UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Gabriela Nogueira de Oliveira Carvalho

Avaliação das emissões de poluentes atmosféricos pela frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora
2026

Gabriela Nogueira de Oliveira Carvalho

Avaliação das emissões de poluentes atmosféricos pela frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: Emissões atmosféricas.

Orientador: Profa. D.Sc. Aline Sarmento Procópio

Juiz de Fora

2026

Carvalho, Gabriela Nogueira de Oliveira.
Avaliação das emissões de poluentes atmosféricos pela frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora / Gabriela Nogueira de Oliveira Carvalho. -- 2026.
49 p. : il.

Orientadora: Aline Sarmento Procópio
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2026.

1. Emissões atmosféricas. 2. Transporte rodoviário. 3. Gases de efeito estufa. I. Procópio, Aline Sarmento, orient. II. Título.

Gabriela Nogueira de Oliveira Carvalho

Avaliação das emissões de poluentes atmosféricos pela frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária. Área de concentração: Emissões atmosféricas.

Aprovada em 15 de janeiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Profª. D.Sc. Aline Sarmento Procópio - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª. D.Sc. Maria Helena Rodrigues Gomes

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Otávio Eurico de Aquino Branco

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por traçar a rota, guiar meus passos e me sustentar ao longo dessa jornada tão longa e sinuosa. Mesmo nos momentos mais escuros, Sua luz iluminou meu caminho, trazendo esperança e a certeza de que tudo estava sob Seu controle. Sua mão foi essencial para que eu chegasse até aqui, e sem Ele nada faria sentido.

Aos meus pais, minha eterna gratidão por me apoiarem de todas as formas. Sem vocês, nada disso teria sido possível. Cada palavra de incentivo, cada oração, cada gesto de cuidado e cada confiança depositada em mim foram fundamentais para essa conquista, que é de vocês também.

Ao Cleider, que no início dessa jornada era apenas um desconhecido, mas que se tornou meu melhor amigo, namorado, marido e uma das pessoas mais especiais que conheço. Obrigada por me incentivar e apoiar todos os dias, por enxugar tantas lágrimas minhas e vibrar intensamente a cada vitória. Você é meu porto seguro e meu exemplo de dedicação e talento.

À minha orientadora Aline, cuja história inspiradora me fez apaixonar ainda mais pela área e acreditar no meu potencial. Agradeço por todo o suporte, paciência e dedicação, por me acalmar nos momentos de insegurança e por tornar esse processo mais leve e possível.

Às minhas amigas. Nicole, que esteve comigo desde o primeiro dia, dividindo comigo tantas alegrias, frustrações e vencendo os desafios juntas. Às que conheci na minha retomada ao curso, Eduarda, Lidiane e Sofia, que me acolheram quando eu ainda estava tentando me reencontrar; juntas compartilhamos a carga e formamos uma ótima equipe. Às de infância, Letícia e Hannah, que sempre estiveram comigo em cada momento importante e torcem por cada vitória minha. Às que Deus colocou no meu caminho, Millainy e Paulinha, por cada oração, cada conselho e por vibrarem comigo a cada conquista.

À equipe Mináguas, por todo apoio, e a todos os colegas que conquistei lá, que também foram essenciais para meu crescimento.

A todos os colegas e professores que conheci ao longo da faculdade e que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória. A toda minha família e à igreja, que nunca deixaram de orar por mim e de acreditar que esse sonho seria possível, deixo meu sincero agradecimento.

RESUMO

O setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões de poluentes atmosféricos, contribuindo tanto para as mudanças climáticas quanto para a degradação da qualidade do ar em áreas urbanas. Nesse contexto, os inventários de poluentes atmosféricos são instrumentos essenciais para uma gestão ambiental eficiente, pois permitem identificar as principais fontes de emissão, quantificá-las e adotar medidas de mitigação. Este estudo tem por objetivo avaliar as emissões atmosféricas pela frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), considerando os gases de efeito estufa dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (N_2O) e poluentes atmosféricos locais, como o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). A análise foi realizada com base nos dados de consumo de combustíveis da frota institucional no período analisado, bem como nas características dos veículos, como tipo, idade e combustível utilizado. Os cálculos utilizados neste trabalho baseiam-se nas metodologias estabelecidas pelo GHG *Protocol*, pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e pela Companhia Estadual do Estado de São Paulo (CETESB). Os resultados indicaram que as emissões de dióxido de carbono estão diretamente relacionadas ao consumo de combustível, apresentando pouca variação com a renovação da frota, enquanto os poluentes atmosféricos locais mostraram maior sensibilidade à idade e à tecnologia dos veículos, com destaque para veículos mais antigos, que contribuem de forma desproporcional para as emissões totais. A análise de cenários de mitigação evidenciou que estratégias combinadas, envolvendo a renovação da frota e a adoção de combustíveis biodegradáveis, apresentam maior potencial para a redução das emissões. Espera-se que o estudo contribua para o planejamento ambiental da instituição, contribuindo para a elaboração de políticas de sustentabilidade e melhoria da qualidade do ar no Campus.

Palavras-chave: Emissões atmosféricas; setor de transportes; gases de efeito estufa; qualidade do ar; poluentes atmosféricos.

ABSTRACT

The transport sector is one of the main contributors to atmospheric pollutant emissions, contributing both to climate change and to the degradation of air quality in urban areas. In this context, atmospheric pollutant inventories are essential tools for effective environmental management, as they allow the identification of the main emission sources, their quantification, and the adoption of mitigation measures. This study aims to evaluate atmospheric emissions from the vehicle fleet of the Federal University of Juiz de Fora (UFJF), considering the greenhouse gases carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O), as well as local air pollutants such as carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and particulate matter (PM). The analysis was based on fuel consumption data from the institutional fleet over the analyzed period, as well as vehicle characteristics such as type, age, and fuel used. The calculations applied in this study are based on methodologies established by the GHG Protocol, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and the Environmental Company of the State of São Paulo (CETESB). The results indicated that carbon dioxide emissions are directly related to fuel consumption, showing little variation with fleet renewal, while local air pollutants showed greater sensitivity to vehicle age and technology, particularly older vehicles, which contribute disproportionately to total emissions. The analysis of mitigation scenarios indicated that combined strategies involving fleet renewal and the adoption of bio-based fuels present greater potential for emission reductions. It is expected that this study will contribute to the institution's environmental planning and support the development of sustainability policies and improvements in air quality on Campus.

Keywords: Atmospheric emissions; transport sector; greenhouse gases; air quality; air pollutants.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO **7**
1. INTRODUÇÃO **8**
2. OBJETIVOS **11**
2.1. Objetivos específicos 11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **12**
3.1. Caracterização do setor de transportes no Brasil 12
3.2. Principais poluentes veiculares 13
3.2.1. Gases de Efeito Estufa (GEEs) 13
3.2.2. Poluentes locais 15
3.3. Combustíveis 16
3.4. O PROCONVE e o PROMOT 18
3.5. Inventário de emissões 19
4. METODOLOGIA **21**
4.1. Área de estudo 21
4.2. Coleta de dados e limites do inventário 22
4.3. Metodologia de cálculo 23
4.3.1. Cálculo das emissões dos Gases de Efeito Estufa (CO_2, CH_4 e N_2O) 23
4.3.2. Cálculo das emissões dos poluentes locais (CO, NO_x e MP) 26
4.3.3. Cálculo das emissões relativas ao ônibus a biodiesel 27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES **29**
5.1. Caracterização da frota 29
5.2. Emissões da frota 31
5.3. Cenários de mitigação 37
6. CONCLUSÃO **43**
REFERÊNCIAS **45**

APRESENTAÇÃO

O Presente trabalho foi elaborado e avaliado no formato de monografia, de acordo com as normas definidas Resolução nº 17/2023 do Colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF, como pré-requisito para aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso II (ESA098).

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço industrial e o crescimento das atividades antrópicas, as emissões atmosféricas têm aumentado em todo o mundo, tornando-se uma das principais preocupações ambientais dos últimos anos. Segundo o *World Resources Institute Brasil* (WRI Brasil, 2021) a maior fonte de emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE) no mundo é a queima de combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel. O uso intensivo desses combustíveis, especialmente nos setores de transporte, geração de energia e processos industriais, tem elevado significativamente a concentração de gases e partículas na atmosfera, contribuindo tanto para as mudanças climáticas globais na intensificação do efeito estufa, quanto para a piora da qualidade do ar, afetando a saúde da população.

As principais evidências das mudanças climáticas incluem o aumento da temperatura média global, a elevação do nível do mar, o derretimento das calotas polares e glaciais, e o aumento na frequência de eventos extremos (WRI Brasil, 2023). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), a temperatura média da superfície global entre 2011 e 2020 foi 1,1 °C superior à média dos períodos de 1850 a 1900. O documento ainda reforça que esse aumento está diretamente associado ao crescimento das emissões de GEE provenientes de atividades antrópicas, que aumentaram cerca de 54% entre os anos de 1990 e 2019.

Diante desse cenário, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2024) destaca que, para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C, conforme indicado no Acordo de Paris, seria necessária uma redução de 42% das emissões de GEE até o ano de 2030, em relação aos níveis de 2019. Entretanto, as concentrações desses gases continuam a aumentar de forma constante até os dias atuais. De acordo com o relatório *State of the Global Climate* - 2024, publicado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2025), as concentrações dos três principais GEE na atmosfera (dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) atingiram níveis recordes em 2023. Outro marco apontado por este relatório foi o ano de 2024, considerado o ano mais quente dos últimos 175 anos, com média de 1,55 °C acima do período pré-industrial.

As emissões de GEE têm origem em cinco grandes setores econômicos: energia, agricultura, processos industriais, resíduos e uso da terra, mudança do uso da terra e silvicultura. Entre esses, o setor de energia é o principal responsável pelas emissões globais, respondendo por aproximadamente 75,7% do total em 2021 (WRI, 2024). Esse setor compreende as emissões

provenientes da geração de eletricidade e calor, dos transportes, da indústria, da construção civil e dos edifícios, além das emissões fugitivas e da combustão de outros combustíveis. Dentro desse conjunto, o transporte rodoviário destaca-se como uma das principais fontes emissoras, correspondendo a cerca de 12,2% das emissões globais de GEE, o que evidencia sua relevância nas estratégias de mitigação voltadas ao setor energético (WRI, 2024).

