

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE EMISSÕES VEICULARES E O IMPACTO NA QUALIDADE DO AR EM BELO HORIZONTE: O PAPEL DOS VEÍCULOS PESADOS DA MINERAÇÃO

Grazieli Tavares Amoglia*

Paloma Moreira Félix*

Lincoln Lucílio Romualdo*

Resumo: Este trabalho, orientado pelo Prof. Dr. Lincoln Lucílio Romualdo, investiga a composição química das emissões veiculares e seu impacto na qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), com foco nos veículos pesados utilizados na mineração. A poluição atmosférica veicular é um problema de saúde pública nas grandes cidades, e na RMBH, a matriz de poluição é complexa, influenciada tanto pelo tráfego urbano quanto pelas atividades industriais e extrativas. O estudo realiza uma revisão bibliográfica sobre os Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) e o Material Particulado (MP) emitidos por veículos movidos a diesel, gasolina e etanol, destacando a contribuição significativa dos veículos pesados da mineração, que operam majoritariamente com diesel. A pesquisa também aborda as principais técnicas analíticas utilizadas na caracterização dessas emissões, como a cromatografia gasosa (CG), eficaz na separação e análise de VOCs, e a análise gravimétrica, utilizada para quantificar MP por meio da diferença de massa em filtros. A relevância do estudo reside na sua capacidade de fornecer subsídios para políticas públicas voltadas ao controle da qualidade do ar em regiões urbanas com forte presença industrial, contribuindo para estratégias de mitigação da poluição e promoção da saúde ambiental na RMBH.

Palavras-chave: VOCs, material particulado, cromatografia gasosa, gravimetria, combustível.

INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um dos problemas ambientais mais críticos que existem nas grandes cidades, está diretamente relacionada ao desenvolvimento de doenças respiratórias e cardíacas, além de impactar negativamente a qualidade de vida das

peessoas. Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, esse problema é agravado pelo alto volume de veículos nas vias e pelas atividades das indústrias e mineração, o que aumenta consideravelmente os poluentes atmosféricos, especialmente o material particulado e os óxidos de nitrogênio.

Entre as principais fontes de poluição, os veículos de grande porte que utilizam diesel, os quais contribuem de forma considerável para a liberação de compostos orgânicos voláteis (COV), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado. A combinação dessas emissões com as particularidades geográficas da Região Metropolitana de Belo Horizonte, caracterizada por um relevo montanhoso e frequentes ocorrências de inversão térmica, facilita o acúmulo de poluentes e dificulta sua dispersão, tornando mais desafiador o controle da qualidade do ar.

Neste contexto, este estudo visa examinar, por intermédio de uma revisão bibliográfica estruturada, a composição química das emissões de veículos, focando especialmente nos veículos pesados utilizados na mineração. Além disso, pretende discutir os efeitos dessas emissões sobre a qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Ao consolidar e avaliar criticamente as informações existentes, a pesquisa almeja oferecer subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e métodos de monitoramento e controle ambiental mais eficazes.

1. INTRODUÇÃO À QUALIDADE DO AR E À POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

1.1 Conceitos Gerais

A atmosfera da Terra é composta por nitrogênio, oxigênio e pequenas quantidades de outros gases. A poluição do ar ocorre quando substâncias entram nesse ambiente em quantidades que ameaçam a saúde humana, o meio ambiente ou o bem-estar da população.

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) e a Resolução CONAMA nº 506/2024, a poluição do ar é definida pela presença de contaminantes em níveis prejudiciais, como gases, material particulado e algumas formas de energia. Os principais poluentes atmosféricos incluem o monóxido de carbono (CO), o dióxido

de enxofre (SO_2), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o ozônio troposférico (O_3), os compostos orgânicos voláteis (COV) e o material particulado, este último sendo classificado conforme o seu tamanho aerodinâmico, como por exemplo, PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$.

As partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) são vistas como mais perigosas porque, devido ao seu tamanho reduzido, conseguem alcançar o sistema respiratório e chegar até os alvéolos pulmonares, o que eleva os riscos à saúde (CETESB, 2023). Além disso, as partículas finas atmosféricas podem conter metais pesados, cuja toxicidade já é amplamente conhecida e tem sido associada a uma série de efeitos insalubres na saúde humana (Zhang et al., 2019).

1.2 Fontes de Poluição do Ar

As emissões na atmosfera podem ser provenientes de fontes naturais ou antrópicas (Jacob, 1999). A indústria, o transporte e a mineração são as principais fontes antrópicas. No Brasil, o transporte rodoviário é uma das principais fontes de poluentes nas áreas urbanas (IEMA, 2021). Os veículos pesados a diesel são grandes emissores de material particulado fino ($\text{MP}_{2.5}$), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros compostos nocivos.

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, informações apontam que o tráfego elevado de caminhões, combinado com a presença de atividades de mineração, contribui de maneira significativa para o crescimento das concentrações de partículas e gases no ar (FEAM, 2022).

