



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS



# **DIAGNÓSTICO TEMPORAL DA CONTRIBUIÇÃO DO SETOR RODOVIÁRIO BRASILEIRO NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

GEOVANE CARLOS MIGUEL

ITAJUBÁ

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS



# **DIAGNÓSTICO TEMPORAL DA CONTRIBUIÇÃO DO SETOR RODOVIÁRIO BRASILEIRO NAS EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

GEOVANE CARLOS MIGUEL

Trabalho submetido como parte dos requisitos para aprovação do curso de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá.

Área de Concentração: Clima e Gestão do Ambiente

Orientadora: Dra. Vanessa Silveira Barreto Carvalho

Coorientador: Dr. Rafael Silva Capaz

ITAJUBÁ

2026

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de expressar meus agradecimentos à minha família, especialmente aos meus pais, Geraldo e Vanda, por todo o apoio e ajuda durante a minha vida. Aos meus orientadores, Vanessa e Rafael, pela ajuda, ensinamentos e pela oportunidade de estar trabalhando junto com eles. Também agradeço aos meus colegas do curso de mestrado pela convivência e apoio durante o período de trabalho.

Por último, gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro (Número do convênio: 5.16/2022), à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) e ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (POSMARH) pelos recursos disponibilizados durante o período de pesquisa.

## RESUMO

O setor de transporte rodoviário brasileiro é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), respondendo por aproximadamente 206 MtCO<sub>2eq</sub> (10,7% das emissões totais) em 2023. Embora ainda dependa fortemente de combustíveis fósseis, o uso de biocombustíveis nas últimas décadas está associado à mitigação significativa dessas emissões. Este estudo teve como objetivo estimar as emissões de GEE do setor entre 1970 e 2023, analisando as principais etapas do ciclo de vida dos combustíveis, a evolução da frota, o perfil de emissões por tipo combustível e a influência da mudança de uso do solo (MUS). Foi aplicada a Análise de Ciclo de Vida (ACV), com abordagem atribucional e fronteiras do “poço à roda”, para inventários das rotas de etanol (cana-de-açúcar e milho) e biodiesel (óleo de soja e sebo bovino). A análise foi dividida em cinco períodos, permitindo avaliar mudanças tecnológicas e regulatórias. Os resultados mostram redução expressiva dos fatores de emissão dos biocombustíveis, especialmente no etanol de cana-de-açúcar, cujo fator caiu de 40,45 para 14,44 gCO<sub>2eq</sub>/MJ. A etapa agrícola se destacou como principal fonte de emissões, contribuindo, em média, com 83,5% no etanol de cana-de-açúcar, 76% no etanol de milho e 73,9% no biodiesel de soja. A redução da intensidade de consumo nos veículos leves diminuiu a intensidade de emissões de 16 para 2 tCO<sub>2eq</sub>/unidade, acompanhada pela queda da intensidade energética de 0,18 para 0,03 MJ/unidade. Apesar disso, o crescimento da frota elevou as emissões totais do setor. A MUS apresentou impacto limitado para o etanol (2,2%), mas relevante no biodiesel de soja, aumentando em média 67,1% das emissões do ciclo de vida. Estima-se que o uso de biocombustíveis evitou as emissões de aproximadamente 1,1 GtCO<sub>2eq</sub>, equivalente a dois anos das emissões líquidas da agropecuária ou três anos do setor de energia ou doze anos dos setores de processos industriais e resíduos no Brasil. Conclui-se que os biocombustíveis desempenham papel central na mitigação das emissões no transporte rodoviário, sendo sua efetividade dependente de melhorias contínuas na etapa agrícola e de avanços tecnológicos na etapa industrial.

**Palavras-chave:** GEE; ACV; Biocombustíveis; Transporte rodoviário.

## ABSTRACT

The Brazilian road transport sector is one of the main contributors to greenhouse gas (GHG) emissions, accounting for approximately 206 MtCO<sub>2eq</sub> (10.7% of total emissions) in 2023. Although it still relies heavily on fossil fuels, the use of biofuels in recent decades has been associated with a significant mitigation of these emissions. This study aimed to estimate the sector's GHG emissions between 1970 and 2023, analyzing the main stages of the fuel life cycle, fleet evolution, emission profiles by fuel type, and the influence of land use change (LUC). Life Cycle Assessment (LCA) was applied using an attributional approach and “well-to-wheel” system boundaries to develop inventories for ethanol pathways (sugarcane and corn) and biodiesel (soybean oil and beef tallow). The analysis was divided into five periods, allowing the evaluation of technological and regulatory changes. The results indicate a substantial reduction in biofuel emission factors, particularly for sugarcane ethanol, whose emission factor decreased from 40.45 to 14.44 gCO<sub>2eq</sub>/MJ. The agricultural stage was identified as the main source of emissions, contributing on average 83.5% for sugarcane ethanol, 76% for corn ethanol, and 73.9% for soybean biodiesel. The reduction in fuel consumption intensity in light-duty vehicles led to a decrease in emission intensity from 16 to 2 tCO<sub>2eq</sub>/unit, accompanied by a reduction in energy intensity from 0.18 to 0.03 MJ/unit. Despite this, fleet growth led to an increase in total sector emissions. LUC had a limited impact on ethanol (2.2%), but a significant effect on soybean biodiesel, increasing life cycle emissions by an average of 67.1%. It is estimated that the use of biofuels avoided approximately 1.1 GtCO<sub>2eq</sub> in emissions, equivalent to two years of net emissions from the agriculture sector, three years from the energy sector, or twelve years from the industrial processes and waste sectors in Brazil. It can be concluded that biofuels play a central role in mitigating emissions in the road transport sector, and their effectiveness depends on continuous improvements in the agricultural stage and technological advances in the industrial stage.

**Keywords:** GHG; LCA; Biofuels; Road transport.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Emissões líquidas de CO <sub>2eq</sub> por setor no Brasil. Fonte: SEEG, 2026.....                                                                                                                                                           | 11 |
| Figura 2: Fluxograma das etapas de trabalho para estimativa das emissões de GEE devido ao consumo de combustíveis no Brasil (gCO <sub>2eq</sub> /MJ). .....                                                                                            | 21 |
| Figura 3: Estimativa anual das proporções volumétricas dos combustíveis puros nas misturas comerciais: (a) Gasolina A e Etanol Anidro na Gasolina C; (b) Diesel A (B <sub>0</sub> ) e Biodiesel no Diesel B <sub>x</sub> .....                         | 22 |
| Figura 4: Participação volumétrica relativa de biocombustíveis por tipo de matéria-prima de origem. (a) Etanol; (b) Biodiesel. ....                                                                                                                    | 23 |
| Figura 5: Sistema-produto da produção e uso de etanol de cana-de-açúcar.....                                                                                                                                                                           | 26 |
| Figura 6: Sistema-produto da produção e uso de etanol de milho.....                                                                                                                                                                                    | 26 |
| Figura 7: Sistema-produto da produção e uso de biodiesel de óleo de soja. ....                                                                                                                                                                         | 26 |
| Figura 8: Etapas de trabalho para estimativa das emissões evitadas devido ao uso de biocombustíveis no Brasil. ....                                                                                                                                    | 34 |
| Figura 9: Evolução do consumo de combustíveis no Brasil em Mm <sup>3</sup> no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023. ....                                                                                                                     | 38 |
| Figura 10: Taxa de crescimento anual de intensidade consumo de combustíveis para veículos leves e pesados (Figura 10a). Taxa de crescimento anual de veículos leves e pesados (Figura 10b). ....                                                       | 40 |
| Figura 11: Fatores de emissão para o consumo de etanol anidro de cana-de-açúcar considerando as fronteiras do poço à roda.....                                                                                                                         | 42 |
| Figura 12: Fatores de emissão para o consumo de etanol anidro de milho; biodiesel de óleo de soja e biodiesel de sebo bovino considerando as fronteiras do poço à roda. ....                                                                           | 46 |
| Figura 13: Emissões de CO <sub>2eq</sub> associadas ao consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023. ....                                                                                                                 | 47 |
| Figura 14: Intensidade de consumo de combustíveis e intensidade de emissões de CO <sub>2eq</sub> da frota veicular: (a) veículos leves - consumo; (b) veículos pesados - consumo; (c) veículos leves - emissões; (d) veículos pesados - emissões. .... | 50 |
| Figura 15: Emissões de CO <sub>2eq</sub> relacionadas à MUS para o consumo de 1 MJ de Etanol Anidro de cana-de-açúcar.....                                                                                                                             | 52 |
| Figura 16: Emissões evitadas de CO <sub>2eq</sub> no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023 devido à utilização de biocombustíveis. ....                                                                                                       | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Participação relativa dos diferentes tipos de usina na produção de etanol de cana-de-açúcar ao longo dos períodos analisados. Nota: baseado em IPEA (2006), CONAB (2013) e CONAB (2017). ....                                                                                                          | 27 |
| Tabela 2: Mix de açúcar e etanol para usinas anexas no período de 1986-1995 no Brasil. Nota: (1) Produção média de etanol e açúcar entre 1986-1995 (Almeida; Lobghi; Santos, 2017) e (2) Converte os produtos finais em seus equivalentes de ATR. Esta análise foi baseada em Seabra <i>et al.</i> , 2011). .... | 29 |
| Tabela 3: Parâmetros da fase agrícola da produção da cana-de-açúcar (unidade/ha). ...                                                                                                                                                                                                                            | 30 |
| Tabela 4: Parâmetros da fase de produção de etanol de cana-de-açúcar em usina autônoma (unidade/tonelada de cana). ....                                                                                                                                                                                          | 30 |
| Tabela 5: Parâmetros da fase de produção de etanol de cana-de-açúcar em usina anexa (unidade/tonelada de cana). ....                                                                                                                                                                                             | 31 |
| Tabela 6: Parâmetros da fase agrícola da produção de milho (unidade/ha). ....                                                                                                                                                                                                                                    | 31 |
| Tabela 7: Parâmetros da fase de produção de etanol de milho (unidade/tonelada de milho). ....                                                                                                                                                                                                                    | 32 |
| Tabela 8: Parâmetros da fase agrícola da produção de soja (unidade/ha). ....                                                                                                                                                                                                                                     | 32 |
| Tabela 9: Parâmetros da fase de extração do óleo de soja (unidade/tonelada de soja). .                                                                                                                                                                                                                           | 32 |
| Tabela 10: Parâmetros da fase de transesterificação para produção de biodiesel de óleo de soja (unidade/tonelada de óleo de soja). ....                                                                                                                                                                          | 32 |
| Tabela 11: Fatores de emissão observados na literatura para o etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Nota: As estimativas em kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> foram convertidas para gCO <sub>2</sub> /MJ de etanol, considerando que 1 m <sup>3</sup> de etanol anidro equivale a 22.353,7 MJ. ....               | 42 |
| Tabela 12: Taxa de intensidade de emissões de CO <sub>2eq</sub> em porcentagem média anual para as frotas veiculares entre 1970-2023. ....                                                                                                                                                                       | 48 |
| Tabela 13: Estatísticas das emissões (MtCO <sub>2eq</sub> ) associadas ao consumo de etanol e biodiesel nos cenários com e sem MUS no Brasil. A participação da MUS corresponde ao incremento percentual das emissões no cenário com MUS em relação ao cenário de emissões do ciclo de vida. ....                | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|                                                     |   |                                                                 |
|-----------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------|
| ACV                                                 | – | Análise de ciclo de vida                                        |
| ATR                                                 | – | Açúcares Totais Recuperáveis                                    |
| CO <sub>2eq</sub>                                   | – | Dióxido de carbono                                              |
| CO <sub>2eq</sub>                                   | – | Dióxido de carbono equivalente                                  |
| CONAMA                                              | – | Conselho Nacional do Meio Ambiente                              |
| FEs                                                 | – | Fatores de emissão                                              |
| GEE                                                 | – | Gás de Efeito Estufa                                            |
| gCO <sub>2e</sub> /MJ                               | – | Gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule          |
| ha                                                  | – | hectare                                                         |
| ICV                                                 | – | Inventário de ciclo de vida                                     |
| IPCC                                                | – | Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas                |
| IPPU                                                | – | Processos Industriais e Uso de Produtos                         |
| kg                                                  | – | Quilograma                                                      |
| KWh                                                 | – | Quilowatt-hora                                                  |
| l                                                   | – | Litro                                                           |
| LULUCF                                              | – | Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas               |
| Mm <sup>3</sup>                                     | – | Milhões de metros cúbicos                                       |
| MtCO <sub>2eq</sub>                                 | – | Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente          |
| MUS                                                 | – | Mudanças no uso do solo                                         |
| Proálcool                                           | – | Programa Nacional do Alcool                                     |
| PROCONVE                                            | – | Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores |
| RenovaBio                                           | – | Política Nacional de Biocombustíveis                            |
| tCO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> | – | Tonelada de dióxido de carbono por hectare ano                  |
| VEs                                                 | – | Veículos elétricos                                              |
| VHs                                                 | – | Veículos híbridos                                               |