No contexto brasileiro, o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2025a) aponta que o país emitiu cerca de 2145,23 $MtCO_2e$ em 2024, sendo o setor de energia responsável por 19,8% dessas emissões e o setor de transportes por mais da metade dessa parcela (52,3%). Ainda, de acordo com o SEEG (2024), em 2023 o setor de energia teve um acréscimo de 1,1 % em suas emissões em relação ao ano de 2022, devido ao aumento do consumo de óleo diesel, gasolina e querosene de aviação, causando uma elevação de 3,2% nas emissões de transporte, que chegaram a seu recorde histórico. Em Minas Gerais o setor é responsável por uma parcela ainda maior, das 189,96 $GtCO_2e$ emitidas no estado, no ano de 2024, sendo 38,76% referentes ao setor de energia, onde 62,7% dessa fração é oriunda do transporte (SEEG, 2025b).

Além dos GEEs, o setor de transportes também é uma das principais fontes de poluentes atmosféricos de impacto local, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO) e o material particulado (MP). Esses poluentes, embora não contribuam diretamente para o aquecimento global, são danosos à saúde humana e exercem forte impacto sobre a qualidade do ar, comprometendo a saúde e a qualidade de vida da população residente em áreas urbanas. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2014), há 7 milhões de mortes prematuras anualmente devido aos efeitos da poluição do ar e outras milhões pessoas adquirem doenças respiratórias, caracterizando a poluição atmosférica como a maior ameaça ambiental à saúde e uma das principais causas de doenças não transmissíveis.

No Brasil, as emissões veiculares representam uma das principais fontes de poluição atmosférica nos centros urbanos, especialmente devido à alta densidade de frota e ao uso predominante de combustíveis fósseis. Cerca de 90% das emissões de poluentes atmosféricos são oriundos da queima de combustíveis de veículos do modal rodoviário (Corrêa, 2010). Para mitigar esses impactos, uma das medidas adotadas pelo país foi a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), com o objetivo de reduzir progressivamente as emissões veiculares por meio do estabelecimento de limites máximos e da adoção de novas tecnologias automotivas e combustíveis mais limpos (IBAMA, 2022).

Apesar dos avanços do arcabouço legal brasileiro e no crescimento do uso de biocombustíveis, as emissões veiculares ainda representam um grande desafio para a redução de poluentes e GEE. Nesse contexto, a identificação das emissões veiculares, bem como a contribuição de cada tipo de veículo para o total emitido, são essenciais para subsidiar medidas eficazes de controle e mitigação. Diante disso, os inventários de emissões atmosféricas são instrumentos de gestão essenciais, pois permitem estimar as emissões, identificar as principais fontes poluidoras e priorizar ações mitigadoras, auxiliando o poder público e privado na tomada de decisões voltadas à melhoria da qualidade do ar e as estratégias de sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo principal estimar as emissões dos poluentes atmosféricos dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP), provenientes da frota veicular da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) - Campus Juiz de Fora, para os anos de 2022, 2023 e 2024.

2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar a frota veicular da Campus, quanto ao tipo de veículo, combustível utilizado e ano de fabricação.
- Estimar as emissões anuais de CO_2, CH_4, N_2O, CO, NO_x e material particulado associadas à frota, a partir dos dados de consumo de combustível e fatores de emissão.
- Avaliar a contribuição dos diferentes tipos de veículos para as emissões totais da frota.
- Quantificar as emissões de gases de efeito estufa em CO_2 equivalente (CO_2e).
- Simular e analisar cenários de mitigação das emissões da frota veicular.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Caracterização do setor de transportes no Brasil

O setor de transportes é fundamental na economia e na demanda energética do país. Conforme a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2024), entre os anos de 2000 e 2023, o consumo de energia total do Brasil teve uma elevação de 1,9% ao ano, enquanto o consumo do setor de transportes aumentou cerca de 2,6% ao ano, devido principalmente ao aumento da renda da população de forma geral e do número de veículos circulantes. Nesse período, a participação dos transportes no consumo final energético passou de 28% para 33%, destacando-se como um dos principais setores de consumo de energia no Brasil (EPE, 2024).

De acordo com distribuição modal da atividade de transportes em 2023 no Brasil (EPE, 2024), o transporte de cargas é majoritariamente rodoviário, responsável por 71,0% do total movimentado em tonelada-quilômetro útil (tku), seguido por 16,5% do ferroviário e 12,3% do aquaviário, enquanto o transporte aéreo é praticamente irrelevante (0,0%). Essa composição evidencia que o sistema logístico nacional continua concentrado em caminhões para o escoamento agrícola, industrial e comercial, mesmo em longas distâncias onde modais mais eficientes poderiam ter maior participação. Da mesma forma acontece no transporte de passageiros, 68% da atividade é atendida pelo transporte rodoviário individual e 25 % correspondem ao transporte rodoviário coletivo 25% (EPE, 2024).

Essa predominância do modo rodoviário também se reflete no consumo energético nacional. Em 2023, o setor de transportes representou 33% de todo o consumo final de energia do país, ampliando sua participação em relação ao início dos anos 2000 em 2,6% a.a., justificado principalmente pelo aumento da renda e do consumo da população (EPE, 2024). Segundo o último levantamento do IBGE (2024), os números de automóveis ultrapassam 60 milhões no Brasil, já as motocicletas chegam a cerca de 30 milhões, e as caminhonetes permanecem acima de 9 milhões, seguidas pelos caminhões com mais de 3 milhões. Já em relação à distribuição territorial dessa frota destaca-se a região Sudeste, que representa a maior parcela do total de veículos registrados no país, especialmente os estados de São Paulo e Minas Gerais.

Ainda, de acordo com as projeções do Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, o transporte rodoviário no país tende a manter sua preferência no transporte de passageiros, com aproximadamente 80% da demanda energética ao longo do período de 2024

ao ano de 2034 (EPE, 2024). Essa combinação do transporte brasileiro ser predominantemente rodoviário faz com que o setor seja altamente consumidor de energia, reforçando sua dependência em combustíveis fósseis e consequentemente responsável por parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos como CO, NO_x e material particulado.

3.2. Principais poluentes veiculares

Veículos automotores são as principais fontes de poluentes atmosféricos nos centros urbanos, devido à combustão de diferentes tipos de combustíveis, gerando gases e partículas lançadas principalmente por seus escapamentos (CORRÊA, 2010). Esses poluentes podem ser classificados conforme a abrangência de seus impactos, em escala local e global (IPEA, 2011). Os poluentes locais afetam diretamente o entorno das fontes, por terem pequeno tempo de permanência na atmosfera; dentre eles estão o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o material particulado (MP). Já os poluentes globais permanecem na atmosfera por um maior período e são transportados por longas distâncias, como é o caso do dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que constituem os Gases de Efeito Estufa (GEEs).

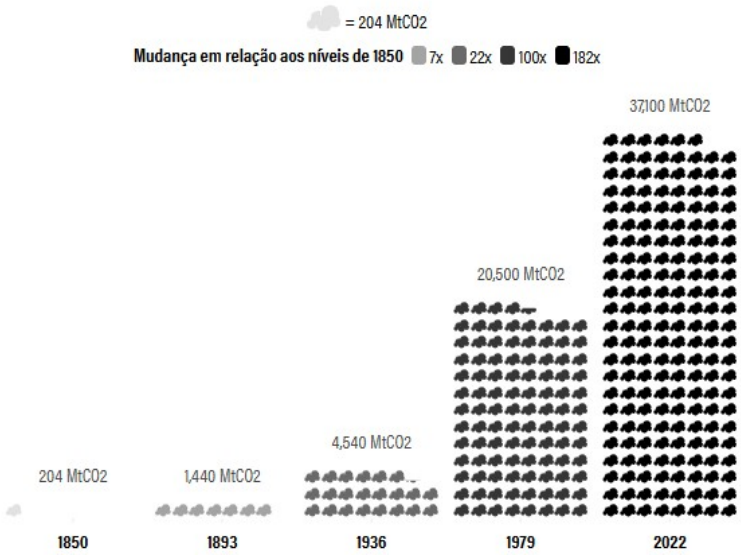
3.2.1. Gases de Efeito Estufa (GEEs)

O efeito estufa é um fenômeno natural essencial para a manutenção das condições de vida na Terra, responsável por reter parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e manter a temperatura média global em níveis adequados à sobrevivência das espécies (MCTI, 202-). No entanto, devido ao aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes das atividades humanas, esse fenômeno tem se intensificado, provocando o chamado aquecimento global e contribuindo para as mudanças climáticas observadas em todo o planeta.

O principal GEE antrópico é o dióxido de carbono (CO_2), emitido em grandes quantidades principalmente na combustão completa de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural). De acordo com *World Resources Institute Brasil* (WRI Brasil, 2024), as emissões globais de CO_2 decorrentes de atividades antrópicas em 2022 estavam 182 vezes acima do que em 1850, período da revolução industrial, conforme apresentado na Figura 1. O dióxido de

carbono (CO_2) é utilizado como unidade de equivalência para os demais gases de efeito estufa, apresentando o menor potencial de aquecimento global (*global warming potential* – GWP) sendo igual a 1. De acordo com a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), todos os inventários devem utilizar o CO_2 como referência, criando a unidade de CO_2 equivalente (CO_2eq) que serve como um comparativo do grau de aquecimento causado por um GEE em relação à mesma quantidade de CO_2 (IPCC,2006; FGV, 2022).

Figura 1: Emissões Globais de Dióxido de Carbono de 1850 a 2022



Fonte: WRI Brasil, 2024.

Outro importante GEE é o metano (CH_4), produzido através da decomposição da matéria orgânica e da combustão veicular. Seu potencial de aquecimento global (GWP) 28 vezes maior que o dióxido de carbono em um período de 100 anos e sua molécula pode permanecer na atmosfera por até 20 anos (OC, 2015). Já as emissões de óxidos nitrosos (N_2O) na queima de combustíveis variam conforme o tipo de combustível e da tecnologia de combustão. Seu potencial de aquecimento global (GWP) equivale a 265 vezes a mais que o CO_2 (EPA, 2025).

3.2.2. Poluentes locais

Os poluentes atmosféricos locais oriundos de fontes veiculares são compostos que geralmente ficam retidos na parte mais baixa da troposfera. Alguns hidrocarbonetos e o NO_x reagem com a radiação solar e dão origem a um fenômeno de ocorrência comum em áreas urbanas, denominado *smog* fotoquímico, cujo principal poluente gerado é o ozônio (O_3). A exposição a esse tipo de poluição pode causar riscos à saúde humana, como doenças respiratórias (asma, bronquite e enfisema), além de estar associada ao aumento de mortalidade prematura em populações expostas por longos períodos (EPA, 2025).

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico derivado da queima incompleta de combustíveis em motores veiculares. Trata-se de um gás incolor, inodoro e insípido e ligeiramente mais denso que o ar, por isso tende a se acumular nas camadas da atmosfera mais próximas à superfície, contribuindo para a deterioração da qualidade do ar local. A inalação desse gás interfere diretamente no transporte de oxigênio no sangue (Dutra, 2007).