1.3 Efeitos da Poluição do Ar na Saúde e no Meio Ambiente

A poluição atmosférica é reconhecida pela Organização Mundial da Saúde como um dos principais riscos ambientais à saúde humana. A exposição prolongada aos poluentes está associada ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, ao desenvolvimento de processos inflamatórios e à redução da função pulmonar. Entre os poluentes que apresentam maior impacto à saúde, destacam-se o material particulado fino ($\text{MP}_{2.5}$), o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o ozônio troposférico (O_3).

Do ponto de vista ambiental, a poluição do ar está relacionada a fenômenos como a chuva ácida, a degradação da cobertura vegetal, a erosão de materiais e a intensificação do aquecimento global. Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, as estações de monitoramento registram episódios recorrentes de elevação das concentrações de MP_{10} e $MP_{2,5}$, especialmente em áreas próximas a vias com elevada circulação de caminhões e regiões industriais.

1.4 Normas e Limites de Qualidade do Ar

O marco regulatório brasileiro para a qualidade do ar foi definido pela Política Nacional de Qualidade do Ar, instituída pela Lei nº 14.850/2024 e pelos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024. Esta regulamentação define padrões intermediários e finais em alinhamento com as recomendações da Organização Mundial da Saúde, com metas progressivas estabelecidas até o ano de 2044.

Os poluentes regulamentados são o MP_{10} , o $MP_{2,5}$, o dióxido de enxofre (SO_2), o dióxido de nitrogênio (NO_2), o ozônio (O_3), o monóxido de carbono (CO) e o chumbo (Pb). O monitoramento da qualidade do ar em Minas Gerais é baseado em estações automáticas onde a concentração desses poluentes é constantemente medida. Embora os níveis de SO_2 e CO pareçam diminuir devido ao uso de diesel S10 e à adoção de tecnologias veiculares mais eficientes, as concentrações de $PM_{2,5}$ permanecem acima dos valores recomendados, principalmente em áreas com tráfego intenso de veículos de grande porte (FEAM, 2022).

2. EMISSÕES VEICULARES E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

2.1 Formação de Poluentes Veiculares

A combustão incompleta de combustíveis fósseis é a principal causa das emissões veiculares. A formação de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), hidrocarbonetos e material particulado é favorecida por fatores como variações na carga do motor, qualidade do combustível, manutenção inadequada dos veículos e condições operacionais severas. Em áreas de mineração,

além dessas emissões, há aquelas resultantes do desgaste de pneus e freios, bem como da ressuspensão da poeira do solo.

2.2 Composição Química das Emissões Veiculares

motores a diesel se destacam pela liberação predominante dos seguintes contaminantes:

- CO, gerado pela combustão incompleta;
- NO_x, gerado em ambientes de altas temperaturas;
- SO₂, relacionado ao conteúdo de enxofre encontrado no óleo diesel;
- HC e COV, resultantes da evaporação e combustão parcial do combustível e;
- CO₂ o principal produto da combustão completa.

O material particulado liberado é formado por carbono orgânico, carbono elementar, metais, nitratos, sulfatos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Nas regiões de mineração, maiores concentrações de carbono negro e metais estão ligadas ao tráfego intenso de caminhões e ao estado das vias de circulação.

2.3 Fatores Determinantes das Emissões

Algumas variáveis influenciam nas emissões veiculares, entre elas destacam-se:

- o tipo de combustível utilizado (diesel, biodiesel, gasolina ou etanol);
- a idade da frota e o estado de manutenção dos veículos;
- as normas tecnológicas vigentes, como o PROCONVE e;
- as condições operacionais, incluindo carga transportada, topografia e presença de vias não pavimentadas.

3. VEÍCULOS PESADOS E O SETOR DE MINERAÇÃO

3.1 Caracterização dos Veículos Pesados de Mineração

O transporte de minério utiliza escavadeiras, carregadeiras e caminhões (rodoviários, articulados e fora de estrada). Esses equipamentos apresentam elevado consumo de combustível, influenciado pelo tipo de solo, aclives e condições de operação. Em geral, as escavadeiras costumam consumir aproximadamente 15 L/, enquanto os caminhões fora de estrada consomem 13 l/h (MATA, 2021).

O tipo de operação a ser realizada pelo equipamento influencia diretamente no perfil de consumo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Consumo de combustível com relação ao tipo de operação do equipamento

Equipamento	Operação/ Condição	Consumo
Escavadeira (hidráulica)	Carregamento de materiais de baixa densidade, desnecessária aplicação de grande força para escavação	Baixo
	Carregamento de materiais após detonação ou força moderada para escavação	Médio
	Escavação direta ou escavação pesada após detonação	Alto
Caminhões (fora de estrada)	Excelentes condições da estrada de transporte; baixo fator de carga; longos períodos de esperas ou atrasos.	Baixo
	Boas condições das estradas de transporte; fator de carga moderado; eficiência operacional normal, com ocasionais períodos de esperas ou atrasos.	Médio
	Condições ruins da estrada de transporte; fator de carga acima do recomendado; Alta eficiência de operação, com mínimos atrasos ou esperas.	Alto

Fonte: UZAN, 2020.