## SUMÁRIO

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                            | <b>10</b> |
| <b>1.1 Objetivos Geral e Específicos .....</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>2. DADOS E METODOLOGIA .....</b>                                                  | <b>18</b> |
| <b>2.1 Área de estudo .....</b>                                                      | <b>18</b> |
| <b>2.2 Base de dados.....</b>                                                        | <b>19</b> |
| <b>2.3 Metodologia.....</b>                                                          | <b>20</b> |
| <b>2.3.1 Estimativa do consumo de combustíveis .....</b>                             | <b>22</b> |
| <b>2.3.2 Estimativa dos fatores de emissão.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>2.3.3 Estimativa das emissões de GEE.....</b>                                     | <b>33</b> |
| <b>2.3.4 Relação frota veicular e emissões de GEE .....</b>                          | <b>35</b> |
| <b>3. RESULTADOS .....</b>                                                           | <b>38</b> |
| <b>3.1 Evolução do consumo de combustíveis no transporte rodoviário.....</b>         | <b>38</b> |
| <b>3.2 Fatores de emissão.....</b>                                                   | <b>41</b> |
| <b>3.3 Perfil das emissões de GEE no transporte rodoviário .....</b>                 | <b>46</b> |
| <b>3.4 Intensidade de consumo e emissões de combustíveis por tipo de frota .....</b> | <b>49</b> |
| <b>3.5 Emissões relacionadas à MUS .....</b>                                         | <b>52</b> |
| <b>3.6 Emissões evitadas pela utilização de biocombustíveis.....</b>                 | <b>54</b> |
| <b>4. CONCLUSÕES.....</b>                                                            | <b>57</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                             | <b>59</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

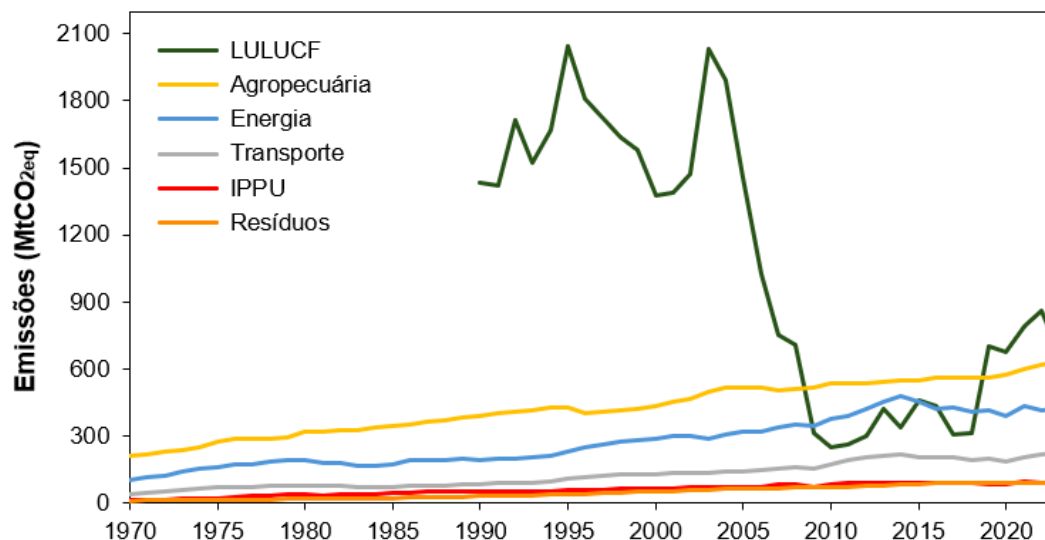
As emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) têm sido cada vez mais discutidas em âmbito mundial e a amplificação deste tema ocorre em virtude das consequências das mudanças climáticas. O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) - ressalta que é inequívoco que a influência humana é a principal causa do aquecimento global, com a década de 2011-2020 registrando um aumento de 1,1°C na temperatura média da superfície global em relação ao período de 1850 a 1900. O IPCC afirma que as mudanças climáticas já estão afetando todas as regiões habitadas do globo, provocando aumento da frequência e na intensidade de eventos extremos climáticos (IPCC, 2022).

A magnitude e a velocidade das mudanças climáticas e os riscos associados dependem fortemente de ações de mitigação e adaptação a curto prazo. Se de um lado, a implementação acelerada de medidas de adaptação contribuirá para o bem-estar da sociedade ao reduzir perdas e danos; por outro lado, reduções nas emissões de GEE exigem grandes transições nos sistemas de produção. Diversas opções de mitigação, como eletrificação dos transportes urbanos e eficiência energética estão se tornando cada vez mais econômicas e apoiadas pela sociedade (IPCC, 2022).

Em 2023, as emissões líquidas de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ )<sup>1</sup> no Brasil foram de 2039,5 milhões de toneladas de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  ( $\text{MtCO}_{2\text{eq}}$ ), sendo aproximadamente 35,7% das emissões provenientes do setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF), 32,8% da Agropecuária, 21,9% da Energia, 4,8% de Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU) e 4,8% de resíduos. As emissões do subsetor de transportes estão alocadas no setor de energia e totalizaram 224  $\text{MtCO}_{2\text{eq}}$ . Desse total, 206  $\text{MtCO}_{2\text{eq}}$  (92%) são provenientes do modal rodoviário, enquanto 18  $\text{MtCO}_{2\text{eq}}$  (8%) restantes correspondem aos modais ferroviário, aquaviário, aeroviário e outros (Figura 1) (SEEG, 2026). As emissões de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  no setor de transporte rodoviário brasileiro são influenciadas por vários fatores, incluindo tipos de veículos (automóveis, caminhões e ônibus), fontes de combustível (diesel, gasolina, etanol e biodiesel) e tecnologia (*flex-fuel*, híbridos e elétricos) (Nogueira *et al.*, 2021).

