

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio
Sustentável

Priscylla Pavlowa Senna Electo Queiroz

**Sustentabilidade atmosférica em Belo Horizonte mediante iniciativa de
mitigação de emissões advindas do setor de transporte terrestre**

Belo Horizonte

2024

Priscylla Pavlowa Senna Electo Queiroz

**Sustentabilidade atmosférica em Belo Horizonte mediante iniciativa de
mitigação de emissões advindas do setor de transporte terrestre**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Orientador: Victor Mourthé Valadares

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Q3s

Queiroz, Priscylla Pavlowa Senna Electo.

Sustentabilidade atmosférica em Belo Horizonte mediante iniciativa de mitigação de emissões advindas do setor de transporte terrestre [manuscrito] / Priscylla Pavlowa Senna Electo Queiroz. - 2024.

85 f. : il.

Orientador: Victor Mourthé Valadares.

Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Ar - Poluição. 2. Sustentabilidade. 3. Transporte urbano. 4. Belo Horizonte (MG). I. Valadares, Victor Mourthé. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 574.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA - EAUFMG
Rua Paraíba, 697 – Funcionários
30130-140 – Belo Horizonte – MG - Brasil

Telefone: (031) 3409-8823
FAX (031) 3409-8822

ATA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA DA ALUNA PRISCYLLA PAVLOWA SENNA ELECTO QUEIROZ COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE EM CIDADES, EDIFICAÇÕES E PRODUTOS.

Às 09:30 horas do dia 28 de Fevereiro de 2024, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelo *Prof. Dr. Victor Mourthé Valadares* - orientador-Presidente, *Prof. Dr. Wellington Lopes Assis*, membro titular externo, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, para avaliação da monografia intitulada "*Sustentabilidade Atmosférica em Belo Horizonte pela Iniciativa de Mitigação de Emissões do Setor de Transporte Terrestre*" de autoria da aluna **PRISCYLLA PAVLOWA SENNA ELECTO QUEIROZ**, como requisito final para obtenção do Certificado de Especialista em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos. A citada Comissão examinou o trabalho e, por unanimidade, concluiu que a monografia atende às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, atribuindo ao trabalho nota 85, conceito "B". A Comissão recomenda que seja encaminhado 01(hum) exemplar digital da monografia ao Repositório da UFMG, após as correções indicadas.

Belo Horizonte, 28 de Fevereiro de 2024

Prof. Victor Mourthé Valadares
Orientador-Presidente

Prof. Wellington Lopes Assis
Membro Titular Externo – UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA - EAUFMG
Rua Paraíba, 697 – Funcionários
30130-140 – Belo Horizonte – MG - Brasil

Telefone: (031) 3409-8823
FAX (031) 3409-8822

ATA RETIFICADORA DA REUNIÃO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE MONOGRAFIA DA ALUNA **PRISCYLLA PAVLOWA SENNA ELECTO QUEIROZ** COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO CERTIFICADO DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE EM CIDADES, EDIFICAÇÕES E PRODUTOS.

A Comissão Examinadora composta pelo *Prof. Dr. Victor Mourthé Valadares* - orientador-Presidente, *Prof. Dr. Wellington Lopes Assis*, membro titular na UFMG, designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, para avaliação da monografia intitulada "*Sustentabilidade Atmosférica em Belo Horizonte pela Iniciativa de Mitigação de Emissões do Setor de Transporte Terrestre*" de autoria da aluna **PRISCYLLA PAVLOWA SENNA ELECTO QUEIROZ**, como requisito final para obtenção do Certificado de Especialista em Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, retifica a nota atribuída à discente, pela referida monografia que, após sua exitosa correção, atendeu plenamente às exigências para a obtenção do Certificado de Conclusão do Curso, agora com a nota 90, conceito "A". A Comissão solicita que seja encaminhado o exemplar digital da monografia ao Repositório da UFMG.

Belo Horizonte, 24 de Junho de 2024

Victor Mourthe
Valadares:62431587649

Digitally signed by Victor
Mourthe Valadares:62431587649
Date: 2024.06.24 13:06:00 -03'00'

Prof. Victor Mourthé Valadares
Orientador-Presidente

Documento assinado digitalmente
 WELLINGTON LOPES ASSIS
Data: 25/06/2024 13:58:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Wellington Lopes Assis
Membro Titular Externo – UFMG

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de minha vivência, que me proporciona desenvolvimento constante como pessoa...

À Universidade Federal de Minas Gerais, por me permitir usufruir de classes imprescindíveis de ensino...

Ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável por oferecer temas tão enriquecedores e atuais para a minha formação profissional...

Ao corpo docente da Escola de Arquitetura da UFMG, que contribuiu imensamente na minha construção intelectual e pessoal...

Ao Professor Doutor Victor Mourthé Valadares, orientador, pelo constante apoio para elaborar e aprimorar meus estudos...

Aos meus pais, pela essencial cooperação e pelo inesquecível incentivo ao longo de minha trajetória acadêmica...

Ao meu irmão, Diego, pelas memoráveis assistências e recomendações, que permitiram o aperfeiçoamento de meu aprendizado...

Sou imensamente grata a todos que participaram desta tão importante jornada, cooperando e encorajando em todas as etapas do curso.

RESUMO

A atmosfera é parte essencial para a vida no Planeta. Ela resulta da interação entre os meios bióticos e abióticos que, se permanecerem em uma dinâmica equilibrada, favorecem a continuidade da biosfera. Portanto, o grande aumento da população humana, situado na vigência predominante de premissas capitalistas, tem causado distúrbios oriundos das repercussões negativas dos avanços industriais e tecnológicos e da dinâmica demográfica inconsequente. Essas questões carecem de ações de sustentabilidade eficazes e eficientes. As práticas antrópicas sem correta reflexão de impactos são fatores que têm desequilibrado ciclos biogeoquímicos, já que impulsionam a maior emissão de gases, causando alteração, degradação e poluição da atmosfera. Ressalta-se que a sensibilização da população sobre os problemas da poluição e o foco do governo para ações de mitigação de emissões considerando contextos locais podem reverter o quadro atual e estimular mudanças significativas. Os enfoques do trabalho foram: i) compreender como a composição e a quantidade de gases poluentes na atmosfera tornaram-se temas inadiáveis, considerando principalmente a saúde pública; ii) observar a relação entre a atividade do setor de transportes e a concentração de gases poluentes na atmosfera e designar estratégias que possam auxiliar na obtenção da sustentabilidade ambiental; e iii) analisar políticas de transporte terrestre em Belo Horizonte para determinar qual é a prioridade de modais na atualidade e quais locais têm maior necessidade de intervenção. Nesse cenário, foi priorizada a ideia de mudança da matriz energética veicular do serviço público. Foram consideradas linhas de metrô baseadas em sistema renovável e limpo, além de sua devida expansão. Para analisar a quantidade de emissões, foram consultados documentos e bases de dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente, visando à observação dos gases mais emitidos e ao estudo da possível melhoria da atmosfera por meio do incentivo ao uso do transporte público. Os resultados foram positivos, indicando que a implementação do novo transporte pode contribuir com a diminuição da poluição atmosférica.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; sustentabilidade; transporte terrestre; metrô; Belo Horizonte.

ABSTRACT

The atmosphere is an essential part of life on the Planet. It results from the interaction between biotic and abiotic environments which, if remain in a balanced dynamic, they favor the continuity of the biosphere. Therefore, the large increase in the human population, situated under the predominant validity of capitalist premises, has caused disturbances arising from the negative repercussions of industrial and technological advances and the inconsequential demographic dynamics. These issues lack effective and efficient sustainability actions. Anthropogenic practices without correct reflection of impacts are factors that have unbalanced biogeochemical cycles, as they drive greater gas emissions, causing alteration, degradation and pollution of the atmosphere. It is noteworthy that raising public awareness about pollution problems and the government's focus on emission mitigation actions considering local contexts can reverse the current situation and encourage significant changes. The focuses of the work were: i) understand how the composition and quantity of polluting gases in the atmosphere have become urgent topics, considering mainly public health; ii) observe the relationship between the activity of the transport sector and the concentration of polluting gases in the atmosphere and design strategies that can help achieving environmental sustainability; and iii) analyze land transport policies in Belo Horizonte to determine what the current modal priority is and which locations are most in need of intervention. In this scenario, the idea of changing the public service's vehicle energy matrix was prioritized. Metro lines based on a renewable and clean system were considered, in addition to their due expansion. To analyze the amount of emissions, documents and databases from the "Fundação Estadual do Meio Ambiente" (FEAM) were consulted, aiming to observe the most emitted gases and study the possible improvement of the atmosphere by encouraging the use of public transport. The results were positive, indicating that the implementation of new transport can contribute to reducing atmospheric pollution.

Keywords: Atmospheric pollution; sustainability; land transportation; subway; Belo Horizonte.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa mental sobre a temática da poluição atmosférica.....	23
Figura 2 – O Tâmis Abaixo de Westminster, de Claude Monet (1871).....	25
Figura 3 – Meios de transporte em Medellín, Colômbia	42
Figura 4 – Ônibus, Bonde, Metrô e Barco de Estocolmo, Suécia.....	44
Figura 5 – Estações de medição de qualidade do ar em BH.....	47
Figura 6 – Codificação para análise de dados sobre os gases poluentes.....	50
Figura 7 – Unidades de conservação ambiental e cursos d'água em BH	54
Figura 8 – Mapa altimétrico de Belo Horizonte.....	55
Figura 9 – Tipologia de uso e ocupação de lotes em BH no ano de 2018	56
Figura 10 – População dos bairros de Belo Horizonte em 2010.....	57
Figura 11 – Belo Horizonte e Região Central	58
Figura 12 – Destaque da Região Central de Belo Horizonte	58
Figura 13 – Inauguração da primeira linha de bonde de Belo Horizonte.....	59
Figura 14 – Bondes e trólebus em Belo Horizonte	60
Figura 15 – Transporte coletivo de metrô e ônibus em Belo Horizonte	63
Figura 16 – Proposta de linhas de metrô em Belo Horizonte	64
Figura 17 – Volume de tráfego de veículos por dia em Belo Horizonte.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Conseqüências de gases poluentes no sistema respiratório 27

Quadro 2 – Conferências Ambientais..... 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados sobre os meios de transporte em Medellín, Colômbia.....	43
Tabela 2 – Taxa de emissão de gases poluentes em vias de Belo Horizonte .	50
Tabela 3 – Valores finais de emissões em Belo Horizonte após implementação do metrô	51
Tabela 4 – Fatores de emissão da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (g/km)	52
Tabela 5 – Amostras de gases poluentes captadas por sensores em BH.....	67
Tabela 6 – Dados estatísticos das concentrações de gases na estações meteorológicas de BH	67
Tabela 7 – Classificação da qualidade do ar de acordo com a Resolução CONAMA nº 491	68
Tabela 8 – Medições dos gases poluentes de Belo Horizonte em comparação com valores ideais da Resolução CONAMA nº 491	69
Tabela 9 – Emissões de gases poluentes referentes a 70% do público que não utilizaria o metrô	71
Tabela 10 – Redução de emissões de gases poluentes após instalação das linhas de metrô	71
Tabela 11 – Emissões da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (g/dia)	72
Tabela 12 – Emissões da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (t/ano)	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Frota de veículos em Belo Horizonte	62
Gráfico 2 – Concentração de gases na Estação PUC São Gabriel, em BH....	66
Gráfico 3 – Concentração de gases na Estação PUC Barreiro, em BH	66
Gráfico 4 – Concentração de gases na Estação Centro, em BH.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
AVC	Acidente Vascular Cerebral
BH	Belo Horizonte
CETEC	Fundação Centro Tecnológico De Minas Gerais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
COP26	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática
COPD	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
DSE	Densidade Social de Emissão
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FMU	Fundo Municipal de Mobilidade Urbana
FSTC	Fundo Municipal de Melhoria da Qualidade e Subsídio ao Transporte Coletivo
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IHD	Doença Cardíaca Isquêmica
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
OBSMOB-BH	Observatório da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEROX	Operação Oxigênio
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
PCPV	Plano de Controle de Poluição Veicular
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PF	Padrão de qualidade do ar final

PI	Padrão de qualidade do ar intermediário
PLANMOB	Plano de Mobilidade de Belo Horizonte
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SITVA	Sistema Integrado de Transporte do Vale do Aburrá
SL	Storstockholms Lokaltrafik
SUMOB	Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte
UNCED	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
WHO	World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

μg	Micrograma
CH_4	Gás metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
DV	Direção do vento
g	Gramma
HFC	Hidrofluorcarbono
km	Quilômetro
m^3	Metro cúbico
N_2	Nitrogênio gasoso
N_2O	Óxido nitroso
NO	Óxido nítrico
NO_2	Dióxido de nitrogênio
NO_3	Nitrato
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O	Oxigênio
O_2	Gás oxigênio
O_3	Gás ozônio
PA	Pressão atmosférica
PFC	Perfluorcarbono
PM10	Material particulado de diâmetro inferior a 10 micrômetros
PM2,5	Material particulado de diâmetro inferior a 2,5 micrômetros
PP	Precipitação
PPM	Partes por milhão
RS	Radiação total incidente na superfície
S	Enxofre
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
SO_2	Dióxido de enxofre
SO_3	Óxido sulfídrico
SO_x	Óxidos de enxofre
T°	Temperatura
UR	Umidade relativa
VV	Velocidade do vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	22
	2.1 Objetivo Geral	22
	2.2 Objetivos Específicos.....	22
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS	24
	3.1 Poluição atmosférica – alerta desde o século XIX	24
	3.2 Gases poluentes	26
	3.3 Saúde pública: alerta da gravidade do aumento da poluição	27
	3.4 Linha do tempo: conferências para discussão do meio ambiente	28
	3.4.1 Clube de Roma (1968).....	28
	3.4.2 Organização das Nações Unidas (ONU) Estocolmo (1972)	29
	3.4.3 Relatório Brundtland (1987).....	30
	3.4.4 Rio-92 (1992).....	31
	3.4.5 Protocolo de Kyoto (1997)	32
	3.4.6 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2014)	33
	3.5 Legislações nacionais e municipais sobre emissões e qualidade do ar .	34
	3.5.1 Política Nacional de Mobilidade Urbana	35
	3.5.2 Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar.....	35
	3.5.3 Programa de Controle de Emissões Veiculares	36
	3.5.4 Plano de Controle de Poluição Veicular	36
	3.5.5 Plano de Mobilidade de Belo Horizonte	37
	3.5.6 Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte	38
	3.5.7 Política de Controle e Fiscalização de Fontes Poluidoras	38
	3.5.8 Operação Oxigênio	39
	3.6 Parâmetros na busca pela sustentabilidade	39
	3.7 Obras análogas	42

3.7.1	Transporte em Medellín – Colômbia	42
3.7.2	Transporte em Estocolmo – Suécia	43
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	45
4.1	Fontes e características dos dados utilizados	46
4.2	Organização e tratamento dos dados utilizados	47
5	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	53
5.1	Fatores geoecológicos estáticos de Belo Horizonte	53
5.2	Fatores ambientais dinâmicos de Belo Horizonte	55
5.3	Breve histórico dos meios de transporte em Belo Horizonte	57
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	62
6.1	Metrô: proposta de transporte predominante em Belo Horizonte	62
6.2	Resultados para mitigação das emissões.....	65
6.2.1	Incidência de gases poluentes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) em BH	65
6.2.2	Incidência de gases poluentes (t/ano) nas avenidas de BH	70
6.2.3	Incidência de gases poluentes (t/ano) na totalidade de BH	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
8	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Esta monografia atende à conclusão de créditos das atividades acadêmicas do curso de Sustentabilidade em Cidades, Edificações e Produtos, sediado no Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo da Escola de Arquitetura da UFMG, e consta entre os requisitos para a obtenção do título de especialista. O tema da pesquisa é centralizado na sustentabilidade atmosférica nos centros urbanos de porte metropolitano, com realização de um estudo na cidade de Belo Horizonte (BH), atentando-se ao impacto do transporte público, considerando fatores tecnológicos que possam aprimorar o sistema existente em termos de menores emissões de gases poluentes.

A atmosfera é parte importante de ecossistemas terrestres. O Planeta possui cerca de 4,5 bilhões de anos. Estima-se que, antes do aparecimento de vida, cerca de 3,5 bilhões de anos atrás, a atmosfera era completamente diferente, visto que o Sol era aproximadamente 40% mais ativo e não havia oxigênio suficiente, enquanto o hidrogênio, o metano e a amônia existiam em elevadas concentrações (JARDIM, 2001).

Após o surgimento dos seres vivos primordiais – principalmente aquáticos, devido à proteção propiciada pela água contra os raios solares; e com respiração por processos de fermentação, por causa da falta de oxigênio –, a interação deles com o meio por processos recíprocos de transformação foi essencial para a reconfiguração das composições atmosféricas e das concentrações de seus constituintes. Assume-se que as mudanças evolutivas ocorreram por meio da seleção natural. Como exemplo, a origem de seres fotossintetizantes (cuja respiração libera oxigênio para a atmosfera) pode ter relação com a falta de alimentos, que os levou à adaptação a um novo tipo de fonte energética para produção de nutrientes. O constante aparecimento de novas formas de vida devido ao aumento do oxigênio produzido por fotossíntese trouxe mudanças geoquímicas, por meio do surgimento de novos seres, mais complexos e de respiração aeróbia (ODUM, 1988).

O oxigênio, cerca de 600 milhões de anos atrás, foi se estabelecendo em um nível próximo das condições atuais. Assim, alterações atmosféricas como o surgimento da camada de ozônio, evitando os efeitos adversos dos raios ultravioleta, estiveram associadas à manutenção das espécies (GALEMBECK; COSTA, 2016).

A Hipótese Gaia, criada por James Lovelock, aborda a correlação entre os níveis de substâncias na atmosfera e as espécies que vivem no meio. Os organismos são responsáveis pela manutenção dos ambientes geoquímicos, onde a evolução das espécies acontece juntamente com o ambiente físico. Dessa forma, surge o contexto de ciclos biogeoquímicos, em que seres vivos estão em constantes trocas de materiais com seres não vivos, externando outros compostos e energia (por meio de ciclagem de nutrientes). Os ciclos biogeoquímicos podem ser gasosos (reservatórios situados na atmosfera ou hidrosfera) ou sedimentares (reservatórios situados na crosta terrestre). Alguns elementos, como nitrogênio, carbono, hidrogênio, oxigênio, entre outros, são essenciais para o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos (ODUM, 1988).

Esta Hipótese, mesmo não comprovada, sugere que haja maneiras da própria biosfera ajustar a quantidade de poluição já existente. Porém, a população deve ter atenção e cuidado com relação à preservação de processos naturais, como as trocas gasosas, a purificação da água e a ciclagem de nutrientes, para que os equilíbrios ecológicos não sejam afetados. A proporcionalidade entre quantidade de produção e qualidade do espaço é imprescindível para que todos os ecossistemas possam se equilibrar (ODUM, 1988).

Nos últimos 150 anos, gases que existiam em baixas concentrações aumentaram em níveis preocupantes (JARDIM, 2001), alterando as paisagens e a qualidade do ar dos centros urbano-industriais e motivando reflexões sobre as repercussões de tais alterações, seja na percepção da saúde de seus habitantes, em representações pictóricas ou em estudos, como aqueles desenvolvidos pela pesquisadora Eunice Foote no final do século XIX.

O constante avanço tecnológico fomentado pelas inovações é fundamental e benéfico do ponto de vista da melhoria do conforto humano e da acessibilidade a uma miríade de facilidades, entre elas as diversas formas de conectividade mundial. Na Primeira Revolução Industrial, por exemplo, ocorreu a introdução da máquina a vapor, cerca de 300 anos atrás. Com isso, houve o aperfeiçoamento das indústrias, o que culminou, no século seguinte, na introdução da energia elétrica. Nos anos 1960, sucedeu o desenvolvimento de semicondutores, *mainframes*, computadores pessoais e Internet, representando grande passo para maior globalização. Por fim, a partir dos

anos 2000, as tecnologias avançaram para uma combinação física, digital e biológica (MAGALHÃES; VENDRAMINI, 2018).

Os crescimentos industrial e tecnológico acelerados trouxeram também consequências negativas ao meio ambiente, estando diretamente relacionados ao aumento dos níveis de poluição do ar, do solo, e das águas; ao esgotamento de recursos naturais; à geração de resíduos; ao aumento do consumo energético; dentre outras repercussões.

Um dos maiores marcos do impacto da poluição atmosférica ocorreu em Londres, em 1952, sendo a queima de combustíveis e o setor de transportes fatores determinantes. Com a chegada do inverno, a população acentuou a emissão de poluentes com uma intensa queima de carvão, levando 12 mil pessoas à óbito, e outras 100 mil sofreram com problemas de saúde. A partir desse fenômeno, novas regulamentações foram adotadas, como a restrição de combustíveis “sujos” no setor industrial, consistindo em medida decisiva para acentuar a preocupação quanto à poluição, até os dias atuais (ANDRADE, 2017).

É importante ressaltar que as fontes provenientes de emissões podem ser biogênicas – naturais: atividades vulcânicas e incêndios em matérias orgânicas – ou antropogênicas – devido às intervenções humanas: transportes, utilização de gás de cozinha, atividades comerciais, agropecuárias e industriais, produção de energia e uso de solventes (REDAÇÃO NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL, 2022).

“Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; II - inconveniente ao bem-estar público; III - danoso aos materiais, à fauna e flora. IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”. (BRASIL, 1990, p. 1).