3.2 EMISSÕES ESPECÍFICAS DO TRANSPORTE DE MINÉRIO E AGREGADOS

As emissões na mineração incluem:

- partículas provenientes da combustão do diesel (fuligem, HPAs, sulfatos);

- partículas de ressuspensão (solo e poeira gerada no carregamento);
- partículas de desgaste de freio, responsáveis por parcela significativa do MP não proveniente de exaustão (WOO et al., 2022).

3.3 NORMAS E CONTROLE DE EMISSÕES EM FROTAS DE MINERAÇÃO

As emissões advindas das frotas de mineração em Minas Gerais são controladas por um conjunto de normas federais e estaduais.

Como parte da legislação federal pode-se citar a norma Conama 506/2024 que define os padrões nacionais de qualidade do ar e limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos, que são a base para a legislação estadual.

Além da norma Conama 506/2024, tem-se o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que visa estabelecer os limites e requisitos para emissões de fontes móveis.

Adicionalmente, pode-se citar as Normas Reguladoras de Mineração (NRM) que visam determinar as condições de operação das mineradoras bem como as condições de seus equipamentos e veículos de transporte.

No que tange às normas estaduais, tem-se a COPAM Nº 248/2023 que define os padrões da qualidade do ar para o estado de Minas Gerais e a COPAM nº 217/2017 que visa classificar empreendimentos de acordo com seu potencial poluidor, o que inclui a atividade de mineração.

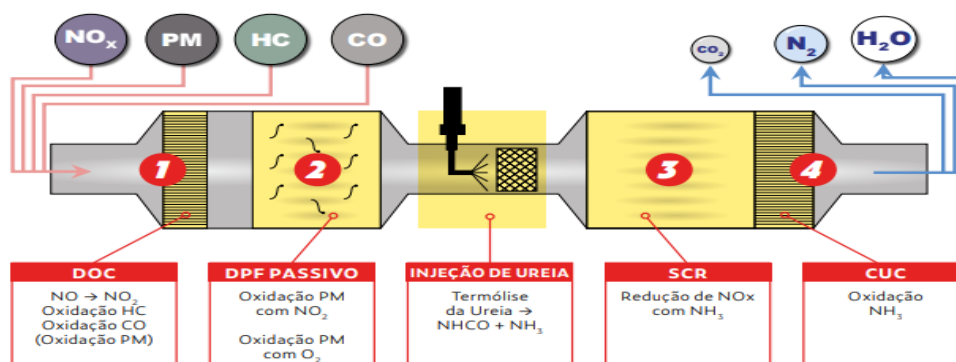
3.3.1 Tecnologias de redução de emissões (filtros, catalisadores, SCR)

A fim de atender os limites de emissões definidos pelas normas estaduais e federais, tecnologias têm sido implementadas ao longo dos anos com o intuito de reduzir a concentração de gases e partículas emitidos.

Dentre essas tecnologias se destacam o Catalisador de Oxidação de Diesel (DOC), Sistema de Redução Catalítica (SCR), Filtro de Partículas de Diesel (DPF),

Catalisador de Limpeza (CUC) e o sistema de injeção de ureia (FPT INDUSTRIAL, 2025).

Figura 1- Desenho esquemático referente ao funcionamento de um catalisador para veículos diesel



Fonte: FPT INDUSTRIAL, 2025.

Os gases advindos da queima do diesel são propagados no DOC onde os hidrocarbonetos (HC) e o monóxido de carbono (CO) são convertidos em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Posteriormente, os gases passam pelo DPF onde são retidas as partículas de carbono. Após esse processo, o gás é admitido no SCR onde é injetada a solução de ureia diluída, a ureia promove a redução do NO_x que resulta em nitrogênio livre e vapor d'água. Por fim, o CUC realiza a oxidação de amônia em excesso (FPT INDUSTRIAL, 2025).

3.3.2 Políticas de monitoramento e mitigação adotadas em minas e transportes

A fim de se reduzir o nível das emissões da operação das minas e dos meios de transporte por estas utilizados na movimentação e carregamento de minério, algumas medidas têm sido adotadas, como a quantificação de gases de efeito estufa por meio de inventários, tecnologias para captura de CO_2 , monitoramento e fiscalização das emissões em conformidade com as normas federais e estaduais, utilização de combustíveis menos nocivos ao meio ambiente, como o biodiesel ou implementação de veículos elétricos ou híbridos (FEAM, 2014).