---

<sup>1</sup> Métrica que expressa as emissões de diferentes gases de efeito estufa em uma base comum, convertendo-os em equivalentes de  $\text{CO}_2$  por meio do seu potencial de aquecimento global.



**Figura 1:** Emissões líquidas de CO<sub>2</sub>eq por setor no Brasil. Fonte: SEEG, 2026.

Nas últimas décadas no Brasil, a frota de veículos leves para transporte de passageiros e de veículos pesados para transporte de carga apresentou crescimento expressivo. Entre 2001 e 2020, as frotas de automóveis, caminhões e ônibus registraram taxas médias anuais de crescimento de aproximadamente 5,5%, 3,7% e 4,8%, respectivamente (SENATRAN, 2025). O crescimento da frota, por si só, exerce pressão sobre o consumo de energia. Contudo, a intensidade das emissões de GEE associadas depende fortemente da composição tecnológica da frota: veículos *flex-fuel*<sup>2</sup>, veículos elétricos (VEs) e veículos híbridos (VHs) e do tipo de combustível utilizado: diesel; gasolina; etanol e biodiesel (Benvenuti *et al.*, 2019; Branco *et al.*, 2024).

Diante desse cenário de expansão da frota e de potenciais implicações climáticas, para viabilizar a redução nas emissões de GEE e mitigar as mudanças climáticas, observa-se um crescente investimento das organizações em tecnologias voltadas à transição energética, com o propósito de diminuir a dependência de combustíveis fósseis no setor de transporte. No contexto brasileiro, as políticas públicas voltadas à transição energética do transporte rodoviário têm sido implementadas de forma contínua, desde 1975, com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool); em 1986 com o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e em 2017, com a

<sup>2</sup> Tecnologia veicular de veículos leves que permite a operação do motor com diferentes combustíveis líquidos, como gasolina e etanol.

Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (Glyniadakis; Balestieri, 2023; Nogueira *et al.*, 2021).

Dentre essas iniciativas, o Proálcool representou um marco nas políticas brasileiras de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis. Em sua primeira fase (1975-1979), o foco foi o estímulo à produção de etanol anidro<sup>3</sup> como aditivo à gasolina, visando reduzir a importação de petróleo. Na segunda fase (1980–1986), o incentivo voltou-se ao etanol hidratado<sup>4</sup>, destinado a veículos movidos exclusivamente por esse combustível (Aguiar *et al.*, 2024). A terceira fase (1986–1995) foi marcada pela estagnação do programa, com a suspensão de subsídios e uma crise de abastecimento, resultando na quarta e última fase (1996–2000), onde ocorreu a liberalização do mercado de etanol, antes regulado pelo governo (Almeida *et al.*, 2017).

De forma complementar ao incentivo aos combustíveis renováveis, o PROCONVE, criado em 1986 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabeleceu como objetivos centrais a redução das emissões de poluentes por motores e a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos. O programa atua por meio de fases progressivas que estabelecem limites de emissão cada vez mais rigorosos, concedendo prazo adequado para a adaptação tecnológica da indústria automotiva. Sua implementação resultou em impactos ambientais significativos: já na primeira fase, a partir de 1992, observou-se uma redução de aproximadamente 70% nas emissões dos poluentes regulamentados. Além dos limites para veículos, o PROCONVE foi fundamental para o desenvolvimento de combustíveis mais limpos, como no caso do diesel que teve redução do teor de enxofre na sua composição (Carvalho *et al.*, 2015; Slovic; Ribeiro, 2018; Bermond *et al.*, 2018).

Seguindo a mesma lógica de diversificação da matriz energética do setor de transporte rodoviário, o PNPB foi lançado em 2004 com o objetivo de introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira. Desde que foi instituído o uso obrigatório do biodiesel na mistura com o diesel fóssil, observou-se uma rápida evolução para a adição do biocombustível em maiores teores. O valor inicial foi fixado em 2% em volume, em 2008, alcançando 5% já em 2010. Nos anos subsequentes, houve a elevação gradual dos

---

<sup>3</sup> Biocombustível utilizado como componente da mistura com a gasolina pura para formação da Gasolina C.

<sup>4</sup> Biocombustível com teor de água de aproximadamente 5%, utilizado diretamente como combustível em veículos do ciclo Otto, especialmente em motores do tipo *flex-fuel*.

percentuais mínimos obrigatórios no Diesel B<sub>x</sub><sup>5</sup>, chegando a 12% em 2020 (EPE, 2020a).

Mais recentemente, consolidando o arcabouço de políticas nacionais que impactam o setor de transporte rodoviário e de biocombustíveis, foi lançado em 2017 o RenovaBio para ampliar a produção e o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. O RenovaBio leva em consideração a relação entre a eficiência energética e a redução das emissões de GEE visando, assim, auxiliar na descarbonização da matriz de transportes brasileira, contribuindo para a segurança energética e a previsibilidade do mercado. O programa estabelece metas nacionais de descarbonização para um período de dez anos, as quais são desdobradas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para os distribuidores de combustíveis, que são a parte obrigada da política de acordo com sua participação no mercado (EPE, 2025b).

O Programa RenovaBio utiliza a ferramenta RenovaCalc para o cálculo das emissões de GEE, expressas em grama de CO<sub>2eq</sub> por Megajoule (gCO<sub>2eq</sub>/MJ), associadas a produção e uso de biocombustíveis no Brasil. A ferramenta possui a finalidade de estimar as emissões ao longo das etapas do ciclo de vida, contemplando as fases agrícola, industrial, de distribuição e de uso. A estimativa das emissões na fase agrícola requer informações como área cultivada, produtividade, manejo da cultura (incluindo a proporção de área queimada) e aplicação de corretivos e fertilizantes. Na etapa industrial, são considerados dados de processamento e rendimentos dos biocombustíveis e coprodutos, bem como os insumos utilizados na geração de energia e eletricidade. A fase de distribuição é representada por sistemas logísticos predefinidos, tal como o rodoviário, dutoviário, ferroviário e, quando aplicável, marítimo, aos quais são atribuídas distâncias médias específicas por rota tecnológica. Por fim, a fase de uso corresponde à combustão dos biocombustíveis em motores, sendo estimada a partir de fatores de emissão baseados em inventários nacionais. Embora um estudo de Análise de Ciclo de Vida (ACV) completo deva abranger várias categorias de impacto ambiental, relacionadas à proteção de recursos naturais, de sistemas ecológicos e da saúde humana, no Programa RenovaBio é considerada apenas a categoria “Mudança do Clima”.

A partir desse panorama histórico e institucional, observa-se que o desenvolvimento dos biocombustíveis no Brasil combinou políticas públicas e inovações tecnológicas. A mistura de etanol na gasolina é obrigatória desde 1930; no entanto, foi

---

<sup>5</sup> Mistura de Diesel A com Biodiesel em proporção volumétrica definida por regulamento, onde “x” representa o percentual de biodiesel adicionado ao diesel fóssil.

apenas a partir da década de 1970, com a criação do Proálcool, que o etanol passou a exercer impacto mais significativo no setor de transporte brasileiro. Adicionalmente, a virada tecnológica no início da década de 2000, com a entrada de veículos *flex-fuel*, ampliou a escolha do consumidor e contribuiu para a estabilização da demanda por etanol (Aguiar *et al.*, 2024). Já o biodiesel possui mistura obrigatória ao diesel desde 2005 com a criação do PNPB, sendo utilizado como uma fonte alternativa ao diesel fóssil, sendo o Brasil o quarto maior produtor de biodiesel do mundo (Costa *et al.*, 2024). Posteriormente, em 2017, o RenovaBio surgiu com o objetivo de impulsionar a produção de biocombustíveis, alinhando-se aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (Aguiar *et al.*, 2024).

Apesar desses avanços institucionais e tecnológicos, os biocombustíveis, como etanol e biodiesel, embora possam proporcionar benefícios relevantes na mitigação das mudanças climáticas no transporte rodoviário (IPCC, 2022), apresentam desafios associados às emissões de GEE ao longo de sua cadeia produtiva. Evidências recentes indicam que as emissões no Brasil são fortemente influenciadas por práticas agrícolas, incluindo o uso de fertilizantes, corretivos e sistemas de manejo das culturas, além das emissões decorrentes da mudança do uso do solo (Aguiar *et al.*, 2024; Carvalho *et al.*, 2021; Garofalo *et al.*, 2022; Cerri *et al.*, 2017). Nesse sentido, os benefícios ambientais do etanol de cana-de-açúcar e do biodiesel de soja têm sido amplamente debatidos, já que para a produção desses biocombustíveis, são observados impactos relacionados às emissões de GEE, uso da terra, consumo de recursos naturais, qualidade do solo e biodiversidade (Cherubin *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2023).