A poluição atmosférica é, atualmente, questão de saúde pública global. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), ocorrem cerca de 7 milhões de mortes por ano associadas a poluição atmosférica. É indispensável considerar também as mudanças climáticas. A contaminação da população e a variação do clima estão dentre as maiores ameaças ambientais (REDAÇÃO GALILEU, 2021).

“Os gases de efeito estufa são os causadores do aquecimento global. Já os gases (e materiais particulados) poluentes são tóxicos e, portanto,

diretamente responsáveis por danos à saúde humana e ambiental” (IEMA, 2022, p. 1).

A atmosfera é um componente importante da biosfera terrestre e a poluição do ar promove impactos negativos na biota, comprometendo estados de equilíbrio ecossistêmicos essenciais à preservação da vida na Terra como é, atualmente, conhecida. A partir dessas observações, o intuito foi desenvolver uma pesquisa com enfoque na poluição do ar, para averiguar os motivos das emissões, potenciais consequências e fatores norteadores para o desenvolvimento de políticas e práticas que possam minimizar a liberação de gases poluentes – não sendo aqui abordados os gases de efeito estufa, que poderão ser objetos de um futuro estudo.

A seguinte indagação guiou esta pesquisa: “Como correlacionar a análise da liberação de gases poluentes em Belo Horizonte com a identificação de determinantes que ocasionam sua elevada concentração, de forma a elaborar estratégias de mitigação dos problemas de poluição atmosférica gerados pelo setor de transporte público?”.

Considerando a grande relevância do tema, bem como a crescente atenção e reflexão da sociedade com relação ao avanço da poluição atmosférica e o desejo de reduzir as emissões nocivas, é necessário buscar soluções por meio de diferentes setores, contemplando o desenvolvimento e a sugestão de novas propostas; a sensibilização da população, com a previsão de medidas instrutivas; a busca por modos de ser, estar e habitar mais sustentáveis; e a implementação de infraestrutura pertinente.

Nesta pesquisa foi importante analisar a história da poluição atmosférica e seus nocivos desdobramentos nos ecossistemas. Além disso, foi necessário observar os resultados e repercussões das maiores Conferências Internacionais sobre o meio ambiente, visto a notável relevância das discussões ambientais que nelas ocorreram em nível global. As legislações brasileiras e municipais (de Belo Horizonte) também foram consideradas, diante da constante evolução e adaptação das leis e da criação de programas específicos que colaborem com os níveis admissíveis de qualidade do ar no contexto do desenvolvimento sustentável.

A contextualização desta pesquisa na cidade de Belo Horizonte, com foco no setor de transportes, é justificada pela parcela de poluentes produzida nos centros urbanos e a pouca tradição da administração pública da capital mineira na elaboração

de políticas públicas de transporte claramente sustentáveis. Isto demanda maior atenção na formulação de práticas não apenas mitigadoras, mas principalmente promissoras para a melhoria da qualidade do ar de sua atmosfera. As propostas foram elaboradas considerando as emissões advindas do transporte movido por combustíveis fósseis, com o intuito de avaliar a possibilidade da redução da concentração de gases nocivos preocupantes na atmosfera, a partir da previsão de um transporte elétrico e de matriz energética renovável que possa integrar melhor a cidade e, por extensão, a região metropolitana.

2 OBJETIVOS

A seguir constam o objetivo geral e três objetivos específicos, com base no mapa mental apresentado na Figura 1.

2.1 Objetivo Geral

Identificar, com base nos dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), quais são as áreas de maiores emissões de gases poluentes (PM10, PM2,5, SO₂, NO₂ e CO) em Belo Horizonte, visando indicar as principais fontes emissoras e estabelecer estratégias e planejamentos de ações no setor de transportes que possam contribuir com a melhoria da qualidade do ar.

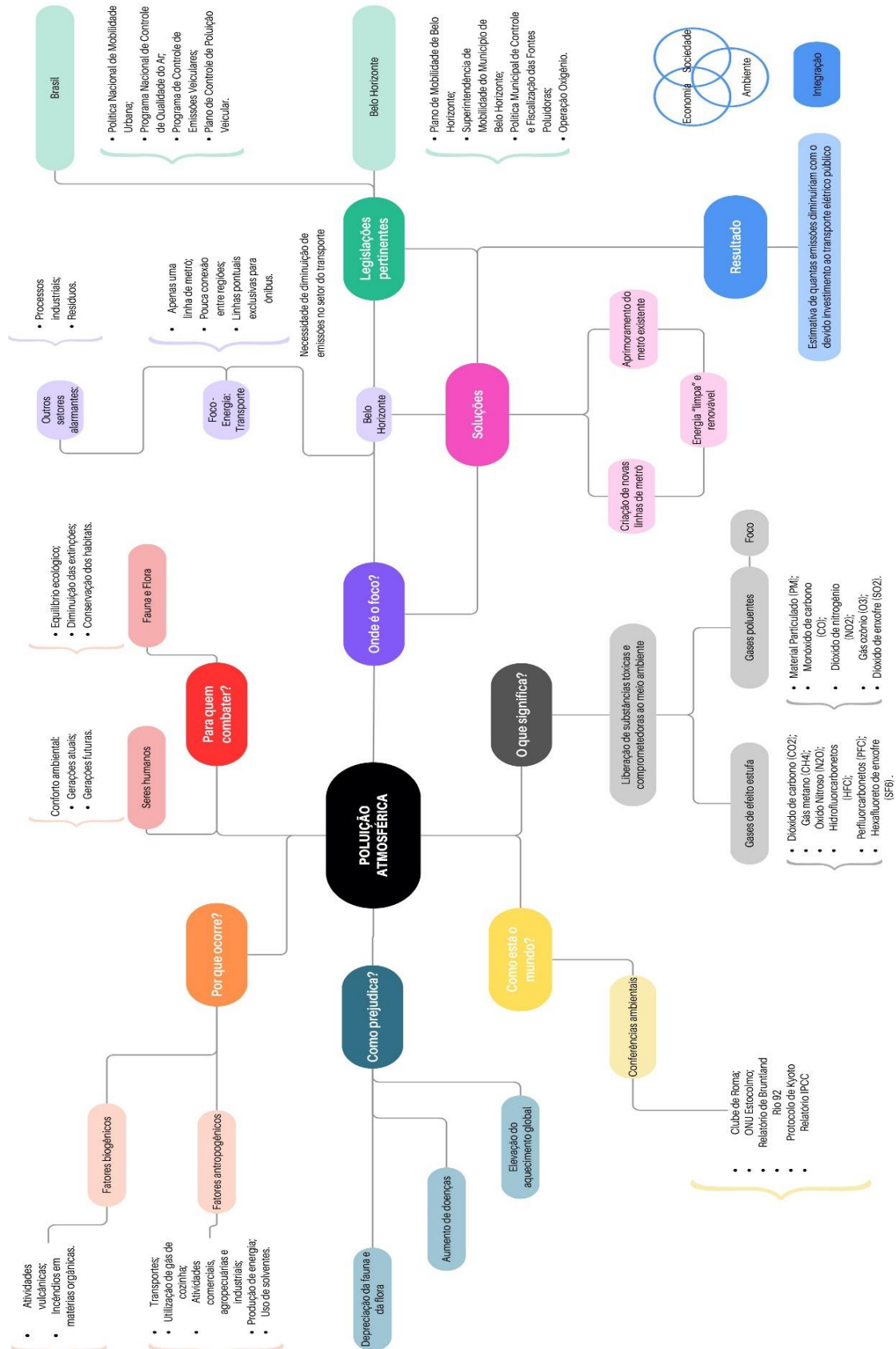
2.2 Objetivos Específicos

a. Compreender como a composição e a quantidade de gases poluentes na atmosfera tornaram-se temas inadiáveis, considerando os riscos em relação à saúde pública, e analisar como ocorrem a correção e a prevenção das emissões, em escala mundial, nacional – Brasil – e municipal – Belo Horizonte –;

b. Observar a relação entre a atividade do setor de transportes e a concentração de gases poluentes na atmosfera e designar estratégias que possam auxiliar na obtenção da sustentabilidade ambiental, por meio de observações e recomendações de sistemas de veículos que contribuam para a melhoria da qualidade do ar e, conseqüentemente, da qualidade de vida;

c. Analisar políticas de transporte terrestre em Belo Horizonte para determinar qual é a prioridade de modais na atualidade e quais locais têm maior necessidade de intervenção, avaliando dados e informações, de forma a propor novas rotas de veículos públicos coletivos – operando com energia renovável e limpa – que possam amenizar os efeitos da liberação de gases poluentes.

Figura 1 – Mapa mental sobre a temática da poluição atmosférica



Fonte: Autora (2023).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS

Esta seção é subdividida em sete itens: o primeiro aborda a cronologia da poluição atmosférica; o segundo trata da composição de gases poluentes; o terceiro é referente ao reconhecimento da influência desses gases na saúde pública; o quarto discorre sobre conferências ambientais; o quinto versa a respeito de legislações nacionais e municipais, respectivamente, incluindo considerações de mobilidade e combate à poluição; o sexto foca em parâmetros de cidades e transportes sustentáveis; e o sétimo explora obras análogas de transporte em outros países.

3.1 Poluição atmosférica – alerta desde o século XIX

Embora a poluição atmosférica tenha sido grande preocupação no século XX, a ciência acerca do tema já havia despertado curiosidade previamente. O movimento impressionista, difundido desde o final do século XVIII, pode ser considerado marco para essa temática representada na arte. Um novo estilo foi criado, com a participação de artistas que abandonavam a forma realística de expressão e objetivavam maior foco em questões de percepção e sensibilidade. A maior apreciação da natureza foi derivada da luminosidade, que exerceu papel importante na fluidez e na dispersão de informações artísticas (ALMEIDA FILHO, 1992).

Mediante o grande foco na utilização inovadora de luzes e sombras, é notável que artistas da época, como Claude Monet e William Turner, tenham retratado, em suas obras, a poluição atmosférica originada, principalmente, a partir da Revolução Industrial. Na primeira metade do século XIX, o Reino Unido foi responsável por metade da liberação do dióxido de enxofre proveniente das indústrias que faziam intensa queima de carvão (ALVES, 2023). A Figura 2 apresenta pintura realizada por Monet, em 1871, dentro do contexto que já apresentava composições artísticas que ressaltavam a poluição atmosférica.

A modificação atmosférica ao longo do século XIX incitou pesquisadores e cientistas para que se aprofundassem no tema, em busca de novas descobertas. Outra questão de relevância para o discernimento de fenômenos de alteração e poluição atmosféricas, associados às mudanças climáticas do século XIX, foi uma notável experiência realizada por Eunice Newton Foote que, por meio de oportunidade de estudo na instituição *Troy Female Seminary*, fundada em 1814, pôde aprimorar os seus conhecimentos sobre a ciência. Mas, devido à desigualdade de gênero e ao

vagaroso avanço da Física nos Estados Unidos, o seu aprimoramento científico ocorreu, também, lentamente (SAAVEDRA; CAMINO, 2021).

Embora atuando como física amadora, Eunice foi capaz de, em 1850, demonstrar que o vapor de água e o dióxido de carbono (CO_2) podiam influenciar no aquecimento solar. Para comprovar a sua teoria, em 1856 foi realizado um experimento, utilizando dois cilindros: um contendo CO_2 e, outro, ar puro. Após exposição ao sol, Eunice comprovou que o cilindro de CO_2 esquentava muito mais e, quando retirado do contato direto com a luz solar, levava maior tempo para esfriar. Em local fechado, o comportamento era parecido, porém em menor intensidade. Embora Eunice não tenha reconhecido a diferença entre radiação solar e radiação irradiada da Terra, ela foi a pioneira no avanço dos estudos dos efeitos gerados pela poluição de dióxido de carbono (SAAVEDRA; CAMINO, 2021).

Figura 2 – O Tâmis Abaixo de Westminster, de Claude Monet (1871)



Fonte: ALVES, 2023.

O levantamento dos gases poluentes que geram constantes problemas atmosféricos e agravam todos os ecossistemas é essencial. Além disso, é fundamental compreender quais são as fontes emissoras que mais agravam o lançamento dos gases na atmosfera.

3.2 Gases poluentes

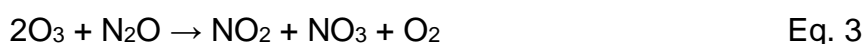
Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, s.d.), alguns dos gases poluentes presentes na atmosfera são monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂) e gás ozônio (O₃). O CO é emitido através de processos de combustão quando não há a queima completa do combustível, sendo principalmente originado de veículos automotores e processos industriais. O PM é definido por qualquer elemento líquido ou sólido na atmosfera, com dimensões microscópicas. Possui como fontes a queima de combustíveis fósseis ou biomassa vegetal, as emissões de amônia na agricultura e as emissões decorrentes de obras da construção civil. A emissão antropogênica do SO₂ ocorre pela queima de combustíveis fósseis, bem como atividades de geração de energia e aquecimento doméstico. Segundo Santos (2017), ele se forma através da reação (quase 100% eficiente, e o SO₂ formado é solúvel em água) representada na Equação 1:



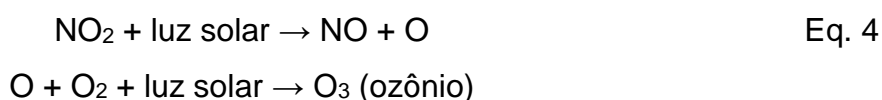
O NO₂ é emitido quando o nitrogênio é liberado através de processos de combustão em fontes móveis e fixas. O nitrogênio, juntamente com o oxigênio, são os gases com maior existência na atmosfera, com 78,03% e 20,99% de participação, respectivamente. Inicialmente, é formado o NO, através do resfriamento do gás de combustão. A reação é definida pela Equação 2 (SANTOS, 2017):



Após esse processo, ocorre a decomposição do N₂O, que reage ao ozônio troposférico, formando um dos gases poluentes mais investigados, o NO₂, como demonstrado na Equação 3 (SANTOS, 2017):



Por fim, o O₃ é gerado quando ocorrem reações químicas entre o NO₂ e compostos orgânicos voláteis na presença de radiação solar. Nesse caso, a emissão deriva de queima de combustíveis fósseis, volatilização de combustíveis e atividades agropecuárias. A Equação 4 é a reação final (SANTOS, 2017).



Os gases poluentes são responsáveis pela intensificação de problemas de saúde. Algumas doenças provocadas pela inalação de gases podem gerar complicações graves e, conseqüentemente, levar a população à óbito.

3.3 Saúde pública: alerta da gravidade do aumento da poluição

Sobretudo na segunda metade do século XX, aplicações tecnológicas e oportunidades financeiras foram significativos fatores para o desenvolvimento de meios para se averiguar efeitos nocivos à saúde derivados de gases tóxicos. Estudos revelam a relação direta de doenças com a exposição à uma atmosfera que, mesmo com padrões de concentrações de gases dentro do recomendado, pode ser maléfica para pessoas mais suscetíveis ao desenvolvimento de enfermidades – dentre elas crianças e idosos. Dentre os diagnósticos, as doenças mais comuns envolvem sintomas respiratórios, cardiovasculares e neoplasias – crescimento desordenado de células (SANTOS *et al.*, 2019). O Quadro 1 é composto pela combinação de dois estudos, que indicam quais são as partes do corpo humano afetadas pela inspiração de gases nocivos e quais são as possíveis doenças que podem ser ocasionadas.

“Estima-se que a poluição do ar ambiente (exterior) tenha causado 4,2 milhões de mortes prematuras em todo o mundo em 2019” (WHO, 2022, p. 1).

Quadro 1 – Consequências de gases poluentes no sistema respiratório

Gás	Penetração no sistema respiratório (SANTOS <i>et al.</i> , 2019)	Doenças relacionadas (WHOb, 2023)
PM10	Traqueia, brônquios, bronquíolos	Doença cardíaca isquêmica (IHD), doença pulmonar obstrutiva crônica (COPD)
PM2,5	Alvéolos	Câncer de pulmão, IHD, derrame cerebral, COPD, doenças respiratórias
O ₃	Traqueia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Função pulmonar reduzida, aumento de inflamação nas vias aéreas
NOx e NO ₂	Traqueia, brônquios, bronquíolos, alvéolos	Asma, doenças respiratórias
SO ₂	Vias áreas superiores, traqueia, brônquios, bronquíolos	-
CO	Alvéolos, corrente sanguínea	Infarto do miocárdio

Fonte: SANTOS *et al.*, 2019; WHOb, 2023 (adaptado).

A poluição atmosférica está relacionada a cerca de 37% das mortes devido às doenças cardíacas isquêmicas e acidente vascular cerebral (AVC), 18% por doença pulmonar obstrutiva crônica, 23% em consequência de infecções agudas das vias

respiratórias inferiores (traqueia, brônquios, bronquíolos e alvéolos) e 11% por enfermidade de câncer no trato respiratório (WHO, 2022).

O agravamento da saúde pública devido aos altos níveis de poluição atmosférica é uma questão de urgência a ser discutida, de forma a ponderar estratégias que podem ser essenciais na mitigação das principais fontes emissoras. Para isso, é importante que haja a associação entre todos os países e que os planejamentos elaborados sejam adequados a todos os envolvidos, como ocorre nas conferências do meio ambiente.

3.4 Linha do tempo: conferências para discussão do meio ambiente

Esta seção é subdividida em seis itens: o primeiro aborda o Clube de Roma; o segundo versa sobre a ONU Estocolmo; o terceiro é referente ao Relatório Brundtland; o quarto discorre sobre a Rio-92; o quinto retrata o Protocolo de Kyoto; e o último foca no Relatório IPCC.

3.4.1 Clube de Roma (1968)

Com a preocupação simultânea sobre a crise do Planeta e a apreensão de como seria o modo de vida futuro, reflexos de movimentos ambientalistas emergentes resultaram em grupos de reflexão, com destaque ao Clube de Roma, criado em 1968, por Aurelio Peccei, contando com a participação de profissionais receosos com o aumento do desequilíbrio ambiental. O Clube foi desenvolvido em três grandes partes, sendo os relatórios “*Limits to Growth*” de 1972, “*Mankind at Turning Point*”, de 1974 e “*RIO: Reshaping the International Order*”, de 1977 (KRUGER, 2001).

O primeiro relatório foi elaborado com grande enfoque no crescimento populacional exponencial. As questões de industrialização, poluição, captação de recursos naturais e produção de alimentos estão diretamente relacionadas ao aumento de habitantes. Dessa forma, os autores do relatório e participantes do movimento ambiental concluíram que existiria horizonte de 100 anos (a partir de 1972) para que houvesse declínio repentino da situação, resultando na impossibilidade de reparação dos danos causados ao Planeta. Para reverter a situação, seria necessária a estabilidade econômica e ecológica partindo de cada indivíduo, garantindo o acesso igualitário a necessidades básicas (MEADOWS, *et al.*, 1972).

Já no segundo relatório foram consideradas as desigualdades mundiais para o agrupamento de regiões comuns, que dispunham das mesmas adversidades em relação aos temas já analisados no *Limits to Growth*, em que os aumentos de práticas desmesuradas poderiam levar o Planeta ao colapso. O uso computacional foi recorrente, através da geração de possibilidades de novos cenários que poderiam ter bom resultado em um período de 50 anos. As maiores preocupações dos autores do relatório eram a desigualdade social e o esgotamento de recursos naturais. Para eles, se houvesse sensibilização global, investimentos, desenvolvimento econômico, controle populacional e dispersão das práticas industriais, seria possível levar o mundo a uma correta economia mundial (KARUNARATNE, 1976).

O *RIO: Reshaping the International Order* foi o último relatório, separado em quatro partes. A primeira demonstrou como a falta de execução de planos de estratégia culminou no aumento da poluição e dos custos energéticos, por motivos como escassez de minerais e alimentos, alterações nos oceanos, explosão populacional e corrida armamentista. A segunda parte descreveu ações necessárias para o bem-estar social, dentre elas, a integridade ambiental. A terceira parte abordou propostas para o desenvolvimento de diferentes áreas, dependendo de cada região comum, envolvendo: recursos, tecnologias, ecologia, armamentos e a situação dos oceanos. A última fração do relatório foi composta por diagnósticos dos grupos de trabalho (TINBERGEN, 1976).

3.4.2 Organização das Nações Unidas (ONU) Estocolmo (1972)

A Conferência de Estocolmo foi responsável pela criação de uma declaração com esclarecimentos das maiores causas para haver cautela quanto à situação ambiental. É evidente o acelerado avanço da tecnologia e de meios que podem modificar a natureza de maneira intensa, o que pode gerar poluição, destruição, desperdício e escassez de recursos. Países industrializados e desenvolvidos são responsáveis pela maior parte dos impactos ambientais, mas a insuficiência de necessidades básicas humanas é enfrentada por populações de locais em desenvolvimento. Por meio de colaboração mundial, é possível conduzir técnicas avançadas de modernização, capazes de contribuir com o meio ambiente e possibilitar um mundo com maior equidade, visando sempre às futuras gerações (ONU, 1972).

A declaração sobre a Conferência também possui 26 princípios, elaborados para auxiliarem na instrução da população para adaptação às práticas sustentáveis e adequadas. Fundamentalmente, é aconselhado preservar recursos naturais, aperfeiçoar a produção de recursos renováveis, conservar a natureza, utilizar com cautela recursos não renováveis, evitar o descarte de substâncias tóxicas diretamente na natureza, entre outros. Além disso, é destacada a importância da planificação econômica, para que as estratégias de preservação sejam devidamente aplicadas de forma global (ONU, 1972).

