text=O%20Brasil%20tem%20avan%C3%A7ado%20na,de%20descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20e%20cuidados%20clim%C3%A1ticos>. Acesso em: 04 set. 2024.

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, 2024c.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Qualidade do Ar**. 2024?. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>. Acesso em: 11 jun. 2024.

BRITO, J.; RIZZO, L. V.; HERCKES, P.; VASCONCELLOS, P. C.; CAUMO, S. E. S.; FORNARO, A.; YNOUE, R. Y.; ARTAXO, P.; ANDRADE, M. F. **Physical-chemical characterisation of the particulate matter inside two road tunnels in the São Paulo Metropolitan Area**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 13, n. 24, p. 12199-12213, 2013.

CASTRO, A. H. S.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. M. **Qualidade do ar – parâmetros de controle e efeitos na saúde humana – uma breve revisão**. Holos, v. 29, n. 5, p. 107-121, 2013.

CESARI, D.; DE BENEDETTO, G. E.; BONASONI, P.; BUSETTO, M.; DINOI, A.; MERICO, E.; CHIRIZZI, D. **Seasonal variability of PM₁₀ composition and sources in an urban background site in Southern Italy**. Atmospheric Research, v. 170, p. 168-179, 2016. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.11.001.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Padrões de qualidade do ar. São Paulo**, 2013. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 4 set. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório Anual de Qualidade do Ar**. São Paulo: CETESB, 2024.

CHUNGSANGUNSIT, T.; GHEEWALA, S. H.; PATUMSAWAD, S. **Emission assessment of rice husk combustion for power production**. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 53, p. 1070, 2009.

CLARITY. **The new WHO air quality guidelines and how they compare with air pollution regulations around the world.** *Clarity*, 2021. Disponível em: <https://www.clarity.io/blog/the-new-who-air-quality-guidelines-and-how-they-compare-with-air-pollution-regulations-around-the-world>. Acesso em: 1 set. 2024.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air pollution control: A design approach.** Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc, 2002. p. 738.

CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches.** 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014.

DERISIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 228 p.

DESOUZA, P.; KAHN, R.; STOCKMAN, T.; OBERMANN, W.; CRAWFORD, B.; WANG, A.; CROOKS, J.; LI, J.; KINNEY, P. **Calibrating networks of low-cost air quality sensors.** *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 15, p. 6309-6328, 2022. DOI: 10.5194/amt-15-6309-2022.

DUCHIADE, M. P. **Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão.** *Caderno de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 3, p. 311-330, jul./set. 1992.

USEPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guia para a Qualidade do Ar.** Washington, D.C.: USEPA, 2021.

USEPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Overview of the Clean Air Act and Air Pollution.** 2024a. Disponível em: <https://www.USEPA.gov/clean-air-act-overview>. Acesso em: 8 jul. 2024.

USEPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **NAAQS Table.** 2024b. Disponível em: <https://www.USEPA.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acesso em: 8 jul. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Council Directive 80/779/EEC of 15 July 1980 on air quality limit values and guide values for sulfur dioxide and suspended particulates.** 1980. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A31980L0779>. Acesso em: 1 set. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Council Directive 85/203/EEC of 7 March 1985 on air quality standards for nitrogen dioxide.** 1985. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:31985L0203>. Acesso em: 1 set. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Parliament Council Conciliation Committee Agreement on ozone in ambient air.** 2001. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/PRES_01_438. Acesso em: 1 set. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2008/50/EC.** 2008. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>. Acesso em: 17 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Zero Pollution Action Plan**, 2021. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en. Acesso em: 8 jul. 2024.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Relatório Anual de Qualidade do Ar, 2022**. Disponível em: <https://www.feam.br/qualidade-do-ar/-relatorios-anuais-de-qualidade-do-ar>. Acesso em: 11 jun. 2024.

FERRAZ, S. **Responsabilidade civil por dano ecológico: Civil liability for ecologic damage**. Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura | RDAI, São Paulo: Thomson Reuters | Livraria RT, v. 2, n. 4, p. 409-421, 2018. DOI: 10.48143/rdai/04.sf2. Disponível em: <https://www.r dai.com.br/index.php/rdai/article/view/127>. Acesso em: 11 jun. 2024.