No caso do etanol de cana-de-açúcar, as emissões de óxido nitroso ( $N_2O$ ) provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos e orgânicos, bem como as emissões de  $CO_2$  associadas ao uso de calcário para correção da acidez do solo, são reconhecidas como as principais fontes de GEE na fase agrícola do ciclo produtivo (Carvalho *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2025). Além disso, o sistema de manejo da cultura exerce influência significativa sobre as emissões, destacando-se que, historicamente, a queima da palha da cana-de-açúcar antes da colheita constituiu a principal fonte de emissões agrícolas no setor sucroenergético brasileiro (Aguiar *et al.*, 2024). Nesse sentido, ao longo das últimas décadas, a produção de etanol de cana-de-açúcar passou por uma transição do sistema de colheita manual com queima para a colheita mecanizada, acompanhada da redução progressiva da queima da palha. Tais mudanças foram impulsionadas por instrumentos regulatórios em diferentes níveis institucionais, como o

Decreto Federal nº 2.661/1998 e, em âmbito estadual, a Lei nº 11.241/2002 no estado de São Paulo, que estabeleceu um cronograma para a eliminação da queima pré-colheita. Como resultado desse processo de modernização, estima-se que as emissões específicas associadas à produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo tenham sido reduzidas de 1,053 para 0,639 tonelada de CO<sub>2eq</sub> por hectare (tCO<sub>2eq</sub>/ha) entre 1990 e 2009, correspondendo a uma diminuição de 39,3% no período (Capaz *et al.*, 2013).

De forma análoga, no caso do biodiesel, produzido a partir de diferentes matérias-primas como o óleo de soja, sebo bovino, óleo de palma, óleo de canola entre outros, além das emissões associadas ao uso de insumos como calcário e fertilizantes (Carvalho *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2025), a mudança do uso do solo (MUS) configura-se como um dos principais fatores determinantes das emissões de GEE na produção de soja no Brasil. Estudos indicam que a expansão da cultura no Cerrado e na Amazônia está associada à conversão de vegetação nativa e à perda de estoques de carbono do solo e da biomassa, resultando em emissões significativas de CO<sub>2</sub> (Cerri *et al.*, 2017; Garofalo *et al.*, 2022). Adicionalmente, segundo Novaes *et al.* (2017), as taxas de emissão por hectare variam conforme o padrão de expansão territorial, sendo mais elevadas nos estados amazônicos, onde a conversão de áreas com altos estoques de carbono é predominante. Em termos quantitativos, as emissões de CO<sub>2</sub> para soja podem atingir entre 4,5 e 6,7 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectare ano (tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), refletindo o impacto da substituição de ecossistemas naturais. Essa variabilidade evidencia que a magnitude dessas emissões está relacionada tanto ao estoque de carbono original das áreas convertidas quanto ao período recente de expansão agrícola, sendo que estados com agricultura consolidada apresentam taxas menores.

Nesse contexto de expansão agrícola, a expansão do mercado de biodiesel no Brasil desde 2005 impulsionou o aumento das áreas cultivadas com soja, resultando em supressão de vegetação nativa (Brito *et al.*, 2023). Para mitigar esse efeito, foi criada a Moratória da Soja, um acordo estabelecido entre sociedade civil e empresas signatárias, que passaram a restringir a aquisição e o financiamento de soja proveniente de áreas desflorestadas após 22 de julho de 2008 no bioma Amazônia. Tal iniciativa tem como objetivo principal reduzir o desflorestamento associado à produção de soja, considerando que os signatários respondem por grande parte da comercialização da oleaginosa nesse bioma. Os resultados indicam que a medida tem sido eficaz, uma vez antes da Moratória, a taxa média de desmatamento nos municípios produtores de soja monitorados (2002-2008) era de 10.629 quilômetros quadrados por ano (km<sup>2</sup>/ano). Após sua implementação

(2009-2021), essa média caiu significativamente para 2.997 km<sup>2</sup>/ano (ABIOVE, 2022).

A partir dessa análise das cadeias produtivas, observa-se que a cana-de-açúcar (etanol) e a soja (biodiesel) estruturam historicamente as principais matérias-primas para produção de biocombustíveis no Brasil. A cana-de-açúcar, até 2012, era responsável por 100% do etanol produzido no país, no entanto, a partir de 2013, a produção de etanol a partir do milho passou a se desenvolver. Em 2023, a cana-de-açúcar foi responsável por 82,5% da produção total, enquanto o milho representou 17,5%. Já para o biodiesel, cuja produção no Brasil iniciou-se em 2005, a soja permanece como principal matéria-prima, sendo responsável, em média, por 73,1% da produção anual (ABIOVE, 2026; UNICADATA, 2026).

Diante da complexidade dos impactos ambientais associados a essas rotas produtivas, a metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) torna-se fundamental para avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essa abordagem possibilita uma análise integrada, incluindo a extração e o processamento de matérias-primas, a produção, a comercialização, o uso, bem como a reutilização e a disposição final dos resíduos (Branco *et al.*, 2024; Rocha *et al.*, 2024; Shang; Luo, 2021).

Nesse sentido, diversos estudos têm aplicado a ACV para analisar as emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transporte rodoviário e como o perfil de emissões se associa às diferentes categorias de frota, tipos de combustível e tecnologias veiculares. Por exemplo, Pereira *et al.* (2019) identificaram grande variabilidade nas estimativas entre modelos de ACV aplicados ao etanol, especialmente devido a diferenças metodológicas e de premissas. Contudo, ao harmonizar os parâmetros, as estimativas convergiram para valores mais consistentes, evidenciando a relevância de fatores como práticas agrícolas e transporte. De forma complementar, Macedo *et al.* (2008) demonstraram o elevado potencial de mitigação do etanol de cana-de-açúcar, associado à eficiência produtiva e ao aproveitamento energético do bagaço.

Adicionalmente, estudos recentes evidenciam que, ao considerar conjuntamente as emissões de ciclo de vida e da mudança de uso do solo, o etanol apresenta contribuição significativa para a redução de emissões no setor de transportes (Aguiar *et al.*, 2024). De forma complementar, a literatura indica que a mitigação das emissões nesse setor depende da combinação entre a ampliação do uso de biocombustíveis e a inserção de veículos elétricos e híbridos (Glyniadakis; Balestieri, 2023).

No que se refere à comparação entre tecnologias, Carvalho *et al.* (2023)

mostraram que veículos de combustão interna e híbridos abastecidos com etanol podem apresentar menores emissões por quilômetro rodado do que veículos elétricos, ressaltando a importância do contexto da matriz energética nacional. De maneira convergente, Rocha *et al.* (2014) apontaram que sistemas produtivos com maiores rendimentos agrícolas e melhor aproveitamento de coprodutos apresentam melhor desempenho ambiental.

Além das rotas baseadas em biocombustíveis, a expansão do uso de veículos elétricos (VEs) na frota veicular tem sido amplamente discutida como estratégia de mitigação climática (Liang *et al.*, 2019; Welch; Widita, 2019). Entretanto, a efetividade dessa alternativa depende diretamente da intensidade de carbono da matriz elétrica. Em países como Alemanha e China, onde predomina uma matriz mais intensiva em combustíveis fósseis, as emissões associadas aos VEs podem superar aquelas de veículos convencionais. Dessa forma, reforça-se a necessidade de expansão de fontes de energia limpa para garantir os benefícios da eletrificação (Buchal *et al.*, 2019; Gan *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, a viabilidade dessas rotas de mitigação reflete-se na organização do mercado nacional, onde os combustíveis em sua forma pura são o Diesel B<sub>x</sub>, Gasolina A<sup>6</sup>, Etanol Hidratado, Etanol Anidro e Biodiesel. No Brasil, é prática consolidada que esses produtos sejam misturados nas distribuidoras antes da comercialização (EPE, 2025a). A Gasolina C<sup>7</sup>, por exemplo, surge da adição de etanol anidro à Gasolina A, iniciada em 1931 (Nogueira; Capaz, 2013). De modo análogo, o Diesel B<sub>x</sub> incorpora percentuais de Biodiesel ao Diesel A, enquanto o Etanol Hidratado é utilizado em sua forma pura por veículos *flex-fuel* (EPE, 2025a). Essa estrutura de oferta atende à demanda de energia do setor rodoviário, que contempla veículos leves (ciclo Otto)<sup>8</sup>, abastecidos majoritariamente com etanol e gasolina C, e veículos pesados (ciclo Diesel)<sup>9</sup>, que utilizam Diesel B<sub>x</sub>.

Diante da crescente necessidade de descarbonização do setor de transportes, observa-se que organizações públicas e privadas têm intensificado esforços na adoção de novas tecnologias (EPE, 2025a). Adicionalmente, projeta-se um aumento significativo na demanda energética nos próximos anos, impulsionado pelo crescimento da frota e da atividade econômica (EPE, 2020b). Nesse contexto, compreender os impactos dessa

---

<sup>6</sup> Combustível fóssil derivado do petróleo, sem adição de etanol anidro, produzido nas refinarias e distribuído como base para a formulação da Gasolina C.

<sup>7</sup> Combustível comercial obtido pela mistura de Gasolina A com Etanol Anidro.

<sup>8</sup> Motor de combustão interna, característico de veículos leves movidos a gasolina ou etanol.

<sup>9</sup> Motor de combustão interna, característico de veículos pesados movidos a diesel.

transição energética torna-se fundamental para o planejamento de estratégias eficazes de mitigação. Considerando a relevância do transporte rodoviário nas emissões nacionais, a adoção de novas tecnologias e a transformação da matriz energética têm potencial para alterar significativamente o perfil de emissões no setor.

Nesse cenário, este estudo propõe uma análise temporal das emissões de GEE no setor de transporte rodoviário brasileiro, integrando avanços tecnológicos, transição energética e as mudanças estruturais na produção de biocombustíveis no Brasil por meio da abordagem de ACV. Adicionalmente, desenvolve análises inéditas de longo prazo ainda não exploradas no contexto nacional, com ênfase na integração entre a evolução da frota veicular e as emissões associadas à MUS. Os resultados obtidos buscam subsidiar a formulação de políticas públicas, o planejamento energético e a tomada de decisão orientada à mitigação de emissões no setor, além de contribuir para estratégias de transição para um sistema de transporte mais sustentável no Brasil.