3.4.3 Relatório Brundtland (1987)

A consideração de questões sociais, abordadas desde o Clube de Roma, e fatores determinantes da ONU Estocolmo, foram, novamente, fundamentais na concepção do Relatório Brundtland. O documento elaborado a partir da convenção, denominado “Nosso Futuro Comum”, foi composto pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), com participantes de 21 países, constituindo prática notável para a exposição de diferentes perspectivas (CMMAD, 1991).

A elaboração dos parâmetros ambientais almejados partiu da ideia da satisfação de necessidades de todas as pessoas em todos os países. É evidente que os padrões de vida de uma população devem ser equilibrados com relação aos recursos naturais disponíveis, ou seja, se o interesse é a equidade social, de forma que não haja esgotamento de matéria, é necessária a interrupção do crescimento populacional acelerado. Destaca-se que, além do controle de natalidade, esse crescimento é influenciado também pela migração das populações rurais para o meio urbano, que, em decorrência do crescimento desordenado, não é capaz de arcar com soluções que atendam às pessoas, que acabam expostas a falta de habitação, água e saneamento, além de poluição do ar e da água e riscos naturais e industriais (CMMAD, 1991).

O consumo exacerbado em países desenvolvidos agrava a limitação de acesso a recursos nos países mais pobres, onde as populações também não dispõem de situações financeiras e tecnológicas adequadas, e acabam tendo maior dificuldade de lidar com problemas ambientais, como deterioração de bacias fluviais e da qualidade do ar, fatores prejudiciais à saúde. Por isso, deve haver abordagem integrativa entre

o desenvolvimento econômico e o social. A educação e a saúde são fatores que podem aumentar a eficácia em atividades econômicas, acelerando o desenvolvimento do país (CMMAD, 1991).

Deve-se atentar a limites energéticos, devido a problemas de abastecimento e problemas de emissão, principalmente ao tratar de ácidos e acúmulo de dióxido de carbono. As reservas de combustível fóssil estão se tornando escassas. Uma forma de resolução é a exploração de recursos energéticos renováveis. A prevenção de emissões é medida muito mais viável, visto que retirar produtos tóxicos do ambiente requer tecnologia avançada e elevado investimento (CMMAD, 1991).

“O aumento do consumo de combustível e matérias-primas torna mais estreitos os vínculos físicos entre os ecossistemas de diferentes países. (...) No futuro, talvez mais que agora, o desenvolvimento sustentável vai exigir a unificação da economia e da ecologia nas relações internacionais” (CMMAD, 1991, p. 70).

3.4.4 Rio-92 (1992)

De forma a homenagear os 20 anos desde a Conferência de Estocolmo (1972), foi realizada, no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD). O evento reuniu mais de 100 chefes de Estado de todo o mundo, marco de extrema importância, visto que em encontros anteriores, esse número permanecia entre 20 e 30. Os pronunciamentos de cada representante foram permitidos em, no máximo, sete minutos, salvo algumas exceções (BERNARDO, 2022). Esse sistema foi extremamente significativo, à medida que o ponto de vista de cada país participante pôde ser considerado.

Um dos documentos mais relevantes assinados na Conferência foi a Agenda 21, que explora assuntos de meio ambiente e desenvolvimento ao longo de 40 capítulos, divididos em quatro seções: i) Dimensões sociais e econômicas; ii) Conservação e gestão dos recursos para o desenvolvimento; iii) Fortalecimento do papel dos grupos principais; e iv) Meios de implementação. Muitas questões já mencionadas em conferências anteriores foram rediscutidas. O capítulo 9 é centrado na proteção da atmosfera, abordando, além do incentivo à ciência para considerar incertezas quanto à prevenção da destruição da camada de ozônio e à poluição atmosférica transfronteiriça, questões de promoção do desenvolvimento sustentável (por meio de planos para o desenvolvimento, o aumento da eficiência e a redução do

consumo de energia; transportes; desenvolvimento industrial; e desenvolvimento dos recursos terrestres e marinhos e uso da terra) (BRASIL, 1995).

Os objetivos de energia demonstram a necessidade de utilização de sistemas renováveis, que possam diminuir a poluição e aumentar a eficiência. Além disso, ponderam aspectos de equidade, de forma a igualar a utilização de energia por todos os países. Porém, é importante criar uma solução para países dependentes da renda de combustíveis fósseis, sem que haja complicações. Para os transportes, o objetivo é a criação de programas que possam limitar as emissões de poluentes e de gases que danificam a atmosfera. É importante considerar o custo-benefício e as especificidades locais, mas sempre priorizando o desenvolvimento e a qualidade de vida (BRASIL, 1995).

Em relação ao desenvolvimento industrial, são recomendados o aperfeiçoamento e a inovação, através de tecnologias que possam auxiliar na redução da poluição, sempre objetivando, também, maior eficiência. Já para o desenvolvimento de recursos terrestres e marinhos e uso da terra, existem práticas diretamente influenciadas por variações climáticas. A perda de recursos pode desequilibrar ecossistemas, além de contribuir com as emissões em casos de transformações antropogênicas, como agropecuária e desmatamento. Além de reduzir as emissões, é necessário que haja maior atenção para conservação e uso sustentável de recursos (BRASIL, 1995).

3.4.5 Protocolo de Kyoto (1997)

A preocupação com a emissão descontrolada de gases de efeito estufa (GEE) culminou na realização da Conferência em Kyoto, em 1997. O Protocolo criado por meio da concordância dos países participantes teve o objetivo de diminuir emissões de GEE nos países industrializados, de forma que no período de 2008 a 2012, os gases presentes na atmosfera pudessem reduzir 5% em relação ao ano de 1990 (BRASIL, 2004).

Dentre os gases considerados para redução de emissões, estão dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Foram identificados, também, os setores que contribuem com a liberação dos gases na atmosfera, sendo energia (como queima de combustível, indústrias de transformação e de construção

civil e transporte), processos industriais, uso de solventes e outros produtos, agricultura e resíduos (BRASIL, 2004).

Para promover o desenvolvimento sustentável, algumas práticas foram delineadas. Dentre elas, há as que visam aumentar a eficiência energética de acordo com cada país e suas particularidades de desenvolvimento, propiciar agricultura sustentável de acordo com padrões de variações climáticas, desenvolver formas renováveis de energia e instrumentos que possam realizar o sequestro de dióxido de carbono, subsidiar setores que contribuem para diminuição de emissões, reduzir emissões no setor do transporte e rebaixar liberação de gás metano advindo de resíduos (BRASIL, 2005).

Apesar do Protocolo ser diretamente relacionado aos gases de efeito estufa, é evidente que os setores de alerta para emissões são os mesmos que podem liberar os gases poluentes. Os planos e medidas de limitações dos gases podem, indiretamente, contribuir para a mitigação da poluição atmosférica de extremo risco para a saúde humana, da fauna e da flora.

3.4.6 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2014)

A variação climática foi o precursor da elaboração do Relatório Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), documento determinante para a coleta de informações e a proposta de possíveis soluções para as adversidades. Esse Relatório é separado em alguns itens (IPCC, 2015).

O primeiro item refere-se às mudanças que ocorrem no Planeta e suas causas, incluindo transformações atmosféricas, dos oceanos – com destaque para o aumento do nível da água –, e da criosfera; influências humanas que podem colaborar para aumento de taxas de emissões; e eventos climáticos extremos que têm origem em alterações do clima. As mudanças climáticas futuras, considerando riscos e impactos, são abordadas no segundo item. Informações sobre elementos responsáveis por estimular consequências ao longo do tempo, conexão de emissões e mudanças de temperatura são pontuadas. Com isso, foi possível mapear probabilidades de oscilações, como o aumento do nível do mar (e sua constante acidificação), e cenários de mudanças irreversíveis (IPCC, 2015).

O terceiro item menciona os caminhos para desenvolvimento sustentável no futuro. Dessa forma, algumas estratégias podem auxiliar na diminuição dos riscos das

alterações climáticas por meio de práticas sustentáveis, que possam limitar contribuintes poluentes e trazer benefícios para o futuro. No último item, o intuito é abordar possíveis soluções, como tecnologias saudáveis, estilos de vida sustentáveis, etc. (IPCC, 2015). A partir disso, infere-se ser possível a integração de todos os envolvidos, nos âmbitos ambiental, social e econômico, onde cada local possa responder de forma representativa, desde que haja consciência.

É importante ressaltar que a variação atmosférica foi considerada como uma ocorrência que está provocando constante aquecimento da superfície terrestre desde 1850. Esse fator aumenta os riscos para ecossistemas, através de elevação de temperatura e precipitações extremas, além de inundações e deslizamentos de terra, escassez de água e poluição do ar (IPCC, 2015).

Outras conferências ambientais importantes poderiam ser citadas, porém não direcionam foco específico em poluentes atmosféricos ou soluções de diminuição de emissões desses gases. Essas, em conjunto com outras, que apenas complementam aquelas já discutidas, são apresentadas no Quadro 2:

Quadro 2 – Conferências Ambientais

Conferências Ambientais	Temas Principais de Discussão
Rio +20 (2012)	Aspectos socioeconômicos
Protocolo de Montreal (1987)	Emissões Nocivas apenas à Camada de Ozônio
Acordo de Paris (2015) e COP26 (2021)	Gases de Efeito Estufa

Fonte: Autora (2023).

A globalização das discussões sobre o meio ambiente é importante para a elaboração de práticas para cada localidade. Dessa forma, cada país, estado e município pode incorporar planos específicos de mitigação de gases, contribuindo parcialmente na melhora da qualidade do ar.

3.5 Legislações nacionais e municipais sobre emissões e qualidade do ar

As legislações nacionais a serem abordadas consistem em questões gerais de mobilidade (3.5.1) e temas ambientais (3.5.2; 3.5.3; 3.5.4), elaborados pelo CONAMA, para tratar de problemas de qualidade do ar e emissões advindas do setor do transporte. As legislações municipais dispõem de maior controle e prioridades que devem ser seguidas de acordo com as particularidades locais, seguindo as regulamentações de âmbito nacional. Para Belo Horizonte, serão analisadas, também, questões gerais de mobilidade (3.5.5; 3.5.6) e temas ambientais (3.5.7; 3.5.8).

3.5.1 Política Nacional de Mobilidade Urbana

Os princípios adotados pela Política Nacional de Mobilidade Urbana, Lei nº 12.587 de 2012, fazem jus à sustentabilidade, integrando todos os conceitos advindos da sociedade, da economia e do ambiente. O País tem o papel de estimular a mobilidade urbana e oferecer contribuições técnica e financeira, além de garantir o acesso a informações necessárias sobre o tema. O transporte urbano requer igualdade de acesso, além de eficiência, de modo que os usuários sejam bem atendidos. Além disso, diretrizes como priorização de transportes coletivos acessíveis e confiáveis – com funcionamento através de energia renovável e que não emitam poluentes na atmosfera – e não motorizados – como a implantação de redes de ciclovia – são essenciais (BRASIL, 2013).

Além disso, a Lei propõe algumas soluções que podem ser aplicadas nas cidades de forma a incentivar a mobilidade sustentável, por meio de medidas como restrição do uso de veículos motorizados em locais e horários definidos, implementação de padrões de controle de poluentes (definindo uma meta), cobrança de tributos para proprietários de veículos automotores, estabelecimento de faixas exclusivas para transporte coletivo e individual não motorizado, limitação de áreas de estacionamento público e privado, definição de local para passagem de transporte de carga e combate ao transporte ilegal de passageiros (BRASIL, 2013).

3.5.2 Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar

O Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) foi uma iniciativa elaborada visando às mais importantes considerações sobre a poluição atmosférica causada pelo acelerado crescimento urbano e industrial e da frota de veículos automotores. A limitação das taxas de emissões atmosféricas pode beneficiar a qualidade de vida das pessoas (BRASIL, 1989).

Foram determinados dois padrões de qualidade atmosférica, sendo primários (são os poluentes que afetam a saúde dos indivíduos caso ultrapassem determinados limites – sendo necessárias metas de curto e médio prazo para adequar as emissões) e secundários (poluentes em níveis abaixo do mínimo estabelecido, sendo padrões esperados como metas de longo prazo). O estabelecimento de unidades de monitoramento foi imprescindível para a gestão dos poluentes, de forma a integrar

diversos órgãos que possam desenvolver tecnologias capazes de garantir bom funcionamento em determinadas regionais (BRASIL, 1989).

3.5.3 Programa de Controle de Emissões Veiculares

A criação do Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE) teve a finalidade de adequar os níveis de emissões de acordo com a qualidade mínima do ar, além de sensibilizar os usuários sobre a quantidade de poluentes liberados por veículos automotores e promover o aprimoramento de características técnicas de combustíveis líquidos (BRASIL, 1986). É de responsabilidade da Resolução, também, a limitação de emissões para:

- Veículos leves (com motores do ciclo Otto), sendo necessário que haja garantia do fabricante de que nenhuma emissão ultrapassará os limites máximos em até 5 anos ou 80.000 km rodados.
- Veículos pesados (com motores do ciclo Otto), com garantia de que nenhuma emissão ultrapassará os limites máximos em até 5 anos ou 160.000 km rodados.
- Veículos pesados (com motores do ciclo Diesel), com a mesma garantia dos veículos do item anterior.

O Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) deve, assim, ser o responsável por ensaios e medições, por meio de normas técnicas que auxiliem no alcance dos resultados. A partir disso, é de responsabilidade estadual e municipal, principalmente, o controle da inspeção e da manutenção dos veículos.

3.5.4 Plano de Controle de Poluição Veicular

Como aperfeiçoamento do PROCONVE, o Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV) é um plano com a finalidade de garantir a correta manutenção e inspeção dos veículos, a depender de cada estado ou município, além de gerenciar o controle de emissões e o consumo de combustíveis. A formulação de uma base de dados que monitora as emissões por fontes móveis é importante para definir a extensão geográfica prioritária, a frota a ser analisada, o registro dos veículos, a frequência da inspeção e o reconhecimento de fatores financeiros, sempre

considerando a integração entre programas de segurança ou que dispõem de questões similares (BRASIL, 2009).

Ao ser constituída a base de dados, é necessária a análise dos resultados, de forma a comparar as emissões com os limites almejados, considerando novas alternativas de controle ou novas tecnologias que possam colaborar com a diminuição de gases poluentes, e a relação do custo-benefício dos Programas utilizados no monitoramento e na inspeção. As informações geradas pelos relatórios do PCPV são públicas, o que promove a sensibilização popular, contribuindo para que a população siga os procedimentos demandados para cada tipo de veículo (BRASIL, 2009).

3.5.5 Plano de Mobilidade de Belo Horizonte

Um dos objetivos do Plano de Mobilidade de Belo Horizonte (PLANMOB) é, principalmente, o estímulo ao desenvolvimento de transportes coletivos (que sejam menos poluentes) ou não motorizados que possam atender à população, garantindo acessibilidade e conectividade do espaço urbano através da priorização de investimentos. Para isso, questões como uso e ocupação do solo foram consideradas, para compreender a capacidade dos sistemas de transporte (BELO HORIZONTE, 2013).

A infraestrutura dos transportes foi desenvolvida por meio da construção de áreas preferenciais para o transporte público coletivo, além da implantação de locais de embarque e desembarque para os usuários. Além disso, outra medida implementada foi a ampliação do número de viagens em combinação com o aumento da integração física, operacional e tarifária do transporte coletivo. Para promover melhoria contínua dos sistemas, o monitoramento da satisfação da população foi proposto, de modo que os usuários possam participar das decisões. Desse modo, atrativos para a utilização dos veículos coletivos foram implementados, com a evidência da importância do cuidado com o meio ambiente, que é diretamente responsável pela melhoria da qualidade de vida. Para garantir a funcionalidade dos sistemas, foram estipuladas algumas medidas, como definições de padrões de emissões de poluentes e restrições de veículos motorizados em locais específicos (BELO HORIZONTE, 2013).

Com o intuito de monitoramento do PLANMOB, o Observatório da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte (OBSMOB-BH) foi criado. Dessa forma, foi possível

acompanhar o desempenho das políticas promovidas, divulgar informações e contribuir para a continuidade de estudos e pesquisas (BELO HORIZONTE, 2013).

3.5.6 Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte

A Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB) é uma autarquia criada com diversas competências e poderes. No geral, são responsabilidades da SUMOB planejar, organizar, fiscalizar e gerenciar o trânsito e os serviços de transportes, implementando as políticas do PLANMOB. O intuito é sempre priorizar o pedestre, as ciclovias e o transporte coletivo. A administração do transporte público e privado também é realizada, além da promoção de pesquisas que possam colaborar no desenvolvimento de fontes de energia que causam baixo impacto ambiental. O controle de emissões de poluentes também é realizado (BELO HORIZONTE, 2021b).

O Fundo Municipal de Mobilidade Urbana (FMU) foi desenvolvido para aplicação de recursos orçamentários nas áreas de interesse da SUMOB, para realização de, por exemplo, obras para melhorar a eficiência do transporte coletivo, incentivo a novas tecnologias para aprimorar a experiência dos passageiros, e implantação de elementos de trânsito, como sinalização. Foi criado, também, o Fundo Municipal de Melhoria da Qualidade e Subsídio ao Transporte Coletivo (FSTC), que avalia as políticas públicas criadas para alcançar, principalmente, as metas do OBSMOB-BH (BELO HORIZONTE, 2021b).

3.5.7 Política de Controle e Fiscalização de Fontes Poluidoras

A necessidade de melhoria da qualidade de vida e da maior conservação do meio ambiente tornou-se imprescindível, promovendo a criação do Decreto nº 16.529 de 2016. Padrões de qualidade do ar estão sendo constantemente avaliados, seja em nível municipal, estadual ou federal. Dessa forma, as emissões podem ser acompanhadas e controladas, dependendo das concentrações na atmosfera (BELO HORIZONTE, 2016).

Uma forma de controlar a emissão de fontes móveis, de forma a respeitar os padrões, é a proibição da circulação dos veículos que possuem motor de ciclo Diesel ou Otto com emissões de gases poluentes acima dos limites propostos. No caso dos motores de ciclo Diesel, existe, também, um nível máximo de fumaça que pode ser

liberada pelo escapamento do veículo. Todos os veículos analisados são identificados por meio de um adesivo que não deve ser removido. No caso de infração, é realizado o bloqueio do cadastro no Registro Nacional de Veículos Automotores e, a partir da 3ª reincidência, é feita a interdição da fonte poluidora (BELO HORIZONTE, 2016).

3.5.8 Operação Oxigênio

A Operação Oxigênio (OPEROX) foi elaborada para promover a fiscalização de veículos com motores de ciclo Diesel, como ônibus e caminhões, por meio de vistorias repentinas, realizadas através de paradas em pontos específicos da cidade. O método mais utilizado para avaliação considera a medição da fumaça e das faixas de rotação, e os testes incluem aceleração e desaceleração dos motores (BELO HORIZONTE, 2021a).

Além da fiscalização, é importante ressaltar o caráter educativo das práticas, que estimulam a realização das inspeções. Caso os veículos estejam irregulares, a normalização é responsabilidade dos proprietários, devendo ser realizada no prazo de 15 dias (BELO HORIZONTE, 2021a).

3.6 Parâmetros na busca pela sustentabilidade

Distintas culturas, histórias, economias e sociedades existem por todo o Planeta. Múltiplas comunidades possuem pontos de vista diferentes sobre a esfera ambiental, as características do meio, a utilização dos recursos e as maiores preocupações sobre a degradação do solo, da água e do ar. Tais divergências foram imprescindíveis para a realização de rica e intensa discussão na Conferência de Estocolmo, em 1972 (apresentada no item 3.4.2) (CETEC, 1983).

É notável o crescimento econômico vinculado à industrialização – que, por sua vez, tende a promover a urbanização –, porém, a incorreta administração, principalmente nos países desenvolvidos, acarreta em perda de qualidade de vida e esgotamento de recursos naturais, fatores essenciais na abordagem do tema do meio ambiente (CETEC, 1983).

O transporte é responsável por impulsionar o desenvolvimento, fazer conexões entre locais e pessoas, facilitar as relações e atender às necessidades de cada indivíduo. Porém, considerando o grande papel positivo realizado, o transporte é, também, um dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica, fator que

demonstra a alta prioridade de novas tecnologias de energia e combustíveis limpos. As recomendações para adequação do transporte a meios sustentáveis foram elaboradas pela ONU, considerando 10 princípios (HIGH-LEVEL ADVISORY GROUP ON SUSTAINABLE TRANSPORT, 2014):

1. Decisões baseadas em desenvolvimento social, crescimento econômico e impactos ambientais;
2. Equilíbrio entre os idealizadores das práticas – em todos os níveis governamentais – e os territórios onde serão implantadas;
3. Criação de apoios governamentais para promover o transporte sustentável;
4. Colaboração entre a capacidade técnica dos planejadores locais e parcerias de órgãos internacionais, incentivando maior equidade;
5. Fortalecimento de práticas que minimizem o trânsito rodoviário e previnam acidentes;
6. Promoção da integração da população com as novas propostas;
7. Estabelecimento de estações que possam coletar e monitorar dados de transporte;
8. Inclusão de financiamento diversificado e quadros fiscais para auxiliar os projetos;
9. Aumento do financiamento internacional e incentivo ao financiamento climático para a concepção de transportes sustentáveis;
10. Integração de um governo orientado aos resultados e que possa encorajar o investimento do setor privado, através de incentivos.