FERREIRA, A.; SOUZA, L. **Policy Implementation for Air Quality Control in Brazil**. Environmental Policy, v. 28, n. 3, p. 302-310, 2021.

FERREIRA, C. C. M.; OLIVEIRA, D. E. **Estimativa da poluição veicular e qualidade do ar nas principais vias do sistema viário da região central da cidade de Juiz de Fora-MG**. Revista do Departamento de Geografia, v. 32, p. 98-114, 2016. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.117682. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.117682>. Acesso em: 1 set. 2024.

FREITAS, C. U.; JUNGER, W.; LEON, A. P.; GRIMALDI, R.; SILVA, M. A. F. R.; GOUVEIA, N. **Poluição do ar em cidades brasileiras: selecionando indicadores de impacto na saúde para fins de vigilância**. Epidemiologia e Serviços de Saúde, v. 22, n. 3, p. 445–454, 2013.

GBD 2019 Risk Factors Collaborators. **Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019**. Lancet, v. 396, n. 10258, p. 1223-1249, 2020. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2.

GOUVEIA, N.; LEON, A. P. S.; JUNGER, W.; LINS, J. D. F.; FREITAS, C. U.; MARTINS, L. C.; MARCILIO, I. O. **Air pollution and the impacts on health in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, in the state of Minas Gerais, Brazil**. Ciência & Saúde Coletiva, v. 24, n. 10, p. 3773-3781, 2019. DOI: 10.1590/1413-812320182410.29432017.

HEALD, C. L.; SPRACKLEN, D. V. **Land Use Change Impacts on Air Quality and Climate**. Chemical Reviews, 2015. Disponível em: <https://cgcs.mit.edu/publications/journal-article/land-use-change-impacts-air-quality-and-climate>. Acesso em: 1 set. 2024.

HOLST, A. **Clean Air Act (CAA)**. Encyclopaedia Britannica, 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/Clean-Air-Act-United-States-1970>. Acesso em: 8 jul. 2024.

IDARRAGA, M. A.; GUERRERO, J. S.; MOSLE, S. G.; MIRALLES, F.; GALOR, A.; KUMAR, N. **Relationships between short-term exposure to an indoor environment and dry eye (DE) symptoms**. Journal of Clinical Medicine, v. 9, n. 5, p. 1316, 2020. DOI: 10.3390/jcm9051316. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0383/9/5/1316>. Acesso em: 1 set. 2024.

IRENO, P. **Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos em São José da Lapa, Minas Gerais**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 4, p. 623-635, 2017. Disponível em: <https://www.revistasbmet.org.br/rbmet/article/view/618>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. **Human health effects of air pollution**. Environmental Pollution, v. 151, n. 2, p. 362-367, 2008. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.06.012.

KIM, K. H.; KABIR, E.; KABIR, S. **A review on the human health impact of airborne particulate matter**. Environment International, v. 74, p. 136-143, 2015. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005.

LAWRENCE, A.; KHAN, T.; AZAD, I. **Indoor air quality assessment and its impact on health in context to the household conditions in Lucknow**. Global NEST Journal, v. 22, p. 28-41, 2019.

LEITE, N. O. **Modelagem estatística da relação entre poluição atmosférica e mortalidade por doenças respiratórias**. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2005. p. 64.

LIKENS, G. E.; DRISCOLL, C. T.; BUSO, D. C. **Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem**. Science, v. 272, n. 5259, p. 244-246, 1996.

LSA GLOBAL. **The Importance of Current State Analysis During Change**. 2024. Disponível em: <https://lsaglobal.com/blog/the-importance-of-current-state-analysis-during-change/#:~:text=Getting%20the%20current%20state%20analysis,root%20causes%2C%20not%20just%20symptoms>. Acesso em: 1 set. 2024.