4. QUALIDADE DO AR EM BELO HORIZONTE

4.1 Caracterização geográfica e meteorológica da cidade

Belo Horizonte apresenta relevo montanhoso e clima tropical, com estação seca no inverno. A topografia favorece episódios de inversão térmica, limitando a dispersão de poluentes, especialmente em áreas de vale e corredores rodoviários (FEAM, 2022).

4.2 Fontes Predominantes

A poluição do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte, deve-se principalmente às fontes móveis de poluição (automóveis, veículos comerciais leves, caminhões, ônibus e motocicletas) e à atividade industrial tendo-se como destaque as atividades mineradoras, petrolíferas e siderúrgicas (IEMA, 2021).

4.3 DADOS E ESTUDOS SOBRE A QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA

Por meio das estações de monitoramento de qualidade do ar, é possível realizar estudos e comparativos a fim de determinar se a qualidade do ar tem se mostrado dentro dos limites aceitáveis ou não.

Um estudo realizado pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), identificou que em 2021 o município de São José da Lapa obteve valor de MP_{10} de 71 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sendo que o valor permitido pela OMS é de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Concentrações anuais para MP_{10} , $MP_{2,5}$, O_3 , NO_2 e SO_2

Município	Estação	MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
São José da Lapa	Centro - MG (Ctr)	71	18	-	-	-
Brumadinho	Comunidade Córrego do Feijão (Fei)	26	-	-	-	-
Brumadinho	E.M. Pe Vicente Assunção (Ass)	29	-	85	-	-
Brumadinho	Parque da Cachoeira (Cac)	36	11	-	12	-

Município	Estação	MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
Betim	Centro Administrativo (Cad)	33	15	59	28	5
Betim	Bairro Jardim das Alterosas (Alt)	31	21	68	34	1
Ibirité	Bairro Cascata (Cas)	22	10	57	7	3
Ibirité	Bairro Petrovale (Pet)	20	17	70	13	11
Ibirité	Bairro Piratininga (Pir)	28	10	50	11	3
Belo Horizonte	Centro - Av. do Contorno (Con)	30	17	61	18	2
Belo Horizonte	PUC São Gabriel (Gab)	26	12	78	26	12
Vespasiano	Célvia (Clv)	27	10	-	-	-

Fonte: IEMA, 2021.

Os demais municípios monitorados também apresentaram valores acima do limite permitido pela Organização Mundial da Saúde.

Tomando-se como referência a Resolução CONAMA n° 506/2024, apenas os resultados obtidos para São José da Lapa e Brumadinho estariam fora dos limites de PI-2 que é de 35 µg/m³ para MP₁₀.

No que tange aos resultados de MP_{2,5} anuais, Betim, São José da Lapa, Ibirité e Belo Horizonte, apresentaram os maiores resultados encontrados entre os municípios monitorados. Com relação ao PI-2 da Conama 506/2024, somente Betim e São José da Lapa apresentaram resultados acima de 17 µg/m³ que é o valor permitido pela norma.

No que diz respeito à concentração média de ozônio anual (O₃), Brumadinho, Belo Horizonte e Ibirité apresentaram os maiores valores encontrados entre as áreas monitoradas.

Em relação ao dióxido de nitrogênio, os municípios de Betim e Belo Horizonte, obtiveram a maior concentração anual deste poluente. Em comparativo com a PI-2 da Resolução CONAMA n°506/2024, todos os municípios se encontram dentro do limite estabelecido que é de 50 µg/m³.

Com relação às emissões de SO₂, todos os municípios se encontram em conformidade com a OMS e ao PI-2 da Conama 506/2024.

A fim de se complementar esta pesquisa bibliográfica, foi feita uma consulta no portal MonitorAr da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) para fins comparativos. Com isso, foram consultados no portal as mesmas regiões em que se foi feito o estudo pela IEMA em 2021.

Os dados de algumas regiões e estações não foram encontrados como Brumadinho, Contagem e Vespasiano. As concentrações dos poluentes NO₂, SO₂, O₃ não estavam disponíveis para consulta. Diante disso, o comparativo foi realizado apenas para os níveis de material particulado.

As informações foram consultadas entre os dias 22/11/2025 a 23/11/2025, cujos valores foram obtidos por meio da concentração média em 24 horas e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Concentração média em 24h de MP₁₀ e MP_{2,5}

Município	Estação	MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)
Betim	Centro Administrativo (Cad)	28	9
Betim	Bairro Jardim das Alterosas (Alt)	26	29
São José da Lapa	Centro - MG (Ctr)	46	37
Ibirité	Bairro Cascata (Cas)	36	23
Ibirité	Bairro Piratininga (Pir)	31	26
Belo Horizonte	Centro - Av. do Contorno (Con)	80	15

Fonte: MonitorAr, 2025.

Belo Horizonte e São José da Lapa apresentaram os maiores valores para MP₁₀ e Betim e São José da Lapa obtiveram os maiores valores para MP_{2,5}. Todos os municípios se encontram dentro dos limites aceitáveis de PI-2 Conama 406/2024.

