



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

REINALDO SEBASTIÃO BORGES

**ESTIMATIVA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS PELA FROTA DE
VEÍCULOS DA CIDADE DE UBERLÂNDIA/MG, NO PERÍODO DE 2022-2023**

**UBERLÂNDIA – MG
2025**

REINALDO SEBASTIÃO BORGES

**ESTIMATIVA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS PELA FROTA DE
VEÍCULOS DA CIDADE DE UBERLÂNDIA/MG, NO PERÍODO DE 2022-2023**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”

Área de concentração: Meio Ambiente e Qualidade Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Samara Carbone

**UBERLÂNDIA – MG
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B732e Borges, Reinaldo Sebastião, 1974-
2025 Estimativa de poluentes atmosféricos emitidos pela frota de veículos
da cidade de Uberlândia/MG, no período de 2022-2023 [recurso
eletrônico] / Reinaldo Sebastião Borges. - 2025.

Orientadora: Samara Carbone.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5228>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Qualidade Ambiental. I. Carbone, Samara, 1982-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 502.175

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 09/2025, PPGMQ				
Data:	29 de agosto de 2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:20
Matrícula do Discente:	12312MQA011				
Nome do Discente:	Reinaldo Sebastião Borges				
Título do Trabalho:	Estimativa de poluentes atmosféricos emitidos pela frota de veículos da cidade de Uberlândia/MG, no período de 2022 – 2023				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	PROCESSOS AMBIENTAIS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo de Poluição do ar em Uberlândia				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof.ª Dr.ª Samara Carbone (Orientadora); Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho (UFU); e Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima (UNIUBE).

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa Prof.ª Dr.ª Samara Carbone apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Samara Carbone, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Alamy Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/08/2025, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Euclides Antônio Pereira de Lima, Usuário Externo**, em 01/09/2025, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6564564** e o código CRC **BC1694A9**.

Dedico este trabalho a Deus, que me mostrou que era possível fazer o Mestrado, quando eu já não acreditava. À minha esposa, Roniane Borges, minha parceira, pelo apoio incondicional que, sempre ao meu lado, me deu forças e cuidou para que eu pudesse me dedicar à pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Encontrar-me nesta fase, na qual concluo o curso de Mestrado em Qualidade Ambiental na Universidade Federal de Uberlândia – UFU, é, sem dúvida, muito especial. Ao pleitear uma das vagas ofertadas pela Universidade, havia diversos motivos para acreditar que não conseguiria. As dificuldades eram muitas, pois, após anos afastado da academia, sabia que o retorno não seria fácil. Além disso, foi necessário conciliar as atividades acadêmicas com o trabalho, as responsabilidades de pai de família e os imprevistos impostos pela vida.

Diante da vitória que hoje se consagra, agradeço primeiramente a Deus, que sempre me abre portas e aponta os melhores caminhos, e que, neste caso, me encorajou a vencer as dificuldades. À minha esposa, Roniane, pela sobrecarga de trabalho assumida em prol do meu objetivo; aos meus filhos, Rafaella e Rodrigo, pela paciência; ao meu pai, que perdi durante o curso, mas que sei ter acompanhado minha jornada; e à minha mãe, inspiração diante dos desafios. Aos colegas de trabalho, em especial Fernando Guimarães, Siomar de Resende e Elaine Ferreira, que me incentivaram a lutar pela realização deste sonho. À minha turma, que parabenejo pela conclusão do curso e da qual levo grandes amizades.

Agradeço ainda aos professores do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, a mais qualificada equipe docente com a qual já trabalhei. Profissionais apaixonados pelo que fazem e que certamente continuarão contribuindo para a educação e a pesquisa em nosso país. Registro minha profunda gratidão a todos, em especial à minha orientadora, Profa. Dra. Samara Carbone, cuja atenção e confiança desde o início, foram fundamentais para que esta dissertação se tornasse realidade.

Enfim, agradeço, também, às demais pessoas que, direta ou indiretamente, participaram dessa trajetória. Não as menciono para não correr o risco de esquecer alguém.

Muito obrigado.

“A água passa por um tratamento prévio, o que a torna um produto industrial para ser consumido. O ar, ao contrário, deve ser consumido exatamente como existe na natureza, “in natura”. Por este motivo, é muito importante que a sociedade entenda e respeite as medidas de preservação da qualidade do ar.”

(Instituto Ambiental do Paraná – IAP, s.d.)

RESUMO

Este estudo teve como objetivo levantar informações de todos os veículos do município de Uberlândia-MG e estimar as emissões dos seguintes poluentes atmosféricos: material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nítrico (N₂O); todos gerados pelo tráfego de veículos na malha viária urbana nos anos de 2022 e 2023. Foi empregada a metodologia *bottom-up* para todos os poluentes, exceto o CO₂, cuja estimativa sustentou-se no método *top-down*. A escolha dos poluentes baseou-se nos dados disponíveis nos relatórios de emissões veiculares da CETESB (2022 e 2023). As médias anuais estimadas de emissões de poluentes foram: 43,97 t de MP, 2.246,18 t de CO, 4.339,34 t de NOx, 365,78 t de HC, 1.486,44 t de CO₂, 311,67 t de CH₄, 196,14 t de N₂O e 1.552.683,99 t de CO_{2e}, considerando a frota veicular total de Uberlândia. Analisando-se os dados, ficam evidentes as elevadas emissões de MP e NOx, devido à frota veicular pesada, e de CO e HC, associada, principalmente, à frota veicular leve. Sugerindo a necessidade de incentivos e investimentos ao transporte coletivo e a adoção de combustíveis alternativos ao diesel. Estes resultados são cruciais para a elaboração de um inventário de emissões atmosféricas da cidade de Uberlândia que poderá impactar na tomada de decisões estratégicas quanto à melhoria da qualidade do ar urbano.

Palavras-chave: emissões veiculares; ação contra a mudança global do clima; poluição atmosférica; inventário de emissões.

ABSTRACT

This study aimed to gather information on all vehicles registered in the municipality of Uberlândia-MG and to estimate the emissions of atmospheric pollutants, namely particulate matter (PM), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O), generated by vehicular traffic within the urban road network for the years 2022 and 2023. A bottom-up methodology was employed for all pollutants, except for CO₂, which was estimated using a top-down approach. The selection of pollutants was based on data availability from the vehicular emissions reports published by CETESB (2022 and 2023). The estimated annual average emissions were: 43.97 tons of PM, 2,246.18 tons of CO, 4,339.34 tons of NO_x, 365.78 tons of HC, 1,486.44 tons of CO₂, 311.67 tons of CH₄, 196.14 tons of N₂O, and 1,552,683.99 tons of CO₂e, considering all the Uberlândia vehicle fleet. The results highlight high emissions of PM and NO_x, primarily due to the heavy-duty vehicle fleet, and significant emissions of CO and HC, mainly from light-duty vehicles. These findings suggest the need for investments and incentives toward public transportation and the adoption of alternative fuels to diesel. The results are crucial for the atmospheric emissions inventory of Uberlândia, which, in turn, plays an important role in strategic decision-making aimed at improving urban air quality.

Keywords: vehicular emissions; action against global climate change; atmospheric pollution; emissions inventory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Morfologia da fuligem com estrutura em uma cadeia de partículas na escala de nanômetros.	23
Figura 2. Distribuição percentual das emissões veiculares por categoria de veículos.	35
Figura 3. Efeitos da poluição do ar na saúde.	39
Figura 4. Fases do PROCNOVE e ano de início de vigência.	45
Figura 5. Avanço do espaço urbano em Uberlândia entre os anos de 1990 a 2020.....	50
Figura 6. Mapa da cidade de Uberlândia no ano de 2024.	50
Figura 7. Crescimento populacional, da frota veicular e média de veículos por habitante em Uberlândia- MG.....	69
Figura 8. Comparativo da evolução dos (FE) de 2008 a 2023.	70
Figura 9. Ônibus coletivos urbanos utilizados no SIT nos últimos três anos.....	71
Figura 10. Comparativo de quilometragem percorrida e consumo de combustível no Sistema Integrado de Transportes (SIT) em Uberlândia, em 2023.....	73
Figura 11. Frota de ônibus Coletivos Urbanos (SIT), de acordo com o ano de fabricação, no período pesquisado.	74
Figura 12. Emissão de poluentes da frota geral sem os veículos do (SIT), no período pesquisado.	75
Figura 13. Resumo da emissão de poluentes em (t) da frota pesquisada	82
Figura 14. Comparação das emissões totais de poluentes atmosféricos para os anos de 2022 e 2023.	84
Figura 15. Comparação das emissões relativas dos poluentes atmosféricos pesquisados..	85
Figura 16. Emissão de poluentes (t) por combustível com a separação por ano, no período da pesquisa.....	87
Figura 17. Emissões de poluentes por grupos de veículos no período pesquisado.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais fontes de poluição atmosférica.	20
Tabela 2 - Limites de emissão e resultados de testes de um veículo com DISI.	31
Tabela 3. Valores de intensidade de uso de referência adotados na pesquisa, em km/ano.	53
Tabela 4. Fatores de emissões utilizados nos cálculos de estimativas de poluentes do ano de 2022.	55
Tabela 5. Fatores de emissões utilizados nos cálculos de estimativas de poluentes do ano de 2023.	56
Tabela 6. Fator de emissão de CO ₂ (kg/L) adotado no cálculo pelo método <i>top-down</i>	58
Tabela 7- Emissão de poluentes em (t) da frota de ônibus do SIT, no período pesquisado, conforme o ano de fabricação.	78
Tabela 8. Emissão de poluentes em (t) da frota no período pesquisado, exceto os ônibus do SIT.	80
Tabela 9. Ranking dos grupos veiculares que registraram as maiores emissões médias anuais por poluente.	84
Tabela 10. Estimativa das emissões médias anuais de poluentes atmosféricos por veículo de cada um dos grupos.	90
Tabela 11. Estimativas anuais totais de CO ₂ e.	93
Tabela 12. Emissão média de CO ₂ e por veículo.	93
Tabela 13. Valores de emissões específicas (em kg/veículo/ano) para os principais poluentes analisados.	94

LISTA DE ABREVIATURAS

A22	Gasolina referência no Brasil: Mistura em volume de 78 % e gasolina brasileira de referência e 22 % de etanol
Aerossóis	Suspensão de partículas sólidas ou líquidas num meio gasoso
A85	85% em volume de etanol anidro e 15% em volume de gasolina pura
BC	Carbono Negro
COMTEC	Cia. de administração de terminais urbanos e centros comerciais
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVS	Compostos Orgânicos Voláteis
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
C ₈ H ₂₀ Pb	Tetraetila ou tetraetilchumbo misturado à gasolina
C ₂ H ₆ O	20% de etanol anidro à gasolina
EC	Carbono Elementar
EHR	Etanol Hidratado Combustível Referência
Fe	Fator de emissão
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
GW	Gigawatt
H ₂ O	Água
HC	Hidrocarbonetos
HPA	Hidrocarboneto policíclico aromático
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima

MAA	Média Aritmética Anual
MGA	Média Geométrica Anual
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MP	Material Particulado
NCN	Núcleo de condensação de nuvens
N ₂ O	Óxido nitroso
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxido de nitrogênio
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial de Saúde
OC	Carbono orgânico
OPAS	Organização Pan-americana da Saúde
O ₃	Ozônio
RCHO	Compostos químicos resultantes da oxidação parcial dos álcoois
PAN	O Ozônio e o Peroxiacetilnitrato
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
PCPV	Planos de Controle de Poluição Veicular
GWP	Potencial de Aquecimento Global
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PMU	Prefeitura Municipal de Uberlândia
PRONCOVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle das Emissões das Motocicletas e Veículos similares
PTS	Partículas Totais em Suspensão
SAHEL	Região da África situada entre o deserto do Saara
SEMA	Secretaria Especial do Meio Ambiente
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
SETTRAN	Secretaria de Trânsito e Transportes
SIT	Sistema Integrado de Transportes

SO ₂	Dióxido de enxofre
SMOG	Termo usado para definir o acúmulo de poluição do ar formada de neblina de fumaça no ambiente atmosférico próximo à superfície nas cidades
SCR	Selective Catalyst Reduction
SOF	Fração Orgânica Solúvel
S10	Diesel com teor máximo de 10 mg/kg de enxofre
SUV	Veículo utilitário esportivo
USEPA	Agência Ambiental dos Estados Unidos
≤	Menor ou igual
µm	Mícron

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Poluentes atmosféricos	18
2.2	Tipos de Poluentes	22
<i>2.2.1</i>	<i>Material particulado</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)</i>	<i>25</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Monóxido de carbono</i>	<i>26</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Óxidos de Nitrogênio</i>	<i>26</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Dióxido de Carbono</i>	<i>26</i>
2.3	Poluição atmosférica por veículos	27
<i>2.3.1</i>	<i>Impactos da Poluição Atmosférica por Veículos Automotores</i>	<i>28</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Ônibus Coletivos Urbanos</i>	<i>31</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Veículos Automotores Combustíveis utilizados no Brasil e suas consequências</i>	<i>32</i>
2.4	Consequências da poluição do ar	35
<i>2.4.1</i>	<i>Efeitos da poluição do ar na saúde</i>	<i>38</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Efeitos da poluição do ar no clima</i>	<i>40</i>
2.5	Medidas legais voltadas ao controle da poluição atmosférica, gerada por veículos automotores no Brasil	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Área de estudo	49
3.2	Etapas desenvolvidas na pesquisa	51
3.3	Fe, referências utilizadas e discussão dos grupos de veículos da frota	51
<i>3.3.1</i>	<i>Cálculo de emissões pelo método bottom-up</i>	<i>59</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Veículos leves (automóveis e motos)</i>	<i>60</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Veículos pesados</i>	<i>63</i>
4	RESULTADOS	69
4.1	Frota de ônibus urbanos do SIT	71
4.2	Frota do município, exceto do SIT	79

4.3	Frota completa do município (Geral e SIT)	81
4.3.1	<i>Emissões por tipo de poluente</i>	81
4.3.2	<i>Emissões por tipo de combustível.....</i>	86
4.3.3	<i>Emissões por tipo de veículo.....</i>	91
4.3.4	<i>Emissão de CO₂e e validação de dados</i>	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A - REGULAMENTAÇÃO AMBIENTAL REFERENTE A POLUIÇÃO DO AR NO BRASIL	112
	APÊNDICE B - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO (SIT) NA CIDADE DE UBERLÂNDIA NO PERÍODO PESQUISADO	115
	APÊNDICE C - RELAÇÃO DE VEÍCULOS UTILIZADOS NO SISTEMA URBANO DE TRANSPORTE COLETIVO DE PASSAGEIROS NA CIDADE DE UBERLÂNDIA, NO ANO DE 2022.....	116
	APÊNDICE D - EMISSÃO ESTIMATIVA DOS POLUENTES PESQUISADOS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG, NO PERÍODO DE 2022 E 2023	117
	APÊNDICE E - EMISSÃO ESTIMATIVA DOS POLUENTES PESQUISADOS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG.....	118
	APÊNDICE F - FUNDAMENTAÇÃO DE ESTUDOS RELACIONADOS ..	119
	ANEXO A - RELAÇÃO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS, NÚMERO DE VIAGENS E QUILOMETRAGEM PERCORRIDA NO SIT, NO ANO DE 2022	120

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias desenvolvidas a partir da primeira guerra mundial mudaram de forma definitiva a vida da população em todo o mundo. Entre as principais mudanças, destacam-se o aperfeiçoamento (é preciso um complemento aqui, “o aperfeiçoamento de quê?”), a produção em grande escala e, conseqüentemente, a ampliação do acesso aos motores que utilizam combustíveis fósseis. Esse processo resultou em um crescimento exponencial das frotas de veículos leves e pesados, impactando diretamente na qualidade do ar, especialmente, nos centros urbanos.

A poluição atmosférica é considerada uma das principais conseqüências desse desenvolvimento. Trata-se da modificação nociva do ar provocada por atividades humanas, com efeitos diretos e indiretos sobre a saúde, o meio ambiente e o clima. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), aproximadamente 8 milhões de pessoas morrem anualmente em decorrência da poluição do ar. O Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2015) define a poluição atmosférica como:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e à qualidade de vida da comunidade. (p.

No Brasil, o processo de industrialização e a priorização do transporte rodoviário a partir da década de 1930 contribuíram significativamente para o aumento das emissões atmosféricas. A partir da década de 1950, com grandes investimentos em rodovias, o modal rodoviário se consolidou como o principal meio de transporte de pessoas e mercadorias no país. Esse modelo logístico, embora eficiente em termos de alcance territorial, apresenta altos índices de consumo energético e emissões de poluentes atmosféricos, incluindo gases de efeito estufa. De acordo com o MMA (2023), o transporte rodoviário representa cerca de 30% do consumo global de energia e é responsável por aproximadamente 8% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂).

Entre os principais poluentes emitidos pelos veículos automotores estão o MP, CO, NO_x, HC, CO₂, CH₄ e N₂O. Esses poluentes possuem diferentes origens e impactos:

o MP, por exemplo, está relacionado à queima incompleta de combustíveis e ao desgaste de componentes veiculares, podendo causar sérios danos à saúde humana e ao clima; já o CO, NO_x e HC são produtos típicos da combustão interna de motores, com efeitos nocivos tanto à saúde quanto ao meio ambiente; os gases CO₂, CH₄ e N₂O estão associados ao agravamento do efeito estufa e às mudanças climáticas globais.

Apesar da relevância desse tema, observa-se que, em Uberlândia (MG), não há informações detalhadas sobre a frota de veículos, nem sobre programas institucionalizados de controle da poluição atmosférica gerada. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo produzir informações relevantes sobre as emissões veiculares, fornecendo subsídios para ações de gestão de frotas e servindo como base para estudos futuros voltados ao monitoramento da qualidade do ar em centros urbanos.

1.1 Objetivos

O trabalho tem o objetivo de estimar a emissão de 07 (sete) poluentes atmosféricos gerados pelo tráfego da frota geral de veículos, bem como destacar a geração de poluentes da frota de ônibus coletivos urbanos do SIT, na malha viária do município de Uberlândia – MG, no período de 2022 e 2023, para que seja colocado à disposição da sociedade.

1.1.1 Objetivos específicos

- i. Levantar informações quanto à frota de veículos circulantes no município de Uberlândia-MG, para estimar as emissões de poluentes para a atmosfera.
- ii. Utilizar a metodologia *bottom-up* e *top-down* para estimar as emissões anuais dos poluentes MP, CO, NO_x, HC, CO₂, CH₄, e N₂O.
- iii. Analisar comparativamente as emissões por tipo de combustível (diesel, gasolina e etanol), identificando os combustíveis com maior emissão pela frota local.
- iv. Avaliar as contribuições relativas dos diferentes segmentos veiculares (leves, pesados, motocicletas) nas emissões totais do município.
- v. Estimar as emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE), em termos de CO₂ equivalente CO₂e.

- vi. Avaliar a contribuição da frota de ônibus urbanos do Sistema Integrado de Transporte (SIT) nas emissões totais do município, com foco nos poluentes críticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Poluentes atmosféricos

Os poluentes podem ser introduzidos na atmosfera de forma natural (erupções vulcânicas, queimadas de florestas, erosão do solo, processos de decomposição de animais e plantas, emissão de compostos orgânicos voláteis pela vegetação, dentre outros) ou pela ação antrópica (queima de materiais orgânicos ou inorgânicos, queima de combustíveis de origem fóssil, processos industriais, por exemplo). As principais fontes antrópicas de emissão de poluentes atmosféricos são os processos industriais (fontes fixas) e os veículos automotores (fontes móveis) que, em decorrência do processo de combustão, liberam diversos poluentes no ar. A qualidade do ar é o resultado da interação dos poluentes presentes na atmosfera com as condições meteorológicas.

Entre as definições conhecidas para “poluição”, destaca-se uma das primeiras abordagens aprofundadas sobre o tema que foi o artigo 3º da Política Nacional do Meio Ambiente, que a define como:

A degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (Brasil, 1981, p.).

Os poluentes atmosféricos são definidos legalmente como qualquer forma de matéria ou energia capaz de tornar o ar impróprio à saúde ou ao bem-estar da população¹.

Dentre os principais poluentes atmosféricos, destacam-se as partículas em suspensão, cuja periculosidade está diretamente relacionada ao seu tamanho reduzido. Em razão de suas dimensões extremamente pequenas, as partículas permanecem em suspensão no ar, invisíveis, porém, nocivas à saúde. O tamanho das partículas é inversamente proporcional aos efeitos que causam, a seguir temos as definições dos tipos de partículas (CETESB, 2018).

¹ CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 22 ago. 1990. Art. 1º, § 2º.

- a. **Partículas totais em suspensão:** Tamanho de partícula com diâmetro inferior a 50 µm, pode de ser inalada ou ficar em suspensão afetando o meio como um todo.
- b. **Partículas inaláveis:** Tamanho de partícula com diâmetro inferior a 10µm, dependendo da dimensão, pode ser retida na parte superior do sistema respiratório ou atingir os alvéolos pulmonares.
- c. **Partículas inaláveis finas:** Tamanho de partículas com diâmetro inferior a 2,5µm, definem a fração mais importante para a saúde pública, devido ao tamanho extremamente reduzido penetram profundamente no sistema respiratório.

Esses poluentes são produzidos, principalmente, por motores de ciclo Diesel durante o processo de combustão, considerando-se, somente, a emissão por veículos automotores. Segundo Bosch (2005), veículos com injeção de combustível indireta, ou seja, com formação de mistura no coletor de admissão, produzem material particulado em quantidades muito pequenas, por trabalharem normalmente com mistura de combustível homogênea.

Material particulado difere de fumaça, segundo Brunetti (2018), a fumaça é formada por partículas sólidas visíveis, o material particulado, por outro lado, é composto por combustível não queimado (hidrocarbonetos) e compostos inorgânicos, não necessariamente visíveis a olho nu. Grosso modo, a fumaça é qualquer composição que pode abrandar um fecho de luz e o material particulado pode ser determinado por partículas ultrafinas que, segundo Bosch (2005), podem ter características cancerígenas para o ser humano.

Os poluentes podem ser introduzidos na atmosfera de forma natural e pela ação antrópica, conforme Tabela 1. As principais fontes antrópicas de emissão de poluentes atmosféricos são os processos industriais (fontes fixas) e os veículos automotores (fontes móveis), que em decorrência do processo de combustão liberam diversos poluentes. A qualidade do ar é o resultado da interação dos poluentes presentes na atmosfera com as condições meteorológicas.

Tabela 1- Principais fontes de poluição atmosférica.

Tipo de fonte	Exemplos
Fixas Antropogênicas	Indústrias, usinas termoeletricas que utilizam carvão, óleo combustível ou gás, bem como os incineradores de resíduos, com elevado potencial poluidor e outras.
Fixas naturais	Sal marinho e emissões de enxofre vulcânicos e orgânicos liberados pela vegetação, incêndios florestais e outras.
Móveis Antropogênicas	Transportes rodoviários e não rodoviários, queima de biomassa por meio de incêndios, práticas da agricultura com a utilização de amônia associadas ao uso de fertilizantes e queima de resíduos agrícolas. Utilização de geradores a diesel e outras.
Móveis naturais	Poeira deslocada pelo vento, pecuária e outras.

Fonte: Autor (2025).

Habermann, Medeiros e Gouveia (2011) enfatizam que o maior contribuinte da poluição atmosférica vem do tráfego veicular, sendo que essas fontes emissoras estão localizadas nas vias com grande movimento de veículos. A maior emissão da combustão em ciclos a diesel é explicada pela presença de reações isoladas de pirólise que ocorrem dentro do pistão do combustor, gerando a formação de material particulado carbonoso (Drumm, *et al.*, 2014).

Neste contexto, a poluição também está relacionada às tecnologias utilizadas no processo de combustão, pois diferem de acordo com o tipo de veículo, seja pelo tipo de ciclo de geração de trabalho ou pelas características físicas (exemplo: massa e potência do veículo). Consequentemente, as taxas de emissões de poluentes derivadas da queima de combustíveis são diferentes para cada tipo de veículo. Os tipos de combustíveis utilizados também interferem em suas taxas de emissões de poluentes. Isso ocorre porque cada combustível possui propriedades físico-químicas diferentes, como a temperatura de chama adiabática, teor de carbono e pressão de vapor (CETESB, 2018).

Os congestionamentos, acidentes de trânsito, degradação da qualidade de vida e os espaços públicos utilizados prioritariamente por veículos que circulam nas vias de tráfego das cidades também causam impactos negativos nesta quantidade de contaminantes (Cruz, 2006). Observa-se que o Brasil se destaca entre os países que sofreram aumento significativo na motorização individual, intensificando o tráfego de veículos e aumentando o congestionamento nos grandes centros urbanos. Alguns fatores influenciam a participação de cada modalidade na matriz de emissão de CO₂, entre os

quais podemos destacar a composição da matriz modal de deslocamentos das cidades, principalmente em relação à participação do transporte individual motorizado que é o mais poluente e a distância média das viagens motorizadas realizadas pela população (Rodrigues; Serratini, 2008).

Nesse sentido, é necessário destacar que os veículos constituem uma importante fonte de poluição do ar atmosférico nos grandes centros urbanos. Entende-se por veículos e/ou fontes móveis, todo meio de transporte automotor, incluindo-se aí, as motocicletas, os automóveis, caminhões, ônibus etc. (Branco; Murgel, 2010). Nos últimos anos, o acesso ou a aquisição de veículos individuais pela população brasileira foi bastante facilitado, com o aumento da frota nas grandes cidades, maiores são as liberações de gases poluentes na atmosfera, gerando impactos negativos cada vez maiores nessas áreas.

Recentemente as indústrias automobilísticas estiveram batendo “recordes” de vendas de veículos, sejam de duas ou quatro rodas. A facilitação ao crédito e os baixos juros para o consumidor, são fatores atrativos e estimulam, ainda mais, essa movimentação financeira. Segundo Macedo (2013), a partir da década de 1960 a compra de automóveis passou a ser facilitada pelo financiamento (consolidação da classe média) e pelo marketing. É um sistema de autofinanciamento e cooperativa que emergiu para viabilizar a compra do segundo carro, a longo prazo, pela população brasileira. Com a venda de veículos novos mais eficientes, logo, menos poluentes, natural seria se os mais antigos fossem retirados de circulação, principalmente em locais congestionados. Todavia, na prática, isso está longe de ocorrer. Apenas como base de comparação, sabe-se que mesmo com dez anos de utilização, um veículo já produz quantidades maiores de gases poluentes, se comparado a outro veículo mais atual.

O aumento da taxa de motorização no Brasil, bem como na cidade de Uberlândia, está ocorrendo de maneira persistente e contínua. Esse fenômeno do crescimento acelerado da frota de veículos ocorre com mais intensidade em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, e, geralmente, em períodos de recuperação da economia. As indústrias de veículos são as primeiras a sentirem os efeitos positivos dessa recuperação, transformando essa demanda, até então reprimida, em manifesta prática de consumo generalizado (Carvalho, 2011).

Entretanto, há de se observar que, do ponto de vista tecnológico, grandes avanços foram conseguidos com o advento dos catalisadores e da injeção eletrônica que vieram substituir os antigos carburadores. As várias modificações introduzidas nos motores a combustão interna e nos catalisadores trouxeram melhorias significativas de eficiência que redundaram em menor consumo e, portanto, menores emissões. Além disto, os combustíveis foram também alvo de mudanças para diminuir a poluição. Todavia, os efeitos combinados do aumento anual das frotas aliado ao das distâncias médias percorridas tendem a tornar estes avanços insuficientes quando colocados perante as necessidades globais de redução das emissões.

Para Keedi e Mendonça (2000), o modal rodoviário tem característica única, pois trafega por qualquer via, transita por qualquer lugar, e dispõe de flexibilidade no que diz respeito ao percurso. Esse modal torna-se, então, o sistema preferencial de transporte, uma vez que tem maior disponibilidade de vias de acesso o que viabiliza o fluxo de envio de grande quantidade de cargas. Condições essas que conduzem à necessidade de políticas específicas capazes de controlar o aumento expressivo deste modal em cidades que ainda estão aumentando a malha urbana e, assim, manter as taxas de poluentes atmosféricos, por ele gerado, em patamares toleráveis pelo planeta como um todo.

2.2 Tipos de Poluentes

2.2.1 *Material particulado*

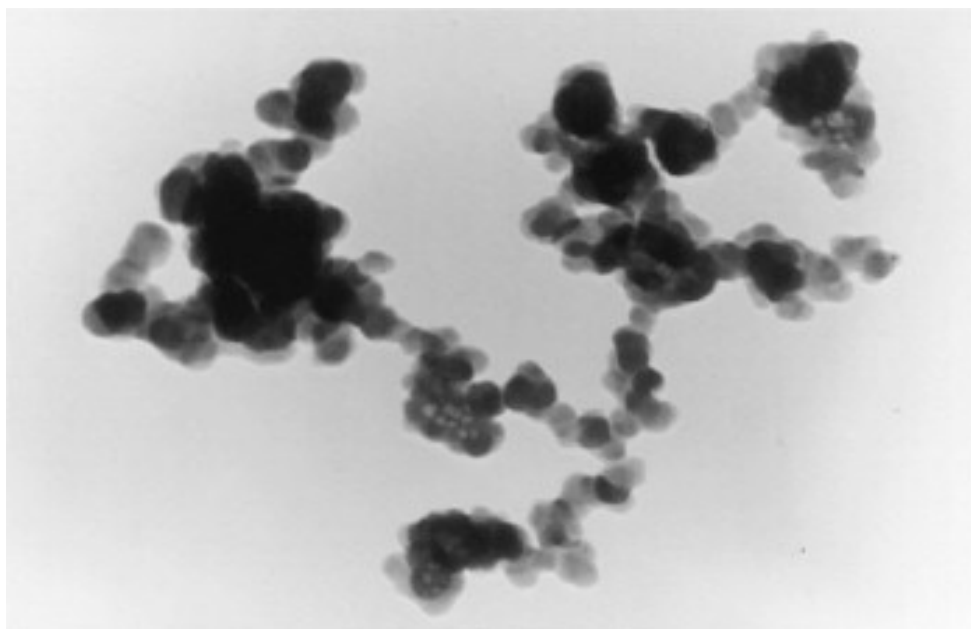
MP é a denominação dada ao conjunto de partículas totais em suspensão, partículas inaláveis e partículas inaláveis finas. A OMS coloca o MP como o principal agente de toxicidade para a saúde humana (WHO, 2006). O MP é gerado por uma mistura de componentes sólidos e líquidos que podem variar na composição, tamanho e de acordo com a fonte de emissão e condições meteorológicas presentes no ambiente. As partículas inaláveis, que possuem maior impacto sobre a saúde humana, podem ser definidas de maneira simplificada como MP₁₀, que são aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é $\leq 10 \mu\text{m}$, MP_{2,5} que possuem diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ e as partículas denominadas submicrométricas MP₁, com diâmetro aerodinâmico $\leq 1 \mu\text{m}$. Vale esclarecer que as partículas maiores são derivadas de atributos mecânicos de materiais presentes no solo e,

no caso das partículas finas, geradas pela queima de combustíveis fósseis no transporte, indústria e geração de energia.