MARGARITIS, D.; KERAMYDAS, C.; PAPACHRISTOS, I.; LAMBROPOULOU, D. **Calibration of Low-Cost Gas Sensors for Air Quality Monitoring**. Aerosol and Air Quality Research, v. 21, 2021. DOI: 10.4209/aaqr.210073. Disponível em: <https://doi.org/10.4209/aaqr.210073>. Acesso em: 1 set. 2024.

MARKOZANNES, G.; PANTAVOU, K.; RIZOS, E. C.; SINDOSI, O. A.; TAGKAS, C.; SEYFRIED, M.; SALDANHA, I. J.; HATZIANASTASSIOU, N.; NIKOLOPOULOS, G. K.; NTZANI, E. **Outdoor air quality and human health: An overview of reviews of observational studies**. Environmental Pollution, v. 306, p. 01-14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119309>.

MEDEIROS, A. M. A. **A qualidade do ar no Brasil – ordem e progresso?** In: NUNES, Matheus Simões (Org.). Estudos em Direito Ambiental: Desenvolvimento, desastres e regulação. Campina Grande: Editora Licuri, 2022. p. 77-89.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). **Deliberação Normativa nº 01, de 26 de maio de 1981**. Estabelece padrões de qualidade do ar para o Estado de Minas Gerais. *Diário do Executivo - Minas Gerais*, Belo Horizonte, 26 maio 1981.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Minas Gerais ganha novas estações de monitoramento da qualidade do ar**. 2010. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1173-minas-gerais-ganha->

novas-estacoes-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar#:~:text=Os%20dados%20t%C3%A9cnicos%20s%C3%A3o%20trabalhados,site%20www.feam.br.&text=Acesse%20para%20mais%20not%C3%ADcias%20do,.youtube.com/governo-deminasgerais. Acesso em: 1 set. 2024.

MINAS GERAIS. **Geografia: Localização Geográfica**. 2022. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pagina/geografia>. Acesso em: 18 jan. 2025.

MINAS GERAIS. **Boletim da Qualidade do Ar**. 2023a. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/servico/acessar-boletim-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 07 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). 2023b. Disponível em: <http://www.feam.br>. Acesso em: 07 ago. 2024.

MINAS GERAIS. Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). **Qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: IEMA, 2023c. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/qualidade-do-ar-na-regiao-metropolitana-de-belo-horizonte>. Acesso em: 04 set. 2024.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). **Deliberação Normativa nº 248, de 23 de novembro de 2023**. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar para o Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo - Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023d.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Dados do monitoramento contínuo da qualidade do ar**. 2024. Disponível em: <https://meioambiente.mg.gov.br/w/-dados-do-monitoramento-continuo-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 3 jan. 2025.

MINAS GERAIS. Divisão Regional (IBGE). **Mesorregiões [Shape file]**. 2025a. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 3 jan. 2025.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Qualidade do Ar (SEMAD) [Shape file]**. 2025b. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 3 jan. 2025.

MIT NEWS. **Coordinating climate and air-quality policies to improve public health**. 2022. Disponível em: <https://news.mit.edu/2022/coordinating-climate-air-quality-policies-to-improve-public-health-1026>. Acesso em: 1 set. 2024.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)**, 2021. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

MOLINA, M. J.; MOLINA, L. T. **Megacities and atmospheric pollution**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 54, n. 6, p. 644-680, 2004. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470936.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 205-233.

NEVES, C. J. T.; SILVA, M. L.; LIMA, J. R.; SILVA, A. C.; COSTA, A. G.; ARAÚJO, R. S. **Avaliação da poluição atmosférica em uma área urbana na cidade de Fortaleza, Ceará, Brasil**. Revista AIDIS de Engenharia e Ciências Ambientais: Pesquisa, Desenvolvimento e Prática, v. 16, n. 3, p. 888-905, dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.3.83568>.

O'LEARY, H.; PARR, S.; EL-SAYED, M. MH. **The breathing human infrastructure: Integrating air quality, traffic, and social media indicators**. Science of the Total Environment, v. 827, p. 01-09, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154209>.