## **1.1 Objetivos Geral e Específicos**

A partir do histórico consolidado de produção e uso de biocombustíveis no Brasil, o objetivo deste trabalho consiste em estimar temporalmente as emissões de GEE associadas ao setor de transporte rodoviário brasileiro.

São objetivos específicos:

- Identificar as etapas do ciclo de vida para produção de biocombustíveis que mais contribuem para as emissões de GEE;
- Quantificar e analisar as emissões de GEE por categoria de veículo (automóveis, caminhões e ônibus) e por tipo de combustível utilizado no setor, na perspectiva do ciclo de vida;
- Avaliar a influência da MUS nas emissões de GEE associadas ao consumo de biocombustíveis.

## **2. DADOS E METODOLOGIA**

### **2.1 Área de estudo**

O estudo abrange o território brasileiro, considerando a análise das emissões de GEE em escala nacional, utilizando a abordagem de ACV.

## 2.2 Base de dados

Foram utilizados dados referentes ao consumo de Gasolina C e Diesel B<sub>x</sub> no período de 1970 a 2023, bem como de Etanol Hidratado entre 1980 e 2023. Os dados apresentam resolução temporal de um ano e abrangência territorial correspondente aos 26 estados brasileiros e ao Distrito Federal. Essas informações foram obtidas por meio do portal de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025b).

Foram utilizados dados anuais de produção de biocombustíveis desagregados por tipo de matéria-prima. Para o etanol, foi estimada a participação relativa da produção anual proveniente de cana-de-açúcar e milho. Para o biodiesel, foi considerada a participação relativa da produção a partir de óleo de soja e sebo bovino, os quais, desde 2005, representaram, em média, 89% da produção anual do combustível (ABIOVE, 2026; UNICADATA, 2026).

Complementando os dados de consumo disponibilizados pela ANP (2025b), foi necessária a estimativa das proporções de Gasolina A e Etanol Anidro presentes na Gasolina C, bem como da proporção de Biodiesel no Diesel B<sub>x</sub>. Para isso, foram utilizados dados anuais de consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário no Brasil, no período de 1970 a 2023, contemplando Diesel B<sub>x</sub>, Biodiesel, Gasolina C e Etanol Anidro. Esses dados estão expressos em mil toneladas equivalentes de petróleo (mil tep), unidade energética adotada pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2025), sendo 1 tep equivalente a 41,868 Gigajoules.

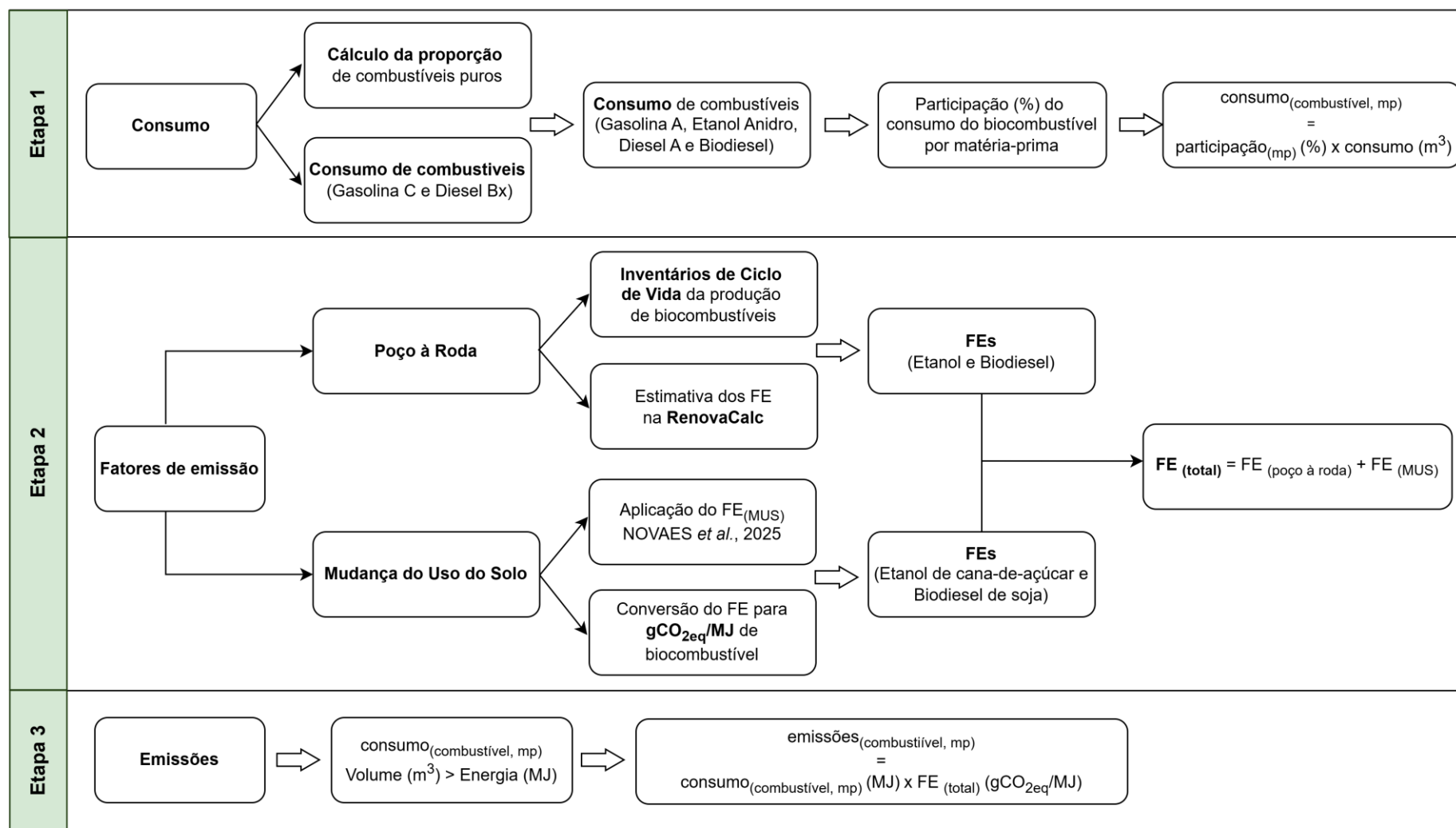
Neste estudo, os automóveis foram definidos na categoria de veículos leves, enquanto, caminhões e ônibus na categoria de veículos pesados. Inicialmente foram realizados o *download* dos dados das frotas veiculares. Foram utilizadas duas bases de dados contendo informações sobre a evolução da frota de veículos no Brasil durante o período entre 1970 e 2023. Os dados de 1970 a 1985 foram obtidos no portal de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), enquanto os dados entre 1998 e 2023 foram obtidos no portal de dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN, 2025). Entretanto, ressalta-se que, para o período entre 1986 e 1997 não foram encontrados dados disponíveis, dessa forma, os dados desse período foram estimados a partir da taxa de crescimento médio anual entre 1985-1998, com base em dados do SENATRAN, aplicada a cada categoria veicular considerada no estudo.

As emissões associadas à MUS para a produção de biocombustíveis no Brasil

foram estimadas para o etanol de cana-de-açúcar e o biodiesel de óleo de soja. Para esse fim, foi utilizada a ferramenta *Brazilian Land Use Change version 2.1* (BRLUC v2.1) (EMBRAPA, 2026), amplamente empregada na estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes de processos de MUS para culturas agrícolas, pastagens e florestas plantadas no país. O BRLUC considera o período de 2000 a 2019 para estimar as emissões associadas à MUS para 64 culturas, além de pastagens e florestas plantadas, em nível municipal no Brasil (Batista *et al.*, 2025). Em função da limitação de dados históricos de emissões associadas à MUS, adotou-se um único fator de emissão para todo o período de estudo, compreendendo os anos de 2000 a 2019.

### **2.3 Metodologia**

Para estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao consumo de combustíveis no Brasil, foram necessárias a realização de três etapas como ilustrado na Figura 2.



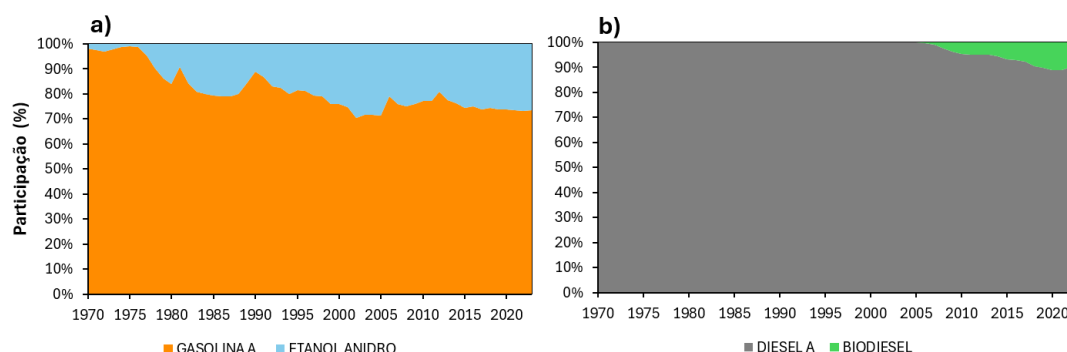
**Figura 2:** Fluxograma das etapas de trabalho para estimativa das emissões de GEE devido ao consumo de combustíveis no Brasil (gCO<sub>2eq</sub>/MJ).