A ONU também foi responsável pela criação do documento intitulado “*My Neighbourhood*”, que é focado no planejamento urbano objetivando o desenvolvimento sustentável, considerando especificidades de cada local. Cinco categorias foram analisadas, sendo (IGNATOVA, 2024):

1. Cidade compacta: a proximidade entre a vizinhança garante a locomoção por meio de caminhadas e por uso de bicicletas. Os transportes públicos devem ser planejados de forma que o acesso aos veículos de baixa capacidade seja de 500 metros, enquanto aos de alta capacidade seja de 1.000 metros, permitindo que as pessoas os alcancem com maior facilidade. É também recomendado que as áreas de estacionamento de veículos individuais não sejam priorizadas, para desincentivar o uso e mitigar emissões, além de

- favorecer apropriados espaços públicos. Os níveis de barulho e poluição precisam ser medidos para garantir a segurança das pessoas.
2. Cidade conectada: a conexão da cidade depende de transportes. Porém, a partir da ideia da cidade compacta, é recomendado que o espaço destinado para estradas e locais de estacionamento seja apenas 30% da cidade (sempre priorizando rotas de caminhada, ciclismo e transporte público), enquanto 15 a 20% da cidade seja para criação de espaços públicos abertos. Além disso, a rede viária deve abordar diferentes meios de transporte, que possam ser úteis para diferentes tipos de viagens.
 3. Cidade inclusiva: a tipologia misturada de diferentes variedades de construções pode incentivar a inclusão de diferentes estilos de vida. Além disso, é necessário considerar a acessibilidade financeira, em que moradias de menor custo possam estar localizadas em 20 a 50% de áreas residenciais. Os serviços e oportunidades de emprego também devem ser disponíveis dentro de cada vizinhança. A acessibilidade física também é imprescindível, em termos de transportes, edifícios e espaços públicos.
 4. Cidade vibrante: a diversidade de funções e usos nas vizinhanças garante a interação dos moradores com as atividades profissionais, comerciais, educacionais, de lazer, entre outras. O transporte auxilia essas práticas, trazendo oportunidades e facilidades de acesso para toda a população. A identidade e a revitalização das construções são ótimos recursos que podem incluir a cultura local e trazer valor social, e o espaço natural também deve sempre ser promovido e conectado às comunidades, garantindo a preservação da natureza e da biodiversidade.
 5. Cidade resiliente: para garantir a resiliência urbana, algumas iniciativas são a eficiência por meio de correto uso do solo e da infraestrutura, a implementação de locais destinados para transportes não motorizados, o foco em redução do uso de automóveis e a proteção da natureza. O design dos bairros deve ser realizado considerando o clima local (umidade, chuva, sazonalidade) e a topografia, de forma a aproveitar sombreamentos e a direção de vento, além de reduzir o consumo energético. Áreas naturais, vegetais e aquáticas devem ser preservadas e integradas às vizinhanças. A vegetação também pode ser incluída no local, por meio de, por exemplo, tetos verdes.

3.7 Obras análogas

Esta seção é subdividida em dois itens, um deles sobre a experiência de Transporte em Medellín, Colômbia; e o outro sobre a experiência do Transporte em Estocolmo, Suécia.

3.7.1 Transporte em Medellín – Colômbia

Como parte do processo de elaboração da Segunda Conferência Global sobre Poluição Atmosférica e Saúde, foi produzida uma nota contendo conceitos que estão sendo utilizados em diversos países para contribuir com a mitigação de emissões e a melhoria da qualidade de vida. Na Colômbia, o sistema de transporte público promoveu o avanço das condições de saúde da população, situação que resultou, também, na diminuição de congestionamentos e na restauração de locais públicos (WHOa, 2023). A Figura 3 representa cinco tipos de meios de transporte da cidade.

Figura 3 – Meios de transporte em Medellín, Colômbia



Fonte: SITVA, 2023 (adaptado).

Os metrôs apresentam duas linhas que conectam extremidades da cidade e são responsáveis pela locomoção de cerca de 800 mil pessoas por dia. Os cabos (teleféricos) possuem cinco linhas e são importantes na parte mais alta da cidade, possibilitando melhor integração. O Metroplus realiza viagens em vias exclusivas,

conectando-se com estações de metrô e bondes. Os bondes são veículos elétricos mais novos, onde os passageiros podem desfrutar, durante nove paradas, da vista de longas galerias urbanas. Os ônibus complementam os outros sistemas de transporte, permitindo que a população possa se deslocar por toda a cidade (SITVA, 2023). Na Tabela 1 constam informações quanto à disponibilidade de veículos e à distância percorrida.

Tabela 1 – Dados sobre os meios de transporte em Medellín, Colômbia

Meio de transporte	Distância percorrida	Unidades
Metrô (1995)	31,3 km	80 trens
Cabos (2004)	12,6 km	326 teleféricos
Bonde (2016)	4,3 km	12 bondes
Metroplus (2011)	27 km	31 ônibus articulados e 57 ônibus
Ônibus alimentadores e rotas integradas	-	370 veículos

Fonte: SITVA, 2023 (adaptado).

3.7.2 Transporte em Estocolmo – Suécia

O Condado de Estocolmo, composto pela capital da Suécia e as municipalidades vizinhas, inclui diversos serviços de transporte, desde trens, metrô, ônibus, bondes e até barcos. Grande parte dos veículos são de responsabilidade da mesma empresa, Storstockholms Lokaltrafik (SL), e o transporte dos barcos é de responsabilidade da Waxholmsbolaget. Porém, o mesmo cartão eletrônico possui validação em todos os transportes (SL, 2023).

O metrô possui três linhas principais, azul, verde e vermelha, que fazem a conexão do centro da cidade até as áreas ao entorno. A distância percorrida por ele é de mais de 100 km e existem 100 estações, além de 270 vagões. Já os trens suburbanos são compostos de quatro linhas e 54 estações e, em algumas dessas estações, existe uma conexão direta com serviços de ônibus (SL, 2023).

Os ônibus em Estocolmo são extremamente versáteis, sendo compostos por 500 linhas, 6.500 pontos de parada e cerca de 2.200 veículos. Existem ônibus que fazem percurso noturno, realizam rotas intensas em horários de pico, vão para o centro da cidade, circulam nos arredores, dentre outros. Além disso, os números identificadores dos veículos estão relacionados às suas rotas. Os bondes da cidade fazem percurso, principalmente, para destinos turísticos, por meio de uma única linha, inaugurada em 2010. Por último, os barcos são constituídos por quatro linhas, que garantem integração das regiões pelo arquipélago (SL, 2023). Os principais veículos são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Ônibus, Bonde, Metrô e Barco de Estocolmo, Suécia



Fonte: CIVITATS ESTOCOLMO, 2023.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi de caráter exploratório, elaborada através de um estudo de caso sobre o qual o tema proposto foi investigado. A abordagem é mista – quantitativa, visto que existe foco na análise de dados das emissões de gases poluentes, e qualitativa, pois propõe solução para o transporte público urbano visando à melhoria da qualidade de vida por meio de política sustentável. O intuito foi vislumbrar ações intervenientes ao tema, através de compreensões, interpretações e perspectivas. Os procedimentos utilizados foram:

- a. Revisão bibliográfica: entendimento dos conceitos que foram utilizados através de pesquisa de obras e autores significativos, bem como investigação sobre conferências do tema de meio ambiente e consideração de práticas sustentáveis utilizadas em outros países;
- b. Análise de documentos: estudo de dados disponibilizados pela FEAM e pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), e dados secundários, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), além de análise de legislações nacionais e municipais;
- c. Análise de dados: utilização de softwares (linguagem Python e Microsoft Excel);
- d. Análise de mapas: utilização de plataformas (Google Earth e BHMap);
- e. Estudo de caso: observação da cidade de Belo Horizonte para compreensão das demandas que poderiam ser auxiliadas através da utilização de transporte coletivo movido por energia renovável e limpa: i) análise das tecnologias de sensoriamento de gases poluentes no contexto urbano, levando em consideração a captação de dados; ii) interpretação de dados, juntamente com softwares, dos locais mais afetados pela quantidade de gases em Belo Horizonte; e iii) proposta de amenização da poluição atmosférica por meio de gestão dedicada e implementação de linhas de metrô sustentáveis, considerando também a otimização da abrangência espacial, de forma que as pessoas se sintam incluídas.

4.1 Fontes e características dos dados utilizados

Para realização da metodologia, foram considerados diferentes dados da mesma Instituição (FEAM). A partir dos dados, três diferentes estudos foram realizados, de maneira a comparar resultados e inferir possíveis interpretações.

O primeiro estudo foi elaborado a partir dos “Dados de Monitoramento Contínuo da Qualidade do Ar”, disponibilizados no site da FEAM (FEAM, 2019). Os arquivos de diferentes cidades de Minas Gerais, fornecidos em formato .xls (compatível com o Microsoft Excel), são compostos por informações de diferentes gases poluentes – dentre eles CO, PM10, PM2,5, SO₂, NO₂ e O₃ –, que são relacionados ao nível de poluição gerado, por hora durante um ano, na unidade de medida de microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), com exceção do CO, medido em partes por milhão (PPM). Existem nos dados, também, informações locais distintas, como radiação total incidente na superfície (RS), umidade relativa (UR), pressão atmosférica (PA), temperatura (T°), direção do vento (DV), precipitação (PP) e velocidade do vento (VV), porém esses materiais não foram utilizados. O foco era verificar a quantidade de poluição captada pelos sensores referentes a cada gás.

O segundo estudo foi realizado a partir de dados disponibilizados por parceria da FEAM e da PETROBRAS, que desenvolveram, em conjunto, um relatório técnico, denominado “Atualização do Inventário das Fontes de Emissão de Poluentes Atmosféricos da Região de Belo Horizonte, Contagem e Betim” (FEAM; PETROBRAS, 2018). Esse documento registra importantes considerações de poluentes, desde fontes fixas até fontes móveis, associadas a avenidas e ruas de grande fluxo. As informações são apresentadas de acordo com a taxa de emissão, medida em toneladas por ano de cada gás em cada via. A importância desse estudo foi relacionar todas as vias que seriam contempladas pela proposta de metrô, apresentada no item 6, com a diminuição das emissões, por meio da redução do número de veículos individuais e incentivo ao uso do metrô, de funcionamento elétrico e renovável.

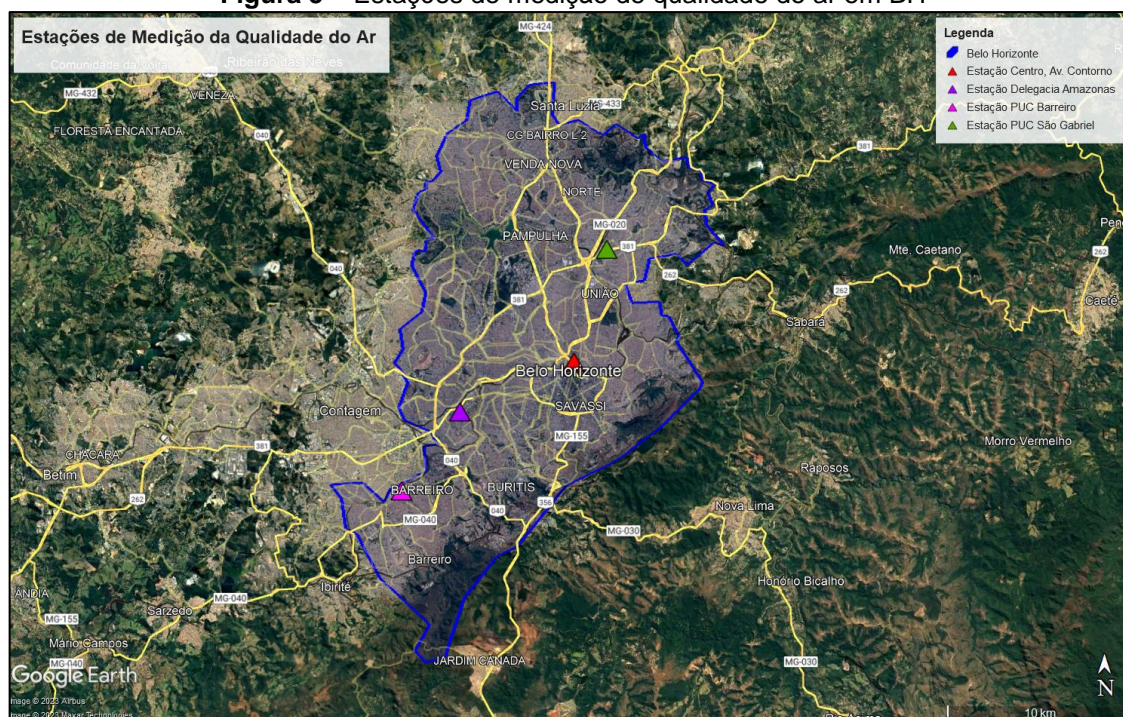
O último estudo, desenvolvido a partir do relatório “Emissões Atmosféricas de Fontes Veiculares do Município de Belo Horizonte”, da FEAM (FEAM, 2020), utilizou dados de emissões de fontes móveis (veiculares), medidas em gramas por quilômetro. Os dados representam emissões de diferentes tipos de veículos: automóveis, motocicletas, ônibus e caminhões. O intuito desse estudo era averiguar se, caso

alguns veículos deixassem de circular devido à proposta de metrô, as emissões poderiam ser reduzidas.

4.2 Organização e tratamento dos dados utilizados

Os dados do primeiro estudo referem-se ao monitoramento da qualidade do ar em relação aos gases poluentes em alguns municípios de Minas Gerais. Em Belo Horizonte, foram estabelecidas estações em locais estratégicos, sendo: Pontifícia Universidade Católica (PUC) São Gabriel, PUC Barreiro, Delegacia Amazonas e Centro. Por haver muitos dados faltantes, a terceira estação não foi considerada na comparação de valores. Na Figura 5 é possível observar a localização das estações de medição de qualidade do ar.

Figura 5 – Estações de medição de qualidade do ar em BH



Fonte: Google Earth, 2023b (adaptado).

A base analisada foi disponibilizada pela FEAM (FEAM, 2019). Os dados armazenados estão organizados conforme dias e horários do ano de 2019 (nas linhas) e concentrações dos gases (nas colunas). A escolha de BH para a análise é justificada pelo objetivo de se compreender a situação da atmosfera nas suas diferentes regionais, além do município ter mais dados divulgados, pois a FEAM fornece dados de poucas cidades e, em algumas delas, os dados são predominantemente ausentes.

É importante ressaltar que constam no monitoramento alguns dados faltantes para determinados gases em certas épocas do ano, em que as causas das supressões das informações são desconhecidas. A retirada dos dados poderia influenciar na captação de dados dos outros gases e, por isso, a eliminação de linhas foi uma opção descartada.

A FEAM analisa seis gases, sendo: material particulado de diâmetro inferior a 10 micrômetros (PM10), material particulado de diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (PM2,5), NO₂, O₃, SO₂ e CO. Além da retirada das informações que não foram pertinentes ao trabalho, como RS, UR, PA, T^o, DV, PP e VV, o gás O₃ também não foi considerado na pesquisa, pela falta de dados importantes.

Os dados de concentração dos gases são expressos em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), com exceção do monóxido de carbono (CO), medido em partes por milhão (PPM). Para regularizar os dados para a mesma unidade de medida, foi necessário fazer a conversão de PPM para $\mu\text{g}/\text{m}^3$. O processo realizado foi baseado no Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar (BRASIL, 2019), definido pela Equação 5, de origem empírica:

$$C \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \frac{C \text{ (PPM)} \times \text{peso molecular} \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{0,02447} \quad \text{Eq. 5}$$

A concentração de PPM do CO deve ser multiplicada pelo peso molecular inerente ao gás, que, segundo o INMETRO (2012), é 28 g/mol. O valor de 0,02447 é uma constante. Na Equação 6, apresenta-se exemplo da conversão:

$$\frac{0,51 \times 28}{0,02447} = 584 \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad \text{Eq. 6}$$

As planilhas para processamento e tratamento dos dados foram aperfeiçoadas no software Microsoft Excel. Todas foram compostas por 8.760 linhas, referentes a todos os dias do ano, com os horários atrelados a cada um, de hora em hora. Após a limpeza das bases de dados fornecidas pela FEAM – excluindo-se as variáveis não utilizadas neste trabalho –, o intuito foi visualizar os atributos de maneira mais completa, sendo utilizado o Jupyter Notebook, software que incorpora a linguagem de programação Python. Primeiramente, realizou-se a importação de bibliotecas que possuem funções para realização de tarefas automaticamente, facilitando o

processamento de dados. Foram utilizadas as bibliotecas Pandas – que facilita a compreensão e manipulação de tabelas –, Numpy – que fornece a capacidade de realizar operações matemáticas em um conjunto de números –, e Matplotlib – para visualização dos dados através de gráficos.

É importante ressaltar que o Python possui a capacidade de importação de dados em formato “.xlsx”, compatível com o Microsoft Excel. Para isso, realizou-se upload da tabela do Excel no Jupyter Notebook e, assim, foi possível realizar a leitura (comando *read*) e a verificação dos dados (através do comando *head*, que é capaz de mostrar as cinco primeiras linhas dos resultados).

O próximo processo foi a criação da visualização, através de gráficos do tipo Boxplot. Os dados foram fornecidos ao software através de comandos como *title*, *xlabel* e *ylabel*, funções que adicionam o título do gráfico, do eixo x e do eixo y, respectivamente. É importante ressaltar que dados considerados *outliers*, que são valores discrepantes, foram ocultados para melhorar a visualização dos gráficos (*showfliers = false*) e foi incluída a média dos valores (*showmeans = true*). Os eixos verticais foram configurados através da função *yylim*, que é capaz de aplicar uma mesma escala em todos os gráficos, facilitando, também, a interpretação dos recursos visuais.

Por fim, as estatísticas foram resumidas por meio do comando *describe()*, possibilitando a impressão do número de dias e horários contendo dados capturados pelas estações de monitoramento para cada gás poluente (24 horas de 365 dias, totalizando 8.760 valores), a média dos valores, o desvio padrão, o valor mínimo, o primeiro quartil (25%), o segundo quartil (50%), o terceiro quartil (75%), e o valor máximo registrado. É crucial evidenciar que os gases estão expressos em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), porém, no caso do monóxido de carbono (CO), foi necessário dividir o valor por oito: $(\mu\text{g}/\text{m}^3)/8$, para equalizar e facilitar a visualização dos gráficos – já que, sem esse artifício, a visualização dos demais dados ficaria muito prejudicada. Assim, torna-se necessária a multiplicação dos resultados por oito quando comparados aos dos outros gases. Na Figura 6, demonstra-se a programação utilizada, exemplificando o caso da estação Centro.

Figura 6 – Codificação para análise de dados sobre os gases poluentes

```

# Importação de bibliotecas:
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline

# Leitura, em dataframe, do arquivo contendo todos os setores:
dados_gases = pd.read_excel('BHCENTRO.xlsx')
dados_gases.head()

# Criação de boxplot para todos os setores:
grafico_gases = dados_servicos.boxplot(showfliers = False, showmeans = True)
grafico_gases.set_title('Estação Centro, Av. Contorno - Belo Horizonte')
grafico_gases.set_xlabel('Gases Poluentes')
grafico_gases.set_ylabel('µg/m³')
grafico_gases.set_ylim(-20, 410)

# Análise estatística para todos os setores:
dados_servicos.describe()

```

Fonte: Autora (2023).

Em relação ao segundo estudo, o documento disponibilizado pela parceria da FEAM e da PETROBRAS (2018) foi importante para a realização de análise das vias beneficiadas pela proposta de metrô apresentada neste trabalho, de forma a compreender a quantidade de poluentes emitidos por fontes móveis em cada local.

As taxas de emissão apresentadas no relatório para as vias de BH estão disponibilizadas na Tabela 2. Os valores contêm a distância total das avenidas e ruas e, para cada uma delas, existe um valor de emissão de gases poluentes, estabelecido em toneladas por ano.

Tabela 2 – Taxa de emissão de gases poluentes em vias de Belo Horizonte

Fonte Emissora/ Avenidas-Ruas	Taxa de Emissão (t/ano)							CO
	C (km)	PM10	PM2,5	SOx	SO ₂ (95%)	NOx	NO ₂ (10%)	
Afonso Pena	4,19	7,68	3,33	4,10	3,90	39,62	4,00	157,32
Vilarinho	5,92	12,46	5,82	5,96	5,66	68,89	6,89	216,44
Dom Pedro I	3,93	16,50	8,40	6,68	6,35	103,07	10,31	234,00
Pres. Antônio Carlos	8,33	37,26	18,11	16,60	15,77	223,77	22,38	609,08
Heráclito Mourão	4,00	3,68	1,60	1,94	1,84	19,00	1,90	74,54
Pres. Tancredo Neves	4,10	16,89	6,79	9,46	8,99	80,45	8,05	389,54
Dom Pedro II	6,20	11,96	5,32	5,99	5,69	62,51	6,25	229,54
Teresa Cristina	9,62	32,08	14,57	16,13	15,32	173,62	17,36	598,58
Antônio Eustáquio Piazza	N.D.*	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Nélio Cerqueira	1,76	1,48	0,74	0,60	0,57	8,86	0,89	21,18
Sen. Levindo Coelho	3,51	5,12	2,71	1,76	1,67	33,42	3,34	62,93
Waldyr Soeiro Emrich	5,69	11,37	5,42	5,20	4,94	63,74	6,37	186,87
SOMA:	57,25	156,48	72,81	74,42	70,70	876,95	87,70	2780,02

*N.D. = Não Definido.

Fonte: FEAM; PETROBRAS, 2018.