OMS. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE . **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: material particulado (PM_{2.5} e PM₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono**. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2021. Disponível em: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Novas diretrizes globais de qualidade do ar da OMS visam salvar milhões de vidas**. 22 set. 2021. Disponível em: [https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da#:~:text=Quase%2080%25%20das%20mortes%20relacionadas,%2C%E2%82%85\)%%20e%20grandes%20popula%C3%A7%C3%B5es](https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da#:~:text=Quase%2080%25%20das%20mortes%20relacionadas,%2C%E2%82%85)%%20e%20grandes%20popula%C3%A7%C3%B5es). Acesso em: 4 set. 2024.

PARK, Y. M.; KWAN, M.-P. **Individual exposure estimates may be erroneous when spatiotemporal variability of air pollution and human mobility are ignored**. Health & Place, v. 43, p. 85-94, 2017.

PATTON, M. Q. **Qualitative Research & Evaluation Methods**. 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2015.

PEREIRA, F.; ALMEIDA, J.; SOUZA, R. **Evaluation of Air Quality Monitoring Networks in Brazil: A Focus on Minas Gerais**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 194, n. 2, p. 134-142, 2022.

POPE III, C. A.; BURNETT, R. T.; THUN, M. J.; CALLE, E. E.; KREWSKI, D.; ITO, K.; THURSTON, G. D. **Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution**. Journal of the American Medical Association (JAMA), v. 287, n. 9, p. 1132-1141, 2002. DOI: 10.1001/jama.287.9.1132.

POPE, C. A.; DOCKERY, D. W. **Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 56, n. 6, p. 709-742, 2006. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.

QUEIROZ, L. R.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, L. G. T. **Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas,**

Minas Gerais. Química Nova, v. 30, n. 5, p. 1173-1176, 2007. DOI: 10.1590/S0100-40422007000500035.

RADICCHI, A. L. A. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população. Revista Brasileira de Estudos de População, v. 29, n. 1, p. 195–198, 2012.

RAPOSO, A.; LOPES DE ASSIS, W.; RAPOSO NORTON, S. Revisão bibliográfica dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde humana e uma breve análise crítica da atual legislação brasileira sobre os padrões de qualidade do ar (CONAMA 491/2018). Cadernos do Leste, v. 21, n. 21, 2021.

RAUB, J. A.; MATHIEU-NOLF, D.; HAMPSON, N. B.; THOM, S. R. Carbon Monoxide Poisoning: A Public Health Perspective. Toxicology, v. 145, n. 1, p. 1-14, 2000. DOI: 10.1016/S0300-483X(99)00217-4.

RIBEIRO, A. K. C.; GALVÃO, E. S.; ALBUQUERQUE, T. T. de A. Air Quality Characterization and Trend Analysis in a Brazilian Industrialized Metropolitan Area in the Period from 1995 to 2022. Atmosphere, v. 14, p. 1792, 2023. DOI: 10.3390/atmos14121792. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos14121792>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ROSSO, I. L. N. As emissões de poluentes atmosféricos em empreendimentos de incineração de resíduos sólidos do estado de Minas Gerais: Análise crítica do atendimento aos padrões legais. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: https://repositorio.cefetmg.br/bitstream/123456789/10000/1/TCC_IARA-LEMO-NASCIMENTO-ROSSO.pdf. Acesso em: 12 ago. 2024.

SANTOS, F. S.; MIRANDA, G. A.; CARVALHO, A. N. M.; CARVALHO, V. S. B.; ALBUQUERQUE, T. T. A. Regulated air pollutant emissions from higher emitters stationary sources in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. SciELO, 2019. Disponível em: https://scielo.figshare.com/articles/dataset/REGULATED_AIR_POLLUTANT_EMISSIONS_FROM_HIGHER_EMITTERS_STATIONARY_SOURCES_IN_BELO_HORIZONTE_MI_NAS_GERAIS_BRAZIL/9927758.