Neste contexto, a fração carbonácea do aerossol é formada por carbono elementar (do inglês: *elemental carbon*, EC) e carbono orgânico (do inglês: *organic carbon*, OC). O EC é emitido diretamente para a atmosfera durante processos de combustão incompleta e apresenta forma irregular. A fração de EC encontrada no aerossol é relativamente pequena, porém, sua presença é considerada importante pela sua toxicidade e capacidade de absorver a radiação solar (Seinfeld; Pandis, 2016). Durante a combustão incompleta de combustíveis, a fuligem pode ser formada como subproduto.

A fuligem é formada por um aglomerado de partículas de carbono na fase sólida que se agrupam em cadeias retas ou ramificadas (Figura 1). Esta espécie, em contato com a atmosfera, é cercada por compostos orgânicos e inorgânicos que mudam as propriedades óticas do aerossol (Adachi *et al.*, 2010). Segundo Seinfeld e Pandis (2016), cerca de 90% da massa de EC é emitida na forma de partículas submicrométricas. Quando o EC é medido utilizando métodos ópticos, ao invés de térmicos, este é referenciado como carbono negro (BC).

Figura 1 - Morfologia da fuligem com estrutura em uma cadeia de partículas na escala de nanômetros.



Fonte: Chylek, Jennings e Pinnick (2015).

Em razão de suas dimensões extremamente pequenas, as partículas permanecem em suspensão no ar, invisíveis, e, como aqui já foi dito, causam efeitos danosos à saúde. O tamanho das partículas é inversamente proporcional aos efeitos que causam, (CETESB, 2018).

- i. Partículas totais em suspensão: Tamanho de partícula com diâmetro inferior a 50 μm , uma parte tem poder de ser inalado e outra fica em suspensão afetando o meio como um todo.
- ii. Partículas inaláveis: Tamanho de partícula com diâmetro inferior a 10 μm , dependendo da dimensão podem ser retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar atingindo os alvéolos pulmonares.
- iii. Partículas inaláveis finas: Tamanho de partículas com diâmetro inferior a 2,5 μm , definem a fração mais importante para a saúde pública, devido ao tamanho extremamente reduzido penetram profundamente no sistema respiratório. São produzidos principalmente por motores de ciclo Diesel durante o processo de combustão, levando em consideração somente a emissão por veículos automotores. Segundo Bosch (2005), veículos com injeção de combustível indireta, ou seja, formação de mistura no coletor de admissão produzem MP em quantidades muito pequenas, por trabalharem normalmente com mistura de combustível homogênea.

É importante destacar que o MP não deve ser confundido com a fumaça visível emitida pelos veículos. Conforme explica Brunetti (2018), a fumaça é composta por partículas sólidas visíveis a olho nu, enquanto o MP é formado por hidrocarbonetos não queimados (HC) e compostos inorgânicos, os quais nem sempre são perceptíveis visualmente. De forma simplificada, a fumaça corresponde a qualquer composição capaz de atenuar a passagem de um feixe de luz, ao passo que o MP pode incluir partículas ultrafinas. Segundo Bosch (2005), essas partículas de dimensões reduzidas apresentam potencial cancerígeno, representando riscos significativos à saúde humana.

2.2.2 Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)

Os poluentes atmosféricos, principalmente os urbanos incluem CO, SO₂, NO_x, HC, e MP em suspensão. Alguns, mesmo em baixos níveis, podem produzir impactos ambientais e à saúde humana. Entre eles estão os diversos COVs e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos HPAs. O aumento das concentrações atmosféricas destes compostos normalmente está relacionado ao aumento da intensidade do tráfego nas áreas urbanas, entretanto, poluentes orgânicos também são emitidos a partir de fontes fixas, tais como, combustão doméstica e industrial.

Mas vale observar que os HPAs são uma classe de mais de 100 substâncias químicas que ocorrem naturalmente no carvão, no petróleo bruto, e na gasolina, também são gerados durante a combustão incompleta ou pirólise de matéria orgânica e em vários processos industriais. Os seus efeitos são deletérios no sistema cardiovascular e respiratório por meio de mutações e de inflamações celulares, sendo um risco ao indivíduo exposto. Um total de 16 estudos analisados mostraram que a exposição aos HPAs esteve associada a doenças cardiovasculares como aumento da pressão arterial, variação da frequência cardíaca e doença cardíaca isquêmica; e respiratórias como diminuição da função pulmonar, doença pulmonar obstrutiva crônica, asma, chiado, tosse, sibilância pulmonar, opressão no peito, dispnéia ao esforço e dor de garganta.

Os estudos apontam ainda que algumas doenças podem estar associadas ao trabalho que envolve a exposição a HPA presentes em vários tipos de fumaça. As misturas que contêm HPA também podem ocasionar malefícios como a mutagenicidade e a predisposição ao desenvolvimento de cânceres (Leachi *et al.*, 2020).

Estes COVs emitidos para atmosfera são importantes porque vão passar por processos de transformação física e química, tais como condensação e oxidação, o que levará a formação de aerossóis ou material particulado (MP_{2,5}) (Seinfeld e Pandis, 2016). O MP_{2,5}, por sua vez, têm impactos na saúde e no clima (Felin, 2024).

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) define como compostos orgânicos voláteis todos os compostos de carbono que participam em reações fotoquímicas atmosféricas, exceto CO, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbeto ou carbonatos metálicos, além de carbonato de amônia (CETESB, 2021). Já os HC, segundo Brunetti (2018), são compostos que deixam a câmara de combustão serem oxidados

durante o processo de combustão, são formados principalmente por aldeídos, tolueno, propileno, metano, etano, acetileno e outros menos relevantes. Tem a formação normalmente em regiões da câmara onde as temperaturas não são suficientes para completar a reação ou em momentos em que a mistura ar/combustível se encontra muito fora da estequiométrica. Segundo Bosch (2005), temos como produto da combustão dois tipos de HC: os alifáticos, que possuem característica inodora, e os aromáticos, que possuem odor; alguns são considerados cancerígenos sob exposição prolongada.

2.2.3 Monóxido de carbono

A formação de CO é o resultado da queima incompleta dos HCs; trata-se de um produto da combustão incompleta e está diretamente relacionado com a estequiométrica da mistura e com processos de sua má formação. Grande parcela do CO se oxida no sistema de pós-tratamento, formando CO₂, Brunetti (2018). Segundo Bosch (2005), é um gás incolor e inodoro, provoca a redução da capacidade do ser humano absorver oxigênio no sangue e provoca envenenamento quando se é exposto ~~por períodos com~~ a altas concentrações.

2.2.4 Óxidos de Nitrogênio

De acordo com Brunetti (2018), os NO_x são formados por monóxido de nitrogênio (NO) e NO₂. São formados, principalmente, pela reação do nitrogênio do combustível com o oxigênio do comburente, altas temperaturas também favorecem sua formação, ou seja, o controle das temperaturas de combustão tem grande impacto na quantidade deste poluente gerado. Segundo Bosch (2005), os óxidos de nitrogênio são responsáveis pela formação de chuva ácida, sua composição é formada por um gás incolor e inodoro e outro que se forma após sua exposição a atmosfera e transforma-se em um gás com odor irritante e coloração avermelhada.

2.2.5 Dióxido de Carbono

De acordo com Brunetti (2018), o CO₂ não é considerado um gás nocivo à saúde humana e tem sua origem em qualquer processo de combustão, tendo como características

ser incolor e inodoro. Entretanto, o acúmulo na atmosfera tem relação direta com o efeito estufa. Uma forma de reduzir a emissão de CO₂ é não utilizar motores de combustão interna, contudo, não havendo outro meio, que o consumo seja otimizado, reduzindo a quantidade de combustível necessário para realização de trabalho, como resultado haverá menor geração de dióxido de carbono. Como abordado nos tópicos acerca de injeção direta de combustível, recursos para melhoria da eficiência energética dos motores sempre estão em desenvolvimento com objetivo de reduzir o consumo e otimizar o funcionamento. Segundo Bosch (2005), um processo de combustão ideal, teria a formação somente dos seguintes compostos, água H₂O e dióxido de carbono CO₂, desconsiderando os processos de formação secundária, assim, é possível observar que o CO₂ sempre estará em formação.

2.3 Poluição atmosférica por veículos

A análise das emissões atmosféricas por tipo de combustível evidencia que o óleo diesel é o principal responsável pela liberação de material particulado (MP) na atmosfera. A elevada emissão associada a motores do ciclo diesel deve-se à ocorrência de reações isoladas de pirólise durante o processo de combustão, que resultam na formação de partículas carbonosas (Drumm *et al.*, 2014). Em contraste, para veículos automóveis movidos a etanol não há fator de emissão disponível para MP, uma vez que este combustível produz quantidades insignificantes desse poluente durante sua queima.

A poluição atmosférica proveniente do setor de transportes está diretamente relacionada à intensidade do tráfego, ao tipo de combustível utilizado e às tecnologias de combustão adotadas. Cada combustível apresenta propriedades físico-químicas específicas, como teor de carbono, temperatura de chama e pressão de vapor, que influenciam nas taxas de emissão de poluentes (CETESB, 2018). Além disso, as características dos veículos, incluindo massa e potência, contribuem para variações significativas nas emissões.

Entre os poluentes liberados, o dióxido de carbono (CO₂) merece destaque, pois o setor de transportes responde por aproximadamente 20% a 32% das emissões globais desse gás (Souza *et al.*, 2017). O CO₂ é o principal gás de efeito estufa associado ao aquecimento global e sua emissão é agravada pelo uso predominante do modal rodoviário,

caracterizado pela flexibilidade de circulação, mas também pelo elevado impacto ambiental (Keedi; Mendonça, 2000).

No que se refere especificamente à fuligem, observa-se que a combustão em motores a diesel gera as maiores concentrações entre os veículos convencionais. Para minimizar esse impacto, a legislação brasileira estabelece que proprietários de frotas de transporte de cargas ou passageiros devem implementar Programas Internos de Autofiscalização (PIA), com vistas à manutenção preventiva e ao controle das emissões de fumaça preta (IBAMA, 1996). Essa medida busca reduzir os efeitos da poluição por MP, especialmente em áreas urbanas com grande densidade veicular.

No Brasil, o crescimento acelerado da frota, sobretudo de veículos individuais, tem contribuído para o aumento das emissões e para a intensificação dos congestionamentos nos centros urbanos (Rodrigues; Serratini, 2008). O tráfego intenso, além de ampliar as emissões, dificulta a dispersão atmosférica, favorecendo a concentração de contaminantes no ar (Habermann; Medeiros; Gouveia, 2011).

Portanto, as emissões veiculares representam um dos principais desafios ambientais das cidades, sendo fortemente influenciadas pelo tipo de combustível, pelas tecnologias de combustão e pelos padrões de mobilidade urbana. A predominância do uso de diesel, associado às elevadas emissões de MP e gases de efeito estufa, reforça a necessidade de políticas específicas para controle das emissões, incentivo ao uso de combustíveis menos poluentes, adoção de tecnologias mais limpas e melhoria do transporte coletivo, visando a mitigar os impactos ambientais do setor de transporte.

2.3.1 Impactos da Poluição Atmosférica por Veículos Automotores

O tráfego de veículos é um dos grandes responsáveis pela degradação da qualidade do ar nos centros urbanos, onde a maior parte da população mundial vive hoje. Ainda que a emissão dos veículos tenha sofrido grande redução a partir de diversas melhorias tecnológicas nos motores e alterações nos combustíveis, as emissões de poluentes atmosféricos, provenientes da frota, ainda constituem um fator que merece atenção, principalmente devido ao crescimento da frota circulante nas áreas urbanas e às condições de tráfego.

Ao se analisar a frota de veículos existente nas grandes cidades, constata-se que sua operação é responsável por relevante emissão de poluentes atmosféricos. A quantidade total de emissões veiculares nas áreas urbanas é influenciada por diversos fatores, tais como o tipo e a idade dos veículos, o combustível utilizado, o volume de tráfego e as condições de fluidez no trânsito.

Tendo em vista este fato, para a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas é necessário preocupar-se, não somente com a emissão de cada veículo, mas com a de todos os veículos em circulação, que perfazem a emissão do tráfego. Nesse contexto, a identificação das emissões de poluentes veiculares nas diferentes áreas dos municípios, assim como a identificação da participação de cada tipo de veículo para o montante da emissão, torna-se relevante para definir políticas de gestão e controle da poluição veicular e de mobilidade urbana que atendam às necessidades de deslocamento ao mesmo tempo em que reduzam as emissões de poluentes atmosféricos que degradam a qualidade do ar.

No contexto, vale mencionar que os motores equipados com sistema de injeção de combustível direta têm um processo de formação de poluentes diferente dos motores de injeção indireta, fato determinado por trabalhar com misturas estratificadas no processo de combustão. É preciso um controle minucioso dos ângulos de trabalho, entre a injeção de combustível e a centelha de ignição, além do controle de mistura ar/combustível, que é o principal requerido nas injeções indiretas (Brunetti, 2018).

Além dos principais elementos já controlados no sistema indireto como HC, CO e NOx, na injeção direta de combustível tem-se uma preocupação adicional com a formação de material particulado, visto que sua formação é mais notável neste sistema. Este material particulado é gerado por uma má formação de mistura em determinados momentos, onde a combustão é iniciada em mistura extremamente rica (Brunetti, 2018).

Como será abordado posteriormente, com a implantação desta tecnologia nos veículos, buscando melhor a eficiência, a legislação de emissões de poluentes evoluiu juntamente. A exigência brasileira fase L7 que iniciou em 2022, baseada nas diretivas europeias, já prevê o controle de material particulado para veículos equipados com motores de ciclo Otto, tal controle só existia para veículos de ciclo diesel no Brasil (CETESB, 2018).

Os motores de ciclo Otto, com sistema de Injeção Direta de Gasolina (GDI), proporcionam a maior formação de partículas ultrafinas em comparação com o mesmo motor utilizando um sistema de injeção indireto (Brunetti, 2018). Para determinar a quantidade de material particulado emitido, o veículo é submetido a testes em laboratório; este método consiste em reter as partículas em filtros apropriados, enquanto o veículo percorre um ciclo pré-definido em norma. A determinação, conforme os limites, é feita com a pesagem do filtro antes e depois do teste, assim, é calculada a emissão em gramas por quilômetro rodado, método aplicado para veículos novos, que precisam atender aos limites do PROCONVE para, então, serem homologados e comercializados em território nacional (ABNT, 2012).

Em trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva (SIMEA) por Vilar *et al.* (2015), os motores com injeção direta de combustível vêm ganhando maior destaque em desenvolvimento devido ao grande interesse e compromisso com o meio ambiente, com a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, com menor geração de CO₂. Segundo o trabalho apresentado, o mesmo motor montado com um sistema de injeção direta tem uma redução no consumo de combustível variando entre 15% e 25%, quando comparado ao sistema de injeção convencional, infelizmente tem-se o bônus e ônus, pois este sistema tem maior geração de material particulado que é tão danosa quanto o CO₂ para a saúde humana. Na Europa, o controle de MP com esta tecnologia é controlado desde 2009 e, nos EUA, desde 2017; o Brasil estabeleceu limites somente a partir do ano de 2022 (Vilar *et al.*, 2015).

Segundo esses autores, o aumento da emissão de MP em motores com injeção direta está principalmente relacionado ao momento de ignição da mistura e ao seu processo de formação, que adota estratégias específicas para otimizar o desempenho do motor. O MP inalável é apontado como um dos poluentes mais nocivos à saúde pública. Um dado relevante é que, em 2013, foi lançado, no Brasil, um dos primeiros veículos do mundo com o ciclo Otto, injeção direta e tecnologia *flex-fuel*, fato que reforça a necessidade de aprofundar os estudos sobre a formação de poluentes nessa configuração.

Os integrantes do estudo realizaram ensaios de emissão de poluentes em laboratório e apresentaram os resultados. O veículo em estudo é equipado com um sistema de injeção direta de combustível *flex-fuel* e se enquadra na fase L-5 do PROCONVE

devido ao ano de produção, 2013. Neste artigo, a sigla para representar a tecnologia de injeção direta é DISI (*direct injection spark ignition*), pois agora com um motor *flex-fuel*, é possível utilizar tanto gasolina quanto etanol, justificando, assim, a nomenclatura alternativa. Foram realizados diversos ensaios, tanto com gasolina quanto com etanol, ambos combustíveis de referência para teste, conforme norma NBR-6601, os valores em gramas por quilômetro foram tratados estatisticamente e apresentados no trabalho. A tabela 2 apresenta um comparativo de emissões deste veículo na fase L5 de alta tecnologia com os limites da L7 (Vilar *et al.*, 2015).

Tabela 2 - Limites de emissão e resultados de testes de um veículo com DISI.

	Limite L5	Limite L6	Limite L7	EmissãoL5 (A22)	EmissãoL5 (EHR)	Unidade
CO	2,000	1,300	1,000	0,244	0,394	g/Km
THC	0,300	0,300	-	0,010	0,020	
NOX	0,120	0,080	0,080(1)	0,015	0,009	
NMHC	0,050	0,050		0,008	0,010	
RCHO	0,020	0,020	0,015	-	-	
MP (GDI)	-	-	6,000	0,650	0,520	mg/Km

Notas:

(1) foi apresentada uma estimativa de limite, pois na fase L7 estes gases são contabilizados de forma diferente, similar a uma somatória, mas contém mais alguns elementos não apresentados no trabalho. Emissão L5 (A22) e emissão L5 (EHR) são resultados médios obtidos nos ensaios FTP-75 apresentados por Vilar *et al.* (2015) no artigo de estudo, veículo com injeção direta *flex-fuel* 2013.

Fonte: Adaptado de Vilar *et al.* (2015) e Brasil (2018).

2.3.2 Ônibus Coletivos Urbanos

O custo total de propriedade e as emissões de gases de efeito estufa variam significativamente entre tecnologias de ônibus urbanos. Mesmo com a disponibilidade de informações atuais, nem sempre ficam claros quais os combustíveis e tecnologias irão proporcionar melhor desempenho da frota de ônibus urbano, dado que os resultados das pesquisas não são facilmente comparáveis com os resultados de outros estudos (Muñoz *et al.*, 2022).

Padrões de emissões são estabelecidos para conduzir o aprimoramento dos veículos de ciclo diesel, e, assim, proporcionar reduções de gases na exaustão. Aqui no Brasil, a normativa é de competência do PRONCOVE. Esses padrões são considerados tecnologicamente neutros, pois qualquer combustível ou tecnologia, que atender aos

padrões, poderão ser utilizados. No entanto, diferentes combustíveis apresentam características próprias de emissão, que podem variar conforme a qualidade do produto utilizado, influenciando diretamente o desempenho ambiental dos veículos.

Os padrões brasileiros de emissão de poluentes para veículos pesados estão aquém das melhores práticas internacionais, esses ônibus não contam com as melhores tecnologias disponíveis para o controle das emissões dos motores a diesel (Miller; Façanha, 2016). O mais recente inventário de emissões veiculares compilado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2018) estima que os ônibus urbanos representam menos de 1% da frota de veículos da região metropolitana de São Paulo, mas respondem por 21% das emissões veiculares de NO_x e MP. Essas emissões têm impactos sociais importantes, contribuindo para a baixa qualidade do ar e gerando efeitos negativos sobre a saúde humana. Os ônibus também são uma fonte importante de emissões de poluentes climáticos, incluindo CO₂ e carbono negro, um potente poluente de curta duração que representa aproximadamente 75% do MP emitido por motores a diesel de tecnologia mais antiga (EPA, 2012).

Dada a importância da frota de transporte público coletivo para a mobilidade urbana, bem como seu impacto desproporcional na poluição por veículos motorizados, os investimentos na renovação da frota de ônibus constituem uma estratégia-chave para o cumprimento das metas ambientais e de sustentabilidade das cidades. No entanto, as políticas voltadas à transição para combustíveis e tecnologias mais limpas têm avançado de forma lenta e pouco eficaz. Apesar da predominância dos motores a diesel, algumas cidades brasileiras já possuem em pequena escala, ônibus movidos a etanol, biodiesel, gás natural veicular (GNV) e modelos híbridos diesel-elétricos, geralmente em caráter experimental ou piloto.

2.3.3 Veículos Automotores Combustíveis utilizados no Brasil e suas consequências

Considerando a diversidade da matriz de combustíveis no Brasil, é igualmente relevante analisar o papel da gasolina e do etanol na emissão de poluentes veiculares. A gasolina, amplamente utilizada em veículos leves urbanos, apresenta um perfil de emissão caracterizado por altos índices de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC), especialmente em motocicletas e veículos comerciais leves. Apesar de sua densidade

energética relativamente elevada, a combustão incompleta em motores a gasolina pode resultar em emissão significativa de poluentes tóxicos e precursores do ozônio troposférico, sobretudo em veículos mais antigos ou com baixa eficiência.

O etanol, por sua vez, é um biocombustível renovável amplamente difundido no Brasil, tanto em sua forma pura quanto em misturas em veículos flex. Embora tenha vantagens ambientais em termos de ciclo de vida, como menor intensidade de carbono em sua produção, a combustão do etanol em motores convencionais pode gerar emissões elevadas de CO, HC e CH₄, especialmente em partidas a frio ou condições de mistura rica. Isso se deve, em parte, à composição química do etanol e à menor eficiência energética em comparação com a gasolina, além da variabilidade nas estratégias de controle de emissões adotadas pelos fabricantes.

Dessa forma, ainda que os combustíveis derivados de fontes renováveis possam representar alternativas mais sustentáveis em longo prazo, suas emissões diretas ao nível do escapamento devem ser consideradas com cautela em inventários urbanos, principalmente no caso de poluentes precursores do ozônio e gases de efeito estufa de alto potencial, como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O).

Quando se trata de veículos pesados, é preciso considerar que o combustível predominantemente utilizado é o diesel, um derivado do petróleo, constituído basicamente por HC de cadeia longa e, em baixas concentrações, por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O atual modelo brasileiro de transporte de cargas é apoiado, principalmente, em veículos movidos por motores a diesel por via rodoviária. Para atender ao suprimento do mercado nacional, a Petrobras opera suas refinarias priorizando a produção deste combustível. Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP, 2024), aproximadamente 66% da produção nacional de óleo diesel “A” corresponde ao diesel S10, enquanto 34% são referentes ao diesel S500.

O diesel comercializado no Brasil para a aplicação em veículos rodoviários recebe 14% de biodiesel (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2025). O teor de enxofre é limitado a 500 mg/kg, no chamado diesel comum e de 10 mg/kg no diesel com baixo teor de enxofre, destinado a regiões metropolitanas e veículos equipados com sistema de controle de emissões com catalisador.

Os principais tipos de óleo diesel são: tipo A (diesel automotivo), utilizado em motores diesel e instalações de aquecimento de pequeno porte, sem adição de biodiesel. O tipo B (diesel metropolitano), também é utilizado para aplicação automotiva. A diferença entre os dois é que o tipo B possui no máximo 0,5 % de enxofre e, por ser comercializado somente para uso nas regiões metropolitanas, apresenta adição de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente. E tem ainda diesel tipo D (diesel marítimo), que é produzido especialmente para utilização em motores de embarcação marítima (Pinheiro, 2004).

Há de se observar ainda que, no motor a ciclo Diesel, a ignição se dá quando o combustível é injetado no ar comprimido, atingindo uma temperatura suficientemente elevada para a autoignição do combustível. Nos motores de ciclo Otto, a mistura de ar/combustível é comprimida dentro do cilindro e queima quando uma centelha salta entre os polos da vela de ignição. Um bom motor a ciclo Diesel de caminhão, ou ônibus, atualmente, tem uma eficiência térmica de 44 a 46%, enquanto, para o melhor motor a ciclo Otto, esta fica em torno de 30%.

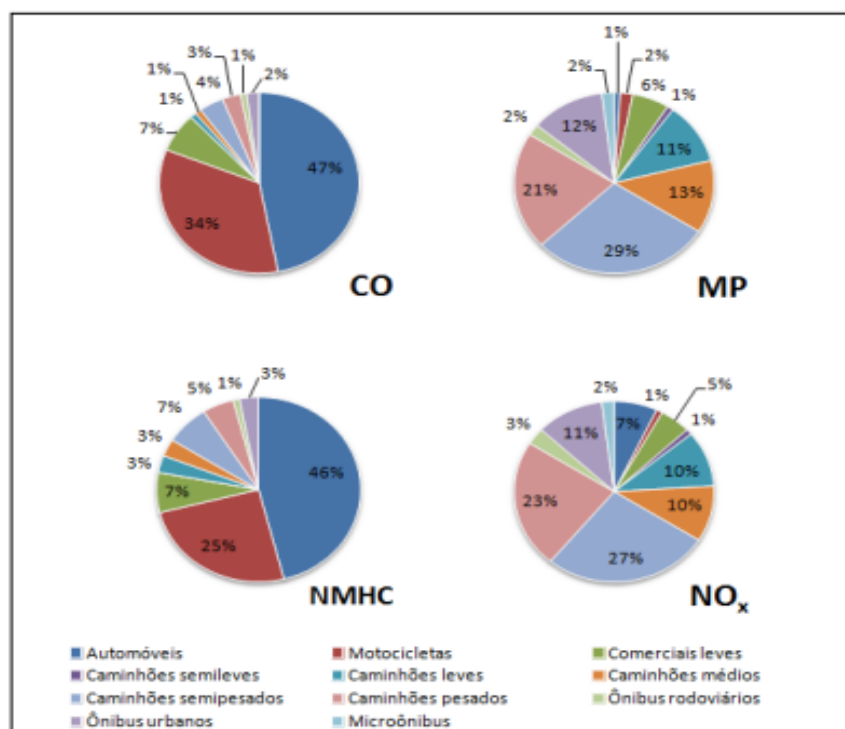
Geralmente os veículos movidos a diesel são fontes significativas de emissão de materiais tóxicos e diversos estudos científicos têm correlacionado o desenvolvimento de doenças graves na população dos meios urbanos, como câncer, hipertensão, cardiopatias, acidentes vasculares e problemas respiratórios, com a exposição a tais poluentes atmosféricos (Gonçalves *et al*, 2015).

Verifica-se, nessa temática, que os poluentes primários provenientes das emissões de veículos, sob certas condições meteorológicas que propiciam a ocorrência de reações fotoquímicas, transformam-se em poluentes secundários, na atmosfera, gerando, por exemplo, ozônio (O₃) troposférico e peroxiacetilnitrato (PAN), substâncias que causam diversos males à saúde humana (IPCC, 2021a). Assim, segundo Li *et al.* (2023), a cocontaminação por PAN e O₃ em áreas urbanas está fortemente associada a fontes antropogênicas. Já Pushparaj *et al.* (2021) afirmam que os nitratos de peroxiacila desempenham papéis fundamentais na química troposférica urbana e regional.

Em termos globais, a emissão de CO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis tem ocasionado o incremento do efeito estufa, apontado como causa das intensas alterações climáticas registradas nos últimos 50 anos (IPCC, 2021).

De acordo com o inventário, dentre todas as categorias de veículos analisadas, as emissões associadas a ônibus urbanos, em 2012, foram 2% de CO, 11% de NO_x, 12% de MP por combustão, 3% de NMHC, 2% de CH₄ (Brasil, 2014), conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2. Distribuição percentual das emissões veiculares por categoria de veículos.



Fonte: Brasil (2014).

A Figura 2 leva à conclusão de que os veículos movidos à óleo diesel (caminhões e ônibus) são os maiores emissores de NO_x e MP, mas os ônibus urbanos são os maiores responsáveis na categoria ônibus. Por isso, deve-se dar atenção às emissões de poluentes de ônibus urbanos.

2.4 Consequências da poluição do ar

Estudo realizado em 50 estados nos EUA com 500.000 pessoas apresentou um acréscimo de 14% na incidência de câncer de pulmão associado ao aumento de 10 µg/m³ na concentração de MP_{2,5} (POPE *et al.*, 2002). A elevação de 10 µg/m³ na concentração de MP_{2,5} aumenta entre 6% e 17% a mortalidade cardiopulmonar, demonstrado nos principais estudos de mortalidade nos EUA (POPE *et al.*, 2007). Por outro lado, em Pequim, durante os jogos olímpicos, houve redução na emissão e na concentração de

MP_{2,5} de 78,8 µg/m³ para 46,7 µg/m³ e de O₃ de 65,8 ppb para 61 ppb, devido a diminuição do tráfego de veículos automotores. Esta diminuição ocasionou, no período analisado, uma queda de 41,6% no atendimento em serviços de emergência relacionadas à asma (ARBEX *et al.*, 2012).

Ainda sobre a China, entre as diversas pesquisas relacionadas, produzidas na última década, Li *et al.* (2023) realizarem um estudo abrangente corroborando que a composição química e as propriedades físico-químicas do MP mudam com o espaço e o tempo, o que pode causar diversos prejuízos à saúde. Afirmam que, com o desenvolvimento da indústria e dos transportes, a poluição do ar tem causado muitos problemas de saúde pública em diversas partes do mundo, sendo o quarto principal risco atribuível aos Anos de Vida Ajustados por Incapacidade (DALYs). A exposição crônica somente ao PM_{2,5} resultou em 4,14 milhões de mortes e 118 milhões de DALYs perdidos, representando 62% de todas as mortes e 55% dos DALYs devido à poluição do ar, respectivamente. Devido à complexidade dos componentes da poluição atmosférica ambiental, o estudo da toxicidade combinada do PM_{2,5} e outros poluentes ambientais é de grande importância. (Zhang *et al.*, 2016), indicaram que a coexposição ao SO₂, NO₂ e PM_{2,5} poderia induzir disfunção endotelial aumentando a resposta inflamatória, resultando em diminuição da pressão arterial e aumento da frequência cardíaca em camundongos.

Observa-se que um adulto médio aspira e expela em torno de 7 a 8 litros de ar por minuto enquanto em repouso. São cerca de 11 mil litros de ar por dia. Respirar ar poluído não afeta só os pulmões e pode ir além, causando mortes prematuras (MINERGEIO, 2022). A poluição atmosférica afeta quase todos os órgãos do corpo. O Fórum de Sociedades Respiratórias Internacionais mostra que a poluição do ar contribui para uma série de doenças e complicações, desde diabetes e demência até problemas de fertilidade e leucemia infantil.

Na maior parte do tempo, o ar poluído também pode ser invisível. A inalação de fuligem ou fumaça com (MP) – geralmente referenciada em tamanho por micrômetros, MP₁₀, MP_{2,5} e MP₁ – escurece os pulmões e causa desconforto respiratório e cardíaco, além de doenças como asma e câncer. É de conhecimento público que, quanto menor a partícula, mais fundo nos pulmões ela pode penetrar, levando junto os compostos químicos dos quais é composta. Esse tipo de poluição surge do processo incompleto de

combustão (de madeira e plantas, bem como de combustível fóssil), poeira e combinações de outros poluentes de fontes diversas, incluindo a agricultura (www.wribrasil-2019).