Já os óxidos de nitrogênio (NO_x) são compostos formados por cerca de 90% de monóxido de nitrogênio (NO) e 10% de dióxido de nitrogênio (NO_2), emitidos a partir do processo de combustão. A formação de NO_x depende do teor de nitrogênio do combustível, mas também ocorre via rota térmica, quando o nitrogênio presente no ar reage com o oxigênio sob altas temperaturas, ou seja, quanto maior a temperatura do gás queimado, maior a taxa de formação de NO_x. Conforme mencionado anteriormente, esses compostos contribuem para a formação do *smog* fotoquímico e também da chuva ácida (Dutra, 2007; CETESB, 202-)

O material particulado (MP) é constituído por pequenas partículas em suspensão na atmosfera, emitidas principalmente por veículos a diesel, pela sua combustão incompleta, e pelas indústrias. Essas partículas, quando emitidas pelos escapamentos dos veículos são caracterizadas por uma fumaça escura, sendo denominada fuligem. Adicionalmente, os veículos também contribuem para a ressuspensão de poeira do solo. Essas partículas ficam em suspensão na atmosfera e podem penetrar nas vias respiratórias, alcançando os alvéolos pulmonares e provocando diversos efeitos adversos à saúde, como irritações, inflamações e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares (Dutra, 2007; CETESB, 202-).

3.3. Combustíveis

O transporte rodoviário brasileiro é formado majoritariamente por veículos com motores a combustão interna, baseados nos ciclos Otto e Diesel. Estes motores utilizam diferentes tipos de combustíveis fósseis e renováveis, que variam conforme o tipo de veículo e sua aplicação. A frota veicular nacional evoluiu muito ao longo dos anos, acompanhando o avanço tecnológico e as políticas de incentivo aos biocombustíveis (CETESB, 202-).

Conforme apresentado no Relatório Síntese 2025 do Balanço Energético Nacional (BEN, 2025), os principais combustíveis utilizados no transporte rodoviário brasileiro no ano de 2024 continuam sendo o óleo diesel, a gasolina e o etanol, cada um apresentando características distintas quanto à eficiência energética e ao perfil de emissões (EPE, 2025). De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 202-), os veículos leves de passageiros utilizam predominantemente gasolina e etanol hidratado. Já os veículos *flex-fuel* podem operar com gasolina ou etanol hidratado em qualquer proporção, característica que oferece maior versatilidade energética e econômica ao consumidor. As motocicletas, por sua vez, funcionam majoritariamente com gasolina, embora existam modelos *flex-fuel* capazes de utilizar etanol hidratado. Os comerciais leves apresentam maior diversidade, podendo empregar etanol, gasolina, GNV ou diesel, além de versões *flex-fuel*. Já os veículos pesados, como caminhões e ônibus, utilizam quase exclusivamente o óleo diesel como fonte de energia, devido à necessidade de maior torque e autonomia (CETESB, 202-).

Nos últimos anos, entretanto, nota-se um crescimento gradual do uso de biodiesel e da frota de veículos elétricos e híbridos no Brasil, conforme apresentado no Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN, 2025). Esse avanço é resultado das recentes alterações na política energética que reforçam o compromisso nacional com a descarbonização do setor de transportes. De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (BRASIL, 2025), em agosto de 2025, a mistura obrigatória de etanol anidro na gasolina foi ampliada de 27% para 30%, enquanto o teor de biodiesel no óleo diesel passou de 14% para 15%. Paralelamente, nota-se um incremento na adoção de tecnologias de eletrificação veicular, especialmente em áreas urbanas, impulsionado por programas de mobilidade sustentável e expansão da infraestrutura de recarga (EPE, 2025).

A gasolina é uma mistura líquida e inflamável, constituída por centenas de compostos hidrocarbonetos obtidos através do refino do petróleo. Suas moléculas podem variar de 5 a 12 átomos de carbono e pontos de ebulição variando entre 30 e 215 °C. Além dos hidrocarbonetos,

a gasolina também possui contaminantes tóxicos naturais em baixas concentrações, formados por compostos contendo enxofre, oxigênio, benzeno, metais e nitrogênio. São utilizadas em veículos e equipamentos do ciclo Otto, isto é, motores de pistão com ignição por centelha (ANP, 2020; CARVALHO, 2014). As gasolinas disponíveis para comercialização no Brasil possuem dois tipos. As gasolinas tipo A, que são aquelas sem adição de etanol anidro, obtidas diretamente nas refinarias, centrais petroquímicas e formuladores. Essas são comercializadas aos distribuidores de combustíveis, onde é adicionada teor estabelecido por lei de etanol anidro para compor a gasolina C, única permitida para venda nos postos de combustíveis no Brasil (ANP, 2020).

Assim como a gasolina, o diesel também é um combustível derivado do petróleo, utilizado principalmente nos veículos de motores ciclo Diesel, ou seja, de ignição por compressão, comumente usado em veículos rodoviários e de carga. Este combustível líquido é composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio (ANP, 2020). O diesel rodoviário comercializado no Brasil é dividido em dois tipos, S-500 e S-10, onde o número atrelado à nomenclatura está relacionado à quantidade de enxofre presente na sua composição (ppm). Além disso, este combustível possui obrigatoriamente uma parcela de biodiesel na sua formulação, que, conforme mencionado anteriormente, é de 15% atualmente (ANP, 2020; BRASIL, 2025). De acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC, 2025) o aumento da participação de biocombustíveis na matriz nacional busca reduzir custos de importação, estimular a economia interna e dar uma maior sustentabilidade à frota nacional.

O biodiesel e o etanol são combustíveis biodegradáveis e renováveis. O biodiesel é produzido a partir da quebra das moléculas de triglicerídeos contidas nos óleos vegetais e gorduras animais com álcool primário, metanol ou etanol. Um dos produtos resultado desse processo é o éster, que após sua purificação, é comercializado como biodiesel e pode ser aplicado em motores do ciclo diesel. (ANP, 2020). Segundo BEN (2025), o Brasil está entre os maiores produtores mundiais de biodiesel, sendo o óleo de soja a principal matéria-prima. Ainda, conforme apresentado no último relatório síntese de 2024 (EPE, 2024), o ano foi marcado pelo aumento do consumo de biocombustíveis no país, com uma elevação de 19,3% em relação a 2023, aumento esse impulsionado principalmente pelo consumo do diesel que teve uma elevação do percentual de adição do biodiesel ao diesel mineral.

O etanol por sua vez, é obtido através da fermentação de açúcares, como a cana de açúcar e o milho. Este é utilizado em motores do ciclo Otto, ou seja, de combustão interna com

ignição por centelhamento. Há dois tipos desse combustível: o etanol hidratado, que possui uma parcela de 4,9% de água e é utilizado diretamente nos veículos *flex-fuel* e o etanol anidro que é misturado à gasolina C e possui um teor de água de apenas 0,4% (ANP, 2020; UFV, 2020). Em 2024 houve um aumento do consumo de etanol hidratado de 30,1% comparado ao ano de 2023, justificado pela maior competitividade do biocombustível em relação à Gasolina C e pelo aumento da utilização do milho como matéria prima na produção do etanol (EPE, 2024).

3.4. O PROCONVE e o PROMOT

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) foi instituído em 6 de maio pela Resolução CONAMA 18/1986 (CONAMA, 1986), com o objetivo principal de reduzir as emissões de poluentes de veículos automotores para atender os padrões de qualidade do ar, além de promover o desenvolvimento tecnológico e melhorar a qualidade dos combustíveis. O programa é coordenado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e estabelece limites progressivos de emissão, além de incentivar a adoção de tecnologias mais limpas nos motores e combustíveis utilizados no país (IBAMA, 2022). Esses limites foram estabelecidos de acordo com o peso e característica de cada veículo. As fases “L” são as aplicadas aos veículos leves, como automóveis e comerciais leves, já as fases “P” são as destinadas aos veículos pesados, como caminhões e ônibus. A cada fase nova há a implementação de padrões mais restritivos, sem um tempo determinado entre cada uma (CETESB, 202-). Atualmente, o programa encontra-se nas fases L8 (veículos leves) e P8 (pesados) (CETESB, 202-).

Alguns marcos importantes na qualidade dos combustíveis aconteceram a partir de 1970, com a obrigatoriedade da mistura de etanol anidro na gasolina, porcentagem essa que variou ao longo desses anos de 5% até os dias atuais com 30%. Já por volta da década de 90 houve a eliminação do chumbo na composição do combustível gasolina, estabelecendo então a parcela de 20% de etanol anidro à gasolina. Nessa mesma época, aconteceram alguns avanços na tecnologia dos veículos, e as fases L2 e L3 do PROCONVE foram marcadas também pela substituição do carburador dos veículos pela injeção eletrônica, tecnologia que permite maior precisão na dosagem de combustível e controle mais eficiente da combustão, possibilitando o uso de catalisadores de alta eficiência e resultando em reduções expressivas nas emissões veiculares. A tecnologia de injeção eletrônica de diesel chegou para os veículos pesados por volta dos anos 2000, e a partir de 2012 iniciou-se a adoção generalizada da tecnologia SCR

(*Selective Catalytic Reduction*), voltada para a redução dos óxidos de nitrogênio (NO_x), um dos principais poluentes gerados por motores a diesel.

Com o aumento da utilização das motocicletas, foi necessária uma atenção a esses veículos, sendo assim, em 2002 criou-se o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), estabelecido pela Resolução CONAMA nº 297/2002 (CONAMA, 2002), com o mesmo propósito do PROCONVE, porém voltado para motocicletas, ciclomotores e triciclos motorizados. Assim como o PROCONVE, o PROMOT também foi organizado pelo estabelecimento de fases progressivamente restritivas e pela atualização das tecnologias das motocicletas. Os primeiros limites de emissões foram estabelecidos no início do ano de 2003, e em 2009, com a implementação do PROMOT 3, todos os modelos de ciclomotores e motociclos novos e em produção no Brasil passaram a adotar sistemas de controle de emissões similares aos dos automóveis, promovendo expressiva melhoria na qualidade do ar urbano (CETESB, 202-; IBAMA, 2022).

3.5. Inventário de emissões

Os inventários de emissões são instrumentos fundamentais para a quantificação, organização e análise das emissões atmosféricas provenientes de atividades humanas, permitindo identificar fontes emissoras, estimar a magnitude das emissões e acompanhar sua evolução ao longo do tempo. (IEMA, 2023). No contexto atual, marcado pelo agravamento das mudanças climáticas, os inventários de emissões assumem papel central na gestão estratégica ambiental, pois auxiliam a atuação de instituições públicas e privadas, bem como a formulação, implementação e acompanhamento de políticas ambientais. A partir dessas informações, é possível avaliar impactos ambientais, estabelecer metas de redução de emissões e avaliar estratégias de mitigação e adaptação.