É importante ressaltar que os gases NO₂ e SO₂ foram calculados através de uma correlação com dados de outros gases. De acordo com um estudo de impacto

realizado pela empresa Linhares Energia (2008), o SO_x, que está presente no relatório, é emitido por meio da oxidação do enxofre, que é convertido, geralmente, em SO₂ (95%), SO₃ (1 a 5%) e sulfato particulado (1 a 3%). Já segundo Teixeira (2005), a combustão do NO_x resulta em NO (90 a 95%) e NO₂ (5 a 10%). Os valores utilizados foram 95% de SO_x para o SO₂ e 10% de NO_x para o NO₂.

As maiores emissões estão relacionadas aos gases monóxido de carbono (CO), material particulado (PM10) e dióxido de nitrogênio (NO₂). De forma geral, as Avenidas Presidente Antônio Carlos e Teresa Cristina alcançaram as maiores concentrações, situação que demanda maior atenção e constante busca de soluções que possam reduzir os impactos.

A medição do possível tamanho das linhas de metrô foi feita através do Google Earth, de forma a comparar como a taxa de emissão seria reduzida em cada via. A partir disso, foram calculados novos valores. Para estimar a redução nas emissões devido à implementação do metrô, determinou-se, primeiramente, a porcentagem de cada via atendida por este (coluna fator de atendimento), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores finais de emissões em Belo Horizonte após implementação do metrô

Fonte Emissora/ Avenidas-Ruas	C (km)	C - Metrô (km)	Fator de atendimento
Afonso Pena	4,19	4,19	1,00
Vilarinho	5,92	2,18	0,37
Dom Pedro I	3,93	3,93	1,00
Pres. Antônio Carlos	8,33	8,33	1,00
Heráclito Mourão	4,00	1,10	0,28
Pres. Tancredo Neves	4,10	4,10	1,00
Dom Pedro II	6,20	4,98	0,80
Teresa Cristina	9,62	9,62	1,00
Antônio Eustáquio Piazza	N.D.*	0,22	N.D.
Nélio Cerqueira	1,76	0,30	0,17
Sen. Levindo Coelho	3,51	0,80	0,23
Waldyr Soeiro Emrich	5,69	2,83	0,50
SOMA	57,25	42,58	-

*N.D. = Não Definido.

Fonte: Autora (2023).

No caso da Avenida Teresa Cristina, existe continuidade no município vizinho de Contagem, que está sendo levado em consideração para implementação do metrô – por isso a porcentagem representativa superaria 100%, o que não será adotado, tendo em vista que os dados disponibilizados contemplam apenas BH. Já no caso da Rua Antônio Eustáquio Piazza, não existem valores disponíveis referentes às emissões – contudo, diante de seu reduzido comprimento, admitiu-se que o impacto de não inseri-la no cálculo seria pequeno.

No caso do último estudo, realizado pela FEAM, em 2020, a compreensão da poluição atmosférica emitida por veículos móveis foi essencial. Estima-se que a população de BH, em 2019, era de aproximadamente 2.512.070 pessoas (ESTATÍSTICAS SOCIAIS, 2019). Visando analisar a redução de emissões por meio da utilização de dados mais gerais, que contemplam toda a cidade e considerando público-alvo de atendimento de 30%, admite-se que 753.621 pessoas usariam o metrô. Levando em conta os dados do IBGE (item 6.1), em 2019 havia 2.279.568 veículos em circulação na cidade. Ponderando as proporções de 69,17% de automóveis, 11,30% de motocicletas e motonetas e 0,41% de ônibus divulgadas pelo Instituto, estima-se que o metrô permitiria que 473.021 automóveis, 77.242 motocicletas e motonetas e 2.826 ônibus deixassem de circular (IBGE, 2019). As emissões de cada tipo de veículo estão apresentadas em g/km, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de emissão da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (g/km)

Categoria	CO (g/km)	NOx (g/km)	NO₂ 10% (g/km)	SOx (g/km)	SO₂ 95% (g/km)	PM (g/km)
Automóvel	2,136	0,263	0,026	0,046	0,044	0,003
Ônibus	1,612	8,270	0,827	0,130	0,124	0,322
Moto	2,598	0,117	0,012	0,019	0,0181	N.D.*

*N.D. = Não Definido.

Fonte: FEAM, 2020.

De acordo com a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2016), os veículos individuais, como os carros e as motos, viajam, em média, 7,4 km/dia. Já os ônibus fazem um percurso de 10,4 km/dia (considerando o tamanho da cidade, com população acima de 1 milhão de habitantes). Diante da distância percorrida por dia, é possível, então, calcular o percurso diário evitado pelos veículos que deixariam de rodar, conforme apresentado nas Equações 7, 8 e 9:

$$473.021 \text{ automóveis} \times 7,4 \text{ km/dia.automóvel} = 3.500.355 \text{ km/dia} \quad \text{Eq. 7}$$

$$77.242 \text{ motos} \times 7,4 \text{ km/dia.moto} = 571.591 \text{ km/dia} \quad \text{Eq. 8}$$

$$2.826 \text{ ônibus} \times 10,4 \text{ km/dia.ônibus} = 29.390 \text{ km/dia} \quad \text{Eq. 9}$$

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Esta seção é subdividida em três itens: o primeiro aborda fatores geocológicos estáticos de BH; o segundo versa sobre fatores ambientais dinâmicos de BH e o terceiro discorre sobre um breve histórico dos meios de transporte no contexto de BH.

5.1 Fatores geocológicos estáticos de Belo Horizonte

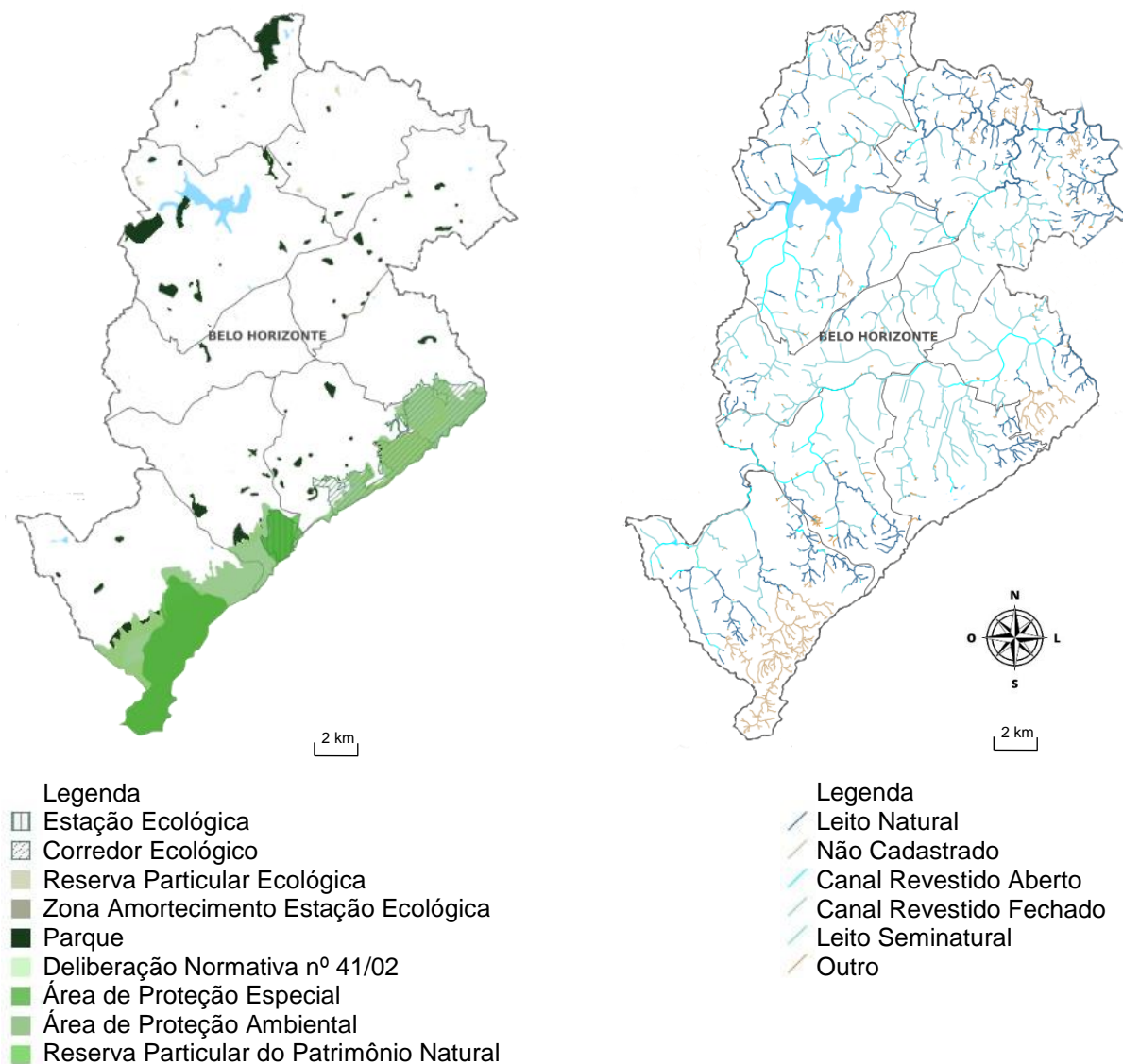
A análise da cidade de Belo Horizonte é imprescindível para avaliar como fatores estáticos, como relevo, vegetação e hidrografia, podem influenciar na percepção do espaço. A qualidade do ar pode estar diretamente relacionada à cobertura vegetal, diante da frequente troca gasosa realizada pelos seres fotossintetizantes. Além disso, a hidrografia também pode ser fator determinante, visto que a decomposição de poluentes presentes na água pode liberar gases danosos na atmosfera. O relevo é significativo do ponto de vista da direção do escoamento de água pluvial, que movimenta poluentes, principalmente em direção aos corpos d'água. Além disso, é necessária a análise do relevo para confirmar se há viabilidade de implementação da proposta do metrô, com a finalidade de incentivo à troca de veículos poluidores por um meio de transporte limpo e de energia renovável.

A vegetação de BH está espaçada por todo o território por meio de parques, que abrangem todas as regionais. Além disso, existe a vegetação difusa nas vias e em locais vagos. As maiores áreas de conservação e proteção são localizadas no sudeste e no sul da cidade. Porém, a cobertura vegetal está irrisória em relação à área urbana, questão que pode estar relacionada à dificuldade de trocas gasosas eficientes no ecossistema.

A hidrografia pode representar fator importante na análise de emissões atmosféricas. No caso de BH, é notável a existência de canais revestidos abertos nos cursos d'água que passam pela cidade, principalmente nas regionais Pampulha, Leste e Oeste. Esses canais podem sofrer com a poluição física, visto que as águas pluviais conduzem diversos materiais aos rios, e o processo de decomposição da matéria orgânica emite outros poluentes para a atmosfera. Além disso, nos locais onde há canalização fechada, esta apenas retém a poluição. Os cursos d'água em leito natural estão localizados principalmente nas extremidades, estando também suscetíveis à constante introdução de poluentes. Pode-se mencionar, também, a contaminação dos

corpos hídricos devido ao inadequado despejo de esgoto. Na Figura 7, é possível observar a prevalência das áreas verdes e a distribuição dos cursos d'água em BH.

Figura 7 – Unidades de conservação ambiental e cursos d'água em BH

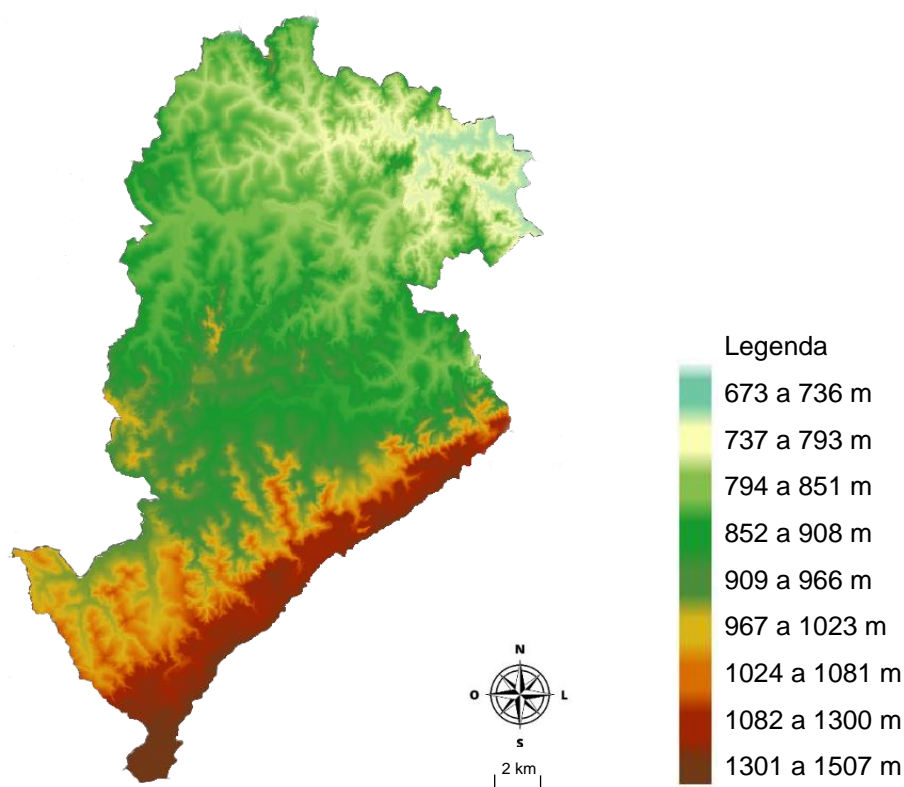


Fonte: BHMap, 2024a (adaptado).

O relevo de BH aumenta gradativamente na direção norte-sul e, as partes mais altas, onde são localizadas as áreas de preservação ambiental (como consta na Figura 7) não são densamente habitadas. Isso confirma que, além da dificuldade de implementação de uma linha de metrô nas áreas com maiores diferenças altimétricas, não há necessidade de integração dessa região, pelo baixo número de possíveis usuários (densidade demográfica na Figura 10). Essa análise é de extrema importância para ponderar se um novo sistema de transporte consegue ser bem

adaptado na cidade. E, no caso da proposta do metrô apresentada no item 6.1, o relevo da cidade é abordagem elementar para estudo de viabilidade de sua realização. Na Figura 8, está representada a altimetria de Belo Horizonte.

Figura 8 – Mapa altimétrico de Belo Horizonte

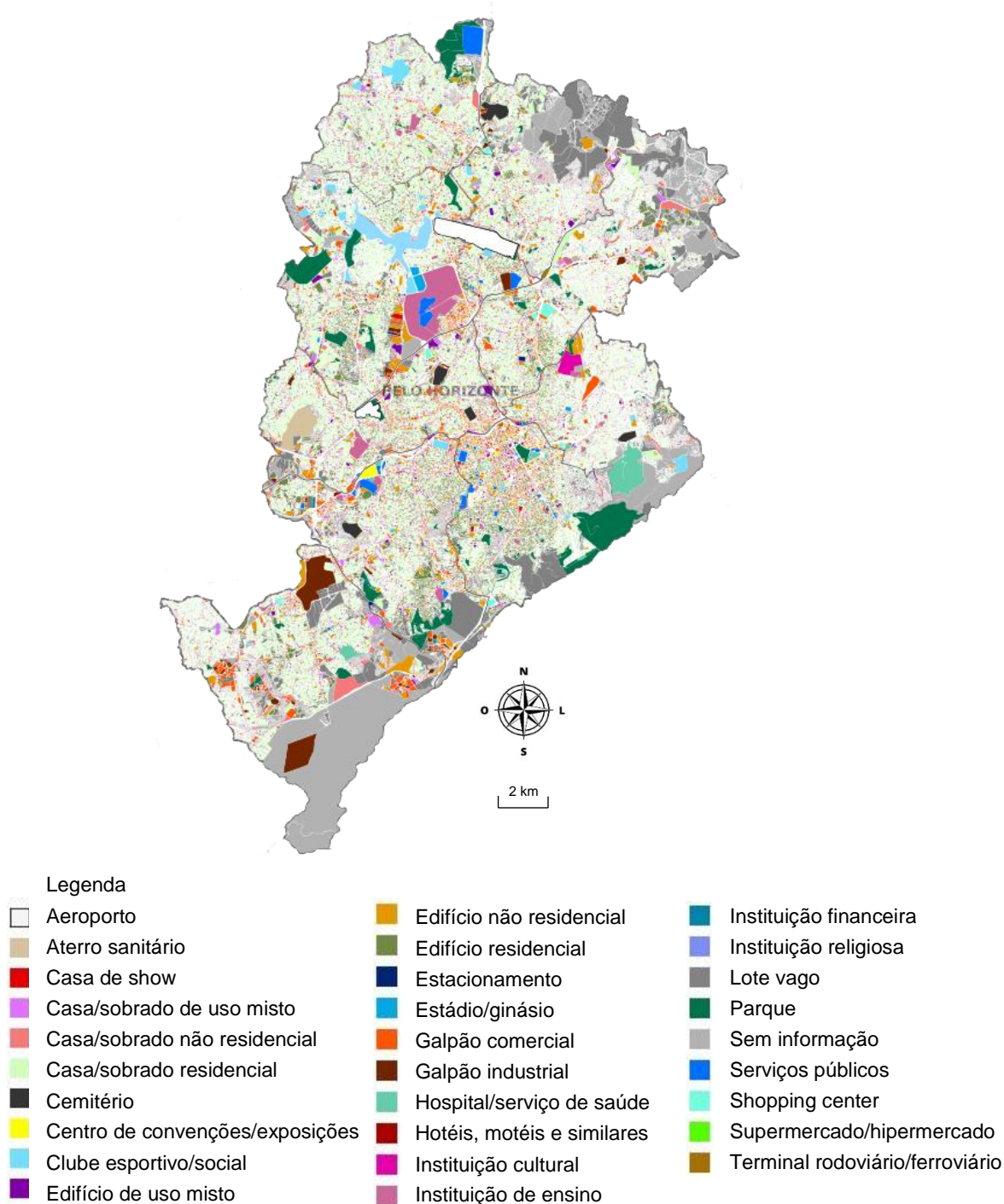


Fonte: BHMap, 2024b (adaptado).

5.2 Fatores ambientais dinâmicos de Belo Horizonte

As questões de uso e ocupação do solo e densidade demográfica são importantes considerações que estão em constante mudança. O zoneamento urbano e, conseqüentemente, as tipologias de construção, podem ser indicativos dos motivos de algumas regionais estarem mais suscetíveis a fontes poluidoras, como no caso, por exemplo, de aeroportos, indústrias e aterros sanitários. A Figura 9 representa a distribuição de uso e ocupação de lotes do ano de 2018.

Figura 9 – Tipologia de uso e ocupação de lotes em BH no ano de 2018

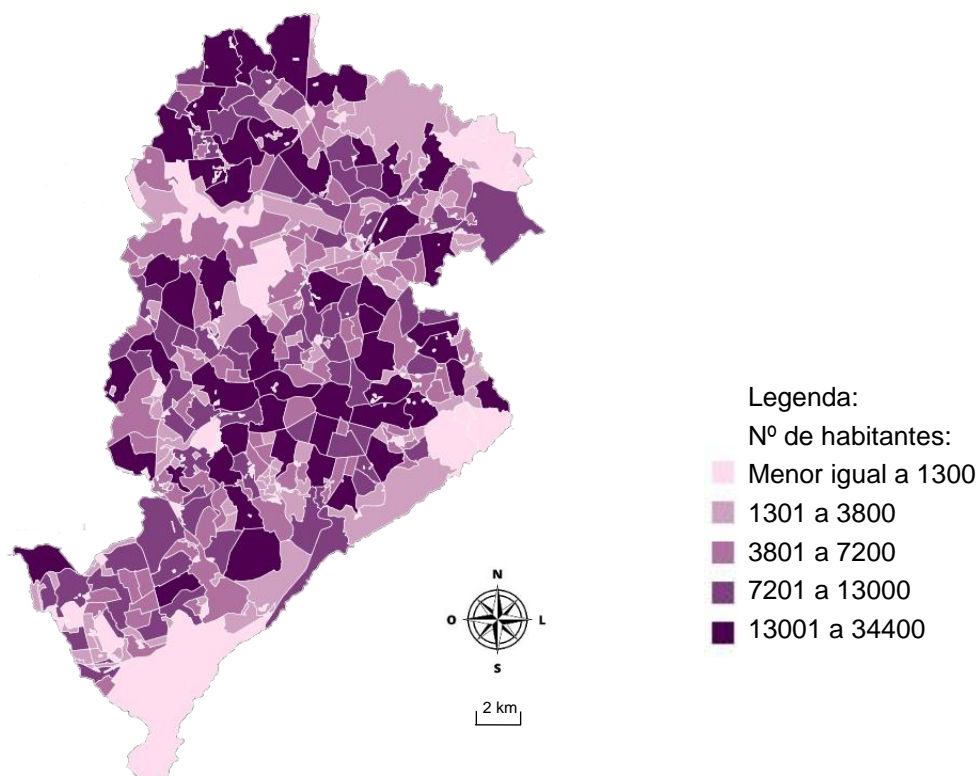


Fonte: BHMap, 2024c (adaptado).

A densidade demográfica é um fator a ser considerado para análise da possível influência na poluição atmosférica. Bairros da cidade com elevada população relativa podem estar relacionados a índices de poluição, dependendo, por exemplo, de questões como atividades locais e deslocamento de pessoas. Pode-se perceber que

a população de BH está bem distribuída em todo o território. Na Figura 10, pode-se analisar a densidade demográfica.