É possível verificar que tanto no estudo realizado no ano de 2021, quanto ao comparativo feito em 24h o município de São José da Lapa apresentou os maiores valores para MP₁₀ e MP_{2,5}. O município em questão possui grande atividade extrativa de calcário o que o torna um potencial poluidor.

A cidade de Betim que também apresentou valores altos para material particulado, é conhecida por sua intensa atividade siderúrgica.

Com relação à Belo Horizonte, a presença de indústrias e o trânsito de veículos contribuem para o valor elevado de material particulado.

4.4 COMPARATIVO ENTRE BELO HORIZONTE E OUTRAS CAPITAIS

A concentração de poluentes pode estar relacionada a diversas fontes como fontes fixas como indústrias ou móveis como veículos. Para se determinar onde atuar para reduzir as emissões, estudos têm sido realizados para avaliar a contribuição de cada tipo de fonte poluidora.

Andrade et. al., 2010, realizou um estudo em seis cidades brasileiras a fim de comparar o potencial poluidor de cada cidade e determinar as principais fontes de poluição.

Por meio da pesquisa, Andrade et al., 2010, identificou que as concentrações médias de $MP_{2,5}$ nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre e Recife foram de 28, 17,2, 14,7, 14,4, 13,4 e 7,3 $\mu g/m^3$, respectivamente.

Além das concentrações, foram identificados os principais fatores que contribuíam para a concentração de $MP_{2,5}$, como descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Contribuição das fontes de emissão na concentração de $MP_{2,5}$

Cidade	Veículos pesados	Solo, poeiras, obras	Veículos leves	Indústria, caldeiras, aerossóis secundários	Não determinado
São Paulo	28%	13%	13%	12%	34%
Rio de Janeiro	40%	14%	11%	18%	17%
Belo Horizonte	13%	44%	4%	12%	27%
Curitiba	-	40%	15%	16%	29%
Porto Alegre	-	35%	2%	33%	30%
Recife	29%	8%	8%	24%	31%

Fonte: ANDRADE et al, 2010.

Segundo Andrade et. al. 2010, pelo fato de Belo Horizonte estar localizada em Minas Gerais, onde a mineração é a principal atividade econômica do estado, a cidade apresenta um valor superior em porcentagem (44%) no que diz respeito à movimentação de solos e poeiras em comparação às outras cidades.

5. LACUNAS DE PESQUISA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

5.1 SÍNTESE CRÍTICA DAS PESQUISAS ANTERIORES

Estudos nacionais e internacionais indicam que as emissões veiculares constituem a principal fonte de material particulado fino ($MP_{2,5}$) e de outros poluentes atmosféricos em áreas urbanas (Andrade et al., 2012; Torres et al., 2020; WHO, 2021). No Brasil, pesquisas realizadas em grandes centros urbanos demonstram que o setor de transporte, especialmente os veículos pesados movidos a diesel, é responsável por parcela significativa das emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (CETESB, 2023; Seibert; Pinto; Monte, 2022).

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, estudos desenvolvidos pela FEAM (2022) e por Ribeiro et al. (2023) registram episódios recorrentes de excedência dos padrões de MP_{10} e $MP_{2,5}$, sobretudo em áreas próximas a eixos rodoviários e zonas minerárias, onde as características do relevo e a ocorrência de inversões térmicas favorecem o acúmulo de poluentes. Apesar dos avanços na caracterização das emissões, observa-se ainda uma expressiva variação metodológica entre os estudos, especialmente no que se refere às técnicas analíticas empregadas, como ICP-MS, XRF, TC/OC e GC-MS, o que limita comparações diretas e dificulta a construção de um diagnóstico nacional consistente (Freitas; Solci, 2009; Pereira et al., 2019).

Em âmbito internacional, pesquisas conduzidas em ambientes minerários indicam que operações a céu aberto geram partículas enriquecidas com metais traço e carbono elementar, provenientes tanto da combustão do diesel quanto da ressuspensão de poeira mineral (Gren et al., 2020; Freitas, 2021). No entanto, esses estudos ainda se apresentam de forma pontual e pouco articulada ao contexto urbano brasileiro, o que evidencia a necessidade de investigações mais integradas.