O trânsito, aterros sanitários e a agricultura, entre outras fontes, também geram poluições e produzem poluentes que levam a formação do ozônio (O_3), um gás invisível. Em 2017, o (O_3) contribuiu para 500 mil mortes em todo o mundo e foi a causa de até 23 milhões de atendimentos de emergência em 2015. A exposição, principalmente ao dióxido de nitrogênio (NO_2), um dos precursores do (O_3) originado principalmente pela combustão de combustíveis fósseis, pode causar doenças respiratórias e cardiovasculares e ter impactos reprodutivos e de desenvolvimento (www.wribrasil-2019).

Estima-se que a exposição à poluição do ar cause 8 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vida saudáveis a cada ano. No caso das crianças, isso pode incluir redução do crescimento, depressão da função pulmonar, infecções respiratórias e agravamento da asma. Em adultos, a cardiopatia isquêmica e o acidente vascular cerebral são as causas mais comuns de morte prematura atribuíveis à poluição atmosférica. Boa parte de toda a problemática pode estar relacionada à exposição ao (MP), originados da emissão de indústria e escapamentos de automóveis. Além disso, estão surgindo evidências de efeitos, como diabetes e doenças neurodegenerativas, colocando a carga de doenças atribuíveis à poluição do ar no mesmo nível de outros grandes riscos globais à saúde, como dieta inadequada e tabagismo (OPAS, 2021).

Sérias doenças têm comprovação direta com a inalação do (MP), doenças cardiovasculares, doenças respiratórias e doenças do sistema nervoso. Por isso, se faz necessário sempre atualizar os estudos sobre os níveis aceitáveis pelo corpo humano e assegurar medidas de controle de emissões. Partículas mais grossas (MP_{10} μm), quando inaladas, conseguem ficar retidas nas entradas respiratórias ao invés de se alojarem em partes mais sensíveis do sistema respiratória. Entretanto, a maior preocupação são as partículas finas ($MP_{2,5}$ μm), estas provocam as doenças de maior risco (esse tipo de partícula tem maior emissão proveniente da combustão dos automóveis). Nesse caso, percorre os brônquios e alvéolos podendo penetrar na corrente sanguínea ocasionando problemas maiores. Partículas ainda menores (MP_1 μm) são capazes de agravar as doenças como asma e bronquite.

Destaca-se que o material particulado tem ganhado destaque nas agências de saúde globais, como um dos grandes responsáveis por mortalidade precoce à medida que o conhecimento científico avança sobre os efeitos. Há de se observar que em 2010, a partícula MP_{2,5} foi considerada o sexto maior fator de risco para a mortalidade prematura global pela OMS, e a primeira relacionada a fatores ambientais (Brasil, 2016). Essa partícula é considerada mais letal, em números absolutos, do que as doenças malária e AIDS juntas.

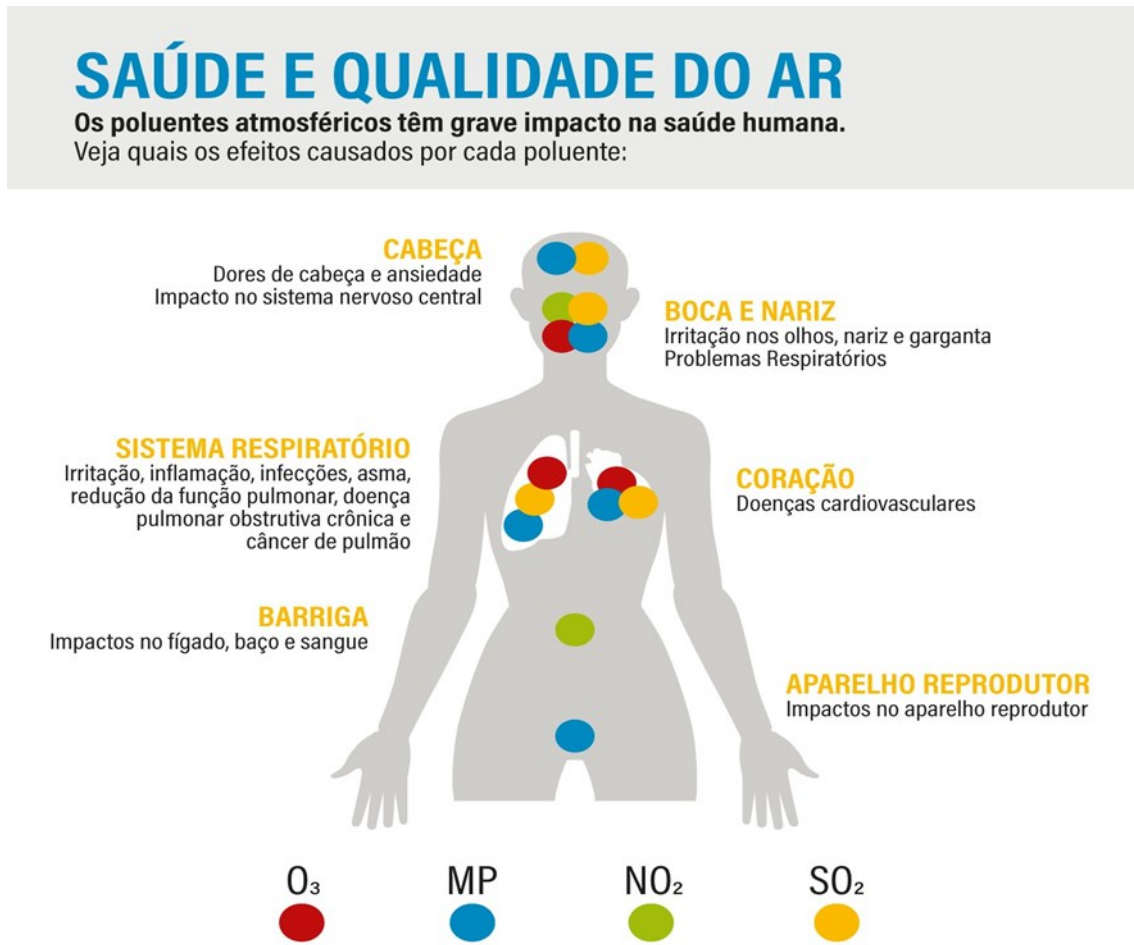
2.4.1 Efeitos da poluição do ar na saúde

Em 2013, a Agência Internacional de Pesquisas sobre o Câncer (IARC), vinculada à OMS, classificou a poluição do ar exterior e do poluente MP, como substâncias carcinogênicas do Grupo I. Isso significa que o risco de desenvolver determinados tipos de câncer é maior para pessoas expostas à poluição atmosférica e ao MP (IARC, 2013).

Alves, *et al.*, (2015) e Pope *et al.* (2006) afirmam que o diâmetro da partícula é determinante para a facilidade com a qual atinge o sistema respiratório (IPCC, 2014). Dessa forma, dentre as pesquisas científicas que se tem conhecimento, há estudos que relacionam o aumento das doenças respiratórias diretamente com as cidades mais populosas (Pope *et al.*, 2006).

Outros efeitos na saúde podem ser vistos na Figura 3. Nesse sentido, a gestão da qualidade do ar é fundamental para controlar as emissões de poluentes atmosféricos e estabelecer parâmetros baseados em suas concentrações e nos impactos associados à saúde da população.

Figura 3. Efeitos da poluição do ar na saúde.



Fonte: Adaptado de WRI BRASIL, 2018.

Uma medida que sem dúvida alguma traria resultados importantes seria a opção do ônibus, ao invés do carro nos deslocamentos diários. Uma pessoa contribui com 45 vezes mais emissões de CO₂ na atmosfera, (gás que contribui para o aquecimento do planeta) e 30 vezes mais de CO (gás tóxico e poluente). Sem contar o aumento de uma vez e meia de NO₂ e o triplo de MP, que afetam os pulmões e provocam danos à saúde. O cálculo foi feito com base nos fatores do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários do Ministério do Meio Ambiente considerando ônibus urbanos com média de ocupação de 80 pessoas e carros com média de 1,5. Mas há de se considerar a poluição gerada pelos ônibus também (WRI BRASIL, 2018).

Nesse contexto, os padrões de qualidade do ar variam de acordo com a abordagem adotada para balancear riscos à saúde, viabilidade técnica e considerações econômicas. Além de vários outros fatores políticos e sociais, dependem também, entre

outras coisas, do nível de desenvolvimento e da capacidade nacional de gerenciar a qualidade do ar. Vale mencionar que as últimas Diretrizes de Qualidade do Ar da (OMS) recomendam os limites de concentração para esses poluentes, seja, para MP_{2,5}: média anual de 5 µg/m³; média de 24 horas de 15 µg/m³. Para MP₁₀: média anual de 15 µg/m³ e para média de 24 horas: 45 µg/m³, (WHO, 2021).

Na América Latina e no Caribe, 90% das pessoas vivem em cidades que excedem as diretrizes da OMS para qualidade do ar (OPAS, 2021). A preocupação com o impacto na saúde humana e o alto índice de mortalidade causados pela poluição do ar fez com que a OMS lançasse as Diretrizes Mundiais para a Qualidade do Ar. Foram estabelecidos parâmetros com objetivo de fornecer recomendações quantitativas relacionadas à saúde para a gestão da qualidade do ar (WHO, 2021). Cerca de 2mil cidades ou assentamentos são monitorados pela OMS para MP₁₀, e MP_{2,5}. No banco de dados de qualidade do ar da OMS de 2022, 37 cidades de países da América Latina aparecem entre as maiores leituras de MP₁₀, sendo 24 no Peru, 6 no Brasil, 5 no México e 2 no Chile. São também 37 cidades em mil que aparecem com as maiores leituras de MP_{2,5}. Sendo 18 no Chile, 10 no Peru, 3 em El Salvador, 2 no México, 2 na Guatemala, 1 em Honduras e 1 na Colômbia (WHO, 2015).

2.4.2 Efeitos da poluição do ar no clima

Muito tem se falado sobre o aumento da temperatura da superfície global. O ano de 2024 foi o mais quente que se tem registro, com um aumento de aproximadamente 1,55 °C em relação aos níveis pré-industriais (ONU confirma 2024 como o ano mais quente já registrado, ONU, 2025). O aquecimento observado é causado pelo ser humano; com aquecimento (GEE), dominado por CO₂ e metano CH₄, parcialmente mascarado pelo resfriamento por aerossol. A temperatura da superfície global nas duas primeiras décadas do século 21 (2001-2020) foi 0,99 [0,84 a 1,10]°C mais alta que em 1850-1900.

A temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos durante os últimos 2000 anos. A faixa provável de aumento da temperatura total da superfície global causada pelo ser humano de 1850–1900 a 2010–2019 é de 0,8°C a 1,3°C, com uma melhor estimativa de 1,07°C. É provável que os GEE10 misturados de forma homogênea tenham contribuído para um aquecimento

de 1,0°C–2,0°C, e outros agentes causadores de origem humana, principalmente aerossóis, contribuíram para um resfriamento de 0,0°C–0,8°C, agentes causadores de origens naturais (solares e vulcânicos) mudaram a temperatura da superfície global em $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e a variabilidade interna a mudou em $\pm 0,2^\circ\text{C}$ (IPCC, 2023).

Nesse cenário, a presença de partículas, também conhecidas por aerossóis, na atmosfera está diretamente relacionada à formação dos núcleos de condensação de nuvens (NCN), podendo influenciar em suas propriedades e interferir na absorção/espalhamento da radiação solar (IPCC, 2014). A absorção de radiação pelos aerossóis emitidos na baixa atmosfera aquece a mesma atmosfera (Johnson *et al.*, 2004), influenciando diretamente nos padrões e intensidade das precipitações (Gonçalves *et al.*, 2015).

Os aerossóis influenciam diretamente no balanço de energia da atmosfera, afetando a formação de nuvens (Lohmann; Feichte, 2005). Seus efeitos, contudo, podem ser contraditórios. Por um lado, em condições de baixa concentração de núcleos de condensação de nuvens (NCN), a precipitação tende a ocorrer de forma mais rápida. Por outro lado, em ambientes com elevada presença de poluição atmosférica, especialmente por aerossóis, a conversão das nuvens em precipitação torna-se dificultada. Isso ocorre porque o vapor d'água em suspensão se condensa em um maior número de gotículas menores, que evaporam com mais facilidade. Com isso, a água não se acumula em quantidade suficiente ao redor dos aerossóis para formar gotas grandes o bastante que possibilitem a ocorrência da precipitação (Andreae *et al.*, 2004; Rosenfeld *et al.*, 2008).

A poluição do ar pode afetar os padrões de chuva e prejudicar a intensidade das monções, alterando diretamente o ciclo da água. Nesse sentido, o MP pode reduzir a quantidade de radiação solar que atinge a superfície do planeta, afetando a taxa de evaporação da água e seu transporte para a atmosfera. Além disso, os aerossóis influenciam na formação de nuvens e na capacidade de transporte de água (MEP WATER GROUP, 2022).

Na Índia e na China, mudanças na intensidade e distribuição das chuvas têm sido relacionadas à poluição do ar por partículas. Algumas áreas registram mais chuva do que o habitual, muitas vezes em grandes concentrações, enquanto outras registram menos. O MP também afeta a trajetória e a intensidade das monções na América do Norte e no sul da Ásia. Além disso, também afeta as chuvas na Europa, na América do Norte e agrava a

seca no Sahel. São impactos que parecem se misturar com uma variabilidade ambiental geral, mas as consequências na agricultura, nos reservatórios de água e na biodiversidade são significativas (ESA, 2021).

Ao tratar a questão da disponibilidade hídrica, é fundamental observar que os rendimentos da geração de energia, oriunda de usinas hidrelétricas, podem ser prejudicados com a alteração do ciclo natural das águas, assim como a produção da energia solar também diminui em áreas com alta concentração de MP. Limpar a poeira gerada pela concentração de MP, nos painéis solares, pode resolver parte do problema, mas o resto é mais complicado, uma vez que a radiação do sol não consegue penetrar completamente no smog¹², reduzindo a produção de energia dos painéis.

2.5 Medidas legais voltadas ao controle da poluição atmosférica, gerada por veículos automotores no Brasil

Em 1977, A CETESB inaugurou seu laboratório de emissão veicular, pioneiro na administração pública e um dos primeiros no Brasil. A partir dele, elaborou estudos que diagnosticaram a contribuição dos veículos na poluição do ar. Em 1981 havia cerca de 2.500.000 veículos licenciados na RMSP.

Devido à inexistência de legislação específica, não havia qualquer tipo de controle de emissões, ou de pós-tratamento das emissões geradas pelos veículos. Então, começaram a ser feitos de forma sistemática, ensaios de determinação dos poluentes no gás de escapamento de veículos, tanto novos quanto em uso, representativos da frota circulante. Nessa primeira metade da década de 1980, as principais indústrias de motores e veículos instaladas no Brasil começaram a implantar e a operar seus próprios laboratórios. Foi sendo criada, portanto, uma extensa base de dados dos valores típicos de emissão dos veículos e motores de então.

Durante o mesmo período, foi introduzido no Brasil o uso do etanol como combustível automotivo, bem como a adição sistemática e regulamentada de etanol anidro à gasolina. Essas ações resultaram em significativa redução nas emissões de CO e

² Smog – junção das palavras *smoke* (fumaça) e *fog* (neblina). Termo usado para definir o acúmulo da poluição do ar formado neblina de fumaça no ambiente atmosférico próximo à superfície, nas cidades (LIEBSCHER, 2000; SCHIRMER; LISBOA, 2008).

na eliminação do chumbo das formulações, uma vez que o etanol passou a substituir o chumbo tetraetila como agente antidetonante da gasolina. A presença do etanol anidro desempenhou essa função de forma eficaz, tornando desnecessário o uso de aditivos à base de chumbo, que além de tóxicos, inviabilizavam o uso de tecnologias de controle de emissões.

Essa substituição foi fundamental para viabilizar, posteriormente, a adoção do catalisador automotivo no país, já que o chumbo presente na gasolina atua como agente envenenador, danificando irreversivelmente o funcionamento dos catalisadores. Nesse contexto, é importante destacar que, no Brasil, os veículos movidos a gasolina utilizam, na verdade, a gasolina tipo C, uma mistura composta por gasolina A e etanol anidro. Essa formulação conhecida como gasol é padrão nos postos de abastecimento do país. Como é tecnicamente uma mistura, será referida ao longo deste trabalho como "gasol".

Mesmo esses avanços, no entanto, não eram suficientes para garantir a qualidade do ar. De posse dos estudos realizados até então e com o auxílio de Michael Walsh, consultor da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OECD, um grupo de profissionais da CETESB preparou o primeiro texto que propunha a regulamentação para o controle das emissões de veículos e motores novos.

Essa minuta foi levada a Brasília pelo Governador Franco Montoro e pelo Secretário Especial Paulo Nogueira Neto, e encaminhada ao CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Em 06 de maio de 1986, o CONAMA publicou sua Resolução nº. 18, que estabeleceu uma política de controle de emissões de longo prazo, com exigências determinadas por fases, para que os diversos segmentos públicos e privados pudessem contar com tempo para incorporar as ações e tecnologias necessárias para a redução das emissões. Estava criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

Entre os objetivos do PROCONVE estava não apenas a redução da emissão de poluentes, mas também a promoção do desenvolvimento tecnológico nacional e a melhoria da qualidade dos combustíveis. Propunha, ainda, a conscientizar da população quanto à questão da poluição do ar e a criar programas de inspeção e manutenção de veículos em uso.

O primeiro artigo do texto da Resolução CONAMA 18/1986 prevê como objetivos gerais:

- i. Reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores visando ao atendimento dos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos;
- ii. Promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística como nos métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;
- iii. Criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;
- iv. Promover a conscientização da população com relação à questão da poluição do ar por veículos automotores;
- v. Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados;
- vi. Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos postos à disposição da frota nacional de veículos automotores, visando à redução de emissões poluidoras à atmosfera.

Simultaneamente, o IBAMA credenciou a CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, para atuar como agente técnico e executivo do PROCONVE. Na ocasião, a CETESB já dispunha de laboratório de ensaios de veículos, equipe capacitada e grande experiência nas questões de qualidade do ar e emissão veicular. A partir de então, as primeiras ações foram desenvolvidas, em especial junto à indústria fabricante de veículos, que passaram a submeter seus modelos a ensaios de emissão de forma a comprovar o atendimento aos padrões, fornecer informações quanto aos volumes de vendas e construir infraestrutura de laboratórios de desenvolvimento e de ensaios.

Para atingir o objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes, foram estabelecidos padrões de emissão para diferentes tipos de veículos comercializados no mercado brasileiro. Esses padrões abrangem, basicamente, veículos leves (L), que incluem automóveis de passageiros e veículos comerciais leves, e veículos pesados (P), como caminhões e ônibus.

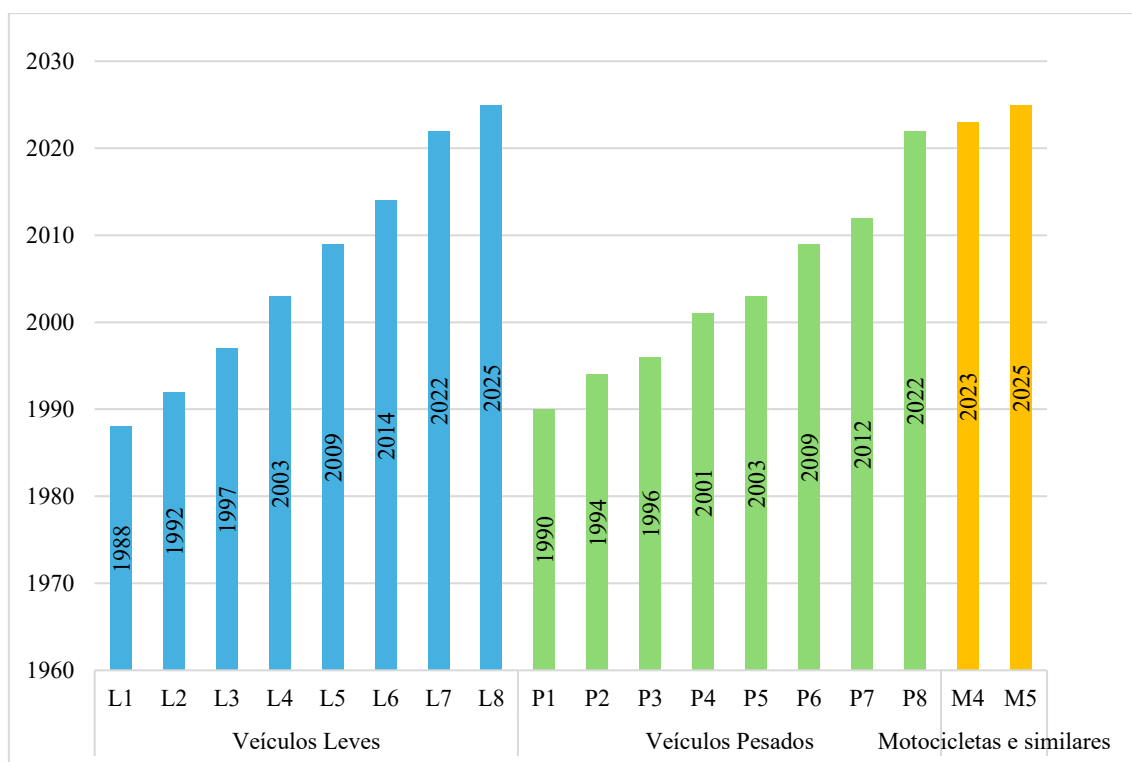
Ao longo do tempo, esses padrões tornaram-se progressivamente mais restritivos, sendo organizados em etapas conhecidas como fases do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores). As fases foram

implementadas em intervalos irregulares, tanto para veículos leves quanto para veículos pesados, como pode ser observado na Figura 4.

Nesse contexto, o ano de 2018 foi um marco importante, pois o CONAMA publicou as Resoluções nº 490 e nº 492, que estabeleceram as bases para as fases L7 e P8 do PROCONVE, ambas com início de vigência em 2022.

A fase L7 promoveu uma redução relevante das emissões evaporativas, ou seja, dos vapores de combustível liberados na atmosfera. Já a fase P8 teve como foco principal a redução significativa das emissões de NOx em veículos pesados. Essas duas medidas, em conjunto, contribuirão para a diminuição da formação de compostos oxidantes na atmosfera, como o ozônio troposférico (O₃) — um poluente secundário nocivo à saúde humana.

Figura 4. Fases do PROCNOVE e ano de início de vigência.



Fonte: Resoluções do CONAMA.

O Brasil já se encontra na fase P8 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), voltada aos veículos pesados. Essa fase foi implementada de forma gradual, com início em 2022 para a homologação de novos modelos e tornando-se obrigatória para todos os veículos novos comercializados a partir

de 2023. A fase P8 está alinhada à norma europeia Euro VI, considerada uma das mais avançadas do mundo em termos de controle de emissões veiculares. Seu principal objetivo é promover uma expressiva redução na emissão de poluentes atmosféricos, especialmente MP e NO_x, que estão diretamente associados a impactos negativos sobre a saúde pública e sobre o meio ambiente.

Da mesma forma, o Brasil também avançou na regulamentação para veículos leves, e, por fim, a nova fase L8, ainda mais restritiva, vigente a partir de 2025, a qual introduz uma mudança metodológica importante nos processos de licenciamento de veículos leves.

Nesse contexto, na busca por melhores resultados, vale mencionar que a avaliação dos impactos da frota veicular sobre a qualidade do ar em áreas urbanas concentra-se, principalmente, na elevada quantidade de veículos leves (automóveis de passeio), que operam sob o ciclo Otto, e de veículos pesados, como caminhões, utilitários e ônibus, que utilizam o ciclo Diesel. Para estimar as emissões de poluentes desses veículos, utilizam-se Fe, geralmente expressos em gramas por quilômetro (g/km) ou gramas por quilowatt-hora (g/kWh), representando valores médios de emissão obtidos em ciclos padronizados de testes.

Esses fatores em dinamômetros de chassis, equipamentos que simulam as condições reais de funcionamento dos veículos, permitindo tanto a avaliação do desempenho (curvas de torque e velocidade) quanto a quantificação das emissões atmosféricas sob diferentes regimes operacionais. Tais testes seguem protocolos técnicos que buscam representar de forma mais realista possível o comportamento dos veículos em uso.

Destaca-se ainda que o modelo tradicional de aprovação por veículo foi substituído pelo critério de média corporativa de emissões, exigindo que o conjunto dos veículos comercializados, por cada fabricante, atenda a limites progressivamente mais restritivos. Essa abordagem estimula a introdução de veículos de emissões zero, como os elétricos, de modo a compensar eventuais modelos com maiores níveis de emissão, promovendo, assim, um avanço consistente rumo a uma frota veicular mais sustentável e ambientalmente eficiente.

No que diz respeito a outras categorias de veículos, destaca-se a criação, em 2002, do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT). Esse programa surgiu em um momento em que o uso de motocicletas, ciclomotores e similares vinha se intensificando, sobretudo em grandes centros urbanos, como alternativa à mobilidade diante dos congestionamentos crescentes. Essa expansão da frota também trouxe maior contribuição para as emissões de poluentes atmosféricos, o que exigiu o estabelecimento de regulamentação específica.

Adicionalmente, em 2011, foi implantado, no âmbito do Proconve, o controle das emissões de máquinas agrícolas e rodoviárias, como tratores e equipamentos de construção civil. Desde então, essa categoria de veículos também passou a ser submetida ao processo de homologação, devendo atender aos limites estabelecidos para emissões de poluentes atmosféricos e ruído.

Para o cumprimento dos limites de emissões estabelecidos pelas diferentes fases do Proconve e do Promot, os veículos passaram por significativas atualizações tecnológicas. Nos veículos leves equipados com motores ciclo Otto, destaca-se a substituição do carburador — dispositivo tradicional responsável pela formação da mistura ar-combustível — pela injeção eletrônica, tecnologia que começou a ser amplamente adotada a partir das fases L2 e L3, na década de 1990. A injeção eletrônica permite o controle mais preciso do volume de combustível e, em conjunto com a ignição eletrônica e o uso de catalisadores, viabilizou uma redução expressiva das emissões veiculares.

Nos veículos pesados, avanços tecnológicos semelhantes foram incorporados apenas a partir de meados dos anos 2000, com a introdução dos sistemas de injeção de diesel com controle eletrônico. Posteriormente, em 2012, foi adotado de forma generalizada o uso de catalisadores do tipo SCR (Selective Catalytic Reduction), tecnologia responsável por reduzir significativamente as emissões de NO_x, principal poluente dos motores a diesel.

Em 2018, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou as Resoluções nº 490 e nº 492, que estabeleceram as bases para as fases L7 e P8 do Proconve, ambas com início de vigência em 2022. A fase L7 trouxe uma redução relevante das

emissões evaporativas, ou seja, dos vapores de combustíveis liberados para a atmosfera. Já a fase P8 teve como foco a redução significativa dos óxidos de nitrogênio nos veículos pesados. Essas medidas, quando associadas a estratégias de renovação da frota e ao fortalecimento da fiscalização, representam avanços significativos na redução de poluentes críticos. Contudo, ainda persistem desafios relacionados à emissão de gases de efeito estufa, sobretudo o CO₂, cuja mitigação requer não apenas medidas tecnológicas e regulatórias, mas também métodos eficazes de quantificação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

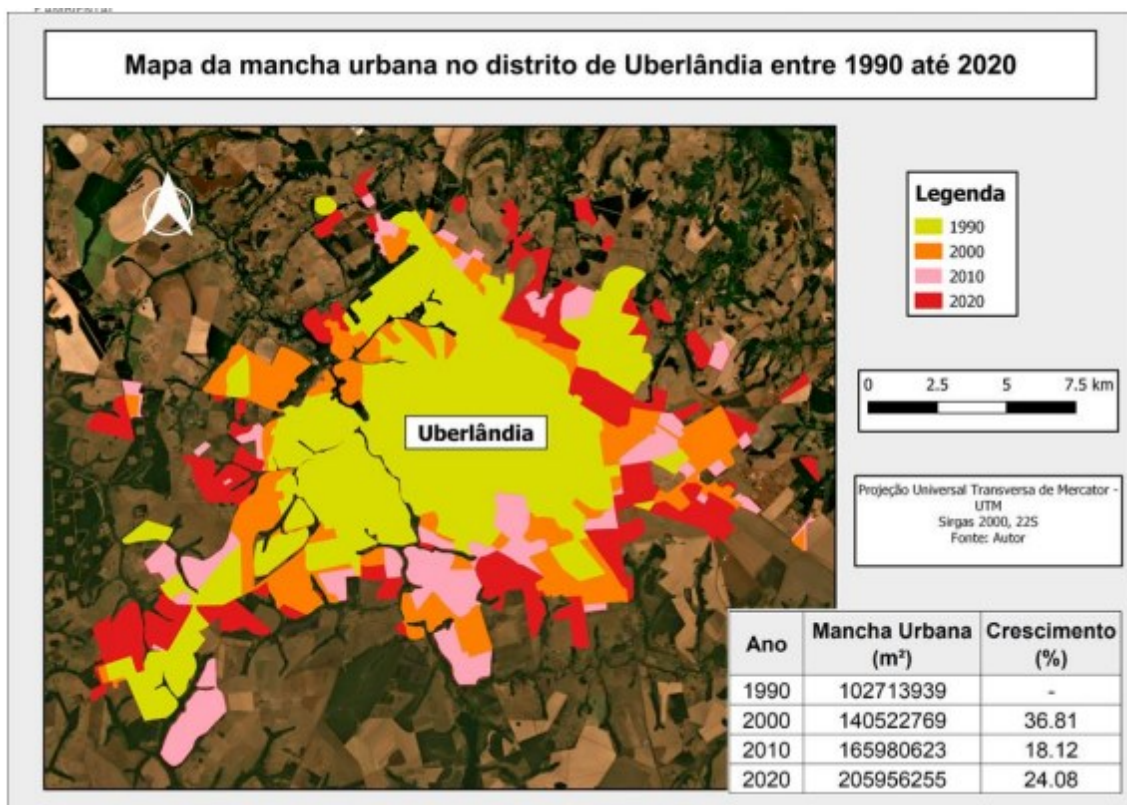
3.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada na cidade de Uberlândia-MG, conhecida como uma cidade relativamente moderna e em franco desenvolvimento. Observa-se, nos números aqui apresentados, e, também, ao comparar o avanço do espaço urbano nos mapas das Figuras 5 e 6, que ocorreu um expressivo crescimento dentro do seu espaço temporal. Uberlândia se localiza na mesorregião denominada Triângulo Mineiro no extremo oeste do estado de Minas Gerais, com altitude de 867 metros em relação ao nível do mar, sob as coordenadas geográficas de latitude: 18°55'06" S e longitude: 48°16'37".

A área do município é de 4.115,206 km² e a população estimada em 2022 foi de 713.224 habitantes, apresentando uma densidade populacional de 173,31 hab./km². (IBGE, 2022). A frota de veículos em Uberlândia, a exemplo do espaço urbano, também tem crescido aceleradamente. Já em dezembro de 2024, a frota atingiu 537.657 veículos, entre eles 275.824 da categoria automóveis e 1.999 de ônibus, o que vale esclarecer nesse caso, que inclui todos os modelos e tamanhos de ônibus.