Os inventários são indispensáveis para gestão da qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas, onde o setor de transportes figura entre as principais fontes de poluição atmosférica. Já no contexto de Gases de Efeito Estufa, os inventários de GEE são essenciais para a compreensão das contribuições de cada setor para as emissões totais e ao acompanhamento de compromissos climáticos assumidos por governos e organizações (WAYCARBON, 2023)

No Brasil, a consolidação dos inventários nacionais de emissões veiculares representou um avanço importante para os estudos ambientais e climáticos. A divulgação do Primeiro

Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (IEMA, 2011) representou o primeiro documento em escala nacional a integrar dados de frota, consumo de combustíveis e emissões do transporte rodoviário, estabelecendo uma base técnica para o diagnóstico das emissões veiculares no país (ANTT, 2022). Dessa forma, os inventários nacionais passaram a padronizar metodologias, incorporar fatores de emissão voltados à realidade brasileira e fornecer subsídios técnicos para políticas públicas voltadas à mobilidade urbana e à qualidade do ar (BRASIL, 2013).

De modo geral, os inventários de emissões podem ser elaborados a partir de diferentes abordagens metodológicas, destacando-se os métodos *top-down* e *bottom-up*. A abordagem *top-down* utiliza dados agregados, como consumo total de combustíveis e estatísticas nacionais ou regionais, sendo amplamente aplicada em inventários nacionais e estaduais. Já a abordagem *bottom-up* baseia-se em dados detalhados de atividade, como características da frota, quilometragem percorrida e fatores de emissão específicos, permitindo estimativas mais precisas em escala local ou institucional (CRUZ, 2021). Ambas as metodologias são amplamente utilizadas em estudos de emissões veiculares e frequentemente aplicadas de forma complementar, de modo a aprimorar a representatividade dos resultados (BRASIL, 2013; CRUZ, 2021).

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) é uma instituição pública e gratuita de ensino superior, pesquisa e extensão, reconhecida entre as cem melhores universidades da América Latina (UFJF, 202-). Criada em 23 de dezembro de 1960, a instituição acumula mais de 60 anos de história, em que vem crescendo de forma contínua, com ampliação de sua infraestrutura física, expansão de cursos e consolidação de suas atividades. Atualmente a instituição oferece mais de 90 cursos de graduação, 45 programas de mestrado e 24 de doutorado, além de especializações e residências nas áreas de saúde, gestão e docência, onde há formação de cerca de 26 mil estudantes. Além disso, a Universidade ainda conta com um corpo técnico e docente formado por mais de 1.600 professores e 1.500 servidores técnico-administrativos, além de ampla infraestrutura composta por 18 bibliotecas, mais de 370 laboratórios e diversos programas de assistência estudantil, contribuindo para o desenvolvimento acadêmico e social da comunidade universitária. (UFJF, 202-)

A instituição está localizada no estado de Minas Gerais e conta com dois campi: o Campus Sede, situado no município de Juiz de Fora e o Campus de Governador Valadares. O Campus central abriga 19 unidades acadêmicas, enquanto o de Governador Valadares conta com duas unidades, ampliando o alcance educacional da instituição (UFJF, 202-). O Campus Sede Juiz de Fora é o responsável por concentrar a maior parte das atividades acadêmicas, administrativas e de pesquisa da instituição. Dessa forma, para garantir o pleno funcionamento dessas atividades e a mobilidade da comunidade universitária, o setor de transporte é essencial na gestão da frota de veículos da UFJF, sendo responsável pela manutenção, programação de viagens e atendimento de demandas emergenciais de docentes, discentes e servidores (UFJF, 202-). O setor realiza atendimentos tanto de deslocamentos internos quanto externos no município de Juiz de Fora, além de viagens intermunicipais e interestaduais. Também é responsável pela gestão e fiscalização dos contratos relacionados à manutenção automotiva, seguro total da frota e serviços de condução de veículos, assegurando o transporte eficiente e seguro das atividades institucionais (UFJF, 202-).

Figura 2 - Parte da frota veicular da UFJF adquirida em 2013.



Fonte: Tribuna de Minas, 2013.

4.2. Coleta de dados e limites do inventário

De acordo com as Especificações do Programa Brasileiro GHG *Protocol*, o primeiro passo para a elaboração de um inventário de emissões é estabelecer os limites geográficos, organizacionais e operacionais para a contabilização emissões de GEE, além de definir o ano-base do estudo, a fim de garantir resultados mais precisos e coerentes, que consigam representar as emissões da organização (FGV, 2022).

Nesse contexto, o estudo considerou apenas o Campus Juiz de Fora da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), com foco na quantificação das emissões provenientes da combustão móvel da frota veicular institucional. A escolha por delimitar o estudo à frota veicular da instituição deve-se ao fato de que os dados relativos aos veículos institucionais são registrados e monitorados de forma contínua pelo Setor de Transportes da UFJF, garantindo maior confiabilidade e controle sobre as informações. Além disso, houve dificuldades na obtenção de dados de outros setores da universidade, o que reforça essa escolha. Para a coleta de dados, foram realizados contatos telefônicos e reunião com a gerência do setor para um levantamento detalhado dos dados primários necessários ao cálculo das emissões. Segundo a FGV (2022), essa etapa é uma das mais complexas e exige maior tempo e esforço, sendo fundamental para assegurar a qualidade e a consistência dos resultados do inventário.

As emissões estimadas consideraram os anos de 2022, 2023 e 2024 como período de avaliação, possibilitando uma análise comparativa da evolução das emissões ao longo do tempo.

O recorte temporal foi definido em função da disponibilidade dos dados pela gerência de transportes da instituição.

4.3. Metodologia de cálculo

4.3.1. Cálculo das emissões dos Gases de Efeito Estufa (CO_2, CH_4 e N_2O)

Para as estimativas das emissões de GEE foi utilizado a Ferramenta de Cálculo de Emissões do GHG *Protocol* Brasil, versão mais recente disponível. O *Greenhouse Gas Protocol* (GHG *Protocol*) foi desenvolvido em 1998 pelo *World Resources Institute* (WRI) em parceria com o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), com o objetivo de estabelecer um padrão internacional para contabilização e elaboração de inventários corporativos de gases de efeito estufa (GEE). Compatível com as normas da ISO e com as metodologias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), o GHG *Protocol* tornou-se referência mundial na identificação, quantificação e gestão de emissões. No Brasil, o Programa Brasileiro GHG *Protocol* foi criado em 2008 pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces, 2024) da Fundação Getúlio Vargas e pelo WRI, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, o CEBDS e diversas empresas fundadoras, com a finalidade de adaptar a metodologia ao contexto nacional e disponibilizar ferramentas padronizadas para a elaboração e divulgação de inventários de emissões (FGVces, 2024; GHG Protocol, 2024)

Conforme as orientações internacionais estabelecidas pela UNFCCC e adotadas pelo Programa Brasileiro GHG *Protocol*, os cálculos de GEEs utilizam os valores de Potenciais de Aquecimento Global (GWP) definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) e atualizados periodicamente em seus relatórios de avaliação. Os GWPs são indicadores calculados para um horizonte de 100 anos que expressam a capacidade de um gás de efeito estufa de reter calor na atmosfera em comparação ao dióxido de carbono (CO_2), tomado como referência e tendo seu valor igual a 1. Esses coeficientes permitem converter diferentes gases para uma métrica comum, o dióxido de carbono equivalente (CO_2e), possibilitando a soma de todas as emissões dos GEEs. Os valores de Potenciais de Aquecimento Global (GWP) dos gases de efeito estufa, utilizados na plataforma para os cálculos são apresentados na Tabela 1 (FGVces, 2024).

Tabela 1: Valores de Potenciais de Aquecimento Global (GWP) por GEE

Fórmula	Nome	GWP
(CO_2)	Dióxido de carbono	1
(CH_4)	Metano	28
(N_2O)	Óxidos Nitrosos	265

Fonte: Adaptado de FGVces, 2024.

Além disso, para os combustíveis fósseis que possuem uma fração renovável em sua composição, como no caso da gasolina com adição de etanol anidro e do diesel com mistura obrigatória de biodiesel, o Programa Brasileiro GHG *Protocol* realiza a separação das emissões de CO_2 em duas parcelas distintas, a fração fóssil e a fração biogênica. A fração biogênica corresponde ao ciclo natural do carbono, absorvido pelas plantas, por isso suas emissões não aumentam a concentração de CO_2 na atmosfera, logo não contribuem para o agravamento do efeito estufa e então não são convertidas em CO_2e. Assim, a ferramenta de cálculo identifica a proporção de combustível fóssil e renovável utilizada em cada veículo, baseados no consumo dos combustíveis daquele ano de referência e aplica fatores de emissão correspondentes de cada fração.

As emissões de cada GEE (CO_2, CH_4 e N_2O) são calculadas separadamente e então convertidas a equivalente de CO_2 com base no seu potencial de aquecimento global, para a obtenção do valor total de emissão de CO_2 equivalente, conforme apresentado na Equação 1.

$$E\ (tCO_2e) = C * FE * GWP \quad (1)$$

Onde:

- E: Emissões (tCO_2e)
- C: Consumo de combustível (L)
- FE: Fator de Emissão (Kg GEE/L)
- GWP: Potencial de Aquecimento Global

Há três maneiras de calcular as emissões de transporte rodoviário disponíveis na ferramenta. São elas: (1) pelo tipo de combustível e ano de fabricação da frota, (2) pelo tipo de combustível e (3) pela distância percorrida por cada veículo. Entre essas opções, a primeira é

considerada a mais precisa e recomendada, pois incorpora informações específicas sobre a tecnologia dos veículos, refletindo melhor as características reais de consumo e emissão. Dessa forma, para este estudo optou-se por utilizar a opção 1, visto que os dados concedidos pelo Setor de Transportes da UFJF incluem o consumo anual de combustível e o ano de fabricação.

O fator de emissão para o dióxido de carbono (CO_2) utilizado nos cálculos da ferramenta foi obtido a partir do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2014). A metodologia utilizada neste inventário segue as diretrizes apresentadas no Relatório de Referência – Emissões por Queima de Combustíveis, elaborado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI, 2010), que adota a abordagem *bottom-up* descrita na Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC).