5.2 LACUNAS RELACIONADAS ÀS EMISSÕES DE VEÍCULOS PESADOS DE MINERAÇÃO

A análise crítica da literatura permite identificar lacunas relevantes no que se refere às emissões de veículos pesados utilizados na mineração, especialmente no contexto nacional. Entre os principais pontos observados, destacam-se:

1. Poucos estudos nacionais têm como foco específico as frotas pesadas da mineração, sendo comum que os inventários de emissões tratem os veículos a diesel de forma genérica, o que dificulta a identificação de assinaturas químicas específicas (Seibert; Pinto; Monte, 2022; FEAM, 2022).
2. Observa-se escassez de medições realizadas em condições reais de operação (RDE), uma vez que grande parte dos dados disponíveis ainda é oriunda de ensaios laboratoriais (CETESB, 2024).
3. Há carência de análises detalhadas de especiação química, incluindo carbono elementar (CE), carbono orgânico (COg), metais pesados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em emissões diretas associadas às rotas minerárias (Pereira et al., 2019; Silva et al., 2021).
4. Verifica-se baixa cobertura de monitoramento em corredores minerários, apesar da existência de estações de qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (FEAM, 2022).
5. Nota-se a ausência de estudos que integrem a composição química das emissões aos efeitos sobre a saúde humana, apesar da toxicidade reconhecida do $MP_{2,5}$ e de seus componentes (Arbex et al., 2012; WHO, 2021).

5.3 JUSTIFICATIVA PARA O ENFOQUE DO PRESENTE ESTUDO

Diante das lacunas identificadas, o presente estudo propõe-se a consolidar o conhecimento existente sobre a composição química das emissões de veículos pesados da mineração e a discutir seus impactos na qualidade do ar em Belo Horizonte. O enfoque adotado justifica-se por quatro aspectos principais:

- **Científico:** possibilita a distinção entre particulados de origem mineral e veicular, contribuindo para modelos de atribuição de fontes.

- **Ambiental e regulatório:** fornece subsídios para a aplicação da Lei nº 14.850/2024 e dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/2024.
- **Saúde pública e social:** auxilia na formulação de políticas voltadas à renovação de frotas e ao controle de poeira, reduzindo a exposição da população ao $MP_{2,5}$ e a compostos tóxicos.
- **Metodológico:** propõe a integração de amostragem local, análise química e comparação de áreas de mineração urbana, resultando em uma base empírica relevante para a tomada de decisões ambientais na RMBH.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo adotou uma abordagem de Revisão Sistemática da Literatura para sintetizar informações científicas sobre a composição química das emissões veiculares, especialmente de veículos pesados utilizados na mineração, e revisar seu impacto na qualidade do ar da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

A busca por estudos ocorreu em novembro de 2025 com referência a artigos publicados entre os anos de 2009 e 2024, durante o período de regulamentação e avanço relacionado ao PROCONVE.

A consulta incluiu as bases de dados Scopus, Web of Science, Google Scholar, bem como documentos técnicos da FEAM, CETESB, IBAMA, CONAMA e legislação federal. Utilizaram-se descritores em português e inglês, abrangendo palavras-chave relacionados a poluentes atmosféricos (emissões veiculares, poluição atmosférica, $MP_{2,5}$, compostos orgânicos voláteis), fontes emissoras (veículos pesados, diesel, mineração, frota de carga) e localização geográfica (Belo Horizonte, RMBH, Minas Gerais, Brasil).

Os materiais selecionados foram lidos e analisados por meio de categorização temática, contemplando cinco eixos principais: conceitos de poluição atmosférica; fontes emissoras e papel do transporte rodoviário; efeitos das emissões na saúde e no ambiente; legislação brasileira e limites de qualidade do ar; e lacunas científicas

relacionadas às emissões de veículos pesados da mineração. A síntese crítica desses eixos fundamentou a elaboração da Revisão Bibliográfica e das Lacunas de Pesquisa, fornecendo base para as conclusões deste trabalho.

7. RESULTADOS

A partir da Revisão Sistemática da Literatura, foi possível reconhecer tendências comuns em relação à composição química das emissões veiculares e analisar as consequências da mineração veicular pesada na qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). A análise dos estudos sugere que as emissões de motores a diesel continuam a ser uma fonte principal de material particulado fino ($PM_{2.5}$), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis em ambientes urbanos e periurbanos.

A maioria dos estudos mostra que os veículos pesados são responsáveis por uma quantidade considerável da carga de poluentes atmosféricos, especialmente em áreas ligadas ao tráfego na cadeia de mineração. Esses estudos sugerem que o material particulado emitido por veículos pesados, em qualquer forma, é composto por componentes de carbono elementar e carbono orgânico, bem como elementos metálicos, incluindo ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn). Eles também podem vir do processo de combustão, bem como da ressuspensão de poeira mineral em estradas não pavimentadas ou em más condições. Pesquisas internacionais mostram que frotas de mineração operando em condições de céu aberto emitem partículas enriquecidas em minerais e metais traço, que diferem das frotas urbanas, cujo material particulado apresenta uma maior contribuição de carbono elementar e compostos orgânicos.

No contexto da RMBH, os resultados consolidados indicam que estações localizadas próximas a corredores de transporte de minério registram concentrações mais elevadas de MP_{10} e $MP_{2.5}$, conforme dados da FEAM e de estudos recentes. A topografia acidentada da região, associada à ocorrência frequente de inversões térmicas, favorece o acúmulo de poluentes, especialmente durante o período seco. Entretanto, a revisão evidencia que a atual cobertura de monitoramento ainda é insuficiente para a adequada caracterização das emissões específicas da atividade

minerária, uma vez que poucas estações estão posicionadas diretamente ao longo das rotas de escoamento.