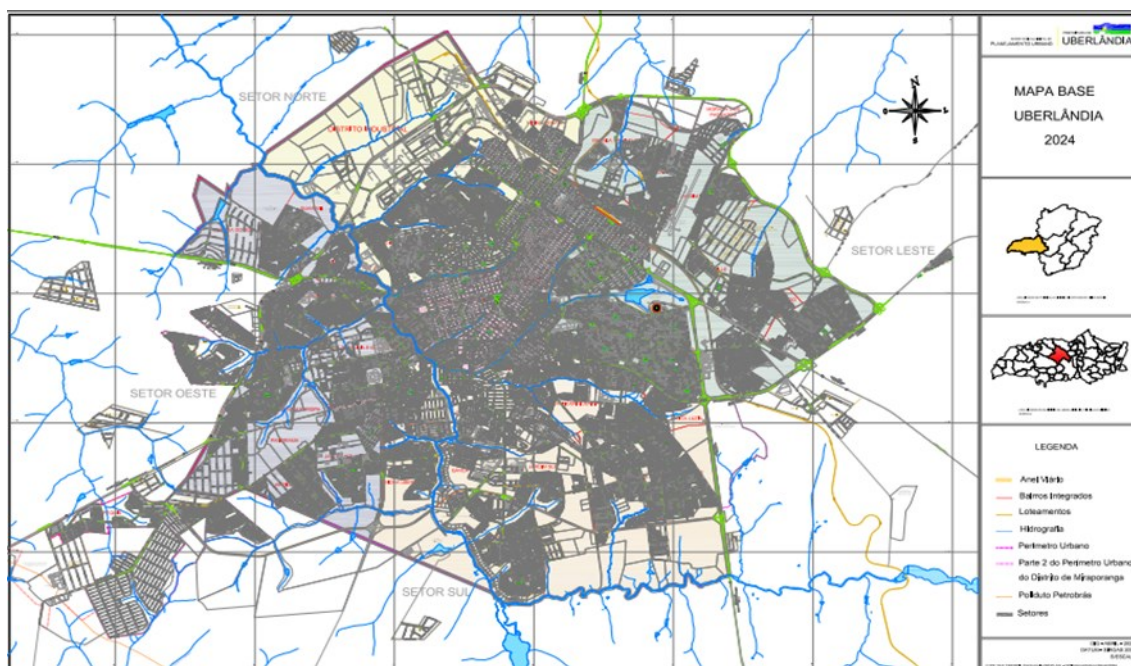
De conhecimento da frota circulante, que é o conjunto de veículos que circulam e do consumo de combustível na área urbana da cidade de Uberlândia-MG, buscaram-se os cálculos de emissão da frota de ônibus de Uberlândia, por meio da quilometragem percorrida e do fator de emissão para os poluentes lançados na atmosfera. A escolha destes poluentes se deu em função da disponibilidade de dados no relatório da CETESB e pelo fato do NO_x e MP serem poluentes considerados traçadores de poluentes da frota de veículos pesados. Em busca de uma fonte segura, foram utilizados os parâmetros e metodologia apresentados nos relatórios de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo, publicados pela (CETESB, 2011).

Figura 5. Avanço do espaço urbano em Uberlândia entre os anos de 1990 a 2020



Fonte: AQUINO et al. Melhoria da qualidade da água tratada e aumento da capacidade de ETAs através da escolha adequada de coagulantes e auxiliares. [s.l.: s.n.], [s.d.]. p. 4.

Figura 6. Mapa da cidade de Uberlândia no ano de 2024.



Fonte: Secretaria de Planejamento Urbano de Uberlândia/MG.

3.2 Etapas desenvolvidas na pesquisa

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa para estimar as emissões de poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis e renováveis. A metodologia está estruturada em quatro etapas principais:

1. CO₂, CH₄ e N₂O e os Fatores de emissão (Fe) utilizados;
2. Coleta de dados: utilização de fontes oficiais como o Ministério dos Transportes, CETESB, Prefeitura Municipal de Uberlândia-MG, antigo Ministério do Meio Ambiente (MMA), ANP e o IPCC. Também foram consideradas fontes acadêmicas complementares;
3. Cálculo das emissões: a partir de fatores de emissão padronizados (g/km, g/kWh), convertidos quando necessário, além do consumo de combustível e eficiência energética dos motores;
4. Validação dos resultados: comparação com dados nacionais, assumindo similaridade entre as frotas dos Estados de Santa Catarina (SC), São Paulo (SP) e Campo Grande (MS), com características semelhantes.

3.3 Fe, referências utilizadas e discussão dos grupos de veículos da frota

Os fatores de emissão utilizados para a estimativa das emissões veiculares foram extraídos das fontes oficiais mais atualizadas e reconhecidas disponíveis, especificamente dos Relatórios e Publicações de Emissão Veicular da CETESB (2011). Para o levantamento do quantitativo da frota circulante no município de Uberlândia-MG, a única fonte oficial consultada foi o Ministério dos Transportes, por meio da SENATRAN (Brasil, 2023).

O estudo considerou o número de veículos registrados nos meses de dezembro de 2022 e 2023, abrangendo todas as categorias, com exceção dos ônibus coletivos urbanos pertencentes ao SIT, cuja frota foi tratada separadamente.

Em razão da indisponibilidade de dados por tipo de veículo para o município de Uberlândia (exceto para os ônibus do SIT), optou-se por adotar uma idade média de 10 anos para toda a frota analisada. Essa decisão está em consonância com dados nacionais,

que indicam idade média da frota brasileira de 10 anos em 2024 (Estudo do Sindipeças revela que a idade média da frota brasileira é de 10 anos, Sindipeças, 2024).

Vale destacar que a escolha da idade média também é coerente com os objetivos do Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), que define faixas etárias para adequação de emissões veiculares conforme a fase vigente (por exemplo, L7, L8 etc.), e reforça a importância de monitorar por idade a frota em circulação para controlar emissões.

A adoção dessa idade média fundamenta-se na premissa de que veículos com aproximadamente 10 anos de uso representam uma fase de maturidade operacional. Nessa etapa, já se encontram consolidados fatores como o desgaste natural dos componentes, o padrão de manutenção e o desempenho médio dos veículos. Além disso, esse valor é comumente utilizado como referência em estudos sobre impacto ambiental, análise de depreciação e desempenho veicular (Carros brasileiros ficam mais velhos na última década, MOBIAUTO, 2021).

Adicionalmente, em virtude da ausência de dados reais sobre a quilometragem média anual percorrida pela frota do município, exceto a do SIT, foi adotado, como parâmetro, o índice de intensidade de uso descrito no *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores – 2013 (ano-base 2012)*, elaborado pelo então Ministério do Meio Ambiente. As informações utilizadas constam na Tabela 3 do referido documento. Embora esse inventário tenha como base a frota do Estado de São Paulo, ele é amplamente aceito como referência em estudos nacionais, especialmente naqueles voltados a contextos urbanos com características similares. Para a frota do SIT, foi possível obter a quilometragem total percorrida mensalmente, a qual foi dividida entre os veículos ativos no período, permitindo o cálculo de uma média por veículo.

Tabela 3. Valores de intensidade de uso de referência adotados na pesquisa, em km/ano.

Anos de uso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Automóveis e Comerciais Leves Otto	10.000	19.400	18.800	18.200	17.600	17.000	16.400	15.800	15.200	14.600	14.000
Comerciais Leves Diesel	10.000	19.600	19.200	18.800	18.400	18.000	17.600	17.200	16.800	16.400	16.000
Motocicletas	6.000	11.600	11.200	10.800	10.400	10.000	9.600	9.200	8.800	8.400	8.000
Ônibus Urbanos e Micro-ônibus	45.997	88.443	84.892	81.341	77.790	74.240	70.689	67.138	63.587	60.036	56.485
Ônibus Rodoviários	59.047	116.095	114.098	112.100	110.102	108.104	106.107	104.109	102.111	100.113	98.116
Caminhões Semi-leves e Leves	32.290	63.875	63.171	62.466	61.762	61.058	60.353	59.649	58.944	58.240	57.535
Caminhões Médios	56.155	110.518	108.727	106.936	105.145	103.355	101.564	99.773	97.982	96.191	94.400

Fonte: Adaptado de Inventário de intensidade de uso de referência adotados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores – 2013 (ano-base 2012), em km/ano, por categoria veicular e ano de uso.

A Tabela 4 apresenta os Fe referentes ao ano de 2013, obtidos nos relatórios da (CETESB, 2011) e aplicados aos cálculos das emissões estimadas para 2022, de forma análoga. Já a Tabela 5 apresenta os Fe de 2014, extraídos dos relatórios da (CETESB, 2011) e utilizados nos cálculos das emissões estimadas para 2023.

Os Fe estão discriminados por tipo de veículo, combustível e fase do PROCONVE/PROMOT, contemplando os principais poluentes atmosféricos regulados. Considerou-se, para ambas as estimativas, a idade média da frota de 10 anos.

Tabela 4. Fatores de emissões utilizados nos cálculos de estimativas de poluentes do ano de 2022.

<u>Veículos automóveis</u>								
Combustível (1)	Fase Proconve	CO (g/km)	HC		NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km) (3)
			Total (g/km)	CH ₄ (g/km)				
Gasolina C		0,241	0,025	0,006	0,02	0,001	197	0,022
<i>Flex</i> -Gasol.C	L5	0,227	0,03	0,006	0,026	0,001	176	0,019
<i>Flex</i> -Etanol		0,423	0,077	0,026	0,023	nd	168	0,017
<u>Veículos comerciais leves "caminhonetas" os mesmos Fe dos veículos utilitários e comerciais leves</u>								
Combustível (1)	Fase Proconve	CO (g/km)	HC		NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km) (3)
			Total (g/km)	CH ₄ (g/km) (2)				
Gasolina C		0,195	0,022	0,005	0,012	0,0011	246	0,025
<i>Flex</i> -Gasol.C	L5	0,221	0,037	0,01	0,039	0,0011	243	0,027
<i>Flex</i> -Etanol		0,643	0,085	0,034	0,035	nd	234	0,017
Diesel	L6	0,075	0,028	0,014	0,276	0,015	256	0,02
<u>Veículos comerciais leves diesel ensaiados como pesados - Camionetas e SUVs</u>								
Fase Proconve	CO (g/kWh)	CO (g/km)	HC (g/kWh)	HC (g/km)	NOx (g/kWh)	NOx (g/km)	MP (g/kWh)	MP (g/km)
P5	1,423	0,496	0,307	0,107	4,199	1,464	0,093	0,033
<u>Motocicletas e Motonetas</u>								
Fase Promot	Combustível	CO (g/Km)	HC (g/Km)	CH ₄ (g/Km)	NOx (g/Km)	MP (g/Km)	CO ₂ (g/Km)	N ₂ O (g/Km)
M3	Gasolina	0,492	0,16	0,04	0,063		56	0,002
		0,821	0,124	0,031	0,073		85	0,002
	<i>Flex</i> - Gasolina	0,681	0,142	0,035	0,046	0,0035	50	0,002
		0,696	0,081	0,02	0,077		77	0,002
	<i>Flex</i> -Etanol	0,828	0,152	0,038	0,038		47	nd
		0,78	0,09	0,022	0,042		76	nd
<u>Veículos pesados com motores do ciclo Diesel em g/km</u>								
Fase Proconve	Categoria	CO (g/km)	HC (g/km)	CH ₄ (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km)
P7	Semi-leves	0,011	0,005	0,06	0,484	0,003	0,03	
		Leves	0,116	0,007	0,06	0,957	0,008	0,03
	Caminhões	Médios	0,087	0,01	0,06	1,086	0,009	0,03
		Semipesados	0,106	0,017	0,06	1,602	0,016	0,03
		Pesados	0,281	0,029	0,06	1,542	0,016	0,03
	Ônibus	Urbanos	0,528	0,018	0,06	2,683	0,021	0,03
		Micro- ônibus	0,128	0,031	0,06	1,211	0,011	0,03
		Rodoviários	0,4	0,046	0,06	1,702	0,017	0,03

Fonte: Relatórios da (CETESB, 2023).

Tabela 5. Fatores de emissões utilizados nos cálculos de estimativas de poluentes do ano de 2023.

<u>Veículos automóveis</u>									
Combustível (1)	Fase Proconve	CO (g/km)	HC		NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km) (3)	
			Total (g/km)	CH ₄ (g/km)					
Gasolina C		0,211	0,021	0,006	0,015	0,001	197	0,021	
<i>Flex</i> -Gasol.C	L5/L6	0,228	0,024	0,004	0,019	0,001	173	0,019	
<i>Flex</i> -Etanol		0,398	0,073	0,02	0,018	nd	165	0,017	
<u>Veículos comerciais leves "caminhonetas" os mesmos Fe dos veículos utilitários e comerciais leves</u>									
Combustível (1)	Fase Proconve	CO (g/km)	HC		NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km) (3)	
			Total (g/km)	CH ₄ (g/km)					
Gasolina C	L5/L6	0,225	0,021	0,003	0,009	0,0011	225	0,022	
<i>Flex</i> -Gasol.C		0,284	0,031	0,006	0,025	0,0011	243	0,027	
<i>Flex</i> -Etanol		0,547	0,09	0,022	0,033	nd	232	0,017	
Diesel	L6	0,08	0,023	0,013	0,276	0,015	256	0,02	
<u>Veículos comerciais leves diesel ensaiado como pesados - Camionetas e SUVs</u>									
Fase Proconve	CO (g/kWh)	CO (g/km)	HC (g/kWh)	HC (g/km)	NOx (g/kWh)	NOx (g/km)	MP (g/kWh)	MP (g/km)	
P5	1,423	0,496	0,307	0,107	4,199	1,464	0,093	0,033	
<u>Motocicletas e Motonetas</u>									
Fase Promot	Combustível	CO (g/Km)	HC (g/Km)	CH ₄ (g/Km)	NOx (g/Km)	MP (g/Km)	CO ₂ (g/Km)	N ₂ O (g/Km)	
M3	Gasolina	0,492	0,16	0,04	0,063	0,0035	56	0,002	
		0,821	0,124	0,031	0,073		85	0,002	
	<i>Flex</i> - Gasolina	0,681	0,142	0,035	0,046		50	0,002	
		0,696	0,081	0,02	0,077		77	0,002	
	<i>Flex</i> -Etanol	0,828	0,152	0,038	0,038		47	nd	
		0,78	0,09	0,022	0,042		76	nd	
<u>Veículos pesados com motores do ciclo Diesel em g/km</u>									
Fase Proconve	Categoria	CO (g/km)	HC (g/km)	CH ₄ (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	CO ₂ (g/km)	N ₂ O (g/km)	
P7	Semi-leves	0,011	0,005	0,06	0,484	0,003		0,03	
		Leves	0,116	0,007	0,06	0,957	0,008		0,03
	Caminhões	Médios	0,087	0,01	0,06	1,086	0,009		0,03
		Semipesados	0,106	0,017	0,06	1,602	0,016		0,03
		Pesados	0,281	0,029	0,06	1,542	0,016		0,03
	Ônibus	Urbanos	0,528	0,018	0,06	2,683	0,021		0,03
		Micro- ônibus	0,128	0,031	0,06	1,211	0,011		0,03

No caso específico de levantamentos de emissões de CO₂, se faz necessário esclarecer que os parâmetros para estimativas ainda são mais escassos. Por essa razão, foram adotados, na pesquisa, os cálculos sob o método *top-down*, frente à ausência de fatores de emissão veiculares específicos e confiáveis para veículos movidos a diesel, no contexto brasileiro. Esse método utiliza o consumo aparente de combustíveis, ou seja, o volume de diesel, gasolina e etanol comercializados na cidade de Uberlândia-MG, conforme dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2025) referentes ao período analisado.

Os fatores de emissão Fe expressos por litro de combustível foram obtidos a partir do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (CETESB, 2023), o qual apresenta as emissões de CO₂ em kg/L.

Cabe destacar que, para todos os poluentes e para os combustíveis gasolina e etanol, os Fe utilizados na pesquisa foram disponibilizados nos relatórios em unidades de g/km. A única exceção refere-se ao CO₂ proveniente do combustível diesel, para o qual não há Fe em g/km nos documentos consultados.

Diante dessa lacuna, adotou-se o método *top-down* para a estimativa das emissões de CO₂ de toda a frota, abrangendo veículos movidos a gasolina, etanol e diesel, conforme descrito na Equação 1.

$$E_{CO_2} = C \times A$$

Eq. 1

Onde:

- C = consumo de combustível (litros/ano)
- A = fator de emissão (kg CO₂/litro)

Para os demais poluentes pesquisados foram utilizados fatores de emissão padronizados, expressos em unidades como gramas de poluentes por quilômetro rodado (g/km). Além disso, foram considerados dados sobre o consumo de combustível e a

eficiência energética dos motores, informações fundamentais para a estimativa das emissões.

A coleta de dados baseou-se em fontes oficiais amplamente reconhecidas, como o Ministério dos Transportes, CETESB, a Prefeitura Municipal de Uberlândia-MG, o então MMA, a ANP e o IPCC.

A Tabela 6 apresenta os Fe disponíveis no 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (CETESB, 2023), que serviram de base para os cálculos realizados nesta pesquisa.

Ressalta-se que os mesmos Fe, utilizados para o ano de 2022, foram também aplicados nas estimativas de 2023, por serem considerados os mais adequados, uma vez que permanecem inalterados nos inventários nacionais desde 2001.

Tabela 6. Fator de emissão de CO₂ (kg/L) adotado no cálculo pelo método *top-down*.

Ano referência	Comb.	Fe CO ₂ (Kg/L)
2022	Diesel	2,603
2023	Diesel	2,603
2022	Gasol	2,212
2023	Gasol	2,212
2022	Etanol	1,457
2023	Etanol	1,457

Fonte: Adaptado de CETESB (2023).

Conforme apresentado na Tabela 6, os fatores de emissão adotados nesta pesquisa estão expressos em diferentes unidades, o que exige conversões para adequar os cálculos ao consumo real de combustível.

Assim, torna-se essencial considerar a densidade como uma propriedade física fundamental dos combustíveis líquidos, uma vez que ela permite relacionar massa e volume, possibilitando a correta transformação de unidades, especialmente de g/km para valores expressos em função do volume consumido.

No processo de conversão dos Fe, é importante destacar a relevância da densidade como propriedade fundamental dos combustíveis líquidos. A densidade,

expressa como a razão entre massa e volume ($d = m/V$), exerce papel decisivo na conversão de unidades, sobretudo quando se pretende transformar fatores expressos em massa por quilômetro (g/km) para unidades associadas ao volume de combustível consumido.

A título de comparação, a densidade da água, utilizada como padrão de referência, é de 1.000 kg/m³. No caso específico do óleo diesel, objeto de análise neste trabalho, sua densidade pode variar entre 835 kg/m³ e 875 kg/m³, conforme relatado por ALS GLOBAL (2018) e normatizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2013). Essa variação de densidade influencia diretamente o cálculo das emissões atmosféricas, especialmente quando a massa de poluentes emitida é estimada com base no volume consumido de combustível.

Neste estudo, foi adotada a densidade de 835 kg/m³ para o óleo diesel, valor correspondente ao limite inferior da faixa estabelecida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2013). Essa escolha visa assegurar uma abordagem conservadora, alinhada ao princípio da precaução, além de manter coerência com relatórios técnicos (ALS GLOBAL, 2018) e outros inventários nacionais, permitindo comparações mais consistentes com estudos similares.

Para a frota geral da cidade, cujo quantitativo de veículos é expressamente maior, a média de idade trabalhada foi de 10 anos de utilização, como informado, já dentro da fase P7, portanto, com referência encontrada na fonte.

3.3.1 Cálculo de emissões pelo método bottom-up

De forma geral, as estimativas das emissões de poluentes gerados pela frota de veículos da cidade de Uberlândia foram obtidas a partir dos fatores de emissão médios por poluente – FEMP (g/km). Esses valores estão disponíveis nos relatórios da CETESB (2023), assumindo-se que a composição e o comportamento da frota veicular do estado de São Paulo são semelhantes aos da frota urbana de Uberlândia, em Minas Gerais.

As emissões dos poluentes foram calculadas com base na Equação 2.

$$E_{x,v,y} = \sum (I_{v,n,y} \times F_{c_{v,n,y}} \times F_{e_{v,n,y}})$$

Onde,

- x é o índice que denota um tipo de poluente regulado;
- v é o tipo de veículo que utiliza o tipo de combustível c ;
- n o ano de fabricação do veículo (de 2.000 a 2023);
- y o ano de referência do relatório (2023);
- $E_{x,v,y}$ a emissão do poluente x atribuíveis ao veículo do tipo v da frota circulante durante o ano y , t poluente x , em toneladas;
- $I_{v,n,y}$ é a intensidade de uso ajustada para o veículo do tipo v fabricado no ano n da frota circulante durante o ano y , em km/ano/veículo;
- $F_{c,v,n,y}$ é o número de veículos do tipo v fabricado no ano n da frota circulante durante o ano y , em unidade de veículos;
- $Fe_{x,v,n,y}$ é o fator de emissão do poluente regulado x aplicável ao veículo v fabricado no ano n da frota circulante durante o ano y , em toneladas de poluente x por km rodado.

3.3.2 Veículos leves (automóveis e motos)

a. Veículos automóveis

Em relação aos veículos automóveis, o levantamento considerou a seguinte distribuição de consumo de combustíveis: 70% gasol e 30% etanol. Apesar da ausência de informações oficiais em relatórios, inventários e documentos técnicos sobre essa divisão de consumo, reconhece-se que o etanol representa uma alternativa relevante no mercado nacional de veículos leves. Como referência, foi utilizado o levantamento recente da União Nacional da Bioenergia, o qual indica que, embora a maioria dos veículos leves no Brasil seja flex, apenas 30% utilizam efetivamente o etanol (UDOP, 2024).

Para a categoria de caminhonetas, veículos mistos projetados para o transporte de cargas e passageiros, incluindo os SUVs, não foram encontradas classificações específicas nas tabelas do Ministério dos Transportes – SENATRAN (Brasil, 2023). Nesse caso, adotou-se uma estimativa de distribuição por tipo de combustível (50%

movidos a gasolina, 30% a diesel e 20% a etanol)³. Essa aproximação foi utilizada de forma metodológica para viabilizar os cálculos de emissões, reconhecendo-se suas limitações.

Destaca-se ainda que, para essa categoria de veículos, bem como para os utilitários, a CETESB (2023) não apresenta diretamente os Fe específicos. Por esse motivo, adotaram-se os Fe aplicáveis aos veículos comerciais leves, tanto para combustíveis fósseis quanto para veículos flex, estendendo-os às duas categorias.

Ainda no que se refere aos veículos leves, observou-se que as planilhas da SENATRAN (2023) apresentam um grupo denominado “Camioneta”. Como a CETESB (2023) adota uma classificação distinta, listando apenas a categoria “Comerciais Leves”, optou-se por criar, na planilha de trabalho, um grupo específico denominado “Caminhonetas - Comerciais Leves”, de modo a compatibilizar as informações entre as fontes. Para esse grupo, adotaram-se os Fe disponibilizados pela CETESB (2011).

Entretanto, no caso específico dos veículos desse grupo movidos a diesel, e considerando a segmentação técnica adotada nos inventários da CETESB, utilizaram-se os fatores de emissão atribuídos à categoria “Comerciais leves novos do ciclo diesel ensaiados como pesado”, conforme os dados apresentados nos relatórios da CETESB (2011).

b. Motocicletas

Em relação à quilometragem utilizada para os cálculos de emissão de poluentes provenientes de Motocicletas e Motonetas, é importante esclarecer que o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários – 2013, publicado pelo então Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2013), considerou a mesma quilometragem média para ambos os tipos de veículos.

³ Os percentuais adotados não correspondem a estatísticas oficiais publicadas por ANP ou Fenabrave. Trata-se de valores estimados com base em tendências de mercado, utilizados metodologicamente para viabilizar a análise, reconhecendo-se a limitação quanto à precisão da distribuição real de combustíveis nessa categoria.

Cabe ainda diferenciar tecnicamente as categorias: considera-se Motocicleta o veículo automotor no qual o condutor pilota em posição montada, com as pernas posicionadas lateralmente ao corpo do veículo. Por sua vez, a Motoneta é o veículo em que o condutor pilota sentado, com os pés apoiados à frente do corpo, em uma plataforma ou estrutura própria (Ventura, 2025).

Diante da necessidade de aprimorar as estimativas e obter resultados mais representativos da realidade nacional, torna-se essencial considerar o consumo efetivo dos principais combustíveis utilizados por esses veículos, notadamente a gasolina e o etanol.

Nesse sentido, dados obtidos na publicação do Diário Gaúcho (Atenção ao comprar uma motocicleta usada, 2013) apontam que, do total de combustível consumido pelas motocicletas no Brasil, apenas 10% correspondem ao etanol, sendo o restante predominantemente gasolina. Ressalta-se, contudo, que os relatórios da (SENATRAN, 2023) apresentam as informações consolidadas sob a categoria genérica "Motocicletas", sem distinção quanto aos diferentes modelos ou faixas de potência. Da mesma forma, os inventários elaborados pela CETESB (2011) fornecem os Fe para o grupo "Motocicletas e similares", sem especificação de categorias.

Considerando essa limitação nas fontes oficiais e buscando maior representatividade, optou-se por adotar, de forma conservadora e técnica, os Fe referentes a motocicletas de até 150 cilindradas, movidas a gasolina e/ou flex (gasolina/etanol), para o cálculo das emissões do grupo. Essa escolha justifica-se pelo fato de essa faixa de potência representar o segmento mais acessível do ponto de vista econômico, além de corresponder ao perfil predominante de motocicletas utilizadas no país tanto para fins de transporte individual quanto para atividades laborais e de lazer.

Ao tratar da categoria de veículos automotores de duas rodas, observa-se que, entre os veículos registrados no município de Uberlândia-MG, conforme dados do Ministério dos Transportes – SENATRAN (Brasil, 2023), os modelos Ciclomotores, Triciclos e Sidecars não tiveram sua utilização convertida em estimativas de emissão de poluentes. Tal decisão fundamenta-se na ausência de referências técnicas e dados consolidados sobre a intensidade média de uso desses veículos na base de dados consultada.

Dessa forma, justifica-se a exclusão desses modelos dos cálculos apresentados no estudo. Cabe ressaltar, entretanto, que, além de representarem um quantitativo reduzido dentro da frota local, esses veículos caracterizam-se, em geral, por apresentarem baixo consumo de combustível. Portanto, considera-se que sua contribuição para a carga poluidora total do município é marginal ou irrelevante, não comprometendo a representatividade dos resultados obtidos para o conjunto da frota.

3.3.3 *Veículos pesados*

i. Caminhões

Em relação à frota de caminhões, destaca-se que o Ministério dos Transportes, por meio da SENATRAN (Brasil, 2023), apresentou separadamente as categorias de veículos utilitários, caminhonetes e caminhonetas. No entanto, no grupo de caminhões, a classificação foi limitada a apenas duas categorias: caminhão-trator e caminhão, de forma genérica.

Com o objetivo de aprimorar a precisão das estimativas, foi incorporada à planilha de trabalho um grupo específico denominado “Caminhões Leves e Semi-leves”. Os fatores de emissão atribuídos a esse grupo foram obtidos das tabelas de classificação disponíveis nos Relatórios e Publicações sobre Emissão Veicular da CETESB (2011), considerando o número de veículos do grupo de Caminhonete das planilhas SENATRAN (2023).

Essa decisão técnica se fundamenta na generalização observada na classificação oficial, que permite interpretar que veículos como as caminhonetes, por apresentarem capacidade de carga de até 3.500 kg, possam ser enquadrados como caminhões, sobretudo considerando que suas características operacionais e estruturais são compatíveis com os parâmetros definidos para essa categoria veicular.

É de conhecimento público que existem diversas classes de caminhões com diferenças significativas em dimensões, capacidade de carga, consumo energético e, conseqüentemente, níveis de emissão de poluentes. Essa diferenciação é fundamental

para garantir maior precisão nos inventários de emissões e nas análises ambientais associadas ao setor de transportes.

Para os caminhões, que não se enquadram na categoria de tratores e que possuem maior porte e capacidade de carga, foram utilizados os fatores de emissão correspondentes ao grupo de caminhões médios, conforme estabelecido pela CETESB (2023). Essa abordagem visa a representar de forma mais realista o perfil de emissões do setor de transporte rodoviário de cargas no país.

Cabe ressaltar que, em relação aos caminhões pesados, popularmente conhecidos como caminhões tratores, carretas ou caminhões reboques, considerou-se, na presente pesquisa, que apenas 5% da quilometragem total percorrida por esses veículos ocorre no município de Uberlândia. Essa estimativa baseia-se nos parâmetros de intensidade de uso veicular apresentados pelo antigo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2013), que, entretanto, fornece apenas o valor agregado da quilometragem total rodada, sem especificar a distribuição dessa quilometragem no espaço urbano ou em áreas municipais.

Levando-se em conta as características operacionais desses veículos, predominantemente voltados ao transporte rodoviário de longa distância, entende-se que a maior parte da quilometragem ocorre em malhas viárias intermunicipais, interestaduais e, em alguns casos, internacionais. A circulação desses veículos no perímetro urbano limita-se, em sua maioria, a deslocamentos para retorno às bases logísticas, manutenções mecânicas e acesso a entrepostos de cargas, atividades que se justificam, sobretudo, pelo fato de Uberlândia ser um importante polo atacadista e centro logístico regional.

Para maior realismo nas estimativas de emissões, considerou-se, portanto, que apenas uma pequena fração da quilometragem percorrida por essa frota é dentro dos limites urbanos do município.

ii. Ônibus

Na classe dos ônibus rodoviários, a fonte utilizada como parâmetro de intensidade de uso também apresenta apenas o valor total da quilometragem rodada, sem estimativa específica do fluxo operacional no perímetro municipal. Assim como ocorre com os caminhões tratores, trata-se de veículos de grande porte, cuja natureza de utilização é predominantemente em rodovias. Entretanto, entende-se que uma parcela desses veículos realiza deslocamentos de menor raio, interligando cidades vizinhas e retornando diariamente ao município.

Diante desse cenário, adotou-se um critério distinto para estimar o fluxo no município. Ao contrário dos caminhões tratores, para os quais se considerou 5% da quilometragem total rodada dentro de Uberlândia, optou-se, no caso dos ônibus rodoviários, por aplicar o percentual de 5% sobre o total de veículos registrados no município.

Essa decisão se deve ao fato de que, diferentemente dos caminhões-tratores, cuja circulação local representa apenas uma fração da quilometragem total percorrida, os ônibus rodoviários apresentam dinâmica de uso particular. Embora sejam formalmente classificados como rodoviários, parcela significativa dessa frota permanece em operação cotidiana dentro do perímetro urbano. Esses veículos são amplamente empregados no transporte de funcionários de empresas, no deslocamento de trabalhadores rurais e na prestação de serviços para eventos e demandas internas da cidade. Nessa condição, o número de veículos registrados torna-se um parâmetro mais representativo da atividade local do que a quilometragem percorrida, justificando o critério adotado.