Os fatores de emissão são expressos em toneladas de carbono por terajoule (tC/TJ), e para sua aplicação no cálculo de emissões é necessário realizar a conversão para unidades de massa de dióxido de carbono por volume de combustível ($kgCO_2/L$), conforme a Equação 2 (MMA, 2014), que considera as relações de densidade energética, fração de oxidação do carbono e a razão estequiométrica entre as massas molares de CO_2 e C (44/12). Dessa forma, ao seguir os parâmetros estabelecidos, obtém-se o fator de emissão de dióxido de carbono (CO_2) correspondente a cada tipo de combustível utilizado.

$$\frac{KgCO_2}{L} = \frac{ton\ C}{TJ} * \frac{TJ}{tep} * \frac{tep}{m^3} * \%\ oxidação * \frac{44\ ton\ CO_2}{12\ tonC} \qquad (2)$$

Onde:

- Kg CO_2/L: Fator de emissão calculado em kg de dióxido de carbono por litro de combustível. ton C/TJ é o fator de emissão apresentado na Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC, em toneladas de carbono por Terajoule de combustível.
- TJ/tep: Fator de conversão de unidades de energia, de Terajoules para toneladas equivalentes de petróleo (tep), disponível no Balanço Energético Nacional 2012, EPE (2013).

- Tep/m³: Densidade energética em tep/m³. Para os anos anteriores a 2005, foram utilizados os valores apresentados na Comunicação Nacional do Brasil à CQNUMC, para os demais anos os valores se encontram no BEN.
- % Oxidação: Fração do carbono presente no combustível realmente oxidado na combustão, disponível na Comunicação Nacional do Brasil à CQNUMC.
- 44 tonCO_2/12 tonC: Relação entre as massas molares do CO_2 e do carbono.

Já os fatores de emissão para metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) variam conforme o tipo de combustível e o ano de fabricação dos veículos. Os valores adotados neste estudo foram obtidos a partir do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2014) e complementados com dados atualizados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2023), presentes nos Relatórios de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo 2023.

Com os fatores de emissão definidos, as emissões de cada gás foram calculadas por meio da multiplicação entre o fator de emissão e o consumo anual de combustível. Em seguida, as emissões individuais de CO_2, CH_4 e N_2O foram convertidas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), a partir da aplicação dos respectivos Potenciais de Aquecimento Global (GWP), conforme a equação 1 já apresentada. Por fim, a soma dos valores convertidos resultou no total de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associadas à frota veicular da UFJF.

4.3.2. Cálculo das emissões dos poluentes locais (CO, NO_x e MP)

As estimativas de emissões de poluentes atmosféricos locais da frota veicular da UFJF foram realizadas com base na metodologia *bottom-up*, que utiliza dados específicos de atividade da frota, como o consumo de combustível e as características dos veículos, associados a fatores de emissão apropriados. Essa abordagem foi adotada por permitir maior representatividade das condições reais de uso da frota, possibilitando estimativas mais precisas das emissões e uma análise consistente das contribuições individuais dos diferentes tipos de veículos.

Os cálculos foram realizados a partir da aplicação dos fatores de emissão disponibilizados anualmente pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. A planilha utilizada neste estudo foi a mais recente disponível, publicada no Inventários de Emissões Veiculares do Estado de São Paulo 2024 (CETESB, 2024). Para os cálculos, os fatores de

emissão foram convertidos de gramas por quilômetro (g/km) para quilogramas por litro de combustível gasto (kg/L), utilizando o consumo médio de combustível por tipo de frota, obtidos através de fontes como o Relatórios de Emissões Veiculares no Estado São Paulo (CETESB, 2023), do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 (MMA, 2014) e do UK *Government conversion factors for Company Reporting* (DEFRA, 2024).

A planilha da CETESB com os fatores de emissão possui valores médios de emissões para diferentes categorias de veículos (automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus urbanos, micro-ônibus e motocicletas), considerando o tipo de combustível (gasolina, etanol, diesel, biodiesel, GNV, etc.) e o ano de fabricação. Portanto, os veículos da frota da UFJF foram organizados dessa forma e em seguida, o consumo anual de combustível de cada um foi multiplicado pelo fator de emissão correspondente. Esses cálculos foram realizados em uma planilha desenvolvida no Microsoft Excel, criada especificamente para reunir os dados de entrada e automatizar as equações necessárias, facilitando o tratamento e a comparação entre categorias veiculares.

Por fim, os resultados das emissões de cada poluente (monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP)) foram convertidos para toneladas por ano (t/ano), para reporte final conforme os gases de efeito estufa calculados

4.3.3. Cálculo das emissões relativas ao ônibus a biodiesel

Para o veículo da frota movido a uma mistura com 30% de biodiesel (B30), destaca-se que sua operação na Universidade Federal de Juiz de Fora teve início apenas no ano de 2024. Dessa forma, as estimativas de consumo de combustível e de emissões atmosféricas associadas a esse veículo foram realizadas exclusivamente para o referido ano. Os dados do consumo real de combustível do veículo não foram disponibilizados por parte dos responsáveis pelo ônibus B30. Diante disso, o consumo anual de combustível em 2024 foi estimado de forma indireta, com base na média de consumo de cinco ônibus de mesma marca, modelo, ano de fabricação e demanda operacional, todos movidos a diesel comercial B15 e pertencentes à frota da instituição.

O combustível utilizado por esse ônibus é composto por uma mistura contendo 30% de biodiesel e 70% de diesel fóssil, sendo que a fração renovável é produzida a partir do reaproveitamento de óleo de cozinha usado, que é transformado em biodiesel. Para os cálculos

das emissões, primeiramente foi feita a separação da fração fóssil e da biodegradável do combustível. As emissões de dióxido de carbono (CO_2) fóssil foram estimadas aplicando-se o fator de emissão correspondente ao diesel convencional sobre a fração de 70% do combustível, enquanto as emissões de CO_2 biogênico foram calculadas com base no fator de emissão do biodiesel puro (B100), aplicado à fração renovável de 30%. Para os demais gases de efeito estufa, metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), as emissões foram estimadas utilizando-se os fatores de emissão do diesel convencional para ônibus urbanos, sem a separação entre as frações fóssil e renovável, conforme recomendado pelo GHG *Protocol.* Essa metodologia segue os procedimentos estabelecidos na ferramenta de cálculo do GHG *Protocol* Brasil para a quantificação de emissões associadas ao uso de biocombustíveis.

Cabe destacar ainda que, para esse veículo, não foram calculadas as emissões de poluentes atmosféricos locais (CO, NO_x e MP) devido à inexistência de fatores de emissão reconhecidos na literatura para misturas superiores ao teor obrigatório de biodiesel. Assim, as estimativas realizadas foram restritas às emissões de GEE, assegurando uma coerência metodológica com os demais veículos da frota.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização da frota

A caracterização da frota é fundamental para a elaboração do inventário, uma vez que o tipo de veículo, o combustível utilizado, idade da frota e intensidade de uso influenciam diretamente na caracterização das emissões atmosféricas. A frota veicular do Campus Juiz de Fora da UFJF é composta por 92 veículos no total, sendo 34 automóveis, 17 ônibus, 12 caminhões (baú, caçamba, pipa, *munck*), 8 vans, 6 motocicletas, 6 micro-ônibus, 5 kombis e 3 caminhonetes, responsáveis por atender às necessidades de transporte acadêmico, administrativo e operacional da instituição. Dentre os ônibus, destaca-se o grupo de 12 ônibus urbanos, conhecidos como circulares, que realizam o transporte diário de alunos, servidores e professores entre os setores do campus. Além desses, 4 automóveis e 6 motocicletas são destinadas às atividades de segurança do campus.

Em relação aos combustíveis utilizados, a frota apresenta veículos movidos majoritariamente a diesel com 56% de participação, veículos *flex-fuel* com uma parcela de 36%, que na prática utilizam apenas gasolina, e por veículos exclusivamente a gasolina representando aproximadamente 8% do total. Há ainda um veículo movido a biodiesel, que opera com mistura contendo aproximadamente 30% de biodiesel (B30). Quanto à distribuição da frota por ano de fabricação, apresentado na Tabela 2, observa-se uma concentração significativa de veículos produzidos entre 2006 e 2015, período que se destaca a maior quantidade de automóveis, ônibus e caminhões. Ainda, é possível notar também a presença de veículos mais antigos, com anos de fabricação variando entre 1973 e 2005, especialmente fabricados até 1999, abrangendo caminhões, ônibus, vans, kombis e caminhonetes. A frota atual ainda inclui dois veículos fabricados em 2024, classificados na faixa após 2020, que foram adquiridos apenas no final desse último ano, e por esse motivo ainda não haviam sido utilizados nos anos avaliados, não contribuindo para as estimativas de emissões consideradas neste estudo.

Tabela 2 - Distribuição da frota da UFJF por ano de fabricação.

Faixa de fabricação	Automóvel	Caminhão	Motocicleta	Van	Ônibus	Kombi	Caminhonete	Total:
Até 1999	0	2	0	1	1	1	3	8
2000 – 2005	0	0	0	1	0	0	0	1
2006 – 2010	10	4	5	2	9	4	0	34
2011 – 2015	24	6	1	4	12	0	0	47
2016 – 2020	0	0	0	0	0	0	0	0
Pós-2020	0	0	0	0	2	0	0	2
Total:	**34**	**12**	**6**	**8**	**24**	**5**	**3**	**92**

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Analisando a relação entre o ano dos veículos e o consumo de combustível da frota, percebe-se que os veículos fabricados nos anos de 2008, 2012 e 2014 são os que apresentam maiores consumos de combustível nos três anos avaliados, conforme apresentado na Tabela 3. Esses anos estão associados, principalmente, a veículos com maior uso diário, como os ônibus urbanos do tipo “circulares”, que rodam continuamente no campus, por isso, demandam maiores volumes de combustível. Destaca-se também o veículo fabricado em 1979, um ônibus antigo que, apesar de representar apenas uma unidade da frota, apresenta consumo elevado. Esse fato indica um veículo muito utilizado e com baixa eficiência, possivelmente relacionados ao desgaste mecânico do veículo e à tecnologia mais antiga do motor. De forma geral, os resultados mostram que o consumo de combustível está associado à intensidade de uso e à idade da frota.