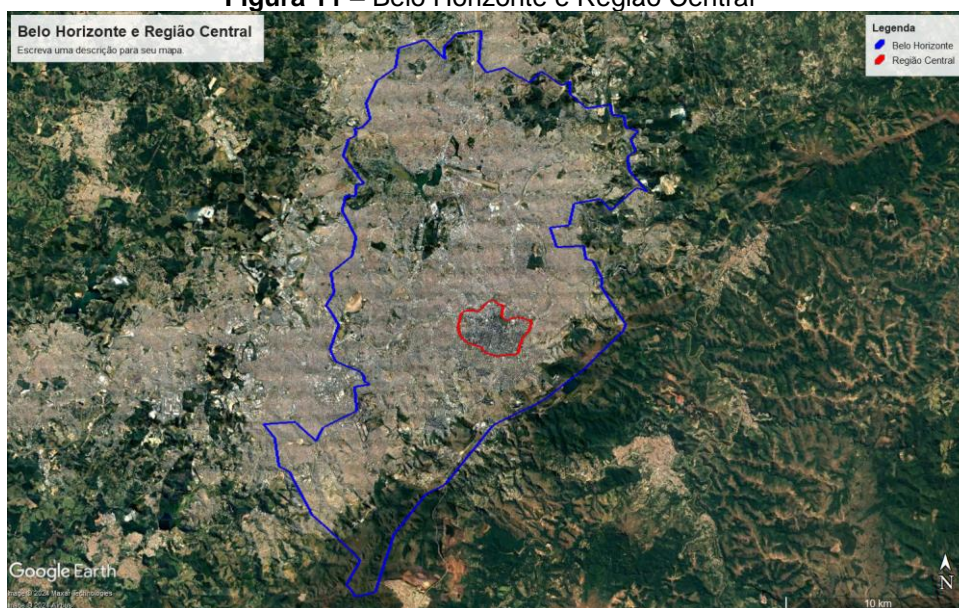
Figura 10 – População dos bairros de Belo Horizonte em 2010



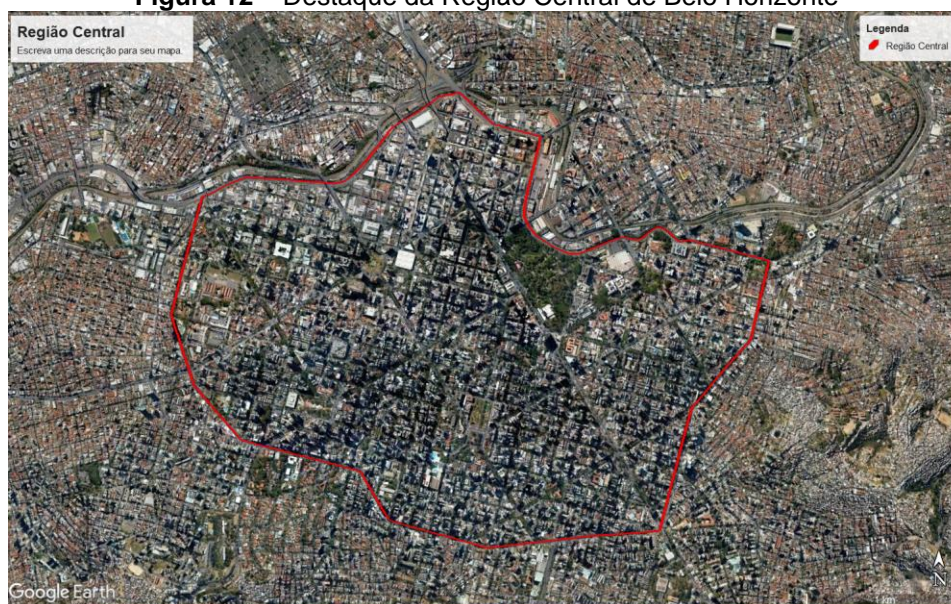
Fonte: BHMap, 2024d (adaptado).

5.3 Breve histórico dos meios de transporte em Belo Horizonte

Belo Horizonte é uma cidade planejada, projetada em uma sequência de circunvizinhanças através de um núcleo central urbano, rumo ao suburbano e ao rural. Foi inaugurada em 1897. Os limites da cidade estão representados pela Figura 11. A parte central da cidade, hoje conhecida como Região Centro-Sul (Figura 12) é a área onde foi implementado o plano urbano, atraindo funcionários da antiga capital de Minas Gerais, Ouro Preto, e também muitos trabalhadores que auxiliaram nas obras da cidade (ARREGUY; RIBEIRO, 2008).

Figura 11 – Belo Horizonte e Região Central

Fonte: Google Earth, 2023d (adaptado).

Figura 12 – Destaque da Região Central de Belo Horizonte

Fonte: Google Earth, 2023a (adaptado).

A área central de BH foi marcada pelos maiores investimentos de infraestrutura, saneamento básico, energia elétrica e transporte coletivo. No ano de 1900, após a cidade entrar em crise financeira, o governo de Minas Gerais cedeu empréstimo que priorizava serviços de eletricidade e de bondes elétricos. Isso ocorreu por solicitação constante da população, que aumentava vertiginosamente e ocupava áreas além dos limites criados para demarcação da cidade, anteriormente contida pela Avenida do Contorno (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1996).

Infelizmente, as obras na cidade excediam os orçamentos, que eram investidos em calçamentos, canalizações, inauguração de ruas, além das estruturas dedicadas ao estabelecimento dos bondes. Essa insuficiência de recursos financeiros levou ao início das privatizações do transporte, cujas consequências perdurariam por muito tempo. No entanto, em 1902, a cidade foi capaz de inaugurar as primeiras linhas dos bondes, através da Companhia Ferro-Carril. Foram estabelecidas na Região Central e, ao longo da década de 1902 até 1912, foram criadas estações ferroviárias no sentido da cidade de Sabará. Logo após, entre 1913 e 1915, foram também implementadas nos bairros Serra, Floresta, Prado Mineiro, Calafate, Lagoinha e Carlos Prates (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1996). Na Figura 13, é possível observar a primeira linha de bondes, que atraiu a atenção dos moradores.

Figura 13 – Inauguração da primeira linha de bonde de Belo Horizonte



Fonte: FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1996.

O sistema dos bondes foi perdendo importância até ocorrer a primeira crise, em 1926, quando a companhia particular responsável pela gestão do sistema não estava cumprindo o plano desenvolvido. É importante ressaltar que houve dificuldade muito significativa no desenvolvimento do transporte em consonância com a expansão e o aumento da demografia em Belo Horizonte. Além disso, havia um conflito entre a disposição de energia elétrica e a energia despendida aos bondes (FOUREAUX, 2017).

Em 1923 já haviam sido estabelecidos os ônibus públicos, que também enfrentavam dificuldades, visto que a produção de veículos de combustíveis fósseis

era insuficiente. Porém, até 1929, foi notável o investimento nesse tipo de transporte, que tentava substituir todos os bondes que operavam nos diversos bairros. Em meados da década de 1950, foram propostos novos veículos movidos à energia elétrica, os trólebus, que, em 1953, seriam recomendados como substitutos dos bondes. Em 1960 os trólebus foram ampliados e se transformaram no principal meio de transporte de massa da Prefeitura, visto que o sistema de ônibus era controlado por iniciativa privada. Porém, em 1967, ocorreu a substituição dos trólebus por ônibus à diesel (FOUREAUX, 2017). A Figura 14 representa o funcionamento adjacente dos trólebus (à esquerda) e dos bondes (à direita).

“Belo Horizonte chegou a ter uma frota de 50 trólebus. Hoje, a cidade testa um único ônibus elétrico em meio à frota de 2.543 veículos a diesel” (LACERDA, 2023, p. 1).

Figura 14 – Bondes e trólebus em Belo Horizonte



Fonte: FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1996.

Apenas em 1986 foi inaugurado o metrô de Belo Horizonte, contando com estações da Lagoinha até o bairro Eldorado. Existiam 7 estações e 5 trens para o trajeto, porém o metrô não tinha integração com o sistema de ônibus. Diversas obras que seriam necessárias para melhorar o sistema de metrô e sua integração com a cidade não foram realizadas, fator que levou a preferência da população pelos ônibus, que faziam percursos maiores e mais completos, e os pontos não ficavam isolados

como no caso do metrô. Além disso, o isolamento do metrô era visto como um possível risco à segurança das pessoas (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1996).

Em 1986 foi também retomado o plano da volta dos trólebus, devido à crise mundial do petróleo. Porém, como o meio de transporte havia sido encerrado, foi necessário recomprar os veículos, o que não foi devidamente cumprido, já que, mesmo após o estabelecimento dos postes para passagem dos trólebus, houve falta de incentivos financeiros para a conclusão das obras (LACERDA, 2023).

“Da encomenda original de 55 veículos para o serviço de trólebus dos anos 1980, 44 foram fabricados. Dois deles foram entregues a BH (...). Os outros 42 trólebus ficaram parados na fábrica da Marcopolo, em Caxias do Sul (RS), até que, em 1993, 20 unidades foram vendidas para a cidade de Rosário, na Argentina. (...) A frota restante, de 22 trólebus, foi vendida para a Eletrobus, de São Paulo (SP), em 1996” (LACERDA, 2023, p. 1).

Até a atualidade, o metrô não recebeu maiores incentivos por parte do governo, visto que existe apenas uma linha, que não é capaz de acomodar as extensões da cidade, principalmente as extremidades. Segundo Foureaux (2017), a dificuldade no cumprimento das obras do metrô ainda não é evidente, porém existem os pressupostos de que o trem suburbano que cortava a cidade era mais acessível para as pessoas, visto que o preço da passagem era reduzido, e, diante da preferência por seu uso, as obras do metrô ficaram em segundo plano. Além disso, o crescimento de empresas privadas operadoras de linhas de ônibus no final da década de 1970 foi marcante, fator que pode ter influenciado nas prioridades do transporte na cidade. O ônibus prevalece como transporte coletivo de maior utilização, havendo irrisória procura de modais sustentáveis que possam atender à demanda.

Considerando a história de Belo Horizonte, é perceptível a dificuldade da Prefeitura na conciliação do transporte público, considerando a carência de verbas, desde o início da construção da cidade. Essa questão abriu margem para a constante dominância de parcerias público-privadas, em que o interesse de grandes empresas acaba sendo superior aos anseios populares. Práticas capitalistas foram, também, responsáveis pela pouca reflexão sobre os danos de longo prazo causados pelos ônibus movidos a combustíveis fósseis. A trajetória dos modais movidos a eletricidade merece maior atenção – lembrando as primeiras soluções que existiam em BH –, mas com maior planejamento e com foco em sustentabilidade, matriz energética renovável e melhoria da qualidade de vida.

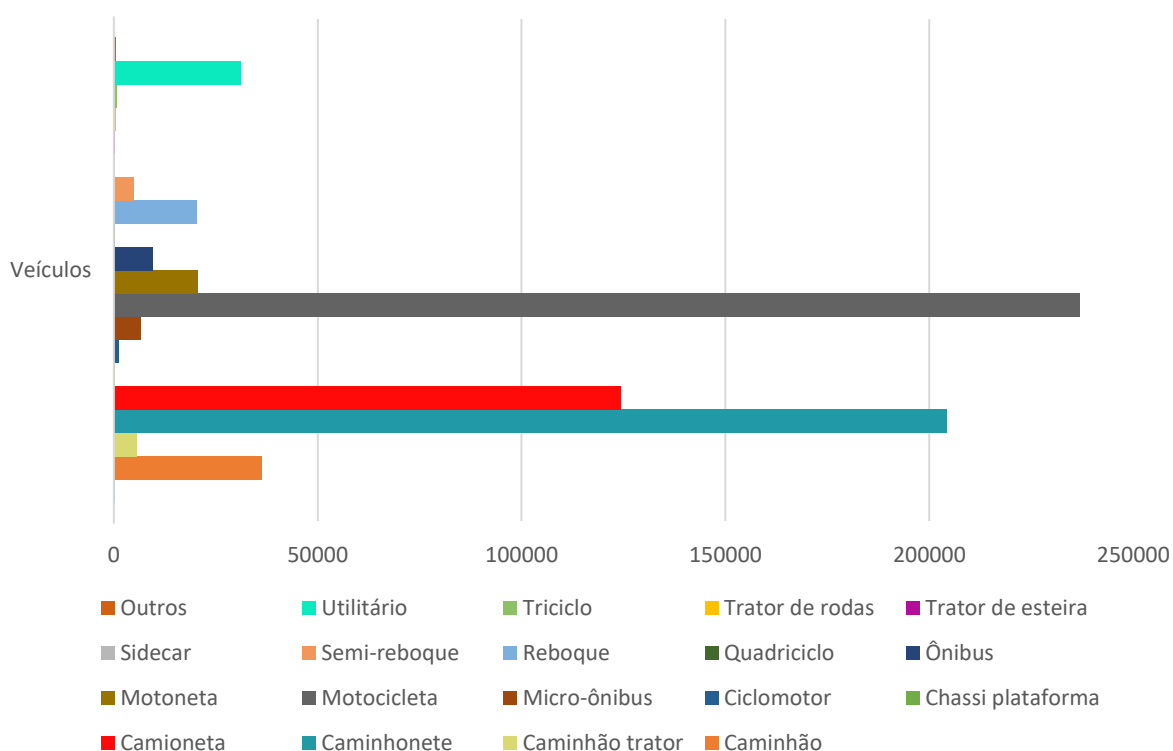
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção é subdividida em dois itens: o primeiro apresenta uma proposta de metrô para BH e o segundo discorre sobre os resultados de mitigação das emissões referentes aos três estudos abordados nos procedimentos metodológicos.

6.1 Metrô: proposta de transporte predominante em Belo Horizonte

Belo Horizonte possui grande frota de veículos. De acordo com dados do Censo Municipal de 2019 do IBGE, existem 19 categorias de veículos na cidade, como pode ser visualizado no Gráfico 1, que apresenta a quantidade total de cada tipo (IBGE, 2019). Os automóveis não foram mostrados por estarem em número extremamente superior aos demais, o que tornaria a visualização pouco produtiva.

Gráfico 1 – Frota de veículos em Belo Horizonte



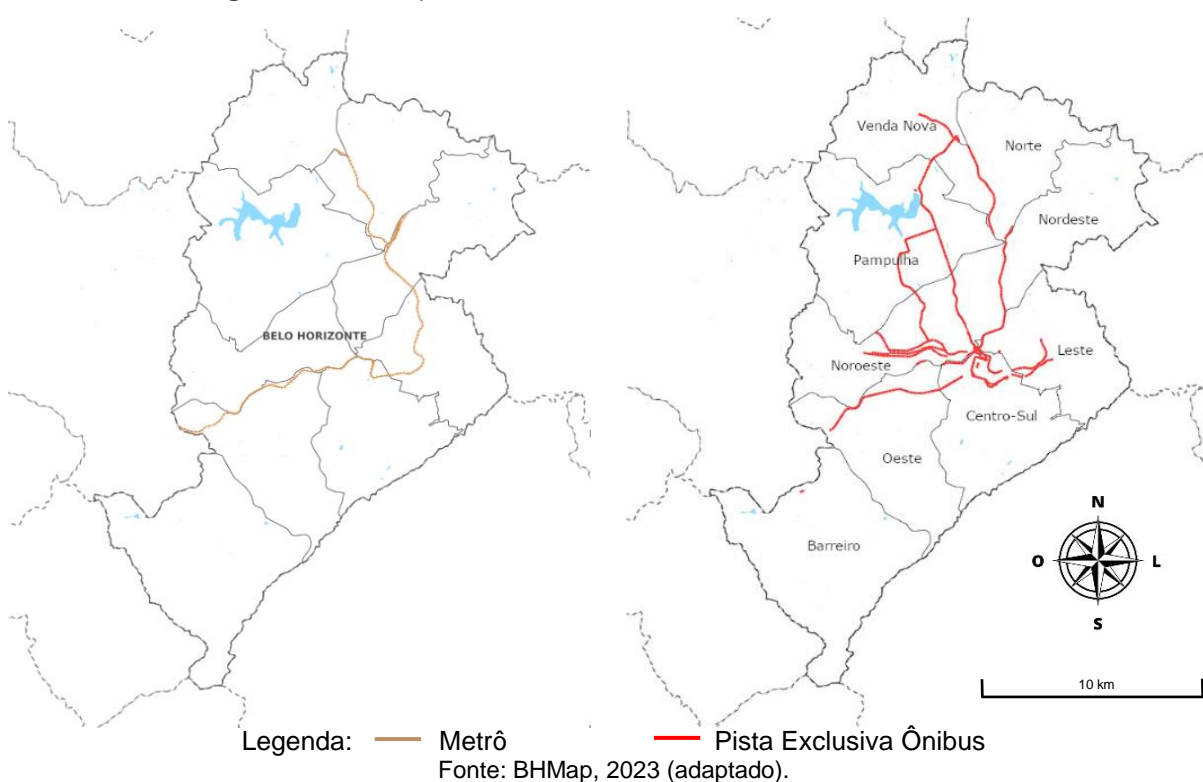
Fonte: IBGE, 2019 (adaptado).

Considerando o número de automóveis (1.576.738), o total de veículos existentes em Belo Horizonte em 2019 era de 2.279.568. Pode-se observar que as maiores quantidades de veículos, após os automóveis, são, também, pertencentes ao transporte individual ou de carga, sendo motocicleta, caminhonete, camioneta, caminhão, utilitário, motoneta e reboque. Com valores muito inferiores a todas as

categorias citadas estão o ônibus e o micro-ônibus, o que demonstra deficiência no transporte coletivo.

O município dispõe de apenas uma linha de metrô e alguns locais destinados às pistas exclusivas de ônibus. Porém, considerando a cidade em sua totalidade, as regiões não estão bem articuladas e conectadas, com transportes concentrados na região central, fazendo conexões apenas com os limites internos de outras regiões, dificultando o acesso aos moradores situados nas extremidades. Essas observações podem ser verificadas na Figura 15.

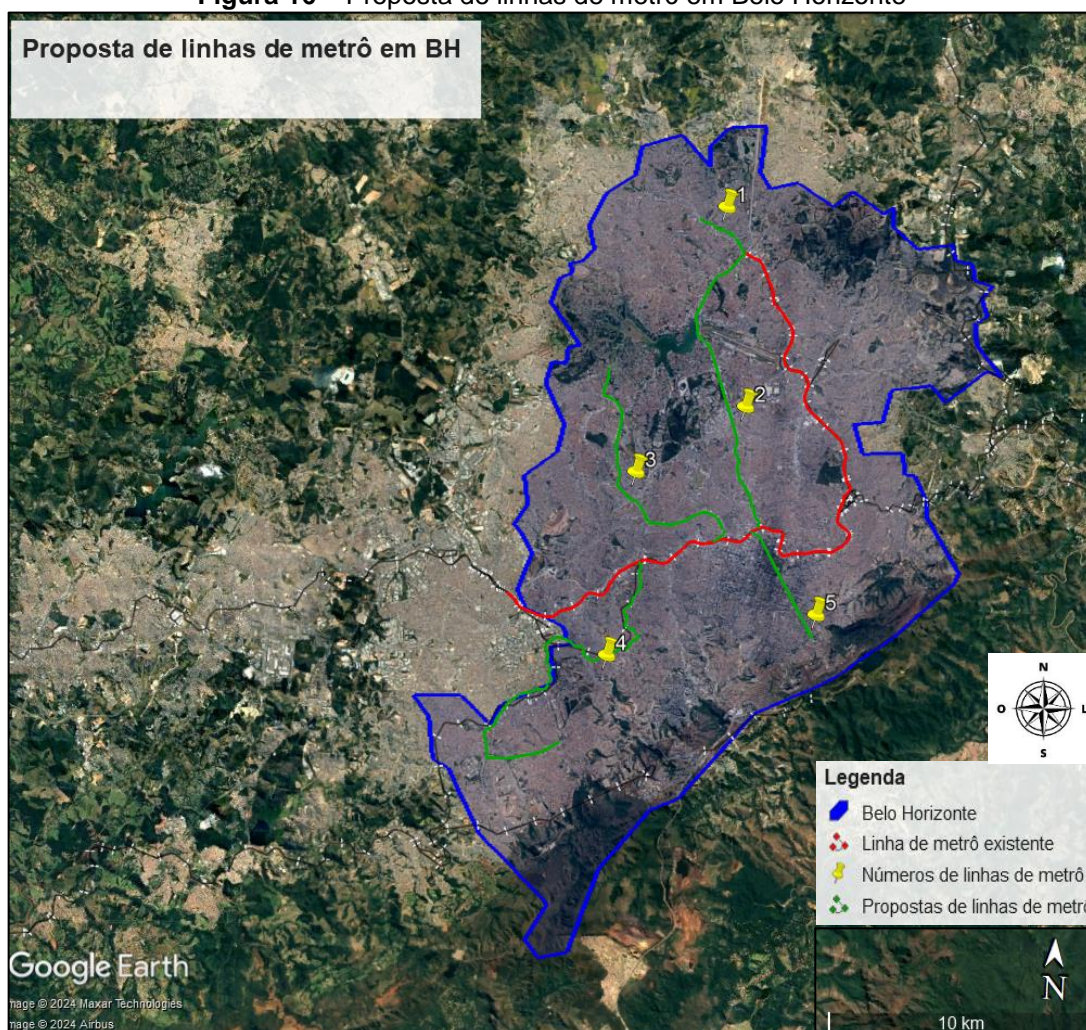
Figura 15 – Transporte coletivo de metrô e ônibus em Belo Horizonte



Para contribuir positivamente com a diminuição de emissões, foram propostas linhas de metrô que pudessem integrar melhor a cidade e fossem mais acessíveis para todas as regiões. Tais modificações são apresentadas na Figura 16.