Ainda sobre os ônibus, embora esta pesquisa contemple a análise das emissões veiculares em escala municipal, a frota de ônibus coletivos urbanos do SIT de Uberlândia recebeu destaque especial. Essa ênfase se justifica pela disponibilidade de informações completas e atualizadas fornecidas por fonte oficial, contemplando dados como ano de fabricação, modelo, características operacionais, consumo de combustível e quilometragem percorrida.

Além disso, trata-se de uma frota totalmente movida a diesel, combustível associado a emissões significativas de poluentes atmosféricos, em especial material

particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx), reconhecidos por seus impactos adversos à qualidade do ar e à saúde pública em centros urbanos.

Para a frota do SIT, utilizou-se a relação de quantitativos de veículos apresentada pela gestora do sistema (PMU, 2024) para cada ano pesquisado. A partir dessas informações, foi possível trabalhar com a idade real dos veículos, agrupando-os por ano de fabricação e aplicando os Fe, de acordo com as fases do PROCONVE correspondentes. Como a mesma fonte apresentou a quilometragem percorrida de forma globalizada, mensalmente, para todo o período analisado, foi possível estimar as emissões mensais ao longo dos 24 meses considerados na pesquisa.

A investigação contemplou toda a frota de ônibus coletivos urbanos de passageiros que operam na malha viária do município de Uberlândia – MG. Por fim, os Apêndices B, C e D a Figura 9, apresentam dados disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Uberlândia, por meio da Secretaria de Trânsito e Transportes, com o objetivo de contextualizar as informações referentes à frota e ao consumo de combustível do SIT no período analisado.

iii. Veículos agrícolas

Para os veículos do grupo de tratores de rodas, cuja utilização está registrada sobre horas de trabalho, foi possível estimar a emissão de quatro, dos sete poluentes aqui trabalhados, conforme detalhamento na seção que trata do grupo em questão.

O Ministério dos Transportes – SENATRAN (Brasil, 2023) relaciona um número relativamente baixo de tratores de rodas registrados no município de Uberlândia-MG. É importante esclarecer que a utilização operacional desses veículos é normalmente registrada em horas de trabalho, e não em quilômetros percorridos, o que dificulta a aplicação direta de metodologias usuais de estimativa de emissões baseadas em distância.

Adicionalmente, destaca-se que veículos movidos a diesel, como é o caso da maioria dos tratores, apresentam emissões de CO₂ por unidade de volume ou massa de combustível superiores às dos demais modais motorizados, especialmente os movidos a

gasol ou etanol. Diversas fontes técnicas, que tratam de cálculos de emissões setoriais, apresentam valores médios de emissões apenas no processo de combustão. Como exemplo, citam-se os seguintes fatores de emissão de CO₂ para o diesel: 2,67 kgCO₂/L, 2,524 kgCO₂/L, e o valor considerado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, de 2,67 kgCO₂/L, baseado em dados de emissões de veículos pesados europeus, cujas características de motorização se assemelham às dos veículos utilizados no Brasil (ÁLVARES, 2009).

Cabe salientar que há certa variação na literatura científica em relação a esse valor médio, em função das premissas adotadas para caracterização da frota, tipo de combustível e condições de uso. No entanto, diante da inexistência de Fe específicos de CO₂ para tratores no contexto nacional, adotou-se, de forma conservadora e metodologicamente coerente, o método *top-down* para o cálculo das emissões desse grupo.

Nesse método, os fatores de emissão dos combustíveis, expressos em kg de CO₂ por litro, foram obtidos do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (CETESB, 2023), que apresenta valores médios de emissão de CO₂ por unidade de combustível consumido, sendo essa abordagem a mais adequada considerando as limitações de dados específicos para o Brasil.

Para este grupo específico de veículos, também foi realizada a conversão de outros três poluentes para a unidade gpoluente/kgdiesel, sendo eles: Material Particulado (MP), Monóxido de Carbono (CO) e Óxidos de Nitrogênio (NOx). Os respectivos Fe foram obtidos na página 13 do Relatório Final do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2011). Contudo, para este grupo de veículos, não foram encontrados Fatores de Emissão referenciais que permitissem o cálculo das emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Em relação à definição do modelo de trator e da potência média considerada nos cálculos, as pesquisas apontam o modelo MF 275, fabricado pela Massey Ferguson e lançado em 1975, como o trator mais vendido na história da mecanização agrícola brasileira. De acordo com a Revista Cultivar (Massey Ferguson alcança o maior volume

de venda da mecanização agrícola brasileira, CULTIVAR, 2009), esse modelo representou 40,7% das vendas no segmento de tratores com 75 cavalos-vapor (CV). Trata-se de um trator com potência motriz considerada média/baixa para a categoria de tratores de rodas, e que, devido à sua robustez, simplicidade mecânica e bom desempenho, ainda apresenta ampla utilização no município de Uberlândia-MG, atendendo a propriedades de pequeno, médio e grande porte. Por essa razão, adotou-se a potência de 75 CV como parâmetro representativo para os cálculos de emissões.

Em relação à metodologia utilizada, verifica-se que, em condições ideais de operação, o consumo médio de um motor diesel é de aproximadamente 0,15 litros por CV de potência por hora de trabalho, conforme indicado por Nuntec Agro (2020). Assim, para um trator de 75 CV, o consumo estimado é de 11,25 litros/hora.

Considerando um regime de trabalho de 8 horas diárias, 40 horas semanais e 52 semanas por ano, o tempo total de operação anual é de 2.080 horas. Dessa forma, o consumo anual estimado por trator é de 23.400 litros de diesel.

Para converter esse volume para massa, utilizou-se a densidade do diesel de 0,835 kg/L, resultando em um consumo anual de aproximadamente 19.539 kg de diesel por trator.

A partir desse valor em massa (kg), foi possível aplicar os Fe mencionados para o cálculo das emissões dos poluentes MP, CO e NO_x, expressos na unidade gpoluente/kgdiesel, assegurando maior rigor técnico e coerência metodológica nos resultados obtidos.

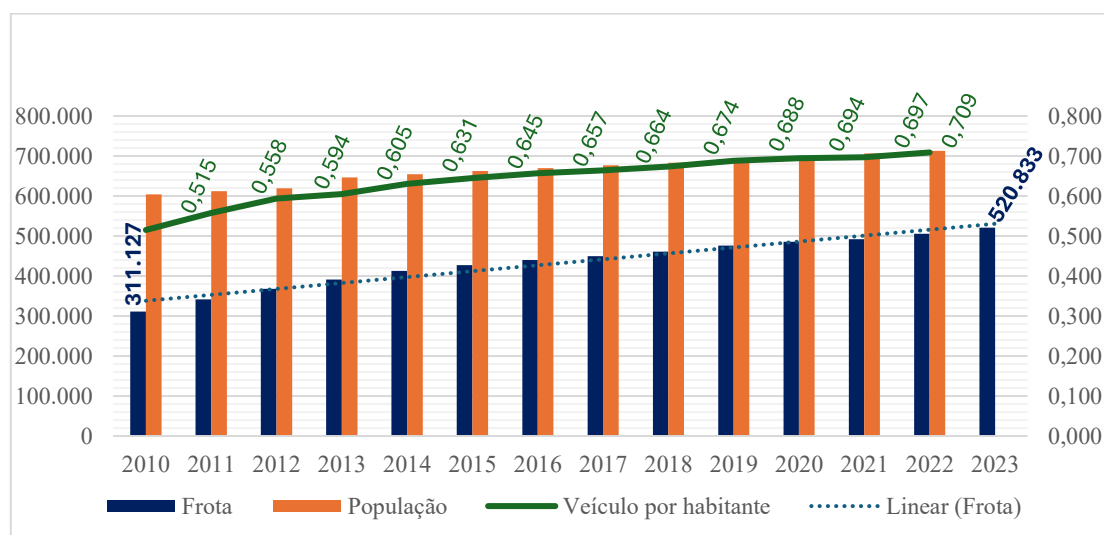
4 RESULTADOS

A análise dos dados obtidos permite compreender a evolução do sistema de transporte e do perfil veicular de Uberlândia ao longo dos últimos anos. A Figura 7 apresenta a relação entre o crescimento populacional, o aumento da frota de veículos e a variação na média de veículos por habitante no município, no período de 2010 a 2022. Para a população, foi considerado o último Censo Demográfico realizado pelo IBGE, referente ao ano de 2022.

Observa-se uma tendência de crescimento contínuo tanto da população quanto da frota, acompanhada pelo aumento do indicador de veículos por habitante (número de veículos dividido pelo número de habitantes de Uberlândia), que passou de 0,515 em 2011 para 0,709 em 2022. Esse comportamento evidencia a intensificação da motorização urbana, aspecto que influencia diretamente no consumo de combustíveis e, consequentemente, nas emissões atmosféricas associadas.

A partir dessa contextualização, foram estimadas as emissões de poluentes veiculares referentes a toda a frota do município, cujos resultados são apresentados a seguir. Essa abordagem permite oferecer uma visão abrangente do cenário de poluição atmosférica em Uberlândia.

Figura 7. Crescimento populacional, da frota veicular e média de veículos por habitante em Uberlândia- MG.



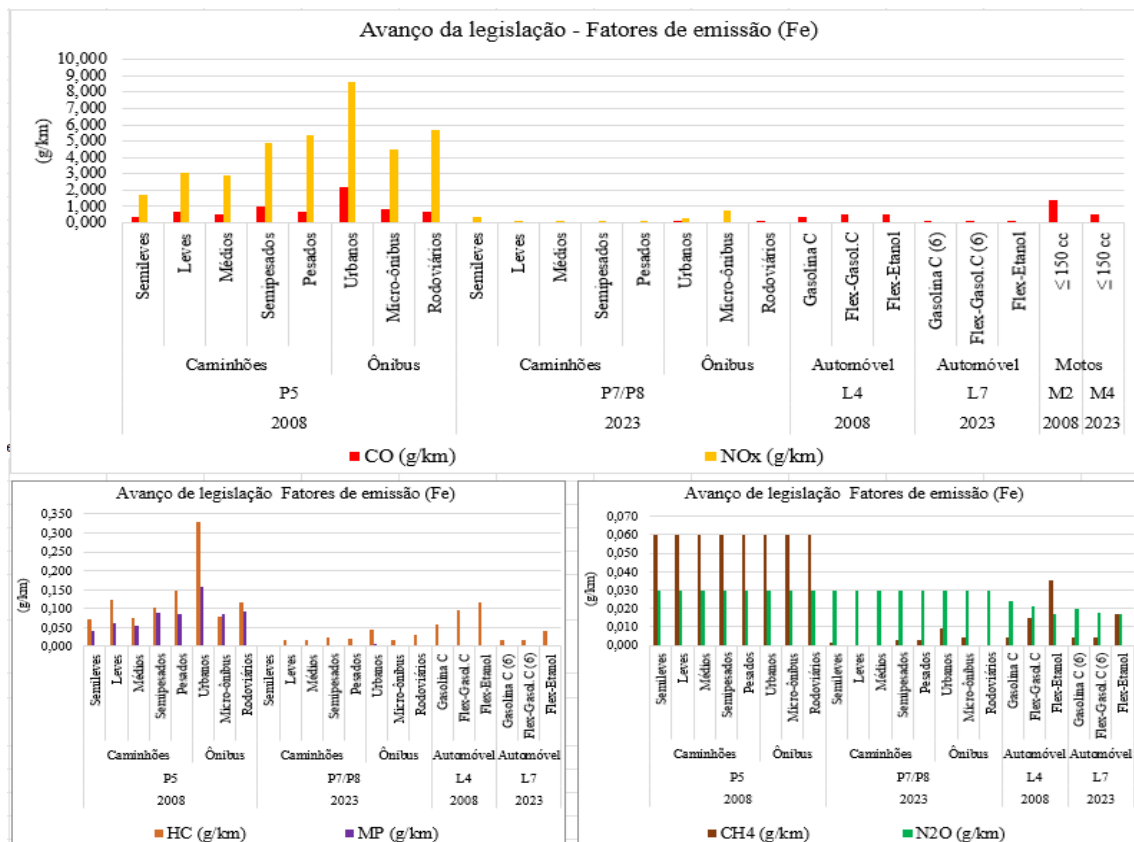
Fonte: Adaptado por IBGE (2022) e Brasil (2023).

O expressivo crescimento da frota veicular nos últimos anos, evidenciado na Figura anterior, impõe desafios consideráveis ao controle da poluição atmosférica nos centros urbanos. À medida que o número de veículos aumenta, cresce também o potencial de emissão de poluentes, caso não haja avanços tecnológicos compensatórios.

Já a Figura 8 mostra a evolução, seja uma redução significativa nos fatores de emissão (g/km) de todos os poluentes entre 2008 (fase P5/L4) e 2023 (fase P7/P8/L7), especialmente nos segmentos de caminhões e ônibus. Destaque para a queda drástica nas emissões de NOx e MP, que eram elevadas em 2008, e se tornaram quase residuais em 2023, refletindo o avanço das tecnologias veiculares e exigências ambientais.

Em relação aos automóveis e às motocicletas, também houve redução nos poluentes, mas menos acentuada em comparação com veículos pesados. Em 2023, os modelos flex-etanol e < 150 cc ainda apresentam níveis notáveis de CO e HC, indicando que há espaço para melhorias, especialmente no controle das emissões evaporativas e da combustão incompleta.

Figura 8. Comparativo da evolução dos (FE) de 2008 a 2023.



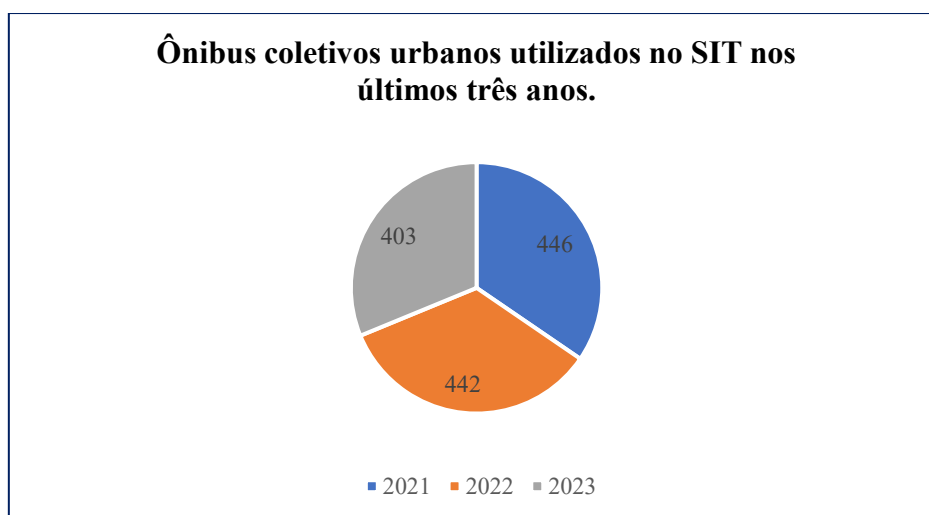
Fonte: Resoluções do CONAMA – Fases do Proconve. Adaptado pelo Autor (2025).

4.1 Frota de ônibus urbanos do SIT

A utilização de dados disponibilizados pelas empresas de ônibus urbanas permitiu a aplicação de metodologias de cálculo mais precisas, conferindo maior robustez e confiabilidade aos resultados obtidos para o SIT e justificando sua posição de destaque no presente estudo.

De acordo com os dados obtidos da Secretaria de Trânsito e Transportes (SETTRAN) de Uberlândia, o transporte coletivo urbano de passageiros, nessa cidade, é operado pelas empresas Auto trans, Sorriso de Minas e São Miguel. Os terminais são operados pela companhia de administração de terminais urbanos e centros comerciais (COMTEC). A frota total em 2023 era composta por 403 ônibus com idade variada, conforme Figura 9. Os ônibus são submetidos à manutenção preventiva, conforme especificado pelo fabricante e utilizam como combustível o óleo diesel.

Figura 9. Ônibus coletivos urbanos utilizados no SIT nos últimos três anos.



Fonte: Secretaria de Trânsito e Transportes de Uberlândia/MG.

Na contramão do crescimento populacional, bem como da frota em geral, a Figura 9 apresenta redução na frota de ônibus em atividade na cidade de Uberlândia, com redução de 39 ônibus no ano de 2023, em relação ao ano de 2022. Segundo informações da Assessoria de Trânsito, essa redução estaria relacionada à mudança de comportamento da população durante a pandemia de SARS-CoV-2, período em que muitos usuários passaram a buscar outros meios de transporte, reduzindo, assim, a demanda pelo sistema de transporte coletivo (SIT).

No entanto, apesar da explicação apresentada, há evidências de que este número de ônibus seja insuficiente para atender às necessidades dos usuários de Uberlândia, conforme (DIÁRIO DE UBERLÂNDIA, 2023). Inclusive, conforme aponta o relatório da Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos, o número de passageiros de ônibus após a pandemia de SARS-CoV 2, nas capitais do Brasil tem voltado a aumentar (NTU, 2025).

O consumo anual de combustível do SIT, no período analisado, foi de aproximadamente 10.300.000 litros, conforme apresentado no Apêndice B “Consumo de combustível do SIT na cidade de Uberlândia no período pesquisado”. Esse valor corresponde a uma média de 3.433.652 litros por empresa ao ano, o que equivale, em média, a 68,12 litros por veículo por dia.

Nos Apêndice, encontra-se também o Apêndice C “Relação de veículos utilizados no sistema de transporte coletivo urbano de Uberlândia no ano de 2022”, no qual constam dados detalhados sobre a frota, incluindo a distribuição por empresa concessionária, ano de fabricação, marca da carroceria, modelo e tipo dos veículos, bem como os quantitativos correspondentes.

Destaca-se que a frota municipal de ônibus urbanos é composta por três tipos principais de veículos:

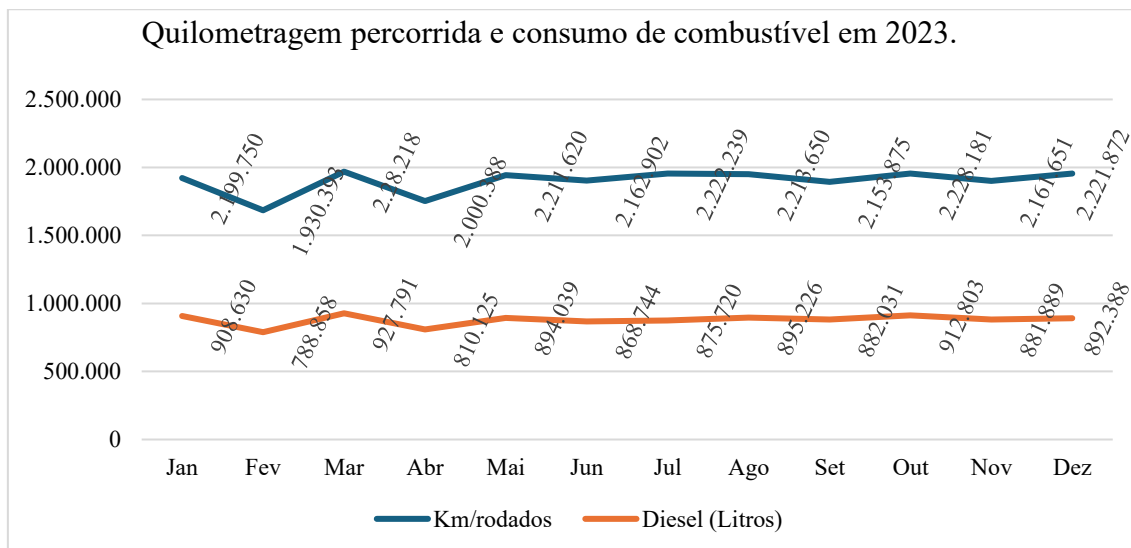
- i. Articulado, com capacidade para até 100 passageiros;
- ii. Padrão, com capacidade para até 80 passageiros;
- iii. Convencional, com capacidade para até 50 passageiros.

No ano de 2022, a frota de ônibus do SIT realizou 1.347.362 viagens, transportando um total de 38.774.198 passageiros. A análise desses dados revela uma média de 28,8 passageiros por viagem, conforme demonstrado no Apêndice D “Relação de passageiros transportados, número de viagens e quilometragem percorrida no SIT, no ano de 2022”.

A Figura 10 apresenta o volume mensal de combustível consumido no ano de 2023, bem como a quilometragem percorrida, permitindo observar não apenas as

variações de consumo ao longo do período, mas também a relação entre frota operacional e demanda atendida.

Figura 10. Comparativo de quilometragem percorrida e consumo de combustível no Sistema Integrado de Transportes (SIT) em Uberlândia, em 2023.



Fonte: Secretaria de Planejamento Urbano de Uberlândia/MG. Adaptado pelo Autor.

Em 2023, a frota do SIT em Uberlândia percorreu um total de 25.954.739 km, com consumo mensal de combustível variando entre 788.858 L e 927.791 L. Observa-se que, embora tenha havido redução no número de veículos em operação, o aumento da quilometragem total indica maior utilização dos ônibus ativos, refletindo em um consumo relativamente constante ao longo do ano. O consumo total anual da frota somou aproximadamente 10.596.423 L. Flutuações mensais podem ser atribuídas a fatores como feriados e variações na demanda de transporte.

O Apêndice B apresenta o volume mensal de combustível consumido no ano de 2023, permitindo observar não apenas as variações de consumo ao longo do período, mas também a relação entre frota operacional e demanda atendida. Verifica-se que, apesar da redução no número de ônibus em atividade, houve acréscimo no número de viagens realizadas. Consequentemente, a quilometragem percorrida pelo SIT também aumentou, totalizando 25.954.739 km no ano de referência.

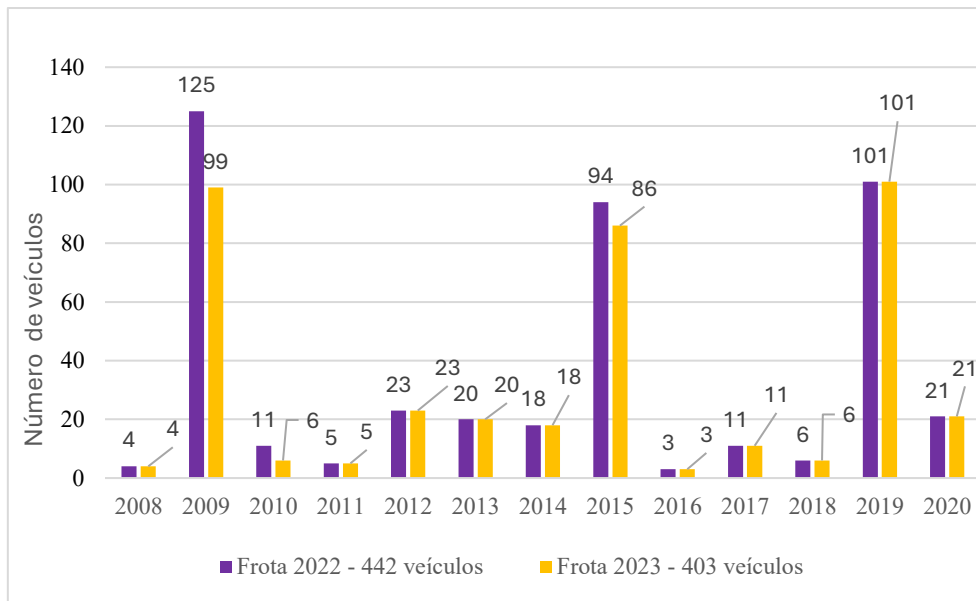
No mesmo período, segundo o Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA, a frota de ônibus urbanos do município de São Paulo percorreu 742,4 milhões de quilômetros (IEMA, 2025). Esta quilometragem é aproximadamente 30 vezes maior do

que a do município de Uberlândia, no entanto, a frota de ônibus é composta por cerca de 12 mil ônibus, de acordo com o site da SPTrans distribuídos em 1300 linhas (SPTrans, 2025). Já a cidade de Ribeirão Preto apresenta uma frota de ônibus mais comparável em número com a de Uberlândia. De acordo com a Prefeitura de Ribeirão Preto a frota é de 356 ônibus e uma quilometragem mensal percorrida de 2.149.450 km (PREFEITURA MUNICIPAL DE RIBEIRÃO PRETO, 2023). Esta quilometragem percorrida em 2022 é bastante semelhante àquela da frota SIT de Uberlândia que no mesmo ano percorreu 2.130.374 km. Isto ocorre, provavelmente, porque são municípios com um número de frota veicular total e número de habitantes semelhantes.

A relação entre o consumo mensal de diesel e a quilometragem percorrida pela frota do SIT de Uberlândia ao longo de 2023 apresentou uma correlação positiva significativa. O coeficiente de correlação de Pearson obtido foi de $R = 0,777$, indicando uma associação de moderada a forte entre as variáveis, ou seja, quanto maior o consumo de diesel, maior tende a ser a quilometragem percorrida.

A Figura 11 apresenta a distribuição da frota de ônibus urbanos do SIT, conforme o ano de fabricação, nos anos de 2022 e 2023. Observa-se que a maior parte da frota é composta por veículos fabricados entre 2009 e 2015, com destaque para os anos de 2009 (224 veículos), 2015 (180 veículos) e 2019 (202 veículos). Nota-se uma leve redução no total de veículos de 442, em 2022, para 403, em 2023, indicando uma possível retirada de veículos mais antigos ou desativação de parte da frota.

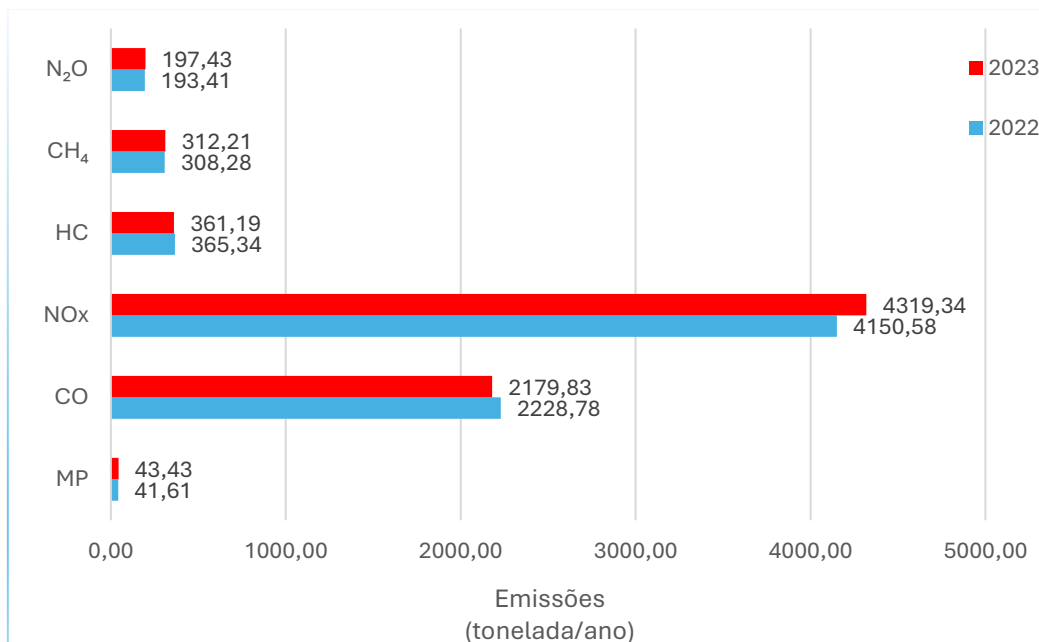
Figura 11. Frota de ônibus Coletivos Urbanos (SIT), de acordo com o ano de fabricação, no período pesquisado.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 12 apresenta os resultados referentes às emissões estimadas de poluentes provenientes da frota geral sem os veículos do SIT, no período de 2022 e 2023. A análise dos dados permite identificar variações relevantes tanto no que se refere aos poluentes regulados quanto aos gases de efeito estufa.

Figura 12. Emissão de poluentes da frota geral sem os veículos do (SIT), no período pesquisado.



Fonte: Autor (2025).

Observa-se um acréscimo de aproximadamente 4,35% nas emissões de MP, passando de 41,61 toneladas para 43,43 toneladas na frota pesquisada. Esse aumento é explicado principalmente pelo crescimento nas emissões de MP de caminhões leves e semi-leves, que passaram de 18,22 toneladas para 19,27 toneladas, e de motocicletas movidas a gasolina, que aumentaram de 2,69 toneladas para 2,75 toneladas. Além disso, os ônibus urbanos e caminhões médios também apresentaram incrementos modestos nas emissões de MP. Esses dados indicam que, embora algumas categorias de veículos tenham mantido suas emissões relativamente constantes, a contribuição de segmentos de maior porte ou mais intensivamente utilizados foi suficiente para gerar um aumento geral no material particulado.

Em contrapartida, as emissões de CO apresentaram uma redução de aproximadamente 2,2% no período analisado. Essa diminuição reflete-se nos dados coletados/estimados. Considerando que o CO é resultado da combustão incompleta de combustíveis, sua redução, mesmo que modesta, representa um efeito positivo para o meio ambiente e para a saúde humana.

Por outro lado, verifica-se um acréscimo de aproximadamente 4% nas emissões de NOx, o que merece atenção, pois esse poluente atua como precursor do ozônio troposférico e do material particulado secundário, além de estar associado a doenças respiratórias e cardiovasculares e à formação de chuva ácida. Esse aumento pode estar relacionado não apenas ao crescimento da frota, mas também ao maior uso de veículos a diesel, ao envelhecimento de parte da frota sem atualização tecnológica e a possíveis falhas nos sistemas de controle de emissões, como o mau funcionamento do SCR ou o uso de combustível fora das especificações.

As emissões de HC apresentaram ligeira redução de aproximadamente 1,1%. Embora discreta, tal redução é desejável, considerando que os HC, além de contribuírem para a formação do ozônio troposférico, possuem potencial cancerígeno, dependendo de sua composição. Substâncias como benzeno, tolueno e etilbenzeno, frequentemente presentes nas emissões veiculares, são classificadas como cancerígenas ou potencialmente cancerígenas para humanos (IARC, 2013; Kousar *et al.*, 2024), reforçando a importância da redução contínua desses poluentes.

No tocante aos gases de efeito estufa, verificou-se um aumento modesto nas emissões de CH₄, de 1,3%, e de N₂O, de 2,1%. Ainda que em valores absolutos esses aumentos sejam inferiores aos dos demais poluentes, é importante ressaltar o elevado potencial de aquecimento global desses gases, em especial do N₂O, que possui potencial cerca de 298 vezes superior ao do CO₂, considerando um horizonte de 100 anos, conforme reportado pelo (IPCC, 2021b).

A Tabela 7 apresenta a estimativa de emissão de poluentes atmosféricos, em toneladas, gerada pela frota de ônibus do SIT, conforme o ano de fabricação dos veículos nos anos de 2022 e 2023. Observa-se que a frota apresenta ônibus fabricados desde o ano de 2008 até o ano de 2020. A apresentação dos dados para os anos de 2022 e 2023 permite uma comparação direta entre os dois anos avaliados, facilitando a identificação de tendências ou mudanças no perfil de emissão da frota ao longo do tempo.