Tabela 3 - Consumo anual de combustível por ano de fabricação dos veículos

Ano de fabricação	2022 (L)	2023 (L)	2024 (L)	Total (L)
1973	729,61	241,02	336,72	1307,35
1979	10796,98	16151,78	10824,59	37773,35
1993	3869,48	5167,85	4483,28	13520,61
1997	172,74	124,63	0	297,37
1998	0	46,35	0	46,35
2003	865,26	829,19	90,63	1785,08
2007	2003,7	3562,71	4259,09	9825,5
2008	20484,5	30821,57	20678,72	71984,79
2009	9678,36	21914,66	15295,32	46888,34
2010	4042,22	4089,57	4425,63	12557,42
2011	8298,73	6160,01	9339,09	23797,83
2012	17015,82	32102,65	25550,56	74669,03
2013	15134,7	19205,25	19307,29	53647,24
2014	32748,72	33907,92	28381,58	95038,22
Total (L):	125840,82	174325,16	142972,5	443138,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

5.2. Emissões da frota

A avaliação das emissões atmosféricas da frota veicular nos anos de 2022, 2023 e 2024 apresentaram algumas diferenças nos padrões anuais, relacionadas principalmente ao ano de fabricação dos veículos e ao consumo de combustível. As emissões dos poluentes avaliados (CO_2 fóssil, CH_4, N_2O, CO, NO_x e MP) estão apresentadas na Tabela 4. Observa-se que o ano de 2023 concentrou os maiores valores de emissões para a maioria dos poluentes, comportamento relacionado ao maior número de veículos em operação e ao aumento da atividade da frota nesse período. Em 2024, verificou-se uma redução das emissões em relação a 2023, acompanhando a diminuição do número de veículos ativos. O CO_2 fóssil destacou-se como o principal componente das emissões totais, refletindo diretamente o consumo de combustíveis fósseis, enquanto CH_4 e N_2O apresentaram valores praticamente constantes ao

longo dos anos analisados. Entre os poluentes locais, NO_x e MP mostraram maior sensibilidade às variações operacionais da frota, devido a predominância de veículos a diesel.

Tabela 4: Emissões totais da frota veicular por poluente atmosférico.

Ano-base	CO_2 fóssil (t)	CH_4 (t)	N_2O (t)	CO (t)	NO_x (t)	MP (t)	Veículos em operação
2022	279,54	0,02	0,02	0,40	1,46	0,05	84
2023	379,71	0,02	0,02	0,58	2,09	0,07	88
2024	300,99	0,02	0,02	0,49	1,54	0,05	83

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Ao analisar as emissões totais agregadas por ano de fabricação dos veículos apresentadas na Tabela 5, observa-se que determinados anos de fabricação há uma concentração significativa das emissões, especialmente os veículos fabricados em 2008, 2012 e 2014, que apresentam valores elevados em todos os anos avaliados. Esse comportamento indica que, além do ano de fabricação, a frequência de uso e a função operacional dos veículos exercem papel fundamental na determinação das emissões. Destaca-se ainda a contribuição do veículo fabricado em 1979 que, apesar de representar apenas uma unidade da frota, apresenta valores significativos de emissão, o que pode ser explicado pelo seu elevado consumo de combustível, relacionado a sua alta demanda na instituição e a baixa eficiência energética devido a seu ano de fabricação, anterior ao início do PROCONVE, ou seja, sem um sistema moderno de controle de emissões, conforme mencionado anteriormente.

Tabela 5: Emissões totais da frota veicular por ano de fabricação dos veículos para cada ano-base.

Ano da frota	Ano-base 2022	Ano-base 2023	Ano-base 2024	Total (t):
	Emissões (t)			
1973	1,76	0,57	0,77	3,11
1979	26,36	38,01	24,87	89,23
1993	9,31	12,07	10,22	31,60
1997	0,30	0,21	0,00	0,51
1998	0,00	0,11	0,00	0,11
2003	2,08	1,93	0,20	4,21
2007	4,75	8,25	9,64	22,64
2008	45,04	68,31	43,40	156,75
2009	22,65	50,30	33,23	106,18
2010	5,55	6,21	6,34	18,10
2011	23,46	16,60	24,12	64,18
2012	31,66	59,72	45,81	137,18
2013	30,60	39,72	38,23	108,55
2014	79,86	80,48	66,29	226,63
Total (t):	281,48	382,50	303,11	968,99

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Analisando ainda as Tabelas 6, 7 e 8 que apresenta as emissões por tipo de veículo em cada ano-base do estudo, é possível observar que os ônibus são os principais responsáveis pelas emissões totais da frota em todos os anos avaliados, especialmente para o dióxido de carbono (CO_2 fóssil). Esse resultado está associado ao uso de motores a diesel, à intensidade de uso desses veículos diariamente e consequentemente ao seu elevado consumo de combustível. Os caminhões também apresentam contribuição relevante, principalmente para os poluentes locais,

como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o material particulado (MP), características típicas de motores do ciclo diesel. Já os carros apresentam valores intermediários de emissão, refletindo sua maior participação numérica na frota, porém com menor consumo individual quando comparados aos veículos pesados. As motocicletas por sua vez, embora representem uma parcela menor da frota, contribuem de forma perceptível para as emissões de monóxido de carbono (CO), visto que a maioria são modelos fabricada em 2008, que pertencem a Fase M2 do PROMOT, com limites de emissão e tecnologias de controle menos restritivas quando comparados à fase M3, em vigor no ano seguinte, com limites de emissões mais rigorosos, principalmente para o CO.

Tabela 6: Emissões por tipo de veículo e poluente atmosférico no ano de 2022.

Tipo de veículo	**Quantidade**	**CO_2 fóssil (t)**	**CH_4 (t)**	**N_2O (t)**	**CO (t)**	**NO_x (t)**	**MP (t)**	**Total (t):**
Caminhão	11	28,84	0,00	0,00	0,02	0,15	0,01	29,02
Caminhonete	3	5,33	0,00	0,00	0,01	0,07	0,00	5,41
Carro	32	36,04	0,00	0,00	0,07	0,02	0,00	36,13
Kombi	5	4,88	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	4,90
Motocicleta	6	1,62	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	1,67
Ônibus	20	185,50	0,01	0,01	0,22	1,18	0,04	186,95
Van	7	17,33	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	17,39
Total:	84	279,54	0,02	0,01	0,40	1,46	0,05	281,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Tabela 7: Emissões por tipo de veículo e poluente atmosférico no ano de 2023.

Tipo de veículo	**Quantidade**	**CO_2 fóssil (t)**	**CH_4 (t)**	**N_2O (t)**	**CO (t)**	**NO_x (t)**	**MP (t)**	**Total (t):**
Caminhão	12	30,52	0,00	0,00	0,03	0,16	0,01	30,71
Caminhonete	3	6,75	0,00	0,00	0,02	0,09	0,00	6,86
Carro	33	60,55	0,00	0,01	0,11	0,02	0,00	60,69
Kombi	5	3,56	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	3,57
Motocicleta	6	2,49	0,00	0,00	0,08	0,01	0,00	2,57
Ônibus	21	256,97	0,02	0,01	0,33	1,76	0,06	259,14
Van	8	18,87	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	18,94
Total:	88	379,71	0,02	0,02	0,58	2,09	0,07	382,50

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Tabela 8: Emissões por tipo de veículo e poluente atmosférico no ano de 2024.

Tipo de veículo	**Quantidade**	**CO_2 fóssil (t)**	**CH_4 (t)**	**N_2O (t)**	**CO (t)**	**NO_x (t)**	**MP (t)**	**Total (t):**
Caminhão	12	42,66	0,00	0,00	0,04	0,23	0,01	42,94
Caminhonete	3	4,35	0,00	0,00	0,01	0,06	0,00	4,43
Carro	31	56,00	0,00	0,01	0,10	0,02	0,00	56,14
Kombi	4	4,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	4,11
Motocicleta	6	3,15	0,00	0,00	0,10	0,01	0,00	3,26
Ônibus	21	175,08	0,01	0,01	0,22	1,18	0,04	176,54
Van	6	15,65	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	15,70
Total:	83	300,99	0,02	0,02	0,49	1,54	0,05	303,11

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A comparação entre os anos analisados indica que 2023 apresentou os maiores valores totais de emissão, resultado do maior número de veículos em operação e do aumento da atividade da frota neste ano. Em 2024, observa-se uma redução das emissões totais, mantendo-se, entretanto, um padrão semelhante de distribuição entre os tipos de veículos. Essa redução está associada à diminuição do número de veículos em operação e à menor utilização de alguns veículos mais antigos, o que impactou diretamente o consumo total de combustível.

Além da análise individual dos poluentes atmosféricos, foram avaliadas as emissões de gases de efeito estufa (GEE), reportadas na forma de dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Os resultados apresentados na Tabela 9, indicam que as emissões totais de GEE acompanham o comportamento do consumo de combustível da frota ao longo do período analisado, com aumento em 2023 e redução em 2024. Além disso, a variação observada entre os anos também reflete a mudanças na intensidade de uso da frota, idade dos veículos ativos e no número de veículos em operação.

Tabela 9: Emissões totais de gases de efeito estufa da frota veicular (em toneladas equivalentes) e emissões de CO_2 biogênico

Ano-base	Emissões totais (tCO_2e)	Emissões de CO_2 biogênico (t)	Veículos em operação
2022	283,90	34,13	84
2023	385,85	52,95	88
2024	318,68	54,98	82

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As emissões de dióxido de carbono (CO_2) biogênico são provenientes da combustão de biocombustíveis, cuja origem está associada ao ciclo natural do carbono das plantas, no qual o CO_2 emitido durante a queima foi previamente absorvido da atmosfera durante o crescimento da biomassa. Dessa forma, o CO_2 biogênico é reportado separadamente do CO_2 fóssil, conforme a metodologia adotada, por não contribuir diretamente para o aumento de GEE na atmosfera. Os resultados indicam aumento das emissões de CO_2 biogênico ao longo do período analisado, passando de aproximadamente 34,1 t em 2022 para 52,9 t em 2023 e atingindo cerca de 55,0 t em 2024. Esse crescimento está associado, principalmente, ao aumento da fração renovável

obrigatória adicionada aos combustíveis fósseis no país, como o etanol anidro na gasolina e o biodiesel no diesel, cujos teores foram ampliados ao longo dos anos analisados. Em 2024, observa-se ainda um aumento percentual mais expressivo da fração biogênica, que, além dos maiores teores obrigatórios de biocombustíveis nas misturas comerciais, também é influenciado pela circulação do ônibus abastecido com biodiesel B30, contribuindo para elevar a participação relativa do CO_2 biogênico nas emissões totais reportadas.

5.3. Cenários de mitigação

Com o objetivo de avaliar alternativas para a redução das emissões atmosféricas da frota veicular analisada, foram elaborados cenários hipotéticos de mitigação, considerando alterações no tipo de combustível utilizado e a renovação da frota. Os cálculos foram realizados com base nos dados de consumo de combustível dos anos-base avaliados, mantendo-se constante o nível de atividade da frota, reconhecendo-se que o consumo volumétrico pode variar em função do combustível empregado e da tecnologia veicular. Essa abordagem foi adotada em razão da indisponibilidade de informações consolidadas sobre os ganhos de eficiência energética associados à renovação da frota.