SANTOS, F. S.; PINTO, J. A.; MACIEL, F. M.; HORTA, F. S.; ALBUQUERQUE, T. T. de A.; ANDRADE, M. de F. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (PM_{2.5}) em Belo Horizonte, MG. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 2, p. 319-329, mar./abr. 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019174045. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/4kSVDKgVcYnwNFt5R6Yb5pp/>. Acesso em: 1 set. 2024.

SANTOS, R. S.; SILVA, G. A.; OLIVEIRA, M. F. Impacto da poluição atmosférica na saúde respiratória em Minas Gerais: uma análise de séries temporais. Revista Brasileira de Epidemiologia, v. 25, n. 1, e220015, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-328X/10/7/1012>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SÃO PAULO. **Qualidade do ar no estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2024/08/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SCHIFFTNER, K. C. **Air pollution control equipment selection guide**. Lewis Publishers, 2002. p. 228.

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

SICILIANO, B.; DANTAS, G.; DA SILVA, C. M.; ARBILLA, G. **The Updated Brazilian National Air Quality Standards: A Critical Review**. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 31, n. 3, p. 603-623, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190212>. Acesso em: 4 set. 2024.

SILVA, M. A. N. da; QUADROS, A. L. de. **Ensino por Temas: A Qualidade do Ar Auxiliando na Construção de Significados em Química**. Química Nova na Escola, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 40-46, fev. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20160007>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SOUZA, A. F. E.; SILVA, R. M. C.; PEREIRA, L. M.; ALBUQUERQUE, A. F.; POZZA, S. A. **Análise química e determinação de fontes poluentes em amostras de material particulado MP10 e PTS**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2017, São Paulo. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. Disponível em: https://www.abes-dn.org.br/analseletronicos/29_Download/TrabalhosCompletoPDF/X-052.pdf. Acesso em: 19 jan. 2025.

SOUZA, T. L. de; MORAIS, C. R. de. **Avaliação da Qualidade do Ar na Cidade de Coromandel, Minas Gerais, Brasil**. GETEC, v. 19, p. 90-102, 2024. Disponível em: <https://www.revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/3529/2186>. Acesso em: 19 ago. 2024.

THEODORE, L. **Air pollution control equipment calculations**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2008. p. 574.

TO, T.; ZHU, J.; LARSEN, K.; SIMATOVIC, J.; FELDMAN, L.; RYCKMAN, K.; GERSHON, A.; LOUGHEED, M. D.; LICSKAI, C.; CHEN, H.; VILLENEUVE, P. J.; CRIGHTON, E.; SU, Y.; SADATSAFAVI, M.; WILLIAMS, D.; CARLSTEN, C.; CANADIAN RESPIRATORY RESEARCH NETWORK. **Progression from Asthma to Chronic Obstructive Pulmonary Disease. Is Air Pollution a Risk Factor?** American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, v. 194, n. 4, p. 429-438, 2016. DOI: 10.1164/rccm.201510-1932OC.

VORMITTAG, E. da M. P. A. de A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; NETO, H. W.; SALDIVA, P. H. N. **Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. Estudos Avançados, v. 35, n.

102, p. 7-30, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>. Acesso em: 08 jul. 2024.

WARK, K.; WARNER, C. F.; DAVIS, W. T. **Air pollution: Its origin and control**. 3rd ed. Addison Wesley Longman, Inc, 1998. p. 573.

WATSON, JOHN G.; CHOW, JUDITH C.; LOWENTHAL, DOUGLAS H.; CHEN, LAWRENCE-WANG A.; SHAW, STEPHEN; EDGERTON, ERIC S.; BLANCHARD, CHARLES L. **PM_{2.5} source apportionment with organic markers in the Southeastern Aerosol Research and Characterization (SEARCH) study**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 65, n. 9, p. 1104-1118, 2015. DOI: 10.1080/10962247.2015.1063551.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project: Technical Report**. 2013.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Global Air Quality Guidelines**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO: ANÁLISE ESTATÍSTICA E CONFORMIDADE REGIONAL

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1KX4mQNf7W-fNbb12nmCX0JqoCwXwmFQQ/edit?usp=sharing&ouid=117671418001358764970&rtpof=true&sd=true>