Os resultados apontam redução de poluentes críticos, como MP, NO_x e HC. Embora o período analisado compreenda apenas dois anos, o que ainda não permite caracterizar uma tendência consolidada, esses dados podem ser interpretados como indicativos de avanços nas condições ambientais e de ganhos na eficiência tecnológica da frota veicular.

Uma possível explicação para esse comportamento é a redução de 39 veículos na frota de ônibus do SIT entre os anos analisados, possivelmente envolvendo unidades mais antigas, que tendem a apresentar maiores Fe devido ao desgaste dos componentes mecânicos e à menor eficiência dos sistemas de controle de poluentes. A retirada desses veículos do sistema pode ter contribuído para a diminuição das emissões totais, ainda que de forma inexpressiva.

Tabela 7- Emissão de poluentes em (t) da frota de ônibus do SIT, no período pesquisado, conforme o ano de fabricação.

Ano de Fabricação	MP		CO		NOx		HC		CO ₂	CH ₄		N ₂ O	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023		2022	2023	2022	2023
2008	0,03	0,04	0,43	0,51	1,86	2,03	0,07	0,08	Cálculos sob a metodologia <i>Top Down</i> (Resultados unificados de toda a frota por ano pesquisado)	0,01	0,01	0,01	0,01
2009	0,98	0,85	11,40	10,77	55,79	48,30	1,97	1,70		0,41	0,35	0,20	0,19
2010	0,09	0,05	1,00	0,65	4,98	2,97	0,18	0,11		0,04	0,02	0,02	0,01
2011	0,04	0,04	0,41	0,49	2,29	2,50	0,06	0,06		0,02	0,02	0,01	0,01
2012	0,02	0,03	0,71	0,85	3,49	3,82	0,02	0,03		0,07	0,08	0,04	0,04
2013	0,02	0,03	0,52	0,62	2,90	3,17	0,02	0,02		0,06	0,07	0,03	0,04
2014	0,02	0,02	0,47	0,56	2,61	2,85	0,02	0,02		0,06	0,06	0,03	0,03
2015	0,12	0,12	2,46	2,69	13,76	13,76	0,13	0,13		0,30	0,30	0,15	0,15
2016	0,00	0,00	0,08	0,10	0,47	0,51	0,00	0,00		0,01	0,01	0,00	0,01
2017	0,01	0,01	0,25	0,30	1,57	1,72	0,01	0,02		0,04	0,04	0,02	0,02
2018	0,01	0,01	0,16	0,19	0,66	0,72	0,00	0,00		0,02	0,02	0,01	0,01
2019	0,13	0,14	2,17	2,59	14,24	15,57	0,13	0,14		0,33	0,36	0,16	0,18
2020	0,03	0,03	0,41	0,49	2,99	3,56	0,04	0,05		0,07	0,07	0,03	0,04
Somatória anual	1,52	1,37	20,45	20,81	107,60	101,48	2,66	2,36		1,43	1,43	0,72	0,72
Total	2,89		41,27		209,09		5,03		2,86			1,44	

Fonte: Autor (2025).

4.2 Frota do município, exceto do SIT

A análise das emissões atmosféricas da frota de veículos da cidade de Uberlândia, excluindo os ônibus do SIT, apresentada na tabela 8, evidencia a expressiva contribuição de diferentes categorias de veículos na poluição ambiental local. Os dados abrangem os principais poluentes atmosféricos: MP, CO, NO_x, HC, CH₄ e N₂O.

Os ônibus rodoviários, micro-ônibus e tratores de rodas, embora componham uma fração menor da frota, apresentaram emissões significativas de CO₂, em razão do uso intensivo de diesel e da natureza operacional contínua desses veículos. De forma semelhante, os caminhões leves e semi-leves destacaram-se como os principais emissores de NO_x e CO, evidenciando o impacto expressivo dos veículos a diesel nesse segmento.

Essa constatação é coerente com o perfil operacional do transporte urbano e regional de cargas, caracterizado por maior tempo de funcionamento do motor e, portanto, maiores emissões, sobretudo em tráfego intenso e ciclos de parada e arranque. Como o CO₂ é um subproduto direto da queima de combustíveis fósseis, essa categoria se destaca na emissão desse gás, com impactos relevantes em contextos urbanos e regionais.

Entre 2022 e 2023, observou-se leve redução nas emissões de CO e HC em automóveis a gasolina e flex, possivelmente associada a fatores pontuais, como intensidade de uso e condições de manutenção. Contudo, o intervalo de um ano não permite atribuir essas reduções a melhorias estruturais ou avanços consistentes na qualidade dos combustíveis.

Por outro lado, verificou-se um crescimento das emissões de NO_x e MP nos veículos a diesel, sobretudo caminhonetes, utilitários e caminhões. Nos comerciais leves a diesel, as emissões de NO_x cresceram 7,4% e as de MP 7,7%. Em caminhões médios, houve aumento de 1,7% tanto em NO_x quanto em MP, enquanto nos caminhões pesados o acréscimo foi de 2,9% e 2,2%, respectivamente.

Essas variações, embora significativas, devem ser interpretadas com cautela, uma vez que o intervalo de apenas um ano não permite caracterizar tendências consolidadas, mas sim oscilações associadas a fatores conjunturais, como intensidade de uso e variações no desempenho operacional.

Tabela 8. Emissão de poluentes em (t) da frota no período pesquisado, exceto os ônibus do SIT.

Grupos de veículos	MP		CO		NOx		HC		CO ₂	CH ₄		N ₂ O	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023		2022	2023	2022	2023
Automóveis	2,59	2,64	623,10	557,94	51,71	39,66	64,64	55,53	Cálculos sob a metodologia <i>Top Down</i> (Resultados unificados de toda a frota por ano pesquisado)	15,51	15,87	56,88	55,53
Caminhonetas - comerciais leves	0,14	0,15	25,54	31,67	1,57	1,27	2,88	2,96		0,65	0,42	3,27	3,10
Utilitários	0,07	0,08	11,97	15,75	0,74	0,63	1,35	1,47		0,31	0,21	1,53	1,54
Motocicletas	2,69	2,75	377,88	386,87	48,39	49,54	122,89	125,81		30,72	31,45	1,54	1,57
Motonetas	0,55	0,56	76,65	78,86	9,82	10,10	24,93	25,65		6,23	6,41	0,31	0,32
Automóveis	0,00	0,00	468,71	451,03	25,49	20,40	85,32	82,73		28,81	22,66	18,84	19,27
Caminhonetas - comerciais leves	0,00	0,00	33,68	30,79	1,83	1,86	4,45	5,07		1,78	1,24	0,89	0,96
Utilitários	0,00	0,00	16,91	16,40	0,92	0,99	2,24	2,70		0,89	0,66	0,45	0,51
Motocicletas	0,30	0,31	70,66	72,34	3,24	3,32	12,97	13,28		3,24	3,32	0,00	0,00
Motonetas	0,06	0,06	14,33	14,75	0,66	0,68	2,63	2,71		0,66	0,68	0,00	0,00
Ônibus Urbanos	1,55	1,72	38,98	43,30	198,07	220,05	1,33	1,48		4,43	4,92	2,21	2,46
Ônibus rodoviários	0,12	0,13	2,71	2,98	11,52	12,69	0,31	0,34		0,41	0,45	0,20	0,22
Micro-ônibus	0,93	0,94	10,84	10,92	102,54	103,36	2,62	2,65		5,08	5,12	2,54	0,22
Caminhões médios	10,69	10,87	103,31	105,08	1289,58	1311,72	11,87	12,08		71,25	72,47	35,62	2,56
Caminhões pesados	0,46	0,47	8,07	8,31	44,30	45,58	0,83	0,86		1,72	1,77	0,86	36,24
Caminhões leves e semi-leves - caminhonetes	18,22	19,27	264,19	279,46	2179,53	2305,57	15,94	16,86		136,65	144,55	68,32	0,89
Caminhonetas - comerciais leves "diesel"	2,59	2,79	38,98	41,88	115,06	123,61	8,41	9,03		0,00	0,00	0,00	72,27
Tratores de rodas	0,67	0,68	30,64	31,49	66,48	68,32	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Somatória anual	41,61	43,43	2228,78	2179,83	4150,58	4319,34	365,34	361,19		308,28	312,21	193,41	197,43
Total	85,04		4408,61		8469,92		726,53			620,49		390,84	

Fonte: Autor (2025).

Os automóveis do ciclo Otto apresentaram um perfil de emissão mais distribuído, com predomínio de CO e HC, especialmente nas versões bicombustíveis (flex). Isso reflete características próprias da combustão incompleta em motores de ignição por centelha, agravada pelo uso de etanol em condições de partida a frio ou por calibração inadequada do sistema de alimentação (Aguiar *et al*, 2015).

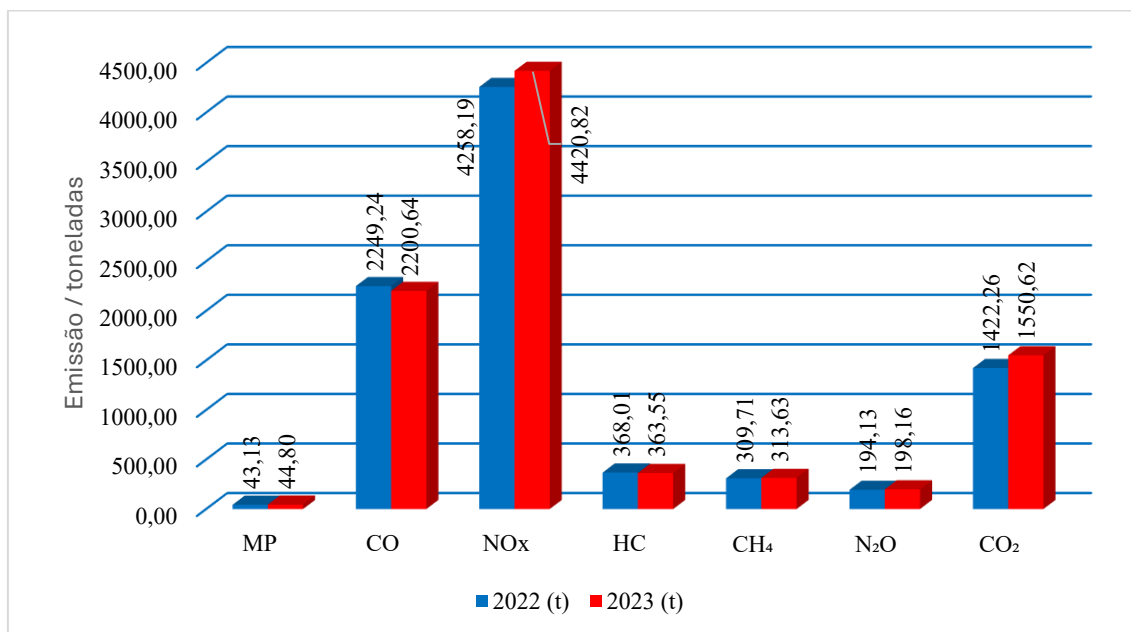
As motocicletas, embora sejam veículos leves, com menor consumo de combustível, apresentaram emissões de HC, CH₄ e MP mais elevadas quando comparadas aos automóveis leves da frota urbana. Essa constatação se baseia nos valores estimados de emissões por quilômetro rodado, que indicam que, apesar do menor porte e consumo, as motocicletas contribuem proporcionalmente de forma significativa para essas classes de poluentes. Esse comportamento pode ser explicado pela menor sofisticação dos sistemas de controle de emissões nesses veículos, pela prevalência de motores de pequena cilindrada com combustão menos eficiente, e por práticas de manutenção irregulares.

4.3 Frota completa do município (Geral e SIT)

4.3.1 Emissões por tipo de poluente

A Figura 13 sintetiza de forma clara e objetiva os resultados obtidos com a estimativa das emissões de poluentes atmosféricos da frota veicular em circulação no município, nos anos de 2022 e 2023. O gráfico evidencia que, apesar das oscilações pontuais entre os dois anos, o padrão geral de emissão por tipo de poluente se manteve relativamente constante, reforçando a consistência metodológica dos cálculos e a estabilidade do perfil da frota no período analisado.

Figura 13. Resumo da emissão de poluentes em (t) da frota pesquisada



Fonte: Autor (2025).

Destaca-se que o levantamento não apenas quantifica, mas também qualifica o impacto ambiental da frota, evidenciando a importância de se monitorar continuamente esses indicadores.

O destaque recai sobre os elevados valores de emissão de óxidos de NO_x que ultrapassam 4.200 toneladas em ambos os anos. A magnitude dessas emissões está fortemente associada à presença de veículos pesados movidos a diesel, especialmente ônibus e caminhões, que apresentam alta intensidade de uso e maior fator de emissão por quilômetro rodado.

As emissões de CO também se mostraram expressivas, superando 2.200 toneladas por ano. Esse poluente, embora menos persistente na atmosfera, é altamente tóxico e sua presença em grandes concentrações está diretamente ligada à combustão incompleta, sobretudo em veículos leves movidos a gasolina e etanol. A estabilidade dos valores entre os anos analisados sugere que não houve renovação significativa da frota nem a introdução de tecnologias mais eficientes nesse segmento.

O CO₂, principal gás de efeito estufa associado ao setor de transportes, apresentou valores próximos a 1.500 toneladas, com leve aumento em 2023. Sua massa total expressiva indica a relevância da frota veicular nas emissões locais de gases de efeito

estufa, com implicações para políticas de mitigação climática e inventários municipais de emissões.

Em menor escala, mas ainda relevantes, aparecem as emissões de HC, metano CH₄ e N₂O. Apesar das emissões absolutas menores, a presença desses compostos deve ser observada com atenção, sobretudo por sua capacidade de amplificar os efeitos das mudanças climáticas.

Importa ressaltar que o estudo, ao estimar tanto a quantidade (toneladas/ano) quanto a qualidade (tipo de poluente e suas fontes) das emissões, vai além de uma abordagem meramente descritiva. Ele permite compreender o impacto ambiental da frota sob múltiplas dimensões, fornecendo subsídios para ações locais de controle da poluição atmosférica. O conhecimento da composição e magnitude das emissões é essencial para o planejamento urbano, a fiscalização veicular, a modernização da frota e o estímulo a combustíveis menos poluentes.

Portanto, os resultados aqui apresentados não apenas cumprem o objetivo da pesquisa como também evidenciam a importância da monitorização contínua das emissões veiculares, especialmente em municípios de médio porte que carecem de dados sistemáticos sobre qualidade do ar e impacto da mobilidade urbana.

A Tabela 9 apresenta o ranking dos grupos veiculares que registraram as maiores emissões médias anuais por poluente, considerando o tipo de combustível e a quantidade emitida por veículo (kg/veículo). Os dados evidenciam que os veículos movidos a diesel, em especial os ônibus do SIT e os ônibus rodoviários, são responsáveis pelas maiores emissões unitárias de poluentes críticos, como MP, NO_x e HC.

Tabela 9. Ranking dos grupos veiculares que registraram as maiores emissões médias anuais por poluente.

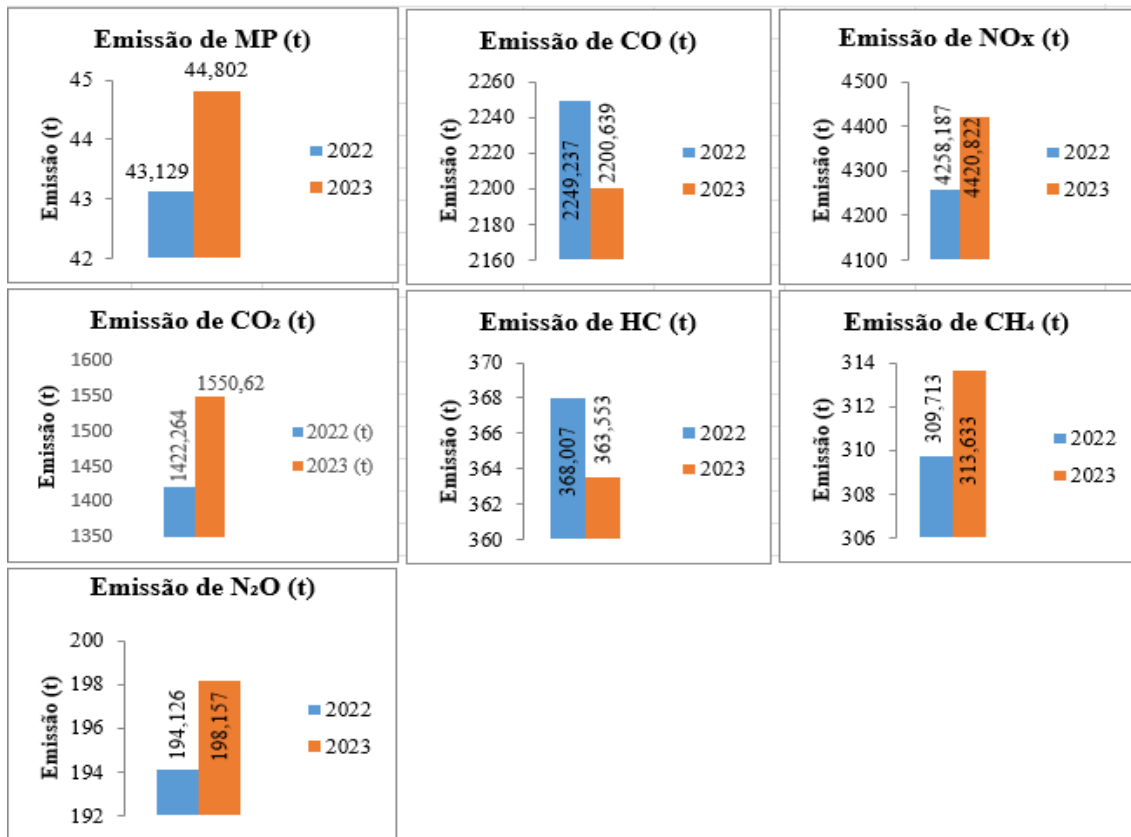
Poluente	Grupo de veículo com maior emissão	Combustível	(kg/veículo)
NO _x	Ônibus SIT	Diesel	247,44
CO	Tratores de rodas	Diesel	76,58
CO ₂	Todos os veículos a diesel	Diesel	12,96
HC	Ônibus SIT	Diesel	5,95
CH ₄	Ônibus rodoviários	Diesel	5,89
MP	Ônibus SIT	Diesel	3,42
N ₂ O	Ônibus rodoviários	Diesel	2,94

Fonte: Autor (2025).

Destaca-se que o maior valor de CO foi associado aos tratores de rodas, também movidos a diesel, enquanto as emissões de CO₂ apresentaram valores uniformes entre todas as categorias de veículos a diesel, refletindo o elevado teor de carbono desse combustível. Os ônibus rodoviários, por sua vez, registraram os maiores índices de emissão de CH₄ e N₂O, poluentes que, apesar de emitidos em menores quantidades, possuem elevado potencial de efeito estufa.

A Figura 14 ilustra a comparação das emissões totais de poluentes atmosféricos para os anos de 2022 e 2023, evidenciando uma leve variação entre os períodos analisados. Observa-se que, para a maioria dos poluentes MP, NO_x, CO₂, CH₄ e N₂O, houve um aumento das emissões em 2023 em relação a 2022, o que pode estar associado ao crescimento da frota ou ao incremento do consumo de combustíveis no período.

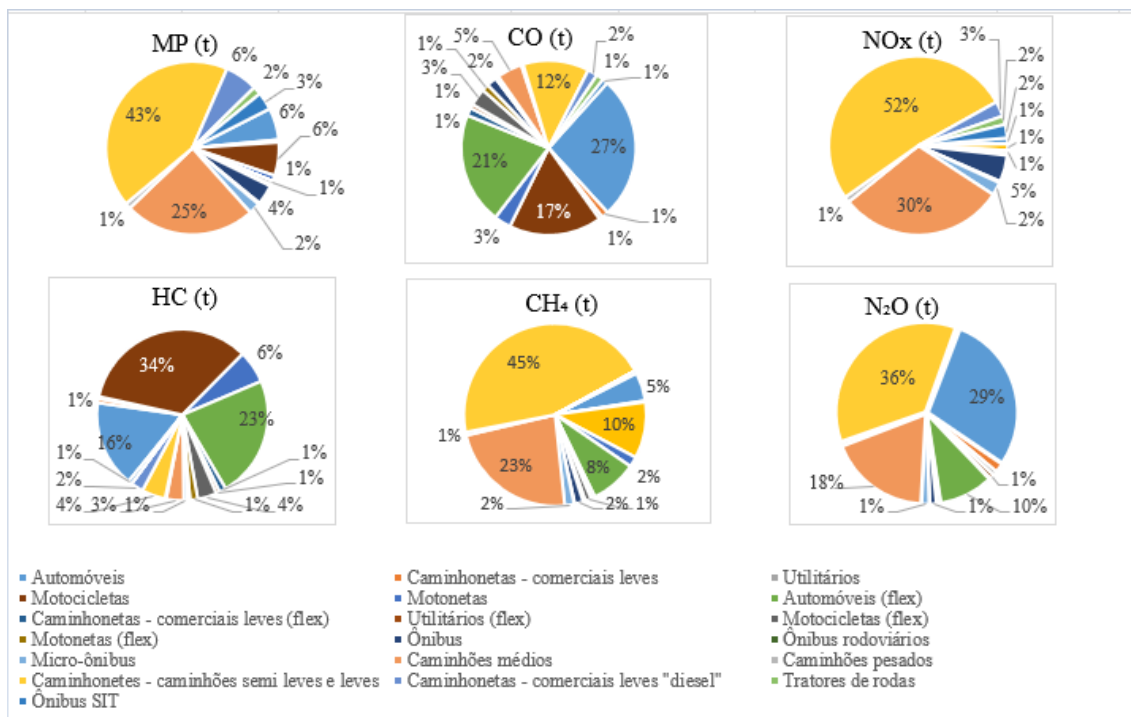
Figura 14. Comparação das emissões totais de poluentes atmosféricos para os anos de 2022 e 2023.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 15 apresenta a comparação das emissões relativas dos poluentes atmosféricos pesquisados, em percentuais, em relação aos diferentes grupos de veículos.

Figura 15. Comparação das emissões relativas dos poluentes atmosféricos pesquisados.



Fonte: Autor (2025).

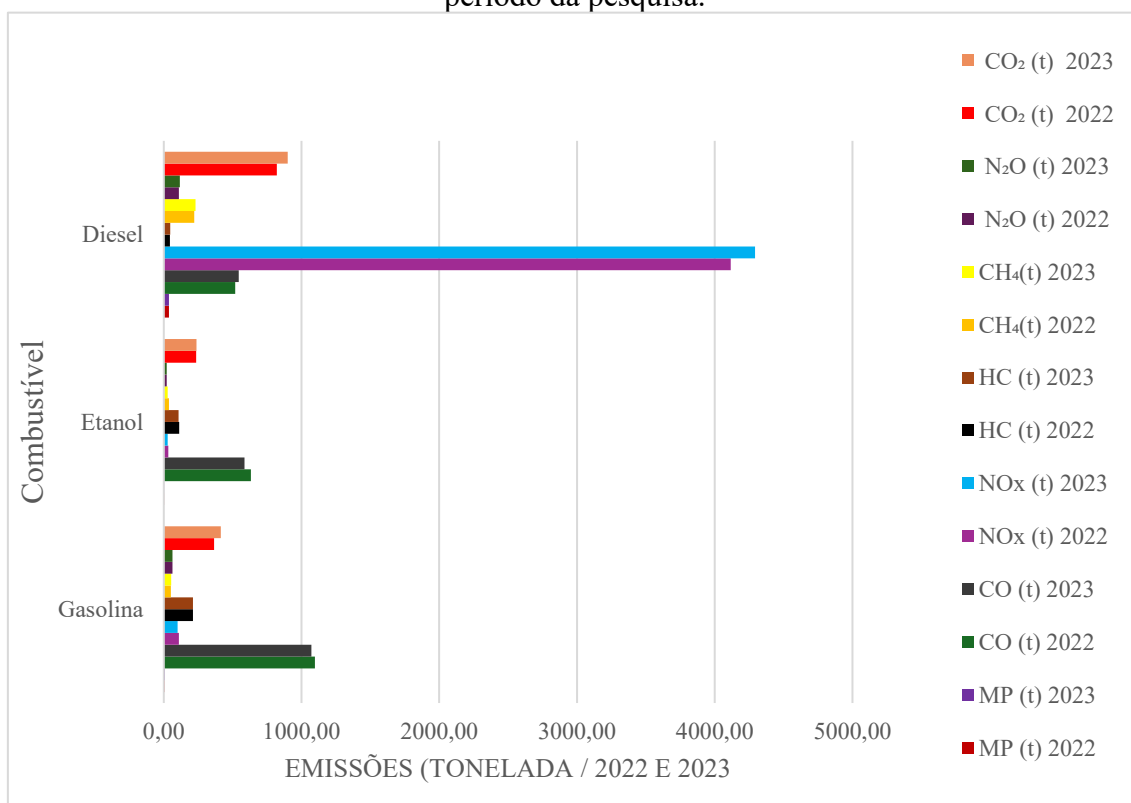
Mais uma vez observa-se que os caminhões leves e semi-leves apresentam os maiores valores relativos em praticamente todos os poluentes, especialmente NO_x e MP, indicando seu elevado impacto ambiental. Esses achados corroboram dados e relatórios da CETESB, que consistentemente apontam a significativa contribuição de veículos a diesel, como caminhões e ônibus, para as emissões de NO_x e MP. Já os automóveis e comerciais leves a gasol (incluindo flex) concentram as maiores emissões relativas de CO.

Os veículos como motocicletas, motonetas e micro-ônibus ocupam posições intermediárias ou com baixo peso relativo; contudo, em função da quantidade em circulação, seu impacto agregado pode ser relevante. Os gráficos destacam, ainda, a diferença entre perfis de motorização (gasol, diesel e flex), reforçando a importância da diversificação da matriz veicular e do incentivo à eletrificação da frota para mitigação das emissões.

4.3.2 Emissões por tipo de combustível

O Apêndice E apresenta a Tabela de Ranking das emissões médias por tipo de combustível, com base nos poluentes pesquisados. Os dados evidenciam que os veículos movidos a diesel são, de forma consistente, os maiores emissores dos principais poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa considerados. Esse resultado está coerente com o perfil tecnológico da frota analisada, predominantemente composta por veículos pesados, como ônibus e tratores, que utilizam o diesel como principal combustível.

Figura 16. Emissão de poluentes (t) por combustível com a separação por ano, no período da pesquisa.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 16 apresenta as emissões totais de poluentes (em toneladas) por tipo de combustível diesel, gasol e etanol, nos anos de 2022 e 2023. Observa-se que o diesel lidera amplamente as emissões de NO_x, ultrapassando 4.000 toneladas por ano, seguido por quantidades relevantes de CO₂, MP e HC. Este resultado confirma o impacto ambiental do diesel, sobretudo no que se refere a poluentes críticos à saúde humana e à qualidade do ar urbano, como os NO_x e MP.

A contribuição elevada de NO_x e MP está relacionada às características da combustão em motores a diesel, que ocorre em altas pressões e temperaturas, favorecendo a formação de NO_x, e à presença de impurezas ou resíduos de queima incompleta, que originam o material particulado. Além disso, nem todos os veículos a diesel estão equipados com sistemas modernos de controle de emissões, como Filtro de Partículas de Diesel (DPF) e sistema de redução catalítica seletiva (SCR), o que agrava o problema, principalmente nas frotas mais antigas.

Os principais grupos veiculares responsáveis por essas emissões são os caminhões leves, semi-leves e pesados, as caminhonetes e utilitários, além dos ônibus

urbanos e rodoviários, que operam com uso intensivo em regime comercial ou de transporte coletivo. Esses veículos, ao circularem diariamente com altas cargas e longos tempos de funcionamento, ampliam de forma expressiva as emissões totais de NOx e MP.

Adicionalmente, o diesel também apresenta as maiores emissões de CO₂, o principal gás de efeito estufa responsável pelo aquecimento global. Isso ocorre devido ao seu maior teor de carbono por unidade de energia e à elevada demanda energética dos veículos pesados movidos por esse combustível.

O combustível gasol, por sua vez, apresenta valores intermediários de emissões, com destaque para os poluentes CO e HC. O CO é resultado da combustão incompleta de combustíveis em motores ciclo Otto e pode gerar impactos significativos sobre a saúde humana. Quanto às emissões de HC, além de contribuírem para o agravamento de doenças respiratórias, estão diretamente relacionadas à formação de ozônio na troposfera (CETESB, 2023). Apesar de apresentarem valores absolutos inferiores aos do diesel, as emissões associadas à gasol ainda representam uma contribuição ambiental relevante, especialmente considerando sua alta penetração na frota leve urbana (IBAMA, 2021).

Em 2023, por exemplo, as emissões de NOx provenientes da queima de gasol foram cerca de 42 vezes menores que as do diesel, mas ainda somaram mais de 100 toneladas. Para o MP, as emissões da gasol foram aproximadamente 6 vezes menores, e para o CO₂, gás de efeito estufa, apenas 2,2 vezes menores, mostrando que os impactos climáticos da gasol são comparáveis aos do diesel, mesmo com menor emissão de poluentes locais. Esses dados confirmam que, embora a substituição do diesel deva ser prioritária, a gasol também precisa ser incluída nas estratégias de mitigação, especialmente em contextos de elevada concentração veicular e baixa renovação de frota.

Por fim, o etanol destaca-se como o combustível com o perfil de emissões mais favorável do ponto de vista ambiental. As emissões de NOx, MP e CO₂ associadas ao etanol, são substancialmente inferiores às observadas nos combustíveis fósseis, o que evidencia o potencial do biocombustível como alternativa para a mitigação dos impactos ambientais do setor de transportes. Contudo, observa-se a presença considerável de CO e

HC, compatível com as características da combustão de etanol, sobretudo em veículos sem tecnologias avançadas de controle de emissões ou em más condições de manutenção.

Apesar desse perfil mais limpo, a contribuição efetiva do etanol para a redução das emissões atmosféricas ainda é limitada pelo seu menor uso em comparação ao diesel (predominante em veículos pesados) e à gasolina (amplamente difundida na frota leve). Essa situação é explicada por fatores econômicos e estruturais, como a variação de preços relativos entre etanol e gasolina e a diferença de autonomia *veicular* (EPE, 2023). Mesmo assim, diversos estudos evidenciam que a produção e o uso de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil resultam em significativa mitigação de gases de efeito estufa, sobretudo quando comparados aos combustíveis fósseis (Macedo; Seabra; Silva, 2008).

Ademais, torna-se imprescindível o incentivo à renovação da frota, como um todo, e à adoção de tecnologias de controle de emissões, de forma a minimizar o impacto ambiental associado a frota veicular. Complementarmente, destaca-se a importância de programas de inspeção e manutenção veicular como estratégia para a redução das emissões de CO e HC, principalmente nos veículos leves movidos a gasol e etanol.

A Tabela 10 apresenta a estimativa das emissões médias anuais de poluentes atmosféricos por veículo de cada um dos grupos, discriminadas por tipo de combustível (gasol, etanol/flex e diesel) e por grupos veiculares, para o período analisado (2022-2023). Os valores expressos em (kg) referem-se às emissões médias individuais dos poluentes pesquisados.