O Cenário 1 avalia os efeitos da substituição da gasolina por etanol em todos os veículos *flex-fuel* da frota, considerando como base o consumo atual de combustível e incorporando um aumento médio de 30% no consumo volumétrico do etanol em relação à gasolina, de forma a representar de maneira mais realista o comportamento desses veículos. Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam uma redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO_2) fóssil, com reduções variando entre 11% e 16%, além de redução das emissões de material particulado. Em contrapartida, observa-se aumento das emissões de monóxido de carbono (CO) e de metano (CH_4), evidenciado por variações percentuais positivas nos anos analisados, que se explica devido às características da combustão do etanol, especialmente em frotas com veículos mais antigos. As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de óxido nitroso (N_2O) apresentaram variações pouco expressivas, indicando menor sensibilidade desses poluentes à substituição do combustível no cenário avaliado.

Tabela 10: Percentual de variação de cada poluente com uso de etanol nos veículos *flex-fuel*.

Ano-base	CO_2 fóssil	CH_4	N_2O	CO	NO_x	MP	Veículos em operação
2022	-11,42%	+24,07%	-8,16%	+8,50%	-0,30%	-11,81%	84
2023	-12,82%	+23,83%	-8,17%	+10,00%	-0,33%	-12,74%	88
2024	-16,17%	+34,24%	-8,94%	+11,27%	-0,56%	-19,93%	82

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O Cenário 2 considera a renovação completa da frota veicular e a utilização de etanol em todos os veículos com tecnologia *flex-fuel*, mantendo-se constante a atividade da frota e mantendo a utilização do diesel nos veículos pesados. Nesse cenário, todos os veículos são substituídos por modelos equivalentes ao ano de 2024, incorporando tecnologias mais recentes de controle de emissões, em conformidade com as fases mais avançadas do PROCONVE e do PROMOT. Para os veículos do tipo Kombi, cuja fabricação foi descontinuada, considera-se a substituição por veículos do modelo Doblô 2024, com motorização *flex-fuel* e abastecimento com etanol. De forma semelhante, as motocicletas originalmente movidas exclusivamente a gasolina são substituídas por modelos mais recentes, também *flex-fuel*, operando com etanol. Os resultados apresentados na Tabela 11, mostram reduções das emissões de todos os poluentes atmosféricos avaliados, especialmente CO, NO_x e material particulado (MP) onde houve reduções expressivas, além de reduções superiores a 30% nas emissões de CO_2 fóssil. Essas reduções estão diretamente associadas à renovação da frota para veículos mais novos, enquadrados em fases mais recentes do PROCONVE, que exigem a adoção de catalisadores e outros sistemas de pós-tratamento mais eficientes (IBAMA, 2011). Em contrapartida, observa-se a redução N_2O foi ligeiramente menor em relação ao cenário anterior, isso acontece, pois, veículos mais novos possuem tecnologias destinadas à redução de óxidos de nitrogênio (NO_x) que favorecem a formação de N_2O como subproduto dos processos de controle de emissões (IEMA, 2025).

Tabela 11: Percentual de variação de cada poluente veicular com renovação da frota e uso de etanol nos veículos *flex-fuel*.

Ano-base	CO_2 fóssil	CH_4	N_2O	CO	NOx	MP	Veículos em operação
2022	-31,61%	-36,42%	-1,63%	-75,47%	-93,00%	-96,91%	84
2023	-31,69%	-34,94%	-1,30%	-72,54%	-88,36%	-96,92%	88
2024	-32,95%	-23,26%	-1,17%	-70,17%	-94,26%	-96,84%	82

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Já o Cenário 3 considera a utilização exclusiva de combustíveis renováveis, combinando a substituição da gasolina por etanol em todos os veículos *flex-fuel* da frota e a substituição do diesel fóssil por biodiesel na proporção B30 em todos os veículos movidos a diesel, mantendo-se inalterada a frota atual. Nesse cenário, as análises foram restritas às emissões de gases de efeito estufa (GEE), não sendo avaliados os poluentes atmosféricos locais (CO, NO_x e MP), em função da inexistência de fatores de emissão consolidados na literatura para misturas de biodiesel superiores ao teor obrigatório, conforme mencionado anteriormente. A partir dos resultados de variação percentual apresentados na Tabela 12, observa-se que a combinação do etanol e do biodiesel B30 promove redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO_2) fóssil em todos os anos avaliados, com variações negativas superiores a 30%. Verifica-se também redução das emissões de óxido nitroso (N_2O), contribuindo positivamente para a mitigação das emissões totais de GEE. Em contrapartida, as emissões de metano (CH_4) aumentaram em relação ao cenário base, comportamento associado às características físico-químicas dos biocombustíveis e às particularidades do processo de combustão nos veículos da frota analisada.

Tabela 12: Percentual de variação de cada poluente veicular com o uso de etanol e biodiesel (B30).

Ano-base	CO_2 fóssil	CH_4	N_2O	Veículos em operação
2022	-31,03%	+16,36%	-14,69%	84
2023	-31,26%	+16,55%	-14,66%	88
2024	-33,79%	+23,06%	-17,46%	82

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Por fim, o cenário 4 representa a alternativa mais completa de mitigação das emissões da frota veicular, combinando a renovação total da frota com a utilização de combustíveis renováveis, considerando o uso de etanol em todos os veículos com tecnologia *flex-fuel* e biodiesel B30 nos veículos movidos a diesel. Semelhante ao cenário 2, neste os veículos também são substituídos por modelos equivalentes ao ano de 2024. A análise atual também foi relativa apenas às emissões de gases de efeito estufa (GEE), em função da inexistência de fatores de emissão para misturas elevadas de biodiesel, conforme já mencionado no cenário anterior. Como esperado, os resultados indicam reduções das emissões dos poluentes em todos os anos analisados, conforme a Tabela 13. Em comparação ao cenário anterior, observa-se que a redução das emissões de dióxido de carbono fóssil foi pouco significativa com a renovação da frota. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a renovação da frota tende a tornar os veículos mais eficientes, reduzindo o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de dióxido de carbono fóssil. Entretanto, como neste estudo o consumo foi mantido constante, esse efeito não foi refletido nos resultados. Além disso, observa-se que as emissões de óxido nitroso (N_2O) tiveram reduções menores em relação ao cenário anterior, comportamento associado ao favorecimento da formação desse poluente devido a atuação dos catalisadores presentes nos veículos mais novos, conforme discutido no Cenário 2.

Tabela 13: Percentual de variação de cada poluente veicular com renovação total da frota, uso de etanol e de biodiesel (B30).

Ano-base	CO2 fóssil	CH_4	N_2O	Veículos em operação
2022	-31,61%	-36,42%	-1,63%	84
2023	-31,69%	-34,94%	-1,30%	88
2024	-32,95%	-23,26%	-1,17%	82

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise comparativa dos cenários de mitigação em relação aos gases de efeito estufa, apresentada na Tabela 14, evidencia diferenças relevantes no potencial de redução das emissões da frota veicular analisada. Conforme indicado pelas análises individuais dos poluentes apresentadas nas Tabelas 10, 11, 12 e 13, os cenários diferem não apenas quanto à redução das emissões de dióxido de carbono fóssil (CO_2 fóssil), mas também em relação ao comportamento do gás metano (CH_4) e do óxido nitroso (N_2O). Porém, embora esses gases apresentem elevados potenciais de aquecimento global (GWP), sua contribuição para o total de emissões em CO_2 equivalente (CO_2e) da frota é menor quando comparada à do CO_2, que representa a parcela mais significativa do inventário.

Nesse contexto, o Cenário 1, baseado exclusivamente na substituição da gasolina por etanol nos veículos *flex-fuel*, resulta em reduções moderadas das emissões totais de GEE, refletindo na diminuição de N_2O e principalmente na diminuição do CO_2 fóssil, ainda que acompanhada pelo aumento das emissões de CH_4. Com a incorporação da renovação da frota no Cenário 2, observam-se ganhos adicionais no controle das emissões, especialmente na redução do dióxido de carbono fóssil, além de diminuições expressivas nas emissões de metano. No entanto, o impacto dessas melhorias sobre a redução total de gases de efeito estufa permanece limitado, em razão do favorecimento da formação de óxido nitroso associado à renovação da frota e da não consideração, neste estudo, dos ganhos de eficiência energética dos veículos mais novos, por falta de dados consistentes disponíveis.

Os Cenários 3 e 4, que incorporam a utilização de biodiesel B30 nos veículos a diesel, destacam-se como aqueles com maior potencial de mitigação climática, alcançando reduções de até 37% nas emissões totais de gases de efeito estufa. Entretanto, a comparação entre esses cenários indica que a inclusão da renovação da frota no Cenário 4 não resulta em vantagens

significativas adicionais em relação ao Cenário 3 no que se refere à redução de GEE. Esse comportamento está associado ao fato de que, neste estudo, o consumo de combustível por quilômetro rodado foi mantido constante, não permitindo capturar os ganhos de eficiência energética esperados com a introdução de veículos mais novos. Na prática, a renovação da frota tende a reduzir o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de GEE, efeito que poderia conferir maior diferenciação ao Cenário 4 caso essa variável fosse considerada. Observa-se também a presença de dióxido de carbono biogênico nos cenários com maior participação de biocombustíveis, efeito esperado da substituição de combustíveis fósseis fontes renováveis, mas não representa acréscimo líquido de emissões à atmosfera.

Tabela 14: Redução das emissões de GEE (CO_2e) e aumento do CO_2 biogênico nos cenários de mitigação.

Cenários	**Descrição resumida**	**Redução de GEE (CO_2e)**	**Aumento de CO_2 biogênico**
Cenário 1	Etanol nos veículos *flex-fuel*	11% - 19%	72% - 86%
Cenário 2	Etanol + renovação da frota	12% - 20%	52% - 64%
Cenário 3	Etanol + biodiesel B30	30% - 35%	128% - 210%
Cenário 4	Renovação + etanol + B30	31% - 35%	128% - 236%

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciaram que as emissões atmosféricas da frota veicular da UFJF estão diretamente associadas ao consumo de combustível, à composição da frota e à intensidade de uso dos veículos, com predominância do dióxido de carbono fóssil como principal componente das emissões totais. Observou-se que veículos com maior nível de atividade, especialmente os ônibus, concentram a maior parcela das emissões, enquanto veículos mais antigos apresentaram emissões desproporcionalmente elevadas, reforçando a influência da idade da frota e da tecnologia de controle de emissões sobre o desempenho ambiental.