A linha de metrô já existente possui 28,10 km, contando com 19 estações ao longo do percurso, que interligam o município de Contagem até o bairro de Venda Nova. As propostas de novas linhas seriam extensões da linha existente, sendo compostas por cinco ampliações.

Figura 16 – Proposta de linhas de metrô em Belo Horizonte



Fonte: Google Earth, 2023c (adaptado).

A primeira, de 2,18 km, seria a continuação da linha principal do metrô, onde já existe uma linha de priorização do sistema de ônibus. Dessa forma, ocorreria o melhor atendimento da região de Venda Nova e da cidade de Santa Luzia. O percurso seria apenas na Avenida Vilarinho.

Em relação à segunda linha, a implantação do metrô seria favorável, visto que já existem estações elaboradas para o sistema MOVE – transporte coletivo via ônibus. O percurso ocorreria desde o início da Avenida Dom Pedro I até o final da Avenida Presidente Antônio Carlos, terminando no encontro com a Estação Lagoinha. A distância total da linha seria de 12,26 km.

Já a terceira, de 10,18 km, beneficiaria os moradores das regionais Pampulha e Noroeste. O trajeto ocorreria a partir da orla da Lagoa da Pampulha, na Avenida Heráclito Mourão de Miranda, passando pela Avenida Presidente Tancredo Neves e pela Avenida Dom Pedro II, até a Estação Central. É importante ressaltar que a

Avenida Dom Pedro II já possui pistas de priorização do transporte de ônibus, que poderiam ser substituídas pelo metrô.

A quarta sugestão estaria localizada a partir da Avenida Teresa Cristina, passando pela Rua Antônio Eustáquio Piazza, pela Avenida Nélio Cerqueira, pela Avenida Senador Levindo Coelho e pela Avenida Waldir Soeiro Emrich. Segundo Siqueira (2023), existe uma proposta de criação dessa linha, que começa desde o bairro Nova Suíça com destino ao Barreiro. Porém, nessa proposta, a linha não acessaria o interior da região. Por isso, na proposta deste trabalho, destaca-se a importância de existir extensão do metrô por dentro dos bairros, demandando acréscimo da linha, estabelecida em 16,45 km.

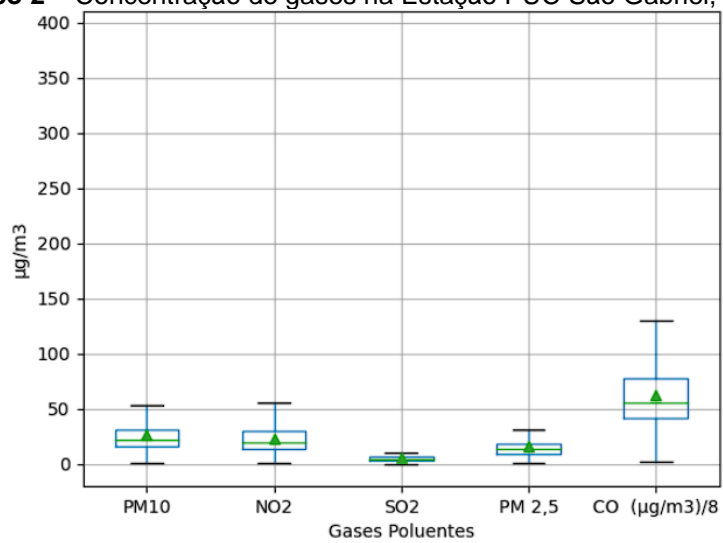
Por último, a ideia é que haja um complemento desde a estação Central, que percorra a Avenida Afonso Pena até o bairro Mangabeiras. Essa seria a segunda linha mais curta, com apenas 4,19 km.

6.2 Resultados para mitigação das emissões

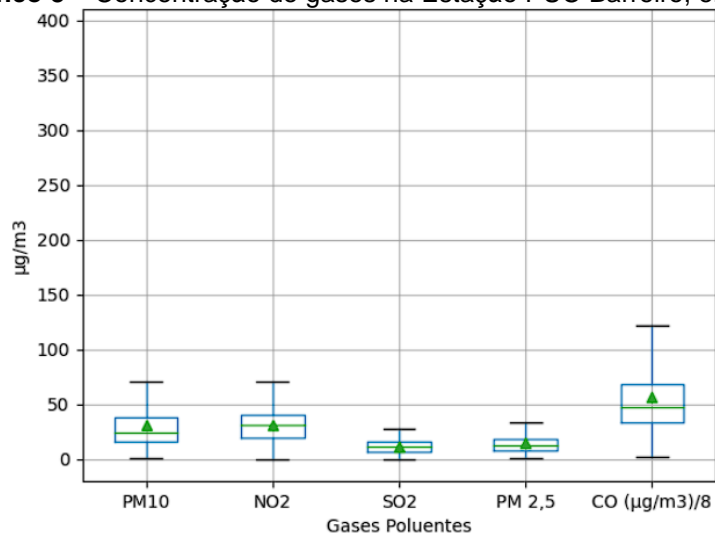
Esta seção é subdividida em três itens: o primeiro aborda a incidência de gases poluentes, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, em BH; o segundo versa sobre a incidência de gases poluentes, em t/ano, nas avenidas e ruas da proposta do metrô, em BH; e o terceiro é referente à incidência de gases poluentes, em t/ano, considerando a totalidade de BH.

6.2.1 Incidência de gases poluentes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) em BH

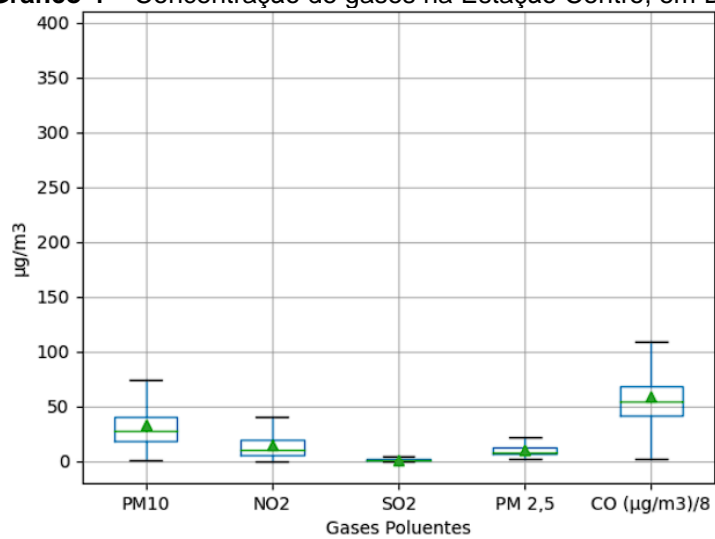
No primeiro estudo realizado, após executar os comandos no Python para cada uma das estações de BH, foi possível verificar o número de registros válidos para cada gás captado por cada estação. Constatou-se que as estações apresentavam registros em quantidades desiguais, o que demandou interpretação, conforme será apresentado a seguir. Os Gráficos 2, 3 e 4 demonstram a concentração de poluentes em cada estação meteorológica.

Gráfico 2 – Concentração de gases na Estação PUC São Gabriel, em BH

Fonte: Autora (2023).

Gráfico 3 – Concentração de gases na Estação PUC Barreiro, em BH

Fonte: Autora (2023).

Gráfico 4 – Concentração de gases na Estação Centro, em BH

Fonte: Autora (2023).

Como citado anteriormente, é importante observar o número total das amostras de gases poluentes captadas em cada estação. O número total teórico seria 8.760, visto o funcionamento ideal das estações com obtenções de medições de gases por 24 horas de cada dia ao longo de um ano. Os valores reais são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Amostras de gases poluentes captadas por sensores em BH

Dados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estação	PM10	NO ₂	SO ₂	PM 2,5	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/8
Total	São Gabriel	6610	8402	8660	6041	8150
	Barreiro	7009	8551	7929	6767	7428
	Centro	8418	8243	8532	7065	8377

Fonte: Autora (2023).

O parâmetro aplicado na comparação de dados foi a média, que, em todos os casos, estava próxima da mediana, o que indica que esses dois parâmetros seriam indicadores sólidos para serem usados na análise. Todos os dados estatísticos obtidos estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados estatísticos das concentrações de gases na estações meteorológicas de BH

Dados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estação	PM10	NO ₂	SO ₂	PM 2,5	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/8
Média	São Gabriel	26,53	23,24	5,11	15,52	62,37
	Barreiro	30,59	30,78	11,45	14,54	56,59
	Centro	33,11	14,49	1,17	10,30	58,59
D. Padrão	São Gabriel	18,45	14,84	5,20	12,35	36,72
	Barreiro	25,70	15,09	7,22	10,59	36,33
	Centro	26,79	14,68	5,08	9,06	29,10
Min.	São Gabriel	1,00	0,06	0,02	0,99	1,43
	Barreiro	1,00	0,00	0,02	1,00	1,43
	Centro	0,12	0,00	0,00	2,00	1,43
25%	São Gabriel	16,00	12,92	2,88	9,00	41,48
	Barreiro	16,00	19,62	6,73	8,00	32,90
	Centro	17,92	4,78	0,11	6,00	41,48
50%	São Gabriel	22,00	19,78	4,13	13,00	55,78
	Barreiro	24,00	31,26	10,68	12,00	47,20
	Centro	27,86	9,92	0,71	8,00	54,35
75%	São Gabriel	31,00	29,78	5,93	18,00	77,24
	Barreiro	38,00	40,14	15,18	18,00	68,66
	Centro	40,58	18,95	1,55	12,00	68,66
Máx.	São Gabriel	327,00	165,39	166,67	251,00	482,02
	Barreiro	563,00	95,43	201,88	132,00	469,15
	Centro	438,70	152,09	423,75	164,00	311,81

Fonte: Autora (2023).

Em relação ao PM10, a estação Centro possui os maiores valores de emissões. Os gases NO₂ e SO₂ foram mais evidenciados na estação da PUC Barreiro, onde as emissões foram muito maiores em comparação com as outras regiões de BH. O PM2,5 foi mais evidenciado na estação PUC São Gabriel, e a mesma constatação vale para o CO (embora a diferença seja relativamente pequena entre as estações).

As medidas referentes à classificação da qualidade do ar são definidas pela Resolução CONAMA nº 491 de 2018 (BRASIL, 2018), na qual as concentrações

limitantes para os gases PM10, NO₂, SO₂ e PM2,5 são fornecidas em termos de média anual. Esse valor pode, portanto, ser diretamente comparado com as médias apresentadas na Tabela 6. As concentrações toleráveis de CO, por sua vez, são fornecidas em máxima média móvel obtida no dia, sendo 9 PPM o valor de referência. Por meio da Equação 5, determina-se que esse valor corresponde a 10.298 µg/m³. Embora esse valor não possa ser diretamente comparado com a média anual, constata-se, por meio da análise da Tabela 6, que mesmo os valores máximos horários observados estão distantes do limite imposto, o que indica situação favorável na cidade quanto a esse critério. Na Tabela 7, apresenta-se os limites toleráveis quanto aos gases poluentes.

Tabela 7 – Classificação da qualidade do ar de acordo com a Resolução CONAMA nº 491

Classificação	Concentração (µg/m ³) – Média anual				
	PM10	NO ₂	SO ₂	PM2.5	CO
PI-1	40	60	40	20	-
PI-2	35	50	30	17	-
PI-3	30	45	20	15	-
PF (Valor ideal)	20	40	-	10	10.298*

Fonte: BRASIL, 2018 (adaptado).

* Valor correspondente à máxima média móvel para o período de 8 horas, inserido apenas para fins de ilustração.

Os valores de PI-1, PI-2 e PI-3 são os padrões de qualidade do ar intermediários, e foram elaborados para cumprimento em etapas, atuando como metas. O PF, padrão de qualidade do ar final, é o valor estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), sendo mais restritivo, o que representa a situação desejável (BRASIL, 2018).

Realizando-se comparação entre os valores de média anual da Tabela 6 e da Tabela 7, percebe-se que, no caso dos gases NO₂ e SO₂, as três estações atenderiam ao padrão PF. Com relação ao PM10, a estação São Gabriel atenderia ao PI-3, embora ainda apresente considerável distância para atendimento ao PF. As demais estações estão em consonância apenas com o PI-2, o que demonstra situação desfavorável. Ao analisar o PM2,5, a situação se inverte: as estações Barreiro e Centro atenderiam ao PI-3, enquanto a estação São Gabriel respeita somente os limites do PI-2. Na Tabela 8, os valores médios estão destacados segundo o esquema de cores da Tabela 7 para facilitar a visualização.

Tabela 8 – Medições dos gases poluentes de Belo Horizonte em comparação com valores ideais da Resolução CONAMA nº 491

Dados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10	NO ₂	SO ₂	PM 2,5
Média - São Gabriel	26,53	23,24	5,11	15,52
Média - Barreiro	30,59	30,78	11,45	14,54
Média - Centro	33,11	14,49	1,17	10,30
Máx. - São Gabriel	327,00	165,39	166,67	251,00
Máx. - Barreiro	563,00	95,43	201,88	132,00
Máx. - Centro	438,70	152,09	423,75	164,00

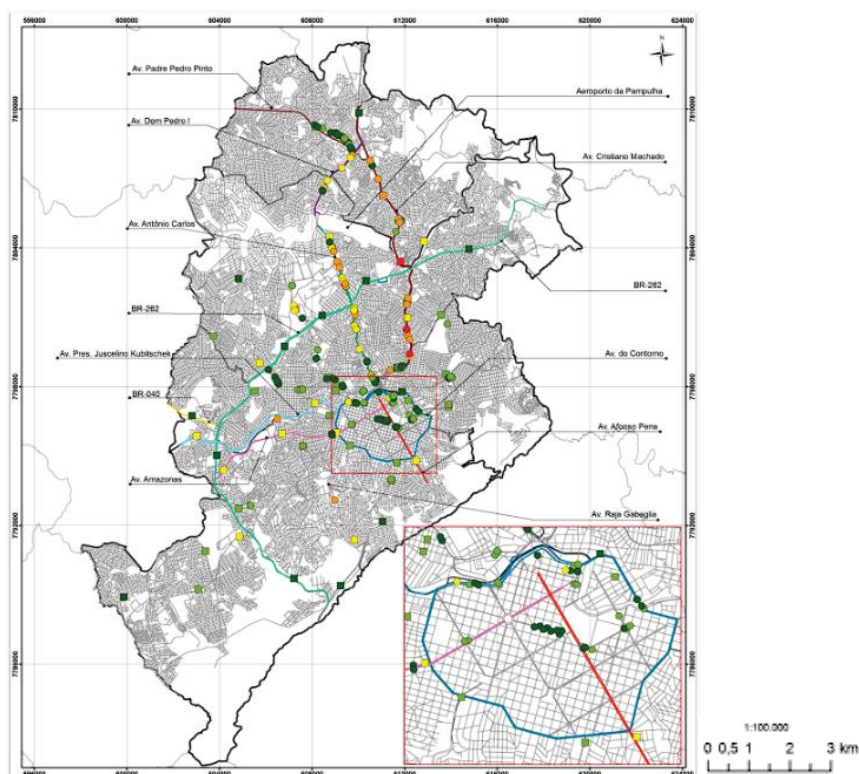
Fonte: Autora (2023).

É importante ressaltar que valores discrepantes, como os máximos apresentados na Tabela 8, podem significar que, em alguns dias do ano, ocorreram eventos que prejudicaram excessivamente a qualidade do ar, fator de alerta que deve ser considerado. Nesses casos, seria interessante a análise dos dados em comparação com a movimentação diária, para comprovar se houve alguma atividade fora do cotidiano no local ou outra anormalidade que explique a diferença.

É evidente, também, que as estações São Gabriel e Barreiro apresentam, no geral, emissões de gases superiores às encontradas na estação Centro, com exceção do PM10. Isso pode ser explicado por fortes atividades emissoras no entorno, como indústrias (principalmente a Vallourec, no Barreiro), aeroporto (na Pampulha), grande fluxo de veículos em rodovias, etc. Além disso, no centro da cidade existe maior restrição para o tráfego de veículos automotores, tendo em vista que existem limitações de estacionamento. É importante ressaltar, também, a grande quantidade de veículos que cruzam diariamente as regionais Norte, Nordeste e Pampulha em direção à Região Centro-Sul. Na Figura 17, é possível verificar os pontos de maior concentração de veículos em Belo Horizonte.

As concentrações de poluentes do setor de transportes são maiores nas regionais Norte, Nordeste e Pampulha, locais de proximidade com a estação São Gabriel (FEAM, 2020). Porém, na regional Barreiro, o tráfego de veículos individuais não é muito intenso, o que dificulta correlacionar o uso do transporte individual com a existência de transporte público insuficiente, visto que as emissões não estão diretamente relacionadas ao fluxo de automóveis. Portanto, reforça-se que a indústria, bastante ativa na região, pode ter influenciado nas medidas da estação Barreiro.

Figura 17 – Volume de tráfego de veículos por dia em Belo Horizonte



- Legenda
 Volume de veículos / dia
- 70.000 – 135.000
 - 50.000 – 70.000
 - 30.000 – 50.000
 - 10.000 – 30.000
 - 0 – 10.000

Fonte: FEAM, 2020.

6.2.2 Incidência de gases poluentes (t/ano) nas avenidas de BH

Para garantir a usabilidade do metrô, definiu-se, como estimativa inicial, público-alvo de 30% da população residente nas regiões atendidas em torno das vias consideradas neste estudo de caso. Admitiu-se, portanto, que existiriam, ainda, veículos responsáveis pelos 70% restantes. Portanto, 30% dos valores de emissões serão retirados para estimar as concentrações de poluentes após a implementação total das linhas propostas para o metrô. Os cálculos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Emissões de gases poluentes referentes a 70% do público que não utilizaria o metrô

Fonte Emissora/ Avenidas-Ruas	Fator	70% do fator	PM10	PM2,5	SO ₂ (95%)	NO ₂ (10%)	CO
Afonso Pena	1,00	0,70	5,38	2,33	2,73	2,80	110,12
Vilarinho	0,37	0,26	3,21	1,50	1,46	1,78	55,79
Dom Pedro I	1,00	0,70	11,55	5,88	4,45	7,22	163,80
Pres. Antônio Carlos	1,00	0,70	26,08	12,68	11,04	15,67	426,36
Heráclito Mourão	0,28	0,19	0,71	0,31	0,35	0,37	14,35
Pres. Tancredo Neves	1,00	0,70	11,82	4,75	6,29	5,64	272,68
Dom Pedro II	0,80	0,56	6,72	2,99	3,20	3,51	129,06
Teresa Cristina	1,00	0,70	22,46	10,20	10,72	12,15	419,01
Antônio Eustáquio Piazza	N.D.*	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Nélio Cerqueira	0,17	0,12	0,18	0,09	0,07	0,11	2,53
Sen. Levindo Coelho	0,23	0,16	0,82	0,43	0,27	0,53	10,04
Waldyr Soeiro Emrich	0,50	0,35	3,96	1,89	1,72	2,22	65,06
SOMA:	-	-	92,88	43,05	42,30	51,98	1668,79

*N.D. = Não Definido.

Fonte: Autora (2023).

A redução através do uso do metrô nessas vias seria uma boa forma de combater a emissão de gases poluentes, conforme apresentado na Tabela 10, que compara a soma dos valores das Tabelas 2 e 9. Além da redução direta nas vias analisadas, é necessário destacar que o metrô atenderia também pessoas de locais mais distantes, o que resultaria em redução ainda maior dos níveis de emissões. Destaca-se que a proposta considera trens de metrô elétricos e baseados em energias renováveis.

Tabela 10 – Redução de emissões de gases poluentes após instalação das linhas de metrô

Gases Poluentes	Soma do valor total de emissões – antes do metrô (t/ano)	Soma do valor total de emissões – após o metrô (t/ano)	Diferença entre os valores (t/ano)
PM10	156,48	92,88	63,60
PM2,5	72,81	43,05	29,76
SO ₂	70,70	42,30	28,40
NO ₂	87,70	51,98	35,72
CO	2780,02	1668,79	1111,23

Fonte: Autora (2023).

6.2.3 Incidência de gases poluentes (t/ano) na totalidade de BH

As emissões veiculares calculadas para a cidade, expressas em função do total diário emitido de cada gás com base nos valores calculados anteriormente, considerando a unidade de g/dia, estão apresentadas na Tabela 11. Na Tabela 12 foi realizada a conversão dos valores para t/ano.

É importante ressaltar que os valores encontrados na Tabela 12 são estimativas. Inúmeros fatores interferem na análise, tornando os resultados não diretamente comparáveis entre si.

Tabela 11 – Emissões da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (g/dia)

Categoria	CO (g/dia)	NOx (g/dia)	NO₂ 10% (g/dia)	SOx (g/dia)	SO₂ 95% (g/dia)	PM (g/dia)
Automóvel	7.476.758,28	920.593,37	91.009,23	161.016,33	154.015,62	10.501,07
Ônibus	47.376,68	243.055,30	24.305,53	3.820,70	3.644,36	9.463,58
Moto	1.484.993,42	66.876,15	6.859,09	10.860,23	10.345,80	N.D.*

*N.D. = Não Definido

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 – Emissões da frota veicular licenciada por categoria agrupada em BH (t/ano)

Categoria	CO (t/ano)	NO₂ (t/ano)	SO₂ (t/ano)	PM (t/ano)
Automóvel	2.731,00	33,24	56,25	3,84
Ônibus	17,30	8,89	1,33	3,46
Moto	542,40	2,51	3,78	N.D.*

*N.D. = Não Definido

Fonte: Autora (2023).