### 2.3.1 Estimativa do consumo de combustíveis

A estimativa anual do consumo volumétrico em metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ) de combustíveis foi realizada a partir da realização das seguintes etapas:

#### **Etapas 1: Estimativa anual da proporção dos combustíveis**

A estimativa anual da proporção dos combustíveis puros (Gasolina A, Etanol Anidro, Diesel A e Biodiesel) nas misturas comerciais (Gasolina C e Diesel B<sub>x</sub>) foi realizada a partir da transformação inicial dos dados de consumo energético, originalmente expressos em mil tep (MME, 2025), para unidades volumétricas (mil  $\text{m}^3$ ), utilizando valores de Poder Calorífico Inferior (PCI<sup>10</sup>, em tep/ $\text{m}^3$ ) para cada combustível: Etanol Anidro (0,53), Etanol Hidratado (0,51), Biodiesel (0,79), Gasolina A (0,77) e Diesel A<sup>11</sup> (0,85), conforme a ferramenta RenovaCalc (ANP, 2025a). Na sequência, foram calculadas, para cada ano do período de 1970 a 2023, as proporções volumétricas dos componentes das misturas por meio de balanço volumétrico dos combustíveis. A participação da Gasolina A e do etanol anidro na Gasolina C, bem como do Diesel A e do biodiesel no Diesel B<sub>x</sub>, conforme apresentado na Figura 3, foi determinada a partir da razão entre o volume de cada combustível puro e o volume total da respectiva mistura.



**Figura 3:** Estimativa anual das proporções volumétricas dos combustíveis puros nas misturas comerciais: (a) Gasolina A e Etanol Anidro na Gasolina C; (b) Diesel A (B<sub>0</sub>) e Biodiesel no Diesel B<sub>x</sub>.

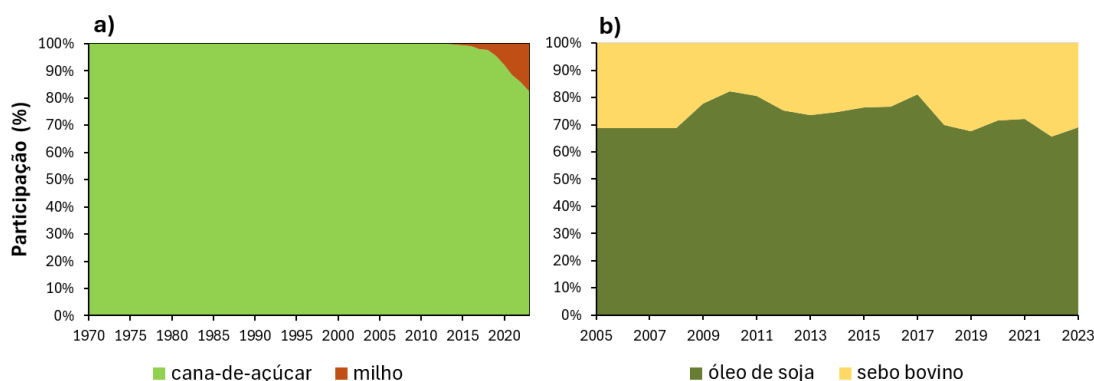
#### **Etapas 2: Cálculo do consumo anual de combustíveis**

O consumo total foi desagregado nos seguintes componentes: Gasolina A, Etanol Hidratado, Etanol Anidro, Diesel B<sub>x</sub> e Biodiesel. O consumo anual de cada combustível ( $\text{m}^3$ ) foi estimado a partir dos volumes de Gasolina C e Diesel B<sub>x</sub>, ponderados pelas

<sup>10</sup> Quantidade de energia liberada na combustão completa de um material combustível.

<sup>11</sup> Combustível fóssil derivado do petróleo, isento de biodiesel, produzido em refinarias e utilizado como base para a formulação do Diesel B<sub>x</sub>.

respectivas proporções dos combustíveis puros previamente determinadas. Adicionalmente, o consumo de biocombustíveis foi desagregado por matéria-prima de origem (etanol e biodiesel). Para o etanol, foi estimada a participação relativa da produção anual proveniente da cana-de-açúcar e do milho. Para o biodiesel, considerou-se a participação relativa da produção a partir de óleo de soja e sebo bovino. A Figura 4 apresenta a distribuição das participações por matéria-prima e tipo de biocombustível.



**Figura 4:** Participação volumétrica relativa de biocombustíveis por tipo de matéria-prima de origem. (a) Etanol; (b) Biodiesel.

### 2.3.2 Estimativa dos fatores de emissão

#### Função do sistema, unidade funcional, fluxo referência e avaliação de impacto

Neste estudo, os FEs para os biocombustíveis foram calculados através da calculadora RenovaCalc versão 7 (ANP, 2025a). A ferramenta adota a ACV atribucional, considerada uma técnica descritiva ou contábil que tem como objetivo atribuir a um produto, fabricado em um dado momento, uma parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos na economia.

A RenovaCalc é uma ferramenta brasileira desenvolvida no âmbito do programa RenovaBio. É especificamente utilizado para avaliar a eficiência energético-ambiental de instalações envolvidas na produção de biocombustíveis. A função principal da RenovaCalc é calcular a emissão de créditos de descarbonização. Esses créditos são um mecanismo para que produtores certificados de biocombustíveis gerem ativos negociáveis que podem ser vendidos a distribuidores de combustíveis fósseis e outras partes interessadas (Tiburcio *et al.*, 2023).

A RenovaCalc utilizada neste estudo para o cálculo das emissões considera a alocação energética, essa abordagem distribui as cargas de emissões entre os produtos, incluindo o etanol e eletricidade após sua conversão em base energética (MJ). Essa

abordagem é frequentemente utilizada em estudos de avaliação do ciclo de vida envolvendo processos de produção de biocombustíveis no Brasil (Liu *et al.*, 2023; Capaz *et al.*, 2021). A RenovaCalc adota as fronteiras do “poço à roda”, contabilizando todos os fluxos de material e energia consumidos e emitidos ao longo das etapas de aquisição de matéria-prima, conversão, distribuição e uso. Na fase de distribuição considerou-se o uso exclusivo do modal rodoviário, com distância média de transporte de 700 km. Na etapa de avaliação dos impactos ambientais da ACV, a RenovaCalc utiliza apenas a categoria de mudanças climáticas.

A utilização da RenovaCalc apresenta limitações quando aplicada à estimativa da intensidade de emissões de GEE de biocombustíveis no Brasil para períodos anteriores à sua criação (2017). A ferramenta foi desenvolvida no âmbito do Acordo de Paris de 2015, com o objetivo de apoiar políticas de mitigação de emissões de GEE no Brasil (Tiburcio *et al.*, 2023). Nesse contexto, a RenovaCalc se baseia em parâmetros e fatores de emissão fixos, incluindo fatores de caracterização do IPCC, insumos industriais e agrícolas, distâncias logísticas médias e fatores de combustão. Embora essa estrutura assegure consistência metodológica, ela limita a representação da variabilidade espacial, tecnológica e temporal dos sistemas produtivos, especialmente em análises históricas os quais podem não representar as condições de produção de biocombustíveis no Brasil (Pereira *et al.*, 2025).

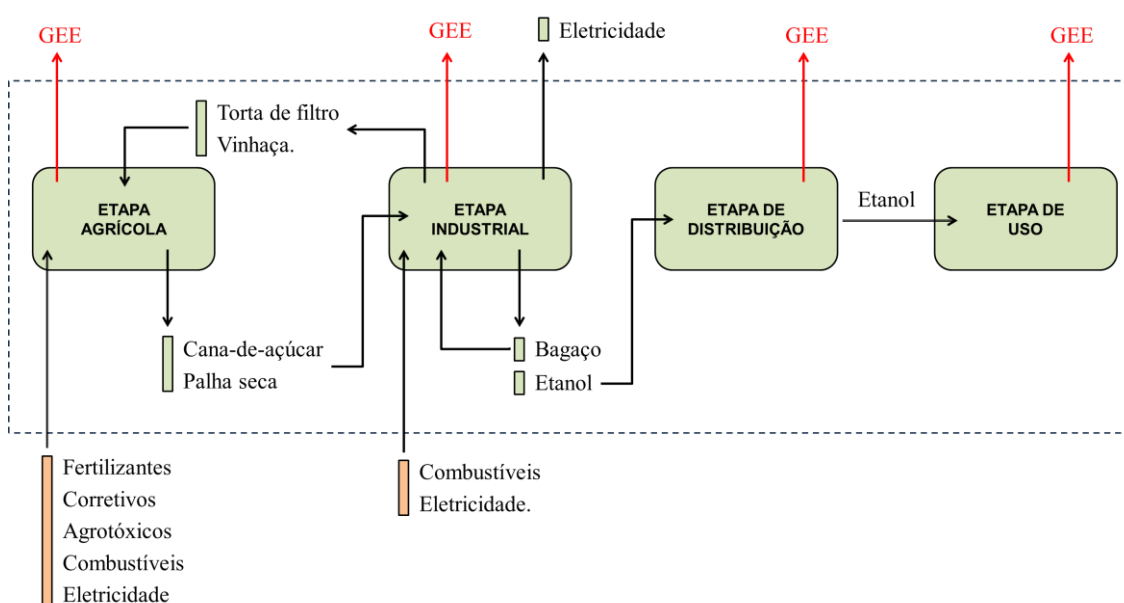
Nesse estudo, a modelagem do sistema de produção de etanol foi realizada considerando a integração entre as etapas agrícola e industrial. Na etapa agrícola, o consumo de diesel está associado às operações mecanizadas do cultivo (preparo do solo, plantio e colheita) e também ao transporte da cana-de-açúcar para às usinas. Na fase industrial da produção de etanol de cana-de-açúcar, são gerados resíduos industriais que são utilizados como fertilizantes nas áreas produtivas de cana-de-açúcar. Esses resíduos industriais, são a torta de filtro e a vinhaça, sendo a primeira um resíduo sólido proveniente da etapa de clarificação do caldo, rica em matéria orgânica e nutrientes, e a segunda um efluente líquido gerado na destilação do etanol. Paralelamente, a etapa industrial inclui o sistema de cogeração de energia, no qual o bagaço e a palha da cana-de-açúcar são utilizados como combustíveis em caldeiras para produção de vapor, que é utilizado tanto nas demandas térmicas do processo quanto na geração de eletricidade. Esse arranjo permite a autossuficiência energética da usina e a produção de eletricidade excedente, que pode ser exportada para a rede elétrica, especialmente quando há aproveitamento adicional da palha, aumentando a disponibilidade energética do sistema