Os resultados indicaram variações nas emissões totais ao longo dos anos analisados, com maior nível emissivo em 2023, associado ao aumento da atividade da frota e ao maior número de veículos em operação, e redução em 2024, relacionada à menor utilização de determinados veículos e à diminuição da atividade operacional. O dióxido de carbono fóssil foi o principal componente das emissões totais, refletindo diretamente o consumo de combustível, enquanto os poluentes atmosféricos locais e os demais gases de efeito estufa apresentaram variações relacionadas ao tipo de veículo, à tecnologia embarcada e ao combustível utilizado. A análise por categoria veicular demonstrou que os ônibus concentram a maior parcela das emissões totais da frota, especialmente de CO_2 fóssil, em função do uso de diesel e da elevada intensidade de operação, enquanto caminhões se destacam pelas emissões de NO_x e material particulado, comportamento típico de motores do ciclo Diesel.

Em relação às emissões de gases de efeito estufa expressas em CO_2 equivalente (CO_2e), verificou-se comportamento coerente com a dinâmica do consumo de combustível, com pico em 2023 e redução em 2024. Observou-se ainda um aumento da fração de CO_2 biogênico, associado à maior participação de combustíveis renováveis na matriz, como o etanol anidro na gasolina e o biodiesel no diesel. Nesse sentido, a substituição da gasolina por etanol em veículos *flex-fuel* mostrou-se uma estratégia relevante, pois, embora apresente efeitos limitados sobre alguns poluentes locais e possa elevar emissões de CH_4 e CO, resulta em redução efetiva das emissões de GEE, ao substituir carbono fóssil por carbono de origem renovável.

A avaliação dos cenários de mitigação indicou que a renovação da frota é fundamental para a redução expressiva dos poluentes atmosféricos locais, como CO, NO_x e material particulado, evidenciando os benefícios diretos da adoção de veículos enquadrados em fases mais recentes do PROCONVE. Além disso, a renovação da frota apresenta potencial para

reduzir ainda mais as emissões veiculares, uma vez que veículos mais modernos são, em geral, energeticamente mais eficientes, demandando menor consumo de combustível para a mesma atividade, o que se reflete diretamente na diminuição das emissões de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa. Destaca-se ainda que a prioridade para a renovação da frota deve ser os ônibus, por serem os veículos que mais rodam e concentram a maior parcela das emissões totais.

Os maiores potenciais de mitigação foram observados nos cenários que incorporaram o uso de biodiesel B30 nos veículos a diesel, associados ou não à renovação da frota, alcançando reduções de até aproximadamente 37% nas emissões totais de GEE. Esses cenários apresentaram aumento expressivo da fração de CO_2 biogênico, resultado esperado da substituição do carbono fóssil por carbono renovável, sem representar acréscimo líquido de emissões à atmosfera. A análise comparativa indicou ainda que, quando o consumo de combustível é mantido constante, a renovação da frota não resulta em reduções adicionais significativas de GEE, evidenciando uma limitação do estudo e reforçando a importância de considerar ganhos de eficiência energética em avaliações futuras.

Diante desses resultados, recomenda-se que a UFJF, no âmbito da Política de Sustentabilidade Institucional em discussão, priorize estratégias voltadas à redução das emissões veiculares, com destaque para a ampliação do uso de combustíveis renováveis em toda a frota, especialmente etanol em veículos *flex-fuel* e biodiesel em maiores proporções nos veículos a diesel e a renovação progressiva da frota, por veículos com tecnologias mais modernas, maior eficiência energética e menores fatores de emissão, começando pelos ônibus que são os principais responsáveis pelas emissões. Essas medidas apresentam potencial para promover ganhos simultâneos na qualidade do ar no campus e na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o cumprimento das metas climáticas nacionais e estaduais, bem como dos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) do Acordo de Paris.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se uma avaliação custo-benefício da renovação da frota, considerando não apenas os ganhos ambientais, mas também os impactos econômicos e operacionais. Sugere-se ainda a ampliação do inventário para outros setores da universidade, como consumo de energia elétrica, uso de geradores, sistemas de climatização e gestão de resíduos sólidos. A integração dessas fontes emissoras possibilitará a elaboração de um inventário mais abrangente e a construção de um plano de sustentabilidade mais completo, voltado à redução dos impactos climáticos e à melhoria da qualidade do ar na região.

REFERÊNCIAS

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). *Especificações de combustíveis automotivos.* Brasília: ANP, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/. Acesso em: 15 out. 2025.

ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). *Panorama do Setor de Transportes.* Brasília: ANTT, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/informacoes-estrategicas/publicacoes/panorama-do-setor.pdf. Acesso em: 09 out. 2025.

CETESB (Companhia Ambiental de São Paulo). *Emissão Veicular - Combustíveis***.** São Paulo: CETESB, [202-]. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular. Acesso em: 11 out. 2025.

CETESB (Companhia Ambiental de São Paulo). *Relatórios e publicações – emissões veiculares.* São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/. Acesso em: 15 out. 2025.

CETESB (Companhia Ambiental de São Paulo). *Relatórios e publicações – emissões veiculares.* São Paulo: CETESB, 2025. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/. Acesso em: 18 out. 2025.

CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). *Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986.* Institui o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jun. 1986. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41. Acesso em: 15 out. 2025.

CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). *Resolução nº 297, de 26 de fevereiro de 2002.* Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motociclos e veículos similares novos (PROMOT). Diário Oficial da União: Brasília, 15 mar. 2002. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=294. Acesso em: 15 out. 2025.

CORRÊA. Carine. *Setor de transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar.* Brasília: MMA, 2010 Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar. Acesso em: 01 out. 2025

CRUZ, Ulysses de Brito. *Inventário de emissões atmosféricas veiculares: metodologia e aplicação.* 2021. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/35620/1/Ulysses%20de%20Brito%20Cruz.pdf

DEFRA (Department for Energy Security and Net Zero). *Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2024.* London: UK Government, 2024. Disponível em: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024. Acesso em: 18 out. 2025.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). *Balanço Energético Nacional 2025: Síntese.* Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). *Caderno de Demanda de Transportes: PDE 2034.* Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE%202034_2024.09.03.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

FGV (Fundação Getulio Vargas). *A economia de baixo carbono e o papel das empresas: estratégias para um futuro sustentável.* Rio de Janeiro: FGV, 2022. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/fd7bc5b9-a1b6-45f9-91b1-35624c63dd16/content. Acesso em: 23 out. 2025.

FGVces (Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas). *Programa Brasileiro GHG Protocol.* São Paulo: FGV, 2024. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol. Acesso em: 02 nov. 2025.

GHG (*Greenhouse Gas Protocol*). *About us.* 2024. Disponível em: https://ghgprotocol.org/about-us. Acesso em: 18 out. 2025.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). *Manual do PROCONVE e PROMOT.* Brasília: IBAMA, Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/phocadownload/veiculosautomotores/manual_proconve-promot_portugues.pdf. Acesso em: 08 nov. 2025.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). *Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE).* Brasília: IBAMA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve. Acesso em: 15 out. 2025.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Anuário Estatístico do Brasil – Seção Transportes 2024.* Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://anuario.ibge.gov.br/2024/servicos/transportes.html. Acesso em: 13 out. 2025.

IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.* São Paulo: Instituto Energia e Ambiente, 2011. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/produto/1o-inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios. Acesso em: 28 out. 2025.

IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente). *Inventários de poluentes e gases de efeito estufa (GEE).* São Paulo: Instituto Energia e Ambiente, 2023. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/inventarios-de-poluentes-e-gee. Acesso em: 28 out. 2025.

IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente). *Brasil atualiza inventário de emissões do transporte rodoviário no país.* São Paulo: Instituto Energia e Ambiente, 2025. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/brasil-atualiza-inventario-de-emissoes-do-transporte-rodoviario-no-pais-20251202. Acesso em: 02 jan. 2026.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers.* Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 08 out. 2025.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). *Comunicações Nacionais do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.* Brasília: MCTI, [202-].

Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/eee.html. Acesso em: 10 out. 2025.

MDCI (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços). *Política de biocombustíveis e diretrizes para a matriz energética nacional.* Brasília: MDIC, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mdic. Acesso em: 18 nov. 2025.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: ano-base 2013.* Brasília: MMA, 2014. 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: 11 out. 2025.

OC (Observatório do Clima). *Causas das mudanças do clima.* [S. l.]: Observatório do Clima, 2015. Disponível em: https://www.oc.eco.br/causas-das-mudancas-do-clima/. Acesso em: 18 nov. 2025.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). *Relatório Analítico SEEG 12.* Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). *Emissões de GEE – Brasil.* Observatório do Clima, 2025a. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/brasil. Acesso em: 10 out. 2025.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). *Emissões de GEE – Minas Gerais.* Observatório do Clima, 2025b. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/minas-gerais. Acesso em: 10 out. 2025.

UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora). *Apresentação institucional.* Juiz de Fora: UFJF, 202-. Disponível em: https://www2.ufjf.br/ufjf/sobre/apresentacao/. Acesso em: 18 out. 2025.

UFV (Universidade Federal de Viçosa). *Departamento de Engenharia Agrícola – Combustíveis automotivos e propriedades físico-químicas.* Viçosa, 2020. Disponível em: https://ccbioenergia.ufv.br/etanol-hidratado-e-anidro-qual-a-diferenca/. Acesso em: 18 out. 2025.

WAYCARBON**.** *Inventário de gases de efeito estufa: o que é e como fazer.* Belo Horizonte: WayCarbon, 2025. Disponível em: https://waycarbon.com/pt/blog/inventario-de-gases-de-efeito-estufa/. Acesso em: 20 out. 2025.

WHO (World Health Organization). *7 million premature deaths annually linked to air pollution.* Geneva: WHO, 2014. Disponível em: https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution. Acesso em: 10 out. 2025.

WRI (World Resources Institute). *4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors.* WRI, 2024. Disponível em: https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors. Acesso em: 08 out. 2025.

WRI (World Resources Institute). *Interactive chart shows changes in the world's top 10 emitters.* WRI, 2023. Disponível em: https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters. Acesso em: 08 out. 2025.

WRI Brasil (World Resources Institute Brasil)**.** *O estado da qualidade do ar no Brasil.* São Paulo: WRI Brasil, 2021. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da-_qualidade-do-ar-no-brasil.pd. Acesso em: 10 out. 2025.

WRI Brasil (World Resources Institute Brasil). *10 conclusões do relatório do IPCC sobre mudanças climáticas de 2023.* WRI Brasil, 2023. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-mudancas-climaticas-de-2023. Acesso em: 08 out. 2025.

WRI BRASIL (World Resources Institute Brasil). *Os países que mais emitiram gases de efeito estufa.* WRI Brasil, 2024. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa. Acesso em: 10 out. 2025.