Essa abordagem permite comparar a intensidade das emissões entre diferentes categorias de veículos, destacando as particularidades associadas ao tipo de combustível utilizado e ao perfil operacional de cada segmento da frota. Observa-se que veículos pesados, especialmente aqueles movidos a diesel, apresentam valores significativamente mais elevados de NO_x e MP, enquanto automóveis leves, motocicletas e motonetas, majoritariamente movidos a gasol e etanol, apresentam maior contribuição relativa para as emissões de CO e HC.

A análise desses dados é essencial para identificar os principais grupos veiculares responsáveis pela carga poluidora no município e subsidiar estratégias de mitigação, alinhadas às políticas públicas de controle de emissões e melhoria da qualidade do ar.

Tabela 10. Estimativa das emissões médias anuais de poluentes atmosféricos por veículo de cada um dos grupos.

Combustível	(Frota) média / ano	Grupos de veículos	MP (kg)	CO (kg)	NOx (kg)	HC (kg)	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)
Gasol	186.776	Automóveis	0,01	3,16	0,24	0,32	1,26	0,08	0,30
	8.491	Caminhonetas comerciais leves	0,02	3,37	0,17	0,34	1,26	0,06	0,38
	4.691	Utilitários	0,02	2,95	0,15	0,30	1,26	0,06	0,33
	97.148	Motocicletas	0,03	3,94	0,50	1,28	1,26	0,32	0,02
	17.591	Motonetas	0,03	3,94	0,50	1,28	1,26	0,32	0,02
Flex/etanol	80.046	Automóveis	0,00	5,75	0,29	1,05	2,33	0,32	0,24
	3.396	Caminhonetas comerciais leves	0,00	9,49	0,54	1,40	2,33	0,44	0,27
	2.010	Utilitários	0,00	8,29	0,48	1,23	2,33	0,39	0,24
	10.794	Motocicletas	0,03	6,62	0,30	1,22	2,33	0,30	0,00
	4.358	Motonetas	0,03	6,62	0,30	1,22	2,33	0,30	0,00
Diesel	1.379	Ônibus	1,19	29,82	151,55	1,02	12,96	3,39	1,69
	72	Ônibus rodoviários	1,67	39,25	166,99	4,51	12,96	5,89	2,94
	1.505	Micro-ônibus	0,62	7,23	68,40	1,75	12,96	3,39	1,69
	12.687	Caminhões médios	0,85	8,21	102,52	0,94	12,96	5,66	2,83
	5.659	Caminhões pesados	0,08	1,45	7,94	0,15	12,96	0,31	0,15
	40.728	Caminhonetes - caminhões semi-leves e leves	0,46	6,67	55,06	0,40	12,96	3,45	1,73
	5.094	Caminhonetas comerciais leves "diesel"	0,53	7,94	23,42	1,71	12,96	0,00	0,00
	402	Tratores de rodas	1,67	76,57	167,05	0,00	12,96	0,00	0,00
	422	Ônibus SIT	3,42	49,09	247,44	5,95	12,96	3,39	1,71

Fonte: Autor (2025).

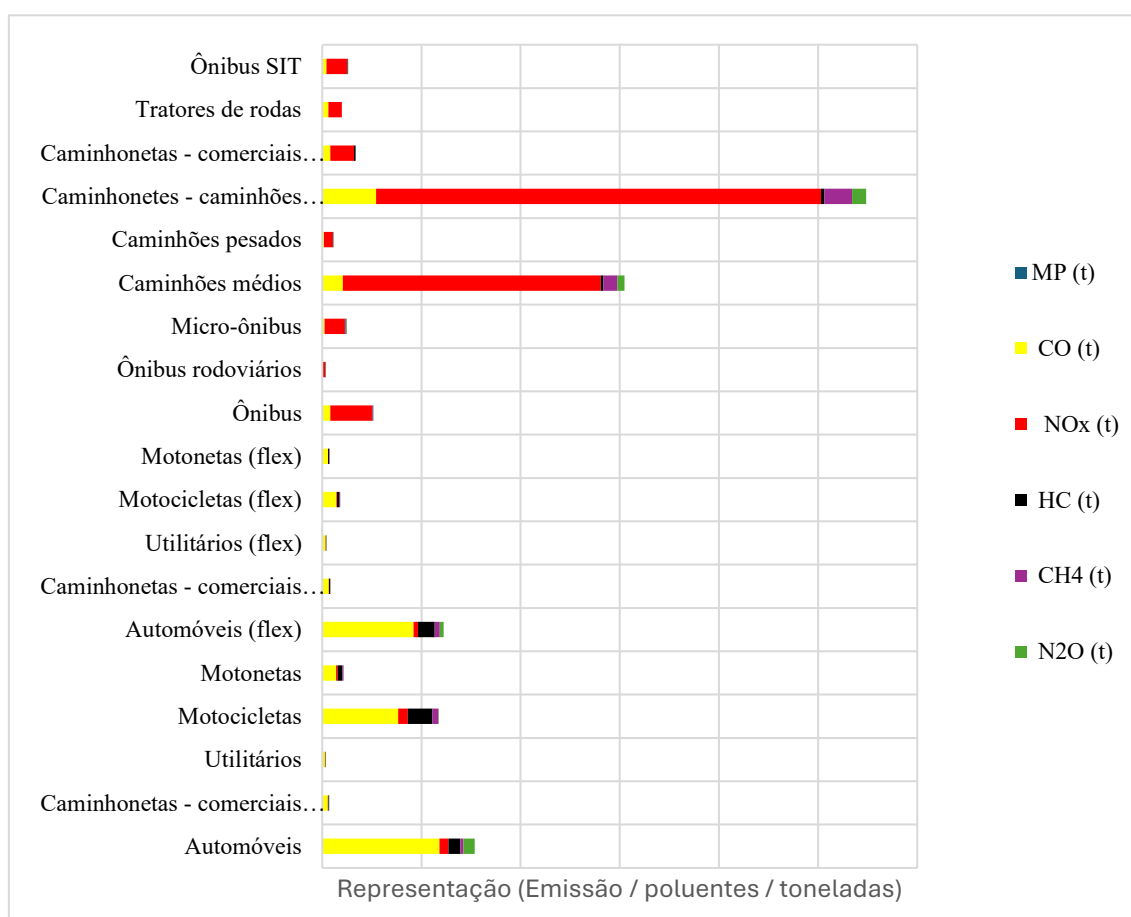
Essa abordagem permite comparar a intensidade das emissões entre diferentes categorias de veículos, destacando as particularidades associadas ao tipo de combustível utilizado e ao perfil operacional de cada segmento da frota.

A análise desses dados é essencial para identificar os principais grupos veiculares responsáveis pela carga poluidora no município e subsidiar estratégias de mitigação, alinhadas às políticas públicas de controle de emissões e melhoria da qualidade do ar.

4.3.3 Emissões por tipo de veículo

A Figura 17 demonstra o perfil de emissões dos poluentes atmosféricos pesquisados, por grupo de veículo no município. A análise permite identificar quais segmentos da frota têm maior contribuição para cada poluente e, conseqüentemente, direcionar estratégias de mitigação.

Figura 17. Emissões de poluentes por grupos de veículos no período pesquisado.



Fonte: Autor (2025).

Este grupo representa o maior impacto nas emissões de NOx, com valores muito superiores aos demais segmentos. O uso predominante de motores a diesel nessa categoria

explica tal comportamento, além de sua alta intensidade de utilização em transporte de mercadorias.

Caminhões Médios também apresentam elevado volume de emissões de NO_x, além de contribuição significativa para HC, CH₄ e N₂O. Este perfil reforça o papel desse grupo no impacto ambiental local, sendo fundamental o incentivo à modernização tecnológica e à inspeção veicular periódica.

Sobre a motocicletas e motonetas, apesar de menor participação em NO_x, as motocicletas e motonetas contribuem expressivamente para as emissões de CO, HC e CH₄, em especial os modelos flex e convencionais.

Os automóveis do ciclo Otto mantêm um impacto relevante, principalmente nas emissões de CO e HC, poluentes diretamente relacionados à queima incompleta de combustíveis. Já os Caminhões Pesados, embora os números de NO_x sejam relativamente menores que os de caminhões leves e médios, a categoria merece atenção por seu potencial emissivo individual elevado, decorrente do uso de diesel. Seu papel no transporte de longa distância contribui para o impacto ambiental urbano e rodoviário.

Em relação aos ônibus (Ônibus, Ônibus Rodoviários, Micro-ônibus e Ônibus SIT), o impacto é visível, em especial no que se refere às emissões de NO_x e MP, típicos de veículos pesados a diesel. Embora o transporte coletivo seja fundamental para a mobilidade urbana, os dados reforçam a necessidade de modernização da frota, priorizando modelos com menor impacto ambiental, como veículos elétricos ou movidos a biocombustíveis avançados.

A análise demonstra que as emissões veiculares no município estão fortemente concentradas nos veículos a diesel, principalmente caminhões de pequeno e médio porte e o transporte coletivo. Adicionalmente, os veículos leves, motocicletas e motonetas, apesar de menor contribuição em massa total, são responsáveis por parcela significativa das emissões de poluentes tóxicos como CO e HC, que impactam diretamente a saúde pública.

4.3.4 Emissão de CO₂e e validação de dados

O estudo contemplou também a avaliação das emissões de GEE, o que é fundamental para compreender o impacto ambiental de atividades antrópicas ao longo do

tempo. Foi realizada a estimativa do CO₂e, considerando as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O referente aos anos de 2022 e 2023, conforme apresentado na Tabela 11.

Para o cálculo do CO₂e, foram aplicados os valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP) de 25 para o CH₄ e 298 para o N₂O, conforme reportado pelo Painel (IPCC, 2021). A partir desses fatores, foi possível determinar as emissões totais em CO₂e, agregando os efeitos relativos de cada gás no período analisado.

A Tabela 11 apresenta as estimativas anuais totais de CO₂e, enquanto a Tabela 12 evidencia a emissão média de CO₂e por veículo, permitindo uma análise comparativa entre os anos avaliados.

Tabela 11. Estimativas anuais totais de CO₂e.

Ano	CO ₂ (t)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)	GWP CH ₄	GWP N ₂ O	CO ₂ e (t)
2022	1.422.264,000	309,713	194,126	25	298	1.487.856,373
2023	1.550.620,000	313,633	198,157	25	298	1.617.511,611

Fonte: Autor (2025).

Tabela 12. Emissão média de CO₂e por veículo.

Ano	Nº de Veículos	CO ₂ (kg/veículo)	CH ₄ (g/veículo)	N ₂ O (g/veículo)	CO ₂ e (kg/veículo)
2022	475.784	2.989,69	651,01	408,1	3.126,91
2023	489.882	3.165,06	640,14	404,37	3.302,00

Fonte: Autor (2025).

A plataforma do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases Estufa (SEEG) disponibiliza estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa discriminadas por município. Para Uberlândia, as emissões do setor de Energia foram estimadas em 1,13 Mt de CO₂e em 2022 e 1,18 Mt de CO₂e em 2023 (SEEG, 2025). No presente estudo, os valores calculados foram de 1,40 Mt e 1,60 Mt, respectivamente (Tabela 11), representando diferenças de aproximadamente 24% (2022) e 36% (2023) em relação ao SEEG.

Essas divergências podem ser explicadas pelas diferenças metodológicas entre os dois inventários. O SEEG adota uma abordagem *bottom-up*, fundamentada em dados desagregados de consumo energético, frota e quilometragem percorrida, associados a fatores específicos de emissão por tipo de combustível e veículo.

Neste trabalho, por outro lado, empregou-se uma abordagem *top-down*, na qual as emissões foram estimadas a partir de dados agregados de consumo de combustíveis e fatores médios de emissão. Assim, a diferença percentual observada (24% e 36%) evidencia que o método *top-down* tende a gerar estimativas mais elevadas em relação à metodologia *bottom-up* do SEEG. Essa constatação reforça a importância de considerar as limitações e incertezas associadas a cada abordagem, bem como a necessidade de cautela ao comparar resultados provenientes de inventários distintos.

Para validar os resultados obtidos nesta pesquisa, realizou-se uma comparação com dados provenientes de outros três diferentes recortes territoriais: a mesorregião da Grande Florianópolis (SC), a Região Metropolitana de Ribeirão Preto (RMRP), em São Paulo, e os resultados de uma pesquisa de Campo Grande (MS). A Tabela 13 apresenta os valores de emissões específicas (em kg/veículo/ano) para os principais poluentes analisados, dos dois primeiros estudos mencionados.

Tabela 13. Valores de emissões específicas (em kg/veículo/ano) para os principais poluentes analisados.

Cidade	CO₂	CO	NO_x	HC	CH₄	N₂O	MP	CO_{2e}
Uberlândia (2023)	2,98	4,23	8,49	0,70	0,60	0,38	0,09	3,11
Meso região "Grande Florianópolis" (ano base-2021)	1,35	8,74	2,71	1,27	0,27	0,11	0,07	
CETESB"RMRP" (2023)		22,85	14,60			0,32		3,015

Fonte: Autor (2025).

No caso da Grande Florianópolis, foi empregada a metodologia BRAVES (Brazilian Vehicle Emission Software), a qual se baseia em um modelo *top-down* que integra informações sobre a frota veicular e o consumo de combustíveis municipais para estimar as emissões veiculares.

O BRAVES adota uma abordagem contemplando variáveis como características da frota, consumo de combustível, deterioração dos veículos e intensidade de uso, a fim de calcular as emissões provenientes do escapamento, desgastes de pneus, estradas e freios, ressuspensão do solo, reabastecimento e emissões evaporativas (IMA, 2023).

Destaca-se a diferença metodológica entre os estudos comparados. Em Uberlândia, a estimativa das emissões foi realizada majoritariamente pela abordagem

bottom-up, a qual utiliza fatores de emissões aplicados diretamente aos dados da frota local. A única exceção foi para o poluente CO₂, cujas emissões foram calculadas pelo método *top-down*, em razão da indisponibilidade de um fator de emissão considerado confiável para esse caso.

Ainda sobre as diferenças dos resultados, observa-se que a Grande Florianópolis, apresentou menores emissões médias de CO₂, NO_x, CH₄ e N₂O por veículo em comparação às demais regiões analisadas. Tal comportamento pode ser atribuído às características da frota e ao perfil de consumo de combustíveis. A região destaca-se como a terceira maior consumidora de gasolina e etanol, além de possuir a quarta maior frota de veículos leves. Em contrapartida, a frota de veículos pesados e o consumo de diesel apresentam valores inferiores aos observados em outras mesorregiões, superando apenas a região Serrana (IMA, 2023). Essa predominância de veículos leves movidos a combustíveis menos associados às emissões de CO₂, NO_x, CH₄ e explica os menores valores registrados.

Por outro lado, o maior uso de gasolina e etanol contribuiu para as emissões relativamente mais elevadas de CO e HC, poluentes característicos da combustão incompleta desses combustíveis, justificando os resultados observados no inventário para esses compostos.

De maneira semelhante, o inventário da CETESB para a RMRP segue uma abordagem *top-down*, fundamentada em dados agregados de consumo de combustíveis de acordo com a realidade de toda a frota do Estado de São Paulo. O comparativo foi realizado com base no Relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo, 2023, elaborado pela CETESB (CETESB, 2023), com apenas três poluentes encontrados, considerando, especificamente, os dados referentes à Região Metropolitana de Ribeirão Preto (RMRP). No caso do CO₂e, o comparativo foi de informações do mesmo relatório (CETESB, 2023), contudo, as emissões contemplam todo o Estado de SP, uma vez que não foram fornecidas emissões por regiões.

Entretanto, ressalta-se que há diferenças metodológicas significativas entre os inventários comparados e o presente estudo. Enquanto a CETESB aplica fatores de emissão consolidados, ajustados para a realidade do estado de São Paulo, a pesquisa em Uberlândia utilizou majoritariamente a abordagem *bottom-up*, que se baseia em dados específicos da frota local e fatores de emissão individualizados. Como já foi dito, apenas

as emissões de CO₂ foram estimadas pelo método *top-down*, devido à indisponibilidade de Fe locais confiáveis.

Embora os estudos apresentem escopos e fontes distintas, sendo o da CETESB calcado em uma metodologia *top-down*, baseada em consumo de combustíveis e fatores de emissão estaduais e o de Uberlândia, predominantemente *bottom-up*, ambos destacam a importância de utilizar indicadores padronizados, como as emissões específicas por veículo, para garantir uma avaliação mais precisa da intensidade poluidora da frota veicular.

Além da comparação entre os dados de Uberlândia com aqueles provenientes mesorregião da Grande Florianópolis, do Estado de Santa Catarina (SC), bem como aqueles da Região Metropolitana de Ribeirão Preto (RMRP), com base no Relatório de Emissões Veiculares da CETESB (2023), também foi realizada uma análise comparativa entre Uberlândia e Campo Grande (MS).

O inventário de Campo Grande foi elaborado com base em uma abordagem *bottom-up*, conforme descrito por Costa (2024). A metodologia incluiu o uso de dados da frota local, fatores de emissão específicos, intensidade de uso dos veículos e espacialização das emissões com base em imagens noturnas, com elevada resolução temporal e espacial. Esse nível de detalhamento permite estimativas mais precisas e contextualizadas das emissões, sendo comparável à abordagem adotada em Uberlândia.

A comparação entre Uberlândia e Campo Grande (MS) evidencia contrastes relevantes no perfil e na intensidade das emissões veiculares. No caso do CO_{2e}, Uberlândia apresentou, em 2023, um total de aproximadamente 1,62 milhões de toneladas, enquanto Campo Grande, em 2022, registrou cerca de 1,44 milhões de toneladas. Apesar de possuir uma frota menor (489.882 veículos contra 681.529 em Campo Grande), Uberlândia apresentou emissão específica mais elevada, alcançando 3,30 t CO_{2e}/veículo/ano, em comparação com 2,12 t CO_{2e}/veículo/ano na capital sul-mato-grossense. Essa diferença sugere maior intensidade de uso, participação mais elevada de veículos pesados movidos a diesel, ou uma frota com idade média superior, fatores que elevam as emissões de gases de efeito estufa.

No que se refere aos poluentes regulados, Uberlândia emitiu, em 2023, 44,80 t de MP, 4.420,82 t de NOx e 2.200,64 t de CO. Já Campo Grande, em 2022, registrou 180 t de MP, 8.208 t de NOx e 12.846 t de CO. Em termos absolutos, Campo Grande apresentou valores mais elevados, especialmente para CO, possivelmente refletindo uma frota com maior proporção de veículos leves movidos a gasolina ou etanol, em que a emissão desse poluente tende a ser mais significativa. Por outro lado, quando as emissões são normalizadas pela frota, Uberlândia apresenta índices específicos mais altos para NOx e MP, o que indica uma contribuição proporcionalmente maior desses poluentes na cidade mineira.

Essas análises comparativas reforçam a importância da padronização dos indicadores, como emissões por veículo ou por quilômetro rodado, como forma de evitar distorções causadas por diferenças no tamanho absoluto das frotas. Além disso, demonstram que, independentemente da abordagem metodológica (*top-down ou bottom-up*), é essencial considerar as características locais das frotas para uma avaliação mais precisa do impacto ambiental.

Por fim, os resultados indicam a necessidade de políticas públicas de mitigação alinhadas às realidades de cada contexto urbano. Em Uberlândia, por exemplo, recomenda-se atenção voltada a substituição da frota a diesel e ao controle das emissões de NOx e MP. Já em Campo Grande, intervenções nos veículos leves, como programas de inspeção e manutenção veicular, podem ser eficazes na redução das emissões de CO.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu avaliar, de forma detalhada, as emissões atmosféricas associadas à frota veicular do município de Uberlândia-MG, considerando diferentes grupos de veículos, tipos de combustíveis e a evolução da frota entre os anos de 2022 e 2023. As metodologias adotadas, baseadas em estimativas segundo abordagem “*Bottom-up*” e “*Top-down*”, proporcionaram uma visão abrangente do cenário atual das emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa relacionados ao setor de transportes no contexto urbano do município.

Para a estimativa das emissões veiculares neste estudo, optou-se por considerar a frota total registrada nos bancos de dados oficiais (SENATRAN), independentemente do estado de circulação efetivo de cada veículo. Essa decisão metodológica fundamenta-se na indisponibilidade de informações consolidadas e confiáveis sobre a frota ativa, uma vez que não há controle rigoroso sobre veículos fora de operação (baixados, sucateados ou em longa inatividade).

Nesse contexto, destaca-se que a utilização da frota total, em detrimento da frota efetivamente circulante, tende a resultar em uma superestimativa das emissões veiculares no município de Uberlândia, especialmente quando comparada a estudos que adotam a frota circulante, como os levantamentos realizados pela Cetesb, nos quais os valores costumam ser cerca de 30% a 50%. Ainda assim, ressalta-se a importância de futuros levantamentos específicos que possibilitem estimar o percentual médio de veículos fora de circulação na realidade local, contribuindo para o aumento da precisão das projeções de emissões.

A comparação entre Uberlândia, Campo Grande, Grande Florianópolis e RMRP evidencia variações significativas nas emissões veiculares, influenciadas pelo perfil da frota, tipo de combustível e metodologia utilizada (top-down ou bottom-up). Uberlândia apresentou maior emissão específica de CO₂e, enquanto Campo Grande liderou em emissões absolutas de CO, NO_x e MP. A Grande Florianópolis destacou-se pelos menores valores específicos de CO₂, NO_x, CH₄ e N₂O, associando-se à predominância de veículos leves e menor consumo de diesel. A RMRP, com dados agregados da CETESB, registrou altos valores de CO e NO_x. Os resultados reforçam a importância da padronização dos indicadores e da consideração das características locais das frotas.

Ressalta-se, ainda, que este estudo não contemplou as emissões associadas ao chamado carbono oculto, como aquelas geradas nos processos de transporte de combustíveis ou na fabricação de veículos, bem como, nas demais, as quais referem-se às emissões de gases de efeito estufa que não são diretamente observadas durante o uso de um produto ou serviço, mas que ocorrem ao longo de seu ciclo de vida. A inclusão desses fatores em futuras análises pode proporcionar uma avaliação mais abrangente do impacto ambiental real do setor veicular, especialmente ao se considerar o ciclo de vida completo dos combustíveis e veículos.

De forma geral os resultados demonstraram que os veículos movidos a diesel representam a maior contribuição para as emissões de NOx e MP, poluentes estes intimamente associados ao agravamento de problemas respiratórios e cardiovasculares, e ao comprometimento da qualidade do ar em ambientes urbanos. As emissões de CO₂, principal gás de efeito estufa, também foram significativamente superiores nos veículos a diesel, evidenciando o impacto dessa parcela da frota no contexto das mudanças climáticas.

A estimativa do CO₂e confirmou essa tendência, totalizando aproximadamente 1,49 milhões de toneladas em 2022 e 1,62 milhões de toneladas em 2023, refletindo o aumento das emissões de gases de efeito estufa no período analisado.

O uso do gasol apresentou emissões consideráveis de CO e HC, poluentes que contribuem para a formação de ozônio na troposfera e para o comprometimento da saúde humana. Já o etanol, por sua vez, como é menos utilizado, apresenta fatores de emissão menores do que os combustíveis fósseis, e, portanto, apresentou expressiva redução nas emissões de NOx, MP e CO₂. Entretanto, observou-se que as emissões de CO e HC associadas ao etanol ainda requerem atenção, especialmente em veículos mais antigos ou com más condições de manutenção.

Importante notar que as emissões do setor de aviação não foram incluídas neste estudo e carecem de identificação, considerando a presença de um aeroporto na cidade.

Diante desse cenário, ficam como recomendações para o fortalecimento de políticas públicas:

- i. A substituição gradual da frota, com prioridade para os veículos pesados, por veículos elétricos e/ou movidos exclusivamente a biocombustíveis;

- ii. O incentivo ao uso de biocombustíveis, em especial o etanol, cuja disponibilidade regional favorece sua adoção;
- iii. A implementação de tecnologias veiculares mais limpas, como filtros de partículas e sistemas de redução de NOx;
- iv. Incentivo e investimento em transporte coletivo por meio de diferentes modais, tais como trem, metrô e bonde elétrico;
- v. Construção de ciclovias e ciclo faixas;
- vi. E o aprimoramento dos programas de inspeção e manutenção veicular, como estratégia para mitigação das emissões, especialmente em veículos mais antigos.

Em termos de estudos futuros, faz-se necessário um estudo para melhor quantificar a quilometragem rodada pelos veículos, bem como as horas trabalhadas por maquinários diversos, na cidade, especialmente automóveis, motocicletas e veículos pesados urbanos, tratores em geral, exceto a frota do SIT, cuja quilometragem é conhecida.

Isto poderia melhorar a intensidade do uso utilizada no estudo e proporcionar valores de emissão mais realísticos. Outro fator de incerteza é com relação ao consumo de combustíveis por veículos que não são registrados em Uberlândia, mas que trafegam e abastecem seus veículos nesta cidade. Isto é especialmente relevante para estimativas *top-down*, onde o consumo de combustível é necessário.

Diante do exposto, conclui-se que, embora haja avanços pontuais no controle de alguns poluentes, os desafios relacionados às emissões veiculares no município permanecem significativos. A continuidade de políticas públicas integradas, fiscalização eficaz, programas de renovação da frota e incentivo à substituição de combustíveis fósseis são medidas indispensáveis para a redução dos impactos ambientais e para a melhoria da qualidade do ar urbano.

Destaca-se, nesse sentido, a relevância de iniciativas recentes adotadas pela administração municipal, como a concessão do passe livre aos estudantes, medida que incentiva o uso do transporte coletivo e os testes com ônibus elétricos, que representam um avanço importante rumo à mobilidade urbana de baixo carbono. Tais ações demonstram o potencial das políticas locais em promover mudanças estruturais positivas no setor de transportes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para a qualidade de vida da população

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6601**: veículos rodoviários automotores: determinação de hidrocarbonetos emitidos pelo tubo de escapamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 57 p.

ADACHI, M. S.; TORRES, J. M.; FITZPATRICK, P. F. Mechanistic studies of the yeast polyamine oxidase Fms1: kinetic mechanism, substrate specificity, and pH dependence. **Biochemistry**, Washington, DC, v. 49, n. 49, p. 10440-10448, dec./2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/bi1016099>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2999662/pdf/nihms-252159.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025

AGUIAR, S. O.; ARAÚJO, R. S.; CAVALCANTE, F. S. Á.; BERTONCINI, B. V.; LIMA, R. K. C.; OLIVEIRA, M. L. M. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. **Transportes**, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 35-43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v23i3.896>. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/896/555>. Acesso em: 16 ago. 2025

ALS GLOBAL. **Propriedades físico-químicas do óleo diesel**. São Paulo: ALS Global, 2018. (Documento técnico).

ÁLVARES JÚNIOR., O. M.; LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada para cálculo das emissões de gases de efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**. São Paulo: CETESB, 2001. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/gases_efeito_estufa.pdf. Acesso em: 11 jul. 2025.

ALVES, D. D.; OSÓRIO, D. M. M.; RODRIGUES, M. A. S.; ILLI, J. C.; BIANCHIN, L.; BENVENUTI, T. Concentrations of PM_{2.5-10} and PM_{2.5} and metallic elements around the Schmidt Stream area, in the Sinos River Basin, southern Brazil. **Braz. J. Biol.**, São Carlos, SP, v. 75, n. 4, p. 43-52, 2015. Supl. 2. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.00113suppl>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/sYNbCG9qXXzvqJLSmbcJpnt/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 23 set. 2025.

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain cloud over the Amazon. **Science**, Whashington, DC, United States of America, v. 303, n. 5662, p. 1337-1342, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1092779>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1092779>. Acesso em: 01 jul. 2025.

AQUINO, G. S.; ROCHA, J. M.; VILELA, F. F. F.; SOUZA, A. A. B. Análise de crescimento da mancha urbana da cidade de Uberlândia-MG. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2024, São Paulo. **Anais eletrônicos [...]**. Rio de Janeiro, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2024. Trabalho 494, p. 1-6. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/21silubesa_download/494_tema_vi.pdf. Acesso em: 6 set. 2025.

ARBEX, M. A.; SANTOS, U. P.; MARTINS, L. C.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F. B. Air pollution and the respiratory system. **J Bras Pneumol**. São Paulo, v. 38, n. 5, p. 643-655, 2012. Disponível em: <https://www.jornaldepneumologia.com.br/details/79/en-US>. Acesso em: 22 jun. 2024.

ASSESSORIA E PROJETOS EM MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE (MINERGEIO). **Descubra como a qualidade do ar pode influenciar na sua saúde**. São Paulo: MINERGEIO, 2022. Disponível em: <https://www.minergeio.com.br/noticias/descubra-como-a-qualidade-do-ar-pode-influenciar-na-sua-saude>. Acesso em: 14 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU). **Demanda de passageiros cresce em 2023, mas ainda não atinge níveis pré-pandemia**. Brasília: NTU, 30 abr. 2025. Disponível em: <https://www.ntu.org.br/novo/noticias/demanda-de-passageiros-cresce-em-2023-mas-ainda-nao-atinge-niveis-pre-pandemia>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ATENÇÃO ao comprar uma motocicleta usada. **Diário Gaúcho**, Porto Alegre, RS, 4 set. 2013. Portal. Disponível em: <https://diariogaucho.clicrbs.com.br/dia-a-dia/noticia/2013/09/atencao-ao-comprar-uma-motocicleta-usada-4257378.html>. Acesso em: 25 fev. 2025.

BARI, M. A.; KINDZIERSKI, W. B. Characterization of air quality and sources of fine particulate matter (PM_{2.5}) in the City of Calgary, Canada. **Atmospheric Pollution Research**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 534-543, may/2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104217305081>. Acesso em: 01 mar. 2025.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. Tradução: Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Jesus Zerbini, Suely Pfeferman. 25. ed. São Paulo: Blücher, 2005.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. **Poluição do ar**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.

BRASIL. Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 16509, 02 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. **Síntese de evidências para políticas de saúde**: reduzindo a emissão do poluente atmosférico – material particulado – em benefício da saúde no ambiente urbano. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2016. Disponível em: https://vsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/sintese_evidencia_politicas_saude_reduzindo_emissao_poluente_atmosferico.pdf. Acesso em: 27 out. 2023

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **CNPE mantém percentual de biodiesel no diesel em 14 % para ajudar a conter preço dos alimentos**. Brasília, DF: MME, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-mantem-percentual-de-biodiesel-no-diesel-em-14-para-ajudar-a-conter-preco-dos-alimentos>. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013**: ano base: 2012. 2014. 2013. Brasília, DF: MMA, 2014. Disponível em: https://sudema.pb.gov.br/qualidade-do-ambiente/inventario_de_emissoes_por_veiculos_rodoviarios_2013.pdf. Acesso em:

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). **Curso de gestão da qualidade do ar**. Brasília, DF: MMA, 2011. Disponível em: <https://ead.mma.gov.br/mod/book/view.php?id=10342>. Acesso em: 25 mai. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013**. 2. ed. Brasília: MMA, 2013 (ano-base 2012). Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/repositorio/grupo-de-trabalho-inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios/inventario_de_emissoes_por_veiculos_rodoviarios_2013.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Frota de veículos 2023**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>. Acesso em: 18 abr. 2025

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. (Volume 1).