(Bonomi *et al.*, 2016).

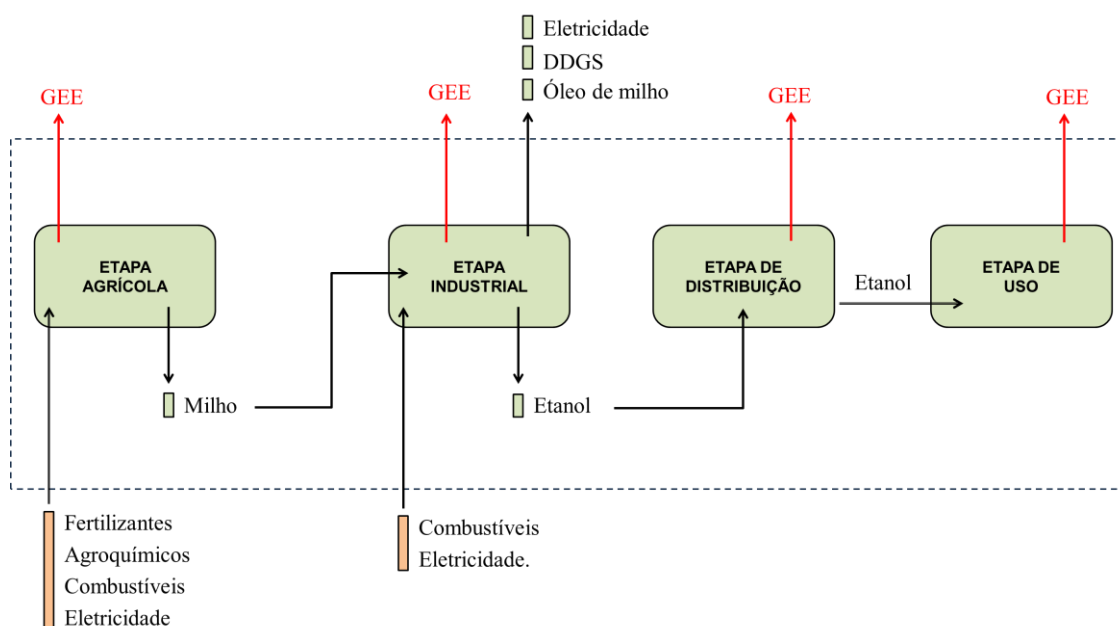
Na etapa industrial da produção de etanol de milho foi considerado o cavaco de eucalipto como insumo principal para cogeração de energia que possibilita a geração simultânea de vapor e eletricidade e reduz a dependência de fontes fósseis. Nesse processo, além do etanol, são gerados coprodutos relevantes, como o DDGS (*Dried Distillers Grains with Solubles*) e o óleo de milho, resultantes das etapas de fermentação e processamento do grão. O DDGS, obtido do resíduo sólido pós-destilação, é amplamente utilizado na alimentação animal, enquanto o óleo de milho pode ser direcionado para produção de biodiesel ou aplicações industriais, contribuindo para a viabilidade econômica do sistema (Moreira *et al.*, 2020).

Na etapa industrial do processo de produção de biodiesel de óleo de soja, são utilizadas diferentes fontes de biomassa como cavaco de madeira, lenha, resíduos florestais e bagaço de cana-de-açúcar para geração de calor e vapor. Além da produção de biodiesel, também são gerados coprodutos nos processos industriais. No processo de extração do óleo de soja destaca-se o farelo de soja, fração sólida remanescente utilizada na alimentação animal, enquanto no processo de transesterificação ocorre a geração de glicerina bruta e purificada (Branco *et al.*, 2025).

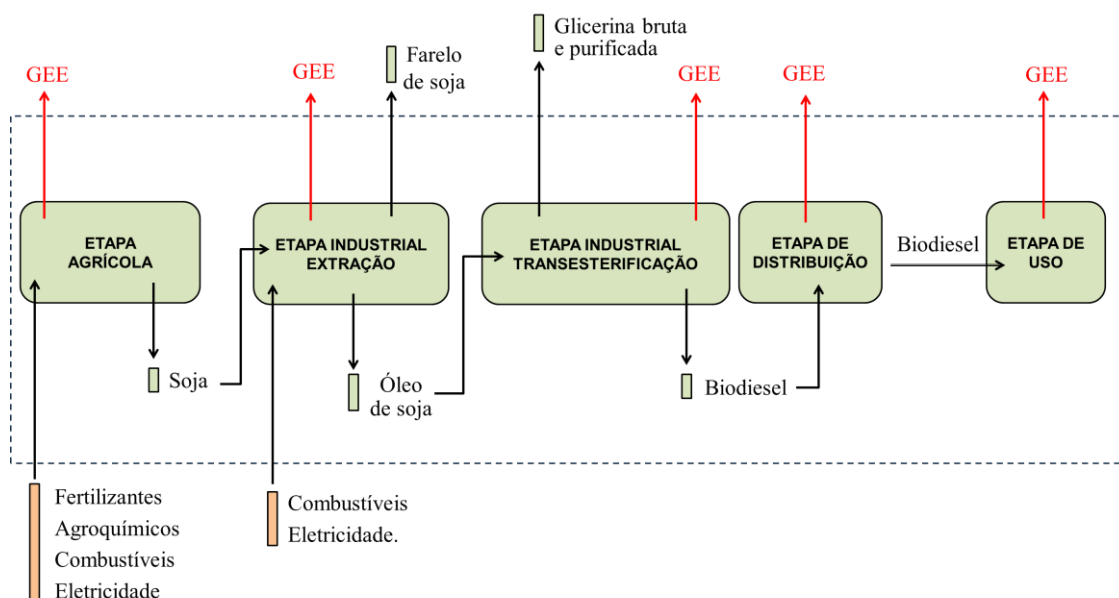
Foram elaborados sistemas de produto com base na RenovaCalc para cada processo de produção de biocombustíveis, abrangendo as etapas agrícola, industrial, distribuição e uso para 1 MJ de combustível. As figuras a seguir ilustram as entradas e saídas de cada sistema.



**Figura 5:** Sistema-produto da produção e uso de etanol de cana-de-açúcar.



**Figura 6:** Sistema-produto da produção e uso de etanol de milho.



**Figura 7:** Sistema-produto da produção e uso de biodiesel de óleo de soja.

### Fatores de emissão

Os fatores de emissão (FEs) foram estimados para o etanol (hidratado e anidro) e para o biodiesel, abrangendo o período de 1970 a 2023. Para o etanol, os FEs foram calculados considerando dois tipos de unidades produtivas: usinas anexas (Uane) e usinas autônomas (Uaut). As usinas anexas correspondem às unidades que produzem

simultaneamente açúcar e etanol, enquanto as usinas autônomas são caracterizadas pela produção exclusiva de etanol.

Devido à limitação de dados históricos sobre as características das usinas de produção de etanol ( $U_{ane}$  e  $U_{aut}$ ), foi necessário estimar a participação relativa dessas categorias no Brasil entre 1970 e 2009, com base em IPEA (2006), CONAB (2013) e CONAB (2017). A estimativa baseou-se na quantidade de usinas  $U_{ane}$  e  $U_{aut}$  em atividade no Brasil entre 1970 e 2023. A partir das informações disponíveis foram realizadas um média de participação de cada tecnologia por período de estudo. As estimativas foram validadas utilizando dados de produção de etanol desagregados por tipo de usina ( $U_{ane}$  e  $U_{aut}$ ), disponibilizados pela UNICADATA (2026a) para o período de 2010 a 2023. A relação entre  $U_{ane}$  e  $U_{aut}$  pode ser observada na Tabela 1.