Outro resultado relevante refere-se às lacunas metodológicas identificadas nos estudos analisados. Observou-se elevada heterogeneidade quanto às técnicas de amostragem, aos tempos de exposição e aos métodos analíticos empregados, como ICP-MS, XRF, TC/OC e GC-MS. Essa diversidade metodológica limita a comparabilidade entre os estudos e dificulta a consolidação de um diagnóstico uniforme sobre a composição química das emissões de veículos pesados no Brasil. Além disso, poucos trabalhos avaliam as emissões em condições reais de operação (RDE), apesar de sua importância para veículos de mineração, cujos níveis de emissão são diretamente influenciados pela carga transportada, pela inclinação do terreno e pelas condições das vias.

Por fim, constatou-se que são escassos os estudos que relacionam a composição química do material particulado emitido por caminhões de mineração a efeitos específicos sobre a saúde da população. Embora a literatura destaque a toxicidade do $MP_{2,5}$ e de seus componentes, como metais e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, ainda são raras as análises integradas que associem essas características químicas ao risco sanitário em áreas próximas às rotas minerárias. Esse conjunto de resultados reforça a necessidade de pesquisas locais, com metodologias padronizadas e foco específico nas frotas pesadas da mineração.

8. CONCLUSÕES

A Revisão Bibliográfica Sistemática realizada evidencia que os veículos pesados utilizados na mineração se configuram como importantes fontes de poluentes atmosféricos, contribuindo de forma significativa para a carga de MP_{10} e $MP_{2,5}$, bem como para a presença de metais e compostos associados tanto à combustão do diesel quanto à ressuspensão de poeira mineral. Na Região Metropolitana de Belo Horizonte, as evidências apontam para maiores concentrações de material particulado fino em áreas situadas próximas a corredores de transporte de minério, reforçando a influência da atividade minerária sobre a qualidade do ar.

Os estudos analisados demonstram avanços no entendimento das emissões veiculares; entretanto, ainda revelam lacunas relevantes, especialmente no que diz respeito à caracterização química específica das emissões de caminhões empregados na mineração, à realização de medições em condições reais de operação e à integração entre a composição química dos poluentes e seus efeitos sobre a saúde humana. A insuficiência de monitoramento ambiental ao longo das rotas minerárias, associada à heterogeneidade metodológica das pesquisas, limita a construção de um diagnóstico robusto e comparável entre diferentes regiões.

Diante desse cenário, conclui-se que é necessária a ampliação de estudos voltados à caracterização química detalhada das partículas emitidas por veículos pesados da mineração, de modo a subsidiar políticas públicas e instrumentos regulatórios relacionados à qualidade do ar. A produção de dados locais, especialmente no âmbito da RMBH, mostra-se fundamental para apoiar a implementação da Política Nacional de Qualidade do Ar, orientar ações de controle de emissões e contribuir para estratégias de proteção da saúde da população exposta. Nesse contexto, o presente trabalho, ao consolidar o conhecimento científico existente e evidenciar lacunas prioritárias, oferece uma base científica consistente para o avanço de pesquisas futuras e para o fortalecimento de políticas ambientais em regiões influenciadas pela atividade minerária.

9. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I. T. de. A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

ANDRADE, M. F. et al. Air quality and health effects in megacities. *Atmospheric Environment*, v. 44, p. 1–12, 2012.

ANDRADE, M. F. et al. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment*, v. 62, p. 446–456, 2012.

ANDRADE, M. F. et al. Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities, 2010.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico 2024. Brasília, 2024.

ARBEX, M. A. et al. Impacto da poluição atmosférica sobre a saúde humana. *Revista Brasileira de Pneumologia*, v. 38, n. 5, p. 643–655, 2012.

ARBEX, M. A. et al. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista de Saúde Pública*, v. 46, n. 4, p. 665–673, 2012.

BRASIL. Lei nº 14.850, de 3 de abril de 2024. Institui a Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 08 jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018. Estabelece a fase L-7 do PROCONVE. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 19 nov. 2018. *(trocar pela fase do PROCONVE que você usar no TCC)*

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Ficha de informação toxicológica – 2020. São Paulo: CETESB, 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. PROCONVE P8: Avaliação técnica e resultados. São Paulo: CETESB, 2024.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2023. São Paulo: CETESB, 2024.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Relatório da Qualidade do Ar em Minas Gerais – 2022. Belo Horizonte: FEAM, 2022.

FEAM. Plano de energia e mudanças climáticas de Minas Gerais: setor agricultura, florestas e outros usos do solo/ Fundação Estadual do Meio Ambiente; com apoio de Agência Francesa do Meio Ambiente e da Gestão de Energia, Conselho Regional de Nord Pas-de-Calais. --- Belo Horizonte: FEAM, 2014. 32 p. il.