CARROS brasileiros ficaram mais velhos e mais poluentes na última década. São Paulo, Mobiauto, 01 jun. 2022. Portal. Disponível em: <https://www.mobiauto.com.br/revista/carros-brasileiros-ficaram-mais-velhos-e-mais-poluentes-na-ultima-decada/1896>. Acesso em: 16 ago. 2025.

CARROS flex são maioria no Brasil, mas só 30% da frota usa etanol, diz estudo. Araçatuba, SP: UDOP, 14 mar. 2024. Portal. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/03/14/carros-flex-sao-maioria-no-brasil-mas-so-30-da-frota-usa-etanol-diz-estudo.html#:~:text=Carros%20flex%20s%C3%A3o%20maioria%20no,frota%20usa%20etanol%2C%20diz%20estudo>. Acesso em: 24 nov. 2024.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília, DF: IPEA, 2011. (Texto para Discussão, No. 1606). Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/91332>. Acesso em: 18 jul. 2024.

CHYLEK, P.; JENNINGS, S. G.; PINNICK, R. Aerosols - soot. *In*: NORTH, G. R.; PYLE, J.; ZHANG, F. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. 2. ed. Oxford, United Kingdom: Academic Press, 2015. chap. 10, p. 86-91.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Análise da proposta de Resolução CONAMA para as novas fases de controle de veículos leves do Proconve (L7 e L8) aprovada em reunião Plenária do CONAMA em 28 de novembro de 2018**. São Paulo: CETESB, 2018. 9 p. (Relatório Técnico N° 11/18/ETH/ET). Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/12/17.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2025.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Estudo dos Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) na atmosfera do município de Paulínia - SP**. São Paulo: CETESB, 2021. 34 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2021/04/Estudo-dos-compostos-organicos-volateis-COVs-na-atmosfera-do-municipio-de-Paulinia-SP.pdf>. Acesso em: 09 maio 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatórios e publicações - emissão veicular**. São Paulo: CETESB, 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 155, n. 222, p. 155-156, 20 nov. 2018. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155&totalArquivos=178>. Acesso em: 28 jun. 2025.

COSTA, G. S. **Inventário de emissões antropogênicas em Campo Grande: fontes veiculares**. 2024. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/retrieve/bcc6023b-fb95-44e9-9e87-ce1d87e63606/5893.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CRUZ, M. M. L. **Avaliação dos impactos de restrições ao trânsito de veículos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: https://www.ta.org.br/site/Banco/7manuais/Arquivos3/restricao_automoveis.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **REGET**, Santa Maria, RS, v. 18 n. 1, p. 66-78, abr./2014. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117010537>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/10537/pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2023**: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

EMPRESAS do transporte público de Uberlândia são atuadas por superlotação nos ônibus. **Diário de Uberlândia**, Uberlândia, MG, 7 ago. 2023. Disponível em: <https://diariodeuberlandia.com.br/noticia/33298/empresas-do-transporte-publico-de-uberlandia-sao-atuadas-por-superlotacao-nos-onibus>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ESTUDO do Sindipeças revela que idade média da frota brasileira é de 10 anos. São Paulo: Novo Varejo Automotivo, 2024. Disponível em: <https://novovarejoautomotivo.com.br/estudo-do-sindipeças-revela-que-idade-media-da-frota-brasileira-e-de-10-anos-e-11-meses/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

FELIN, B. **Qual o impacto da poluição do ar na saúde?** WRI BRASIL, São Paulo; Porto Alegre, 27 jul. 2018. Disponível em: www.wribrasil.org.br/noticias/qual-o-impacto-da-poluicao-do-ar-na-saude. Acesso em: 10 jun. 2024.

GONÇALVES, W. A.; MACHADO, L. A. T.; KIRSTETTER, P.-E. Influence of biomass aerosol on precipitation over the Central Amazon: an observational study. **Atmos. Chem. Phys.**, Munich, Germany, v. 15, n. 12, p. 6789-6800, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-15-6789-2015>. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/15/6789/2015/acp-15-6789-2015.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2024.

HABERMANN, M.; MEDEIROS, A. P. P.; GOUVEIA, N. Tráfego veicular como método de avaliação da exposição à poluição atmosférica nas grandes metrópoles. **Rev. bras. epidemiol.**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 120-130, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-790X2011000100011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepid/a/x6CwzWB9g55wcdjSncxZyLf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 jul. 2025.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Fontes de poluição atmosférica. Curitiba**, [s.d.]. Texto disponível em páginas reproduzidas na internet. Acesso em: 11 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Instrução Normativa nº 21, de 10 de dezembro de 2021. Altera o Art. 5º e Anexo e inclui um novo art. 9-A na Instrução Normativa 22, de 24 de setembro de 2020, que dispõe sobre a regulamentação prevista no artigo 2º da Resolução Conama nº 492, de 20 de dezembro de 2018, relativo à determinação das emissões de gases orgânicos não metano (NMOG) provenientes do escapamento de veículos rodoviários leves de passageiros e leves comerciais quando abastecidos com etanol hidratado brasileiro de referência (EHR), gasool A22, gasool A11H50, gás combustível veicular de referência (GVR) ou Diesel. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 235, p. 123-124. 15 dez. 2021. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=138783>. Acesso em: 10 fev. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Portaria nº 85, de 17 de outubro de 1996. **Diário Oficial da**

União: seção 1, Brasília, DF, ano 134, n. 204, p. 21434, 21 out. 1996. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/PT0085-171096.PDF>. Acesso em: 03 abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades:** Uberlândia. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>. Acesso em: 23 jul. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). **Boletim do Ciclo Diesel – 4º trimestre de 2024 (dados até novembro de 2024).** Rio de Janeiro: IBP, 2024. Acesso em: 06 jul. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Monitor de Ônibus SP:** painel avançado, quilometragem anual percorrida em 2023. São Paulo: IEMA, 2025. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/onibus-sp#painel-avancado>. Acesso em: 23 jul. 2025.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA (IMA). **Inventário de emissões atmosféricas.** Florianópolis, SC: IMA, 2021. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/menu-qualidade-ar/inventario-de-emissoes-atmosfericas>. Acesso em: 16 jul. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: the physical science basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf. Acesso em 01 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese.** Genebra, Suíça, IPCC, 2023. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 04 ago. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Mudanças do Clima 2021 - Base Científica: Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.** Sumário para Formuladores de Políticas. Genebra, Suíça: IPCC, 2021a. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf. Acesso em: 27 jul. 2024.

JOHNSON, B. T.; SHINE, K. P.; FORSTER, P. M. The semi-direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, Reading, Reino Unido, v. 130, n. 599, p. 1407-1422, abr./2004. DOI: <https://doi.org/10.1256/qj.03.61>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1256/qj.03.61>. Acesso em: 26 jul. 2024.

KEEDI, S.; MENDONÇA, P. C. **Transportes e seguros no comércio exterior**. São Paulo: Aduaneiras, 2000.

KOUSAR, S. *et al.* Cancer risk evaluation of VOCs in ambient air of Lahore, Pakistan. **International Journal of Biometeorology**, [s. l.], v. 68, p. 749–761, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-024-02701-w>. Acesso em: 7 ago. 2025.

LEACHI, H. F. L.; MARZIALE, M. H. P.; MARTINS, J. T. ARONI, P.; GALDINO, M. J. P.; RIBEIRO, R. P. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares em trabalhadores. **Rev. Bras. Enferm.**, Brasília, DF, v. 73, n. 3, e20180965, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2018-0965>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/reben/a/mVTTxd9gpBsTymvVd6DZzSk/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

LI, X.; ZHANG, Y.; WANG, Z.; ZHAO, Y.; ZHENG, J.; ZHU, H. Uma observação abrangente sobre as características da poluição de PAN urbano e outros poluentes sob diferentes condições meteorológicas. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 890, p. 164000, 2023.

LIEBSCHER, H. Economic solutions for compliance to the new European VOC directive. **Progress in Organic Coatings**, Amsterdam, Netherlands, v. 40, n. 1-4, p. 75-83, dec./2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(00\)00139-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00139-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944000001399>. Acesso em: 25 jul. 2025.

LOHMANN, U.; FEICHTER, J. Global indirect aerosol effects: a review. **Atmos. Chem. Phys.**, Göttingen, Germany, v. 5, n. 3, p. 715-737, mar./2005. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005>. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/5/715/2005/acp-5-715-2005.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, Reino Unido, v. 32, n. 7, p. 582-595, jul./2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953407002310?via%3Dihub>. Acesso em: 17 maio 2025.

MACEDO, L. V. Problemas ambientais urbanos causados pelo trânsito na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (org.). **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.

MASSEY Ferguson alcança o maior volume de vendas dos últimos 14 anos. **Revista Cultivar**, Pelotas, RS, 14 set. 2009. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/massey-ferguson-alcanca-o-maior-volume-de-vendas-dos-ultimos-14-anos>. Acesso em: 18 out. 2024.

MEP WATER GROUP. **How air pollution affect water rainfall patterns**. Brussels, Belgium, 15 set. 2022. Disponível em: <https://mepwatergroup.eu/how-air-pollution-affect-water-rainfall-patterns/>. Acesso em: 1 jan. 2025.

MILLER, J.; FAÇANHA, C. **Análise de Custo-Benefício da Norma P-8 de Emissões de Veículos Pesados no Brasil**. Washington DC, United States: International Council on Clean Transportation, 2016. (Relatório Técnico). Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/P-8%20Portuguese%20White%20Paper%20vFinal.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2025.

MUÑOZ, P.; FRANCESCHINI, E. A.; LEVITAN, D.; RODRIGUEZ, C. R.; HUMANA, H.; PERELMUTER, G. C. Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. **Energy Conversion and Management**, Oxford, Reino Unido, v. 257, p. 115412, apr./2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422002084?via%3Dihub>. Acesso em: 31 mar. 2025.

ONU CONFIRMA 2024 COMO O ANO MAIS QUENTE JÁ REGISTRADO, COM CERCA DE 1,55 °C ACIMA DOS NÍVEIS PRÉ-INDUSTRIAIS. Brasília, DF: ONU Brasil, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/287173-onu-confirma-2024-como-o-ano-mais-quente-j%C3%A1-registrado-com-cerca-de-155%C2%B0c-acima-dos-n%C3%ADveis>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Novas diretrizes globais de qualidade do ar da OMS visam salvar milhões de vidas**. Washington DC, Estados Unidos: OPAS. 22 set. 2021. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/22-9-2021-novas-diretrizes-globais-qualidade-do-ar-da-oms-visam-salvar-milhoes-vidas-da>. Acesso em: 04 ago. 2024.

PINHEIRO, P. C. C. **O que é óleo diesel**. 1º Semestre de 2004. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/XI-081.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

POPE III, C. A. Mortality effects of longer-term exposures to fine particulate air pollution: review of recent epidemiological evidence. **Inhalation Toxicology**, London, United Kingdom, v. 19, n. suppl. 1, p. 33-38, jul./2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/08958370701492961>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08958370701492961>. Acesso em: 06 ago. 2024.

POPE III, C. A.; DOCKERY, D. W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, Pittsburgh, Pensilvânia, United States, v. 56, n. 6, p. 709-742, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10473289.2006.10464485?needAccess=true>. Acesso em: 08 ago. 2024.

POPE III, C. A.; BURNETT, R. T.; THUN, M. J.; CALLE, E. E.; KREWSKI, D.; ITO, K.; THURSTON, G. D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **JAMA**, Chicago, Illinois, United States, v. 287, n. 9, p. 1132-1141, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>. Disponível em: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/194704>. Acesso em: 06 ago. 2024.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Portal da Prefeitura de Uberlândia**, 2024. Portal. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIBEIRÃO PRETO. Secretaria de Obras Públicas. **Corredores do Transporte Coletivo de Ribeirão Preto**. Ribeirão Preto: Prefeitura da Cidade de Ribeirão Preto, 2023. Portal. Disponível em: <https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/files/splan/planod/mobi-corredor-dom-pedro.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

PUSHPARAJ, D.; GIGLIO, J.; PUSHPARAJ, D. P.; RUSSELL, A. G.; HENNIGAN, C. J. A historical perspective on peroxyacetyl nitrate (PAN) and peroxyacyl nitrates (PANs): Chemistry, measurement, and impacts on air quality. **Chemical Reviews**, Washington, v. 121, n. 22, p. 13855–13924, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00353>.

RODRIGUES, M. A.; SORRATINI, J. A. A qualidade no transporte coletivo urbano. **Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes**. Brasília, DF: CNT, 2008.

RODRIGUES, M. A.; SORRATINI, J. A. A qualidade no transporte coletivo urbano. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 22., 2008, Fortaleza, CE. **Anais [...]**. Fortaleza, Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET), 2008, p. 1081-1092.

ROSENFELD, D.; LOHMANN, U.; RAGA, G. B.; O'DOWD, C. D.; KULMALA, M.; FUZZI, S.; REISSELL, A.; ANDREAE, M. O. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? **Science**, Washington, D.C., USA, v. 302, n. 5894, p. 1309-1313, sep./2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1160606>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1160606>. Acesso em: 01 jul. 2025.

SÃO PAULO TRANSPORTE S.A (SPTRANS). **Dados operacionais da frota de ônibus da cidade de São Paulo**. São Paulo: SPTrans, 2025. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

SCHIRMER, W. N.; LISBOA, H. M. Química da atmosfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, RS, v. 12, n. 2, p. 37-46, jul./dez. 2008. Disponível em:

https://www.sotaodaquimica.com.br/wa_files/Qu_C3_ADmica_20da_20atmosfera.pdf. Acesso em: 01 jul. 2025.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 1152 p.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Observatório do Clima. **Emissões de GEE (2023) Uberlândia/MG**. Piracicaba, SP: SEEG, 2025. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/mg-uberlandia>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SOUZA, R. C.; FERREIRA, M. L.; RIBEIRO, A. P.; FERRADOR, A. L. Avaliação sobre as emissões veiculares com base no Plano de Controle de Poluição Veicular da cidade de São Paulo nos anos de 1983-2015. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 6., 2017; ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE ESTRATÉGIA, 5., 2017. **Anais [...]**. São Paulo, UNINOVE, 2017. Trabalho 539, p. 1-14. Disponível em: <https://www.singep.org.br/6singep/resultado/539.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2017.

UNITED STATES. United States Environmental Protection Agency (EPA). **Report to congress on black carbon: executive summary**, Washington, D.C.: EPA, Mar. 2012. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100EIUR.TXT>. Acesso em: 10 mai. 2025.

VENTURA, T. Você sabe qual a diferença entre ciclomotor, motoneta e motocicleta? **CNN Brasil**, São Paulo, 31 jan. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/auto/voce-sabe-qual-a-diferenca-entre-ciclomotor-motoneta-e-motocicleta/>. Acesso em: 16 ago. 2025.

VILAR, L. H. C.; DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; ERRERA, M. C. Estudo das emissões de material particulado em veículo leve com motor de ciclo Otto de injeção direta flex fuel. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, 23., 2015, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher Engineering Proceedings, 2015. (volume 2, número 1). DOI: <https://doi.org/10.5151/engpro-simea2015-PAP154>. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/simea2015/PAP154.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: summary of risk assessment**. Global update 2005. Geneva, Switzerland: WHO, 2006. Disponível em: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/0139402d-f0a0-4266-874b-08f5d55dc8eb/content>. Acesso em: 28 nov. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). International Agency for Research on Cancer. **Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths**. Lyon, France; Geneva, Switzerland: WHO, 2013. Disponível em: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf. Acesso em: 08 nov. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **WHO global air quality guidelines:** particulate matter (PM_{2.5}) and PM₁₀), ozone, nitrogen, dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, Switzerland: WHO, 2021. Disponível em: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content>. Acesso em: 22 nov. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **World Health Assembly closes, passing resolutions on air pollution and epilepsy.** Geneva, Switzerland, 26 may 2015. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/26-05-2015-world-health-assembly-closes-passing-resolutions-on-air-pollution-and-epilepsy>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ZHANG, Y.; JI, X.; KU, T.; LI, G.; SANG, N. Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: a study based on myocardial toxicity. **Environmental Pollution**, Oxford, Reino Unido, v. 216, p. 380-390, sep./2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.072>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.072>. Acesso em: 17 ago. 2024.

APÊNDICE A - REGULAMENTAÇÃO AMBIENTAL REFERENTE A POLUIÇÃO DO AR NO BRASIL

- i. O marco inicial da regulamentação da poluição do ar no Brasil, de abrangência nacional, ocorreu com o Decreto-Lei nº 1.413/1975, o qual dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais; atribui às indústrias a responsabilidade de tomar as medidas preventivas para evitar danos de contaminação, ou, caso ocorra o dano, tomar medidas corretivas para tratar os prejuízos da poluição.
- ii. O Decreto nº 76.389/1975 trata das medidas de prevenção e controle da poluição industrial.
- iii. A Portaria do então Ministério do Interior nº 0231, de 27/4/76, que estabeleceu padrões de qualidade do ar para partículas totais em suspensão, dióxido de enxofre (SO₂), CO, e oxidantes fotoquímicos, bem como os respectivos métodos de referência para realizar o monitoramento.
- iv. A Lei nº 6.803/1980 se refere ao estabelecimento da localização de indústrias por meio do zoneamento urbano, além da determinação do uso de tecnologias de controle da poluição.
- v. Com base nas disposições da Lei n. 6.938 de 1981, o CONAMA revisou a Portaria n. 0231, acrescentando os poluentes fumaça, partículas inaláveis e dióxido de nitrogênio. Foram estabelecidos também padrões primários e secundários para a exposição de curto e longo prazo para cada um dos poluentes, assim como seus métodos de referência.
- vi. Resolução CONAMA nº 18/1986 que determina a criação do PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores), com o principal objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes pelos veículos automotores.
- vii. Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução CONAMA nº 05 de 15 de junho de 1989. O estabelecimento do programa ocorreu devido à percepção do acelerado crescimento urbano e industrial brasileiro e da frota de veículos automotores; do progressivo aumento da poluição atmosférica, principalmente nas regiões metropolitanas; dos seus reflexos negativos sobre a sociedade, a economia e o meio ambiente e das perspectivas de continuidade

- destas condições. Além disto, a necessidade de estabelecer estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar, válidas para todo o território nacional também contribuíram para o estabelecimento do programa.
- viii. Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar PRONAR.
 - ix. Resolução CONAMA nº 8, de 31 de agosto de 1993. Complementa a Resolução nº 18/86, que instituiu, em caráter nacional, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, estabelecendo limites máximos de emissão de poluentes para partículas totais e dióxido de enxofre por processos de combustão externa para os motores destinados a veículos pesados novos, nacionais e importados.
 - x. Portaria nº 85/96 do INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVAVEIS – IBAMA, visa minimizar os efeitos da poluição por fumaça preta que contribuem para a degradação da qualidade do ar, principalmente nos centros urbanos. Regulamenta que todo proprietário de frota de veículos movidos a diesel destinados ao transporte de cargas ou passageiros deverá montar ou adotar Programa Interno de Autofiscalização (PIA) de sua frota, para garantir a Correta Manutenção da Frota quanto à emissão de fumaça.
 - xi. Código de Trânsito Brasileiro (Lei nº 9.503/1997) regulamenta o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso (I/M).
 - xii. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.
 - xiii. Resolução CONAMA nº 342/2003 estabelece o PROMOT, os limites para a emissão de poluentes pelos ciclomotores, motocicletas e similares.
 - xiv. Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece os limites máximos de emissão para os poluentes por tipologia de fontes e por tipo de combustível usado nos processos industriais.
 - xv. Resolução CONAMA 418/2009 é uma das principais ferramentas legais no âmbito da regulamentação das emissões de veículos em uso. Além de estabelecer 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 ambientais competentes, a referida resolução determina os limites de emissão e os procedimentos para a avaliação do estado de manutenção

de veículos em uso. Dentre os limites de emissão, destacam-se aqueles vinculados à opacidade da fumaça emitida por veículos do Ciclo Diesel. Ainda não foi implementado em escala nacional, atualmente apenas o estado do Rio de Janeiro realiza a inspeção veicular ambiental (BRASIL, 1997; BRASIL, 1986; BRASIL, 2003a; BRASIL, 2009).

- xvi. Resolução CONAMA nº 436/2011 estabelece os limites máximos de emissão para os poluentes por tipologia de fontes e por tipo de combustível usado nos processos industriais. (BRASIL, 1975a; BRASIL, 1975b, BRASIL, 1980; BRASIL, 1981; BRASIL, 1993; (BRASIL, 2006; BRASIL, 2011).
- xvii. Resolução CONAMA Nº 490 DE 16/11/2018 estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências.
- xviii. Resolução CONAMA Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar e estabelece padrões de emissões.
- xix. LEI Nº 14.850, de 02 de maio de 2024 institui a Política Nacional da Qualidade do Ar.
- xx. LEI Nº 14.902, de 28 de junho de 2024 institui o Programa Mover - Mobilidade Verde e Inovação, cujo objetivo central consiste na redução de 50% das emissões de carbono no país até 2050.
- xxi. Resolução CONAMA Nº 506 DE 05 DE JULHO DE 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. Revoga os artigos 1º ao 8º, os artigos 12 a 14 e o anexo I da Resolução Conama nº 491, de 19 de novembro de 2018; e os itens 2.2.1 e 2.3 da Resolução Conama nº 5, de 15 de junho de 1989.

**APÊNDICE B - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO (SIT) NA CIDADE DE
UBERLÂNDIA NO PERÍODO PESQUISADO**

Mês	Empresa A	Empresa B	Empresa C	Total do sistema
JAN/22	264.691	277.239	236.860	778.790
FEV/22	251.007	265.798	204.030	720.835
MAR/22	296.780	345.075	224.332	866.187
ABR/22	275.097	309.490	223.610	808.197
MAI/22	321.786	335.123	225.958	882.867
JUN/22	306.723	322.382	214.954	844,059
JUL/22	314.220	321.684	217.544	853.448
AGO/22	314.730	323.854	210.675	849.259
SET/22	307.369	327.769	214.092	849.230
OUT/22	284.600	371.781	219.869	876.250
NOV/22	272.537	355.807	216.912	845.256
DEZ/22	288.887	373.859	226.551	889.297
JAN/23	292.236	368.593	247.801	908.630
FEV/23	258.516	333.439	196.903	788.858
MAR/23	305,037	397.933	224.821	927.791
ABR/23	263.515	347.508	199.102	810.125
MAI/23	293.653	379.203	221.183	894,039
JUN/23	284.872	369.533	214.339	868.744
JUL/23	291.579	366.664	217.477	875.720
AGO/23	301.250	365.028	228.948	895.226
SET/23	298.579	361.940	221.512	882,031
OUT/23	309.819	368.646	234.338	912.803
NOV/23	302,004	356.123	223.761	881.889
DEZ/23	305.670	359.633	227.085	892.388
Total, em litros:				20.601.916

Fonte: Secretaria de Trânsito e Transportes de Uberlândia/MG. Adaptado pelo Autor.

APÊNDICE C - RELAÇÃO DE VEÍCULOS UTILIZADOS NO SISTEMA URBANO DE TRANSPORTE COLETIVO DE PASSAGEIROS NA CIDADE DE UBERLÂNDIA, NO ANO DE 2022

CONCESSIONÁRIA	ANO	CARROCERIA	TIPO DE VEÍCULO	TOTAL
EMPRESA B	2008	DOPPIO	ARTICULADO	4
	2009	DOPPIO	ARTICULADO	1
	2009	MEGA U	PADRON	37
	2012	MEGA U	PADRON	10
	2013	MEGA U	PADRON	14
	2015	TORINO U	PADRON	16
	2016	TORINO A	ARTICULADO	3
	2017	TORINO U	PADRON	11
	2019	APACHE VIP-SC U	PADRON	30
	2019	TORINO U	PADRON	30
SORRISO DE MINAS TOTAL:				156
EMPRESA A	2009	APACHE VIP-SC U	PADRON	64
	2011	APACHE VIP-SC U	PADRON	2
	2012	APACHE VIP-SC U	PADRON	5
	2012	MILLENNIUM BRT - ARTICULADO	ARTICULADO	8
	2013	APACHE VIP-SC U	PADRON	4
	2013	MILLENNIUM BRT U	PADRON	2
	2014	MEGA U	PADRON	7
	2014	MILLENNIUM BRT U	PADRON	10
	2018	APACHE VIP-SC U	PADRON	6
	2019	APACHE VIP-SC U	CONVENCIONAL	19
	2019	APACHE VIP-SC U	PADRON	22
AUTOTRANS TOTAL:				149
EMPRESA C	2009	TORINO U	ARTICULADO	6
	2009	TORINO U	PADRON	17
	2010	TORINO U	PADRON	11
	2011	TORINO U	PADRON	3
	2014	TORINO U	PADRON	1
	2015	TORINO U	PADRON	78
	2020	APACHE VIP-SC U	PADRON	21
SÃO MIGUEL TOTAL:				137
Total Geral				442

Fonte: Secretaria de Trânsito e Transportes de Uberlândia/MG. Adaptado pelo Autor.

APÊNDICE D - EMISSÃO ESTIMATIVA DOS POLUENTES PESQUISADOS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG, NO PERÍODO DE 2022 E 2023

Resumo da emissão de poluentes em (t) da frota geral, no período pesquisado.													
MP		CO		NO_x		HC		CO₂		CH₄		N₂O	
2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
41,61	43,43	2228,78	2179,83	4150,58	4319,34	365,34	361,19	0,00	0,00	308,28	312,21	193,41	197,43
85,04		4408,61		8469,92		726,53		0,00		620,49		390,84	
Resumo da emissão de poluentes em (t) da frota o (SIT), no período pesquisado.													
MP		CO		NO_x		HC		CO₂		CH₄		N₂O	
2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
1,52	1,37	20,45	20,81	107,60	101,48	2,66	2,36	0,00	0,00	1,43	1,43	0,72	0,72
2,89		41,27		209,09		5,03		0,00		2,86		1,44	
Total combinado de ambos os grupos no ano													
2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
43,13	44,80	2249,24	2200,64	4258,19	4420,82	368,01	363,55	1422,26	1550,62	309,71	313,63	194,13	198,16
87,93		4492,35		8678,69		731,56		2972,88		623,35		392,28	

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE E - EMISSÃO ESTIMATIVA DOS POLUENTES PESQUISADOS NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG

Poluente	1º lugar (maior emissão)	2º lugar	3º lugar
MP	Diesel	Gasol (motocicletas)	Etanol (motocicletas)
CO	Diesel (tratores)	Etanol (caminhonetas)	Gasol (motocicletas)
NOx	Diesel	Etanol	Gasol
HC	Diesel (ônibus SIT)	Etanol (caminhonetas)	Gasol (motocicletas)
CO ₂	Diesel	Etanol	Gasol
CH ₄	Diesel (ônibus rodoviários)	Etanol (caminhonetas)	Gasol (motocicletas)
N ₂ O	Diesel	Etanol	Gasol

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados médios individuais da frota

APÊNDICE F - FUNDAMENTAÇÃO DE ESTUDOS RELACIONADOS

Segundo a legislação brasileira de 2018, CONAMA 491, é permitida a emissão média anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$, configurando um padrão mais próximo da realidade das comunidades mais poluídas dos EUA. Os estudos mencionados sobre a concentração de $\text{MP}_{2,5}$ explicitam que aumentos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de $\text{MP}_{2,5}$ pioram significativamente a função pulmonar, aumentam a chance de pneumonia, influenza, câncer de pulmão, asma e mortalidade cardiopulmonar. Portanto, as concentrações permitidas por lei estão superiores aos valores que causam deterioração da saúde do sistema respiratório.

Fazendo um paralelo entre o estudo realizado em Pequim, durante os jogos olímpicos, com a legislação CONAMA 491, tem-se que, no Brasil, são permitidos até $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{MP}_{2,5}$ em momentos de emissões agudas deste poluente. Dessa maneira, conclui-se que este limite é próximo às margens superiores de emissão em Pequim, China, em períodos de maiores concentrações emitidas de $\text{MP}_{2,5}$. A referida resolução menciona, deixando de forma esclarecedora que se orienta pelos padrões da OMS, mas, isso não ocorre de fato no estabelecimento dos chamados padrões de qualidade do ar intermediários, estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas.

Vale ainda mencionar que a regulamentação da Resolução CONAMA nº 491/2018 busca o padrão final, contudo, passados 19 anos da apresentação dos relatórios da OMS, visto como metas, ela não estabelece períodos concretos entre os estágios intermediários dos três Padrões de Qualidade Intermediários e a etapa final. Dessa maneira, estimula a inércia de qualquer tentativa de atingir os limites mais restritivos. Afinal, a razão da existência de padrões intermediários é que eles funcionem efetivamente como objetivos temporários, levando de forma escalonada ao alcance dos padrões finais. Isso exigiria mecanismos e prazos que pudessem efetivamente estimular a progressão para os padrões mais restritivos ao longo do tempo.

No que diz respeito ao aerossol submicrométricos, as pesquisas ainda são escassas, não havendo limite de concentração estabelecido.

**ANEXO A - RELAÇÃO DE PASSAGEIROS TRANSPORTADOS, NÚMERO DE VIAGENS E QUILOMETRAGEM PERCORRIDA
NO SIT, NO ANO DE 2022**

Mês	Inteiras (dinheiro)	Vales (VT)	Estudante	Idoso (60 a 65 anos)	Idoso (acima de 65 anos)	Viagens programadas	Viagens realizadas	Total quilometragem
JAN	747.970	1.518,378	67.258	89.442	128.564	103.325	101.802	2.031.282
FEV	766.989	1.557,075	214.891	93.507	132.618	94.824	93.385	1.850.723
MAR	852.595	1.829,570	354.499	115.025	166.612	108.875	107.635	2.131.770
ABR	769.511	1.656,781	347.364	105.634	154.218	110.839	109.077	2.133.322
MAI	843,056	1.845,928	503.946	118.306	193.847	121.021	119.919	2.224.475
JUN	793.424	1.810,032	487.403	123.923	225.006	116.772	115.827	2.250.992
JUL	769.092	1.811,120	355.394	126.759	235.925	119.004	118.181	2.175.220
AGO	779.636	1.859,657	483.306	134.017	250.205	117.470	116.547	2.170.630
SET	747.644	1.825,645	483.292	135.082	254.563	115.353	114.173	2.126.499
OUT	727.780	1.779,799	474.360	132.618	250.944	117.656	116.553	2.168.534
NOV	728.747	1.764,111	477.103	133.765	257.038	113.995	113.061	2.089.431
DEZ	744.671	1.750,405	304.083	131.781	252.284	122.369	121.198	2.211.615
Total	9.271.115	21.008.501	4.552.899	1.439.859	2.501.824	1.361.508	1.347.362	25.564.493
Média	772.593	1.750.708	379.408	119.988	208.485	113.459	112.280	2.130.374

Fonte: Secretaria de Trânsito e Transportes de Uberlândia/MG).