**Tabela 1:** Participação relativa dos diferentes tipos de usina na produção de etanol de cana-de-açúcar ao longo dos períodos analisados. Nota: baseado em IPEA (2006), CONAB (2013) e CONAB (2017).

| Período   | Usinas Anexas | Usinas Autônomas |
|-----------|---------------|------------------|
| 1970-1985 | 21,8%         | 78,2%            |
| 1986-1995 | 51,4%         | 48,6%            |
| 1996-2005 | 38,7%         | 61,3%            |
| 2006-2015 | 33,3%         | 66,7%            |
| 2016-2023 | 26,9%         | 73,1%            |

Dentro de cada configuração de usinas ( $U_{ane}$  e  $U_{aut}$ ), foram consideradas duas configurações tecnológicas adicionais: usinas padrão (UP) e usinas otimizadas (UO). As UO são caracterizadas pela adoção de tecnologias mais avançadas e estratégias operacionais voltadas à maximização da eficiência energética e da geração de excedentes de energia. Em comparação às UP, destacam-se maior capacidade de processamento de cana-de-açúcar, maior eficiência na etapa de moagem, aproveitamento integral do bagaço e uso da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia (Bonomi *et al.*, 2016). Entre 1970 e 2015, 100% das usinas de etanol de cana-de-açúcar foram classificadas como UP. No período de 2016 a 2023, no entanto, as UO passaram a operar no Brasil. Para esse intervalo, adotou-se que 8% das usinas produtoras de etanol são UO e 92% UP. Essa classificação baseou-se na capacidade de produção de energia superior a 4 GWh/dia, conforme dados da ANP (2026).

Adicionalmente, a estimativa considerou as duas principais matérias-primas utilizadas, atualmente, na produção nacional de etanol: cana-de-açúcar e milho. No caso do biodiesel, consideraram-se o óleo de soja e o sebo bovino, os quais, desde 2005, representaram, em média, 89% da produção anual do combustível (ABIOVE, 2026).

A ausência de dados históricos sobre o mix de produção de etanol e açúcar nas usinas anexas de cana-de-açúcar entre 1970 e 1995 exigiu a adoção de outra premissa para obter essas informações. Para o período de 1970-1985 foi considerado o mix obtido por (Shikida, 1997). Nesse período, cerca de 20% da cana processada nas Uane foi destinada à produção de etanol e 80% para produção de açúcar. Essa premissa considera a expansão da produção de etanol nas Uane após a implantação do Proálcool em 1975.

Para estimar o mix entre 1986-1995 utilizou-se a abordagem do Mix de ATR (Açúcares Totais Recuperáveis), que quantifica a fração de açúcares recuperáveis atribuída a cada produto derivado da cana-de-açúcar (açúcar, etanol anidro e hidratado) (Seabra *et al.*, 2011). As etapas para calcular o mix de ATR podem ser observadas abaixo:

**(i) Conversão dos produtos finais em equivalente de ATR:** Os produtos finais, como açúcar, etanol hidratado e etanol anidro, são convertidos em seus respectivos equivalentes em ATR (em toneladas). Essa conversão estima a proporção (%) de ATR total disponível na usina que foi destinada à produção de etanol e açúcar.

**(ii) Aplicação dos fatores de ATR:** Um fator específico de ATR é aplicado para converter o volume de produção de cada produto em seu equivalente de ATR. Esses fatores representam a quantidade de açúcares recuperáveis necessária para a produção de cada produto. O fator de ATR é 1,0495 para o açúcar, 1,6913 para o etanol hidratado e 1,7651 para o etanol anidro.

**(iii) Cálculo do ATR total:** É obtido através da multiplicação do volume produzido (etanol e açúcar) pelo respectivo fator de ATR. Em seguida, soma-se o ATR equivalente de todos os produtos para determinar o ATR total da usina.

**(iv) Determinação do percentual do mix:** Nessa etapa foi determinado a participação percentual do ATR equivalente de cada produto em relação ao ATR total.

O mix de etanol e açúcar produzido em usinas anexas de cana-de-açúcar entre 1986-1995 pode ser observada na Tabela 2.

**Tabela 2:** Mix de açúcar e etanol para usinas anexas no período de 1986-1995 no Brasil. Nota: (1) Produção média de etanol e açúcar entre 1986-1995 (Almeida *et al.* 2017) e (2) Converte os produtos finais em seus equivalentes de ATR. Esta análise foi baseada em Seabra *et al.* (2011).

| <b>Produto</b> | <b>Produção <sup>(1)</sup><br/>(Mt ou Mm<sup>3</sup>)</b> | <b>Fator ATR <sup>(2)</sup><br/>Kg/kg ou kg/l</b> | <b>ATR<br/>(Mt)</b> | <b>Mix</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------|------------|
| Etanol         | 1006,0                                                    | 1,7282                                            | 1738,5              | 65%        |
| Açúcar         | 898,5                                                     | 1,0495                                            | 943,0               | 35%        |

A estimativa dos fatores de emissão (FEs) foi realizada a partir da elaboração de inventários de ciclo de vida (ICV) específicos para cada tipo de usina produtora de biocombustível, considerando diferenças nos parâmetros produtivos, nos rendimentos e na geração de coprodutos. Esses inventários foram construídos para os biocombustíveis consumidos no Brasil, sendo segmentados em duas etapas principais: (i) a fase agrícola, correspondente ao cultivo e à colheita das matérias-primas, e (ii) a fase industrial, relativa ao processamento e à conversão em biocombustível. Os ICV foram modelados com base em dados secundários provenientes de estudos nacionais, de modo a garantir a representatividade das condições brasileiras de produção e do período analisado.

Para retratar os marcos tecnológicos que alteraram a intensidade de emissões de GEE na produção dos biocombustíveis, bem como a disponibilidade de dados representativos, os FEs foram calculados temporalmente, segmentando a série histórica (1970-2023) em cinco períodos: 1970-1985, 1986-1995, 1996-2005, 2006-2015 e 2016-2023. As tabelas abaixo apresentam os principais parâmetros utilizados para construção dos ICV.

**Tabela 3:** Parâmetros da fase agrícola da produção da cana-de-açúcar (unidade/ha).

| Período                     | Fonte                       | Produção de cana (t) | Nitrogênio (kg) | Fósforo (kg) | Potássio (kg) | Calcário (kg) | Gesso (kg) | Torta de filtro (kg) | Vinhaça (l) | Queima (%) | Palha recolhida (t) | Diesel B <sub>x</sub> (l) |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|------------|----------------------|-------------|------------|---------------------|---------------------------|
| 1970-1985                   | Nogueira, 1987              | 65                   | 67              | 53           | 143           | 1670          | 0          | 0                    | 0           | 100        | 0                   | 42,1                      |
| 1986-1995                   |                             | 75,7                 | 67              | 53           | 143           | 1670          | 0          | 12000                | 0           | 100        | 0                   | 42,1                      |
| 1996-2005                   | Macedo <i>et al.</i> , 2008 | 82,4                 | 78              | 44           | 120           | 2200          | 0          | 12000                | 36000       | 80         | 5,7                 | 29,1                      |
| 2006-2015                   |                             | 87,1                 | 69,6            | 45           | 114,6         | 1900          | 0          | 12000                | 86240       | 69         | 6,1                 | 29,4                      |
| 2016-2023 (usina padrão)    | Bonomi <i>et al.</i> , 2016 | 76,01                | 101,2           | 15,5         | 108,5         | 400           | 200        | 570,1                | 40200       | 3,4        | 5,32                | 149,9                     |
| 2016-2023 (usina otimizada) |                             | 76,01                | 101,2           | 15,5         | 108,5         | 400           | 200        | 570,1                | 40200       | 3,4        | 5,32                | 149,9                     |

**Tabela 4:** Parâmetros da fase de produção de etanol de cana-de-açúcar em usina autônoma (unidade/tonelada de cana).

| Período                     | Fonte                       | Bagaço processado (kg) | Consumo de eletricidade (kWh) | Palha processada (t) | Rendimento de etanol (l) | Bagaço comercializado (kg) | Eletricidade excedente (kWh) | Representatividade                                                                              |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1970-1985                   | Nogueira, 1987              | 257,6                  | 11,3                          | 0                    | 73 (etanol hidratado)    | 22,4                       | 0                            | 70 usinas anexas; região: Estado de São Paulo.                                                  |
| 1986-1995                   |                             | 238                    | 11,3                          | 0                    | 83 (etanol hidratado)    | 42                         | 0                            |                                                                                                 |
| 1996-2005                   | Macedo <i>et al.</i> , 2008 | 257,6                  | 12,9                          | 0,07                 | 86 (etanol hidratado)    | 22,4                       | 0                            | 44 usinas autônomas; região: Centro-Sul do Brasil                                               |
| 2006-2015                   |                             | 254,2                  | 14                            | 0,07                 | 86,3 (etanol hidratado)  | 25,8                       | 9,2                          |                                                                                                 |
| 2016-2023 (usina padrão)    | Bonomi <i>et al.</i> , 2016 | 255,9                  | 0                             | 0,07                 | 84,7 (etanol anidro)     | 24,1                       | 0                            | Usina autônoma padrão (UP) simulada por <i>software</i> ; região: Condições médias do Brasil    |
| 2016-2023 (usina otimizada) |                             | 280                    | 0                             | 0,07                 | 85 (etanol anidro)       | 0                          | 185,8                        | Usina autônoma otimizada (UO) simulada por <i>software</i> ; região: Condições médias do Brasil |

**Tabela 5:** Parâmetros da fase de produção de etanol de cana-de-açúcar em usina anexa (unidade/tonelada de cana).

| Período        | Fonte                       | Bagaço processado (kg) | Consumo de eletricidade (kWh) | Palha processada (t) | Rendimento de etanol (l)