FPT INDUSTRIAL. *Sistemas de pós-tratamento para motores médios e pesados: Sistema SCR, filtro de partículas de diesel*. [S.l.: s.n.], [s.d.]. 20 p., 2025

FREITAS, A. P. Avaliação da qualidade do ar em áreas de mineração: um estudo de caso em Minas Gerais. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

FREITAS, C. U.; SOLCI, M. C. Emissões veiculares e seus impactos ambientais. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 347–357, 2009.

FREITAS, E. D.; SOLCI, M. C. Caracterização química e toxicológica do material particulado atmosférico. *Química Nova*, v. 32, n. 2, p. 433–440, 2009.

GOMES, A. F. et al. Efeitos do biodiesel nas emissões veiculares. *Energy Policy*, v. 115, p. 1–8, 2018.

GOMES, M. L. et al. Effect of biodiesel on regulated and unregulated emissions from heavy-duty diesel engine. *Fuel*, v. 215, p. 123–133, 2018.

GREN, L. et al. Chemical composition of particulate matter from mining operations: a review. *Environmental Pollution*, v. 265, 115021, 2020.

GREN, L. et al. Diesel emissions and exposure in mining environments. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, 2020.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Programa PROCONVE/PROMOT – Relatório Técnico 2023/2024. Brasília, 2024.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório de Avaliação do PROCONVE para Veículos Pesados – 2024. Brasília, 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report (AR6). Geneva: IPCC, 2023.

LUCAS, Taíza de Pinho Barroso. Gênese e espacialidades das precipitações nas estações chuvosas de 2010/2011 e 2011/2012 em Belo Horizonte, Minas Gerais, e suas correlações com os impactos hidrológicos. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Belo Horizonte, 2015.

MATA, F. P. Estudo de produtividade e custo operacional de caminhões de transporte de minério em uma pedreira na região metropolitana de São Paulo. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021.

MENDONÇA, Roxane Sidney Resende de; ASSIS, Eleonora Sad de. Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte, MG. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 45-63, jul./set. 2003.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 6 de dezembro de 2017. Belo Horizonte, 2017.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 248, de 25 de setembro de 2023. Belo Horizonte, 2023.

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Resolução CONAMA nº 506, de 28 de março de 2024. Brasília, 2024.

PBH – Prefeitura de Belo Horizonte. Plano de Controle de Poluição Veicular – PCPV. Belo Horizonte: PBH, 2023.

PEREIRA, G. M. et al. Chemical characterization of PM_{2.5} in Brazilian cities. *Atmospheric Research*, v. 215, p. 1–12, 2019.

PEREIRA, P. A. et al. Chemical composition and sources of fine particulate matter in a Brazilian urban area affected by traffic emissions. *Science of the Total Environment*, v. 650, p. 1187–1199, 2019.

RIBEIRO, A. K. C. et al. Air Quality Characterization and Trend Analysis in a Brazilian industrialized metropolitan area (Belo Horizonte, 1995–2022). *Environmental Research*, v. 235, 2023.

RIBEIRO, M. A. et al. Impacto da frota veicular na qualidade do ar da RMBH. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 28, n. 4, p. 600–615, 2023.

SEIBERT, O. G.; PINTO, W. P.; MONTE, E. Z. Índice de poluição atmosférica: uma proposta baseada em dados secundários para avaliação da qualidade do ar. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 6, p. 1209–1219, 2022.

SEIBERT, P.; PINTO, L.; MONTE, M. Emissões atmosféricas e qualidade do ar urbano. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 4, 2022.

SILVA, A. F.; VIEIRA, C. A. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. *Ciência e Sustentabilidade*, v. 3, n. 1, p. 166–189, 2017.

SILVA, M. A.; VIEIRA, C. M. Poluição atmosférica: fundamentos e controle. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.

SILVA, R. M. et al. Characterization of heavy metals in particulate matter from diesel vehicles in a mining region. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 56, n. 10, p. 1195–1205, 2021.

TORRES, F. S. et al. Atmospheric pollution and air quality management in Brazil. *Sustainability*, v. 12, 2020.

TORRES, L. M. et al. Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. *Naturae*, v. 2, n. 1, p. 23–33, 2020.

UZAN, A. M. Estudo de dimensionamento de frota de uma mina a céu aberto. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020.

WHO – World Health Organization. Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva: WHO, 2021.

WOO, Sang-Hee, et. al, Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis. *Science of the Total Environment*, v. 842, p. 156961, 2022.

ZHU, C. et al. Sources and toxicity of particulate matter in urban environments. *Environmental Science & Technology*, v. 52, 2018.

ZHU, Y. et al. The contribution of heavy-duty diesel trucks to ambient PM_{2.5} in urban environments. *Atmospheric Environment*, v. 187, p. 101–110, 2018.