Apesar do estudo realizado no Item 6.2.1 não ser equiparável (devido à impossibilidade de conversão da medida $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para t/ano) com o Item 6.2.2 e o Item 6.2.3, nele foi evidente a necessidade de maior alerta referente, principalmente, aos gases PM10 e PM2,5.

Já em comparação dos resultados do Item 6.2.2 e do Item 6.2.3, pode-se citar, por exemplo, a enorme discrepância de emissões de material particulado por quilômetro entre vias livres e avenidas extremamente movimentadas, especialmente em horários de pico (uma média considerando todas as vias não seria, portanto, representativa do pior cenário). Além disso, as inúmeras diferenças nos combustíveis e no funcionamento de cada veículo interferem diretamente. Por fim, ressalta-se que os dados da Tabela 12 referem-se a “material particulado” de forma genérica.

No estudo 6.2.2, os gases poluentes com maior emissão nas avenidas e ruas foram o PM10 e o CO. Os dados do estudo 6.2.3 indicam que a maior emissão advinda do transporte individual é referente ao monóxido de carbono (CO), o que pode ser fortemente reduzido com a introdução de um sistema de transportes elétrico coletivo e baseado em energia renovável e limpa. No caso dos gases dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), a maior parte das emissões provém de automóveis. A diminuição dos veículos individuais faria grande diferença.

No caso do material particulado (PM), porém, as emissões são variadas, não dependendo exclusivamente do setor de transportes. De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o PM pode ser emitido por indústrias, veículos, queimas de biomassa, ressuspensão de poeira no solo e, além disso, pode ocorrer formação do material a partir de outros gases, como NOx e SO₂, através de

reações químicas (CETESB, s.d.). A diminuição das emissões derivada da linha de metrô não é irrisória, podendo ser um grande começo para novas soluções a serem exploradas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento de gases poluentes como auxílio em estratégias de mitigação de emissões de forma inovadora e tecnológica é essencial. O estudo dos gases que geram desequilíbrio ambiental (em termos de poluição atmosférica) e a identificação das fontes de lançamento são indispensáveis e possibilitam o constante gerenciamento da cidade em relação à sua sustentabilidade atmosférica, por meio do planejamento de políticas públicas que melhorem o meio ambiente e a qualidade de vida.

O agravamento da poluição e os prejuízos causados ao longo do tempo mostram como a tecnologia foi utilizada sem previsões dos efeitos adversos que poderiam ser causados com o seu intenso avanço. Porém, a tecnologia, em constante aprimoramento, pode ser benéfica do ponto de vista ambiental, visto que novos métodos de aperfeiçoar as práticas sustentáveis – na integração dos conceitos ambientais, sociais e financeiros –, tendem a favorecer a priorização de estratégias que atendam às pessoas, mas que sejam convenientes com o bem-estar de toda a biosfera.

É evidente que, nas esferas mundial, nacional e municipal, há grande colaboração de diversos órgãos para o combate à poluição atmosférica e, também, aos veículos que demandam combustíveis fósseis e colaboram com as emissões. A correlação entre práticas antrópicas – geração de energia, agropecuária, mudança de uso da terra e floresta, processos industriais e produção de resíduos – e poluição é incontestável, especialmente na dinâmica do modelo desenvolvimentista capitalista vigente e, por isso, mitigações e prevenções devem ocorrer considerando cada fonte emissora, até que sejam revistas tais premissas ambientalmente ameaçadoras que acabam se tornando referências ao longo do curso civilizatório.

O alerta constante da necessidade da diminuição de emissões está relacionado, principalmente, à saúde pública. Gases poluentes podem afetar diretamente os seres humanos, além de contribuírem com o aumento do risco de diversas enfermidades. As legislações analisadas exercem importante papel no controle de emissões – por meio de limites e metas de concentrações de gases poluentes na atmosfera – e incentivam o uso de transporte público, prática imprescindível para desenvolvimento desta pesquisa, visto que, além de contribuir

para a diminuição do número de veículos individuais, pode ser movido por energia renovável e “limpa” (considerada na proposta de metrô integrada neste trabalho).

Parâmetros internacionais voltados à busca pela sustentabilidade idealizam o transporte sustentável e a colaboração entre as diversas vertentes que compõem a esfera da cidade. O adequado cotidiano municipal e a vigência de sustentabilidade atual e futura dependem da interação profícua da população, do governo, da tecnologia e do meio ambiente, na expectativa de que as propostas sejam elaboradas de acordo com as demandas e a participação de todos os envolvidos, levando em conta a capacidade de suporte dos ecossistemas naturais. A análise de sistemas de transporte terrestre bem-sucedidos vigentes, como no caso de Medellín e Estocolmo, promove a concepção de mobilidades adequadas para cada situação. A qualidade de vida e a redução da utilização de modais emissores de gases poluentes são fatores determinantes na adequação dos transportes. Porém, muitos outros fatores devem ser considerados, como relevo, incentivo financeiro, malha urbana, dentre outros.

No caso de Belo Horizonte, foi essencial inferir que a dificuldade de manutenção de transportes movidos à energia elétrica deve-se a fatores financeiros. Com isso, o resultado foi a prevalência de veículos públicos coletivos à combustão fóssil, priorizando iniciativas imediatistas privadas e excluindo anseios populares e cuidados ambientais. Além disso, a utilização desses tipos de transportes também foi, a longo prazo, agravando a qualidade do ar e prejudicando os seres vivos e ecossistemas locais. A proposta de criação de novas linhas de metrô baseia-se na necessidade de ampliação do sistema, que não foi devidamente desenvolvido por toda a cidade. Não há intuito da desconsideração de outras oportunidades de veículos que podem atender à população, como bondes, ônibus e teleféricos elétricos. Porém, é importante considerar que a energia demandada deve ser renovável e limpa majoritariamente.

Considerando os resultados apresentados, é evidente que a proposta de metrô pode contribuir positivamente com a mitigação dos gases poluentes. O primeiro estudo foi capaz de auxiliar na compreensão dos maiores níveis de poluição e, a partir das informações, pôde indicar que algumas emissões podem ter contribuição direta dos veículos movidos à combustão. O segundo estudo foi importante para estimar a diminuição desses gases nas avenidas onde seria implementada a proposta de metrô, confirmando que a troca da utilização de veículos individuais naquelas vias pelo meio

de transporte coletivo poderia representar alguma melhoria da qualidade do ar. O terceiro estudo, mesmo de forma geral, contribuiu para estimar, considerando dessa vez toda a cidade, quais emissões poderiam ser evitadas se alguns automóveis, ônibus e motos deixassem de circular. Nos dois últimos estudos, foi possível comprovar que o metrô seria uma ótima contribuição para a redução de gases poluentes na atmosfera.

As sugestões propostas devem ser capazes de contribuir com o meio ambiente, através da tentativa de redução dos níveis de poluentes rumo a uma atmosfera mais sustentável; com a qualidade de vida urbana, por meio da mitigação dos efeitos tóxicos ao ser humano; e com a governabilidade, a partir do investimento em tecnologias capazes de melhorar a eficiência com relação à diminuição de emissões, por meio de dados que podem ser conduzidos até as autoridades, que recebem a demanda, avaliam e atualizam para que haja sempre uma recorrente melhoria.

Em estudos posteriores, recomenda-se a avaliação de outras práticas que possam reduzir a emissão de gases poluentes, principalmente dos materiais particulados e do monóxido de carbono. Para isso, poderia ser realizado um estudo de emissões de fontes fixas – como indústrias e estabelecimentos potencialmente mais impactantes. Além disso, é de extrema importância a análise de adequadas fontes energéticas movedoras dos novos modais. Outros meios de transporte também devem ser ponderados, visto a multiplicidade de microrregiões dentro de Belo Horizonte, que podem ser integradas de acordo com suas particularidades.

8 REFERÊNCIAS

ALVES, E. Pinturas de Turner e Monet já retratavam a poluição atmosférica no século 19. **Jornal da USP**, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/pinturas-de-turner-e-monet-ja-retratavam-a-poluicao-atmosferica-no-seculo-19/>. Acesso em: ago., 2023.

ANDRADE, J. C. História Hoje: Há 65 anos, Londres era tomada pelo nevoeiro de fumaça que matou milhares de pessoas. **Radio Agência Nacional**, Brasília, 2017. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/acervo/educacao/audio/2017-12/historia-hoje-ha-65-anos-londres-era-tomada-pelo-nevoeiro-de-fumaca-que-matou/>. Acesso em: out., 2023.

ANTP (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS). **Relatório Geral 2014**. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana, 2016, 96 p. Disponível em: http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--geral_2014.pdf. Acesso em: out., 2023.

ARREGUY, C. A. C.; RIBEIRO, R. R. **Histórias de Bairros [de] Belo Horizonte**: Regional Centro-Sul. Belo Horizonte: Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte, 2008. 62 p.

BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal de Política Urbana. **Controle Ambiental, 2021a**. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/fiscalizacao/controle-ambiental>. Acesso em: jan., 2024.

BELO HORIZONTE. **Decreto nº 15.317, de 02 de setembro de 2013**. Institui o plano diretor de mobilidade urbana de belo horizonte - PLANMOB-BH - e estabelece as diretrizes para o acompanhamento e o monitoramento de sua implementação, avaliação e revisão periódica. Belo Horizonte, [2013]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/decreto/2013/1532/15317/decreto-n-15317-2013-institui-o-plano-diretor-de-mobilidade-urbana-de-belo-horizonte-planmob-bh-e-estabelece-as-diretrizes-para-o-acompanhamento-e-o-monitoramento-de-sua-implementacao-avaliacao-e-revisao-periodica>. Acesso em: nov., 2023.

BELO HORIZONTE. **Decreto nº 16.529, de 29 de dezembro de 2016**. Dispõe sobre a Política Municipal de Controle e Fiscalização das Fontes Poluidoras e dá outras providências referentes à Política Ambiental do Município. Belo Horizonte, [2016]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/decreto/2016/1653/16529/decreto-n-16529-2016-dispoe-sobre-a-politica-municipal-de-controle-e-fiscalizacao-das-fontes-poluidoras-e-da-outras-providencias-referentes-a-politica-ambiental-do-municipio>. Acesso em: nov., 2023.

BELO HORIZONTE. **Lei nº 11.319, de 22 de outubro de 2021b**. Cria a Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte - Sumob - e dá outras providências. Belo Horizonte, [2021]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/mg/b/belo-horizonte/lei-ordinaria/2021/1132/11319/lei-ordinaria-n-11319-2021-cria-a-superintendencia-de-mobilidade-do-municipio-de-belo-horizonte-sumob-e-da-outras-providencias>. Acesso em: nov., 2023.

BERNARDO, A. 30 anos da Rio-92: o legado da 'maior conferência ecológica de todos os tempos'. **BBC News Brasil**, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-61752243>. Acesso em: nov., 2023.

BHMAP. **CURSO D'água**. Belo Horizonte: Prodabel, 2024a. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=curso_dagua. Acesso em: mar., 2024.

BHMAP. **MAPA altimétrico**. Belo Horizonte: Prodabel, 2024b. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=mapa_altimetrico. Acesso em: mar., 2024.

BHMAP. **POPULAÇÃO bairros 2010**. Belo Horizonte: Prodabel, 2024d. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=pop_bairro_2010. Acesso em: mar., 2024.

BHMAP. **TIPOLOGIA uso e ocupação lote 2018**. Belo Horizonte: Prodabel, 2024c. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=uso_ocupacao_lote_2018. Acesso em: mar., 2024.

BHMAP. **TRANSPORTE coletivo de metrô e ônibus em BH**. Belo Horizonte: Prodabel, 2023. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=linha%20metro%2Crede_priorizacao_onibus. Acesso em: nov., 2023.

BHMAP. **UNIDADES de conservação ambiental**. Belo Horizonte: Prodabel, 2024a. 1 imagem de satélite, color. EPSG:31983. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo#zoom=1&lat=7795203.06532&lon=610781.82259&baselayer=base&layers=unid_de_conserv_ambiental. Acesso em: mar., 2024.

BRASIL. Congresso Nacional. **Ação Parlamentar nº 56 da Agenda 21**. Rio de Janeiro: Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1992. Brasília: Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, 1995. 472 p.

BRASIL. **Decreto Nº 5.445, de 12 de maio de 2005**. Promulga o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/decreto/d5445.htm. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar**, Brasília, 2019. Disponível em:

<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/mma-guia-tecnico-qualidade-do-ar-pdf>. Acesso em: jan., 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989**. Dispõe o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0005-150689.PDF>. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986**. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009**. Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/04/Resolucao-CONAMA-418-2009.pdf>. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Poluentes Atmosféricos**. [s.d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: mar., 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Política Nacional de Mobilidade Urbana de 2013**. [s.d.]. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/cartilha_lei_12587.pdf. Acesso em: nov., 2023.

BRASIL. Senado Federal. **Protocolo de Quioto e legislação correlata**. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas, v. 3, 2004, 88 p.

CETEC (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS). **Diagnóstico ambiental do Estado de Minas Gerais**. Série de Publicações Técnicas/SPT-010, Belo Horizonte: CETEC, 1983, 158 p.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Poluentes**. Cetesb, [s.d.]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: nov., 2023.

CIVITATS ESTOCOLMO. **Transporte de Estocolmo**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.estocolmo.net/transporte>. Acesso em: jan., 2024.

CMMAD (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO). **Nosso Futuro Comum**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

ESTATÍSTICAS SOCIAIS. IBGE divulga as estimativas da população dos municípios para 2019. **Agência IBGE Notícias**, 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25278-ibge-divulga-as-estimativas-da-populacao-dos-municipios-para-2019>. Acesso em: out., 2023.

FEAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). **Dados de Monitoramento Contínuo da Qualidade do Ar**. Minas Gerais, 2019. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/dados>. Acesso em: mar., 2023

FEAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). **Emissões Atmosféricas de Fontes Veiculares do Município de Belo Horizonte**. Minas Gerais, 2020. Disponível em: <http://www.feam.br/component/content/article/15/1331-relatorios-e-publicacoes>. Acesso em: nov., 2023.

FEAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE); PETROBRAS (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.). **Relatório técnico: Atualização do Inventário das Fontes de Emissão de Poluentes Atmosféricos da Região de Belo Horizonte, Contagem e Betim**. RT-CASM-314-004, Minas Gerais, 2018. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2019/QUALIDADE_AR/Relat%C3%B3rio_T%C3%A9cnico_Invent%C3%A1rio_RMBH.pdf. Acesso em: out., 2023.

ALMEIDA FILHO, N. O Movimento Impressionista. **Revista de Estudos Universitários**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 39-44, 1992. Disponível em: <https://periodicos.uniso.br/reu/article/view/4193/3876>. Acesso em: set., 2023.

FOUREAUX, F. **Mobilidade Urbana e Burocracia em Belo Horizonte – 1897 a 2017**. 2017. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2017.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Omnibus: Uma história dos transportes coletivos em Belo Horizonte**. Coleção Centenário. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 1996, 380 p.

GALDINO, R. Censo Demográfico: população de BH cai de 2010 a 2022. **Estado de Minas**, Minas Gerais, 2023. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/06/28/interna_gerais,1513344/censo-demografico-populacao-de-bh-cai-de-2010-a-2022.shtml. Acesso em: out., 2023.

GALEMBECK, E.; COSTA, C. A evolução da composição da atmosfera terrestre e das formas de vida que habitam a Terra. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 318-323, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311751147_A_evolucao_da_composicao_da_atmosfera_terrestre_e_das_formas_de_vida_que_habitam_a_Terra. Acesso em: out., 2023.

GOOGLE EARTH. **REGIÃO Central de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, 2023a. 1 imagem de satélite, color. Airbus.

GOOGLE EARTH. **ESTAÇÕES de medição de qualidade do ar em BH**. Belo Horizonte, 2023b. 1 imagem de satélite, color. Airbus.

GOOGLE EARTH. **PROPOSTA de linhas de metrô em BH**, Belo Horizonte, 2023c. 1 imagem de satélite, color. Airbus.

GOOGLE EARTH. **BELO HORIZONTE e Região Central**, Belo Horizonte, 2023d. 1 imagem de satélite, color. Airbus.

HIGH-LEVEL ADVISORY GROUP ON SUSTAINABLE TRANSPORT. **Mobilizing Sustainable Transport for Development: Analyses and Policy Recommendations from the United Nations**, 2014, 72 p. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=2375&menu=1515>. Acesso em: jan., 2024.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Frota de veículos**. Minas Gerais, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/pesquisa/22/28120?ano=2019>. Acesso em: set., 2023.

IEMA (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE). **Qual a diferença entre gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos**, IEMA, 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/qual-a-diferenca-entre-gases-de-efeito-estufa-e-poluente-atmosfericos-20220511>. Acesso em: out., 2023.

IGNATOVA, A. **My Neighbourhood**. Kenya: UN-Habitat, 2024, 40 p.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA). **FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS – FISPQ**, Norma de Origem NIE-DIMCI-033, [s. l.]: Inmetro, 2012. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/MRC/8633_monoxido_de_carbono_em_nitrogenio.pdf. Acesso em: jan., 2024.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014**. Genebra, 2015. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: nov., 2023.

JARDIM, W. A Evolução da Atmosfera Terrestre. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 1, p. 5-8, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/01/evolucao.pdf>. Acesso em: out., 2023.

KARUNARATNE, N. D. Mankind at the turning point: The second report of the Club of Rome. **Economic Analysis and Policy**, v. 6, n. 3, p. 69-73, mar., 1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0313592676500051?via%3Dihub>. Acesso em: nov., 2023.

KRUGER, E. L. Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Paraná, n.4, p. 37-43, 2001. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/3038/2429>. Acesso em: nov., 2023.

LACERDA, D. Os ônibus elétricos que BH deixou para trás. **Estado de Minas**, Minas Gerais, 2023. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/10/29/interna_gerais,1583766/os-onibus-eletricos-que-bh-deixou-para-tras.shtml. Acesso em: out., 2023.

LICHOTTI, C.; BUONO, R. Brasil desperdiça (muita) energia nos transportes. **Mobilize Brasil**, 2022. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/noticias/13118/brasil-desperdica-muita-energia-nos-transportes.html>. Acesso em: set., 2023.

LINHARES ENERGIA. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA)**. Consultoria Ambiental Ltda., 2008. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2008/UNIDADE%20TERMOELETRICA%20LINHARES/Cap.%205%20%20Impactos.pdf>. Acesso em: nov., 2023.

MAGALHÃES, R.; VENDRAMINI, A. Os Impactos da Quarta Revolução Industrial. **GVEXECUTIVO**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 40-43, 2018. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/gvexecutivo/article/view/74093/71080>. Acesso em: nov., 2023.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's Project on the predicament of mankind**. United States of America: Universe Books, 1972, 211 p.

ODUM, E. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1988, 434 p.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano**. Estocolmo, 1972. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/33/2016/09/Declaracao-de-Estocolmo-5-16-de-junho-de-1972-Declaracao-da-Conferencia-da-ONU-no-Ambiente-Humano.pdf>. Acesso em: out., 2023.

REDAÇÃO GALILEU. Poluição do ar mata 7 milhões de pessoas por ano, estima OMS. **Revista Galileu**, 2021. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Um-So->

Planeta/noticia/2021/09/poluicao-do-ar-mata-7-milhoes-de-pessoas-por-ano-estima-oms.html. Acesso em: set., 2023.

REDAÇÃO NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. Meio Ambiente: Quais são os principais tipos de poluição ambiental? **National Geographic**. 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/08/quais-sao-os-principais-tipos-de-poluicao-ambiental>. Acesso em: out., 2023.

SAAVEDRA, M.; CAMINO, E. Eunice Newton Foote: pionera en la ciencia del clima. **Tiempo y Clima**, n. 71, p. 34-37, 2021. Disponível em: <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/2427/2627>. Acesso em: out., 2023.

SANTOS, M. A. **Poluição do Meio Ambiente**. 1 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2017, 160 p.

SANTOS, H.; FIALHO, M.; REIS, K.; FRANCO, M.; OLIVEIRA, R. Relação entre Poluentes Atmosféricos e suas Consequências para a Saúde. **Intraciência**, p. 1-24, 2019. Disponível em: https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20190312105045.pdf. Acesso em out., 2023.

SIQUEIRA, J. Linha 2 do metrô de BH ficará pronta até outubro de 2027. **O Tempo**, 2023. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/linha-2-do-metro-de-bh-ficara-pronta-ate-outubro-de-2027-1.3228108>. Acesso em: set. 2023.

SITVA (SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE DO VALE DO ABURRÁ). **Portal Único del Estado Colombiano**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Paginas/transporte-publico/sitva.aspx>. Acesso em: out., 2023.

SL (STORSTOCKHOLMS LOKALTRAFIK). **Home Page da SL**, [s.d.]. Disponível em: <https://sl.se/reseplanering/var-trafik>. Acesso em: jan., 2024.

TEIXEIRA, F. **Caracterização e Controle das Emissões de Óxidos de Nitrogênio e Material Particulado em Caldeiras para Bagaço**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2005.

TINBERGEN, J. Reshaping the international order (RIO). **Futures**, p. 553-556, 1976. Disponível em: <https://repub.eur.nl/pub/7970/1976Futurespdf.pdf>. Acesso em: nov., 2023.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Ambient (outdoor) air pollution**. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), 2022. Acesso em: out., 2023.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Global conference on air pollution and health: Accelerating action for clean air, clean energy access and climate mitigation**. Disponível em: <https://www.who.int/publications/m/item/concept-note--second-global-conference-on-air-pollution-and-health>, 2023a. Acesso em: out., 2023.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). **Overview of methods to assess population exposure to ambient air pollution.** Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073494>, 2023b. Acesso em: out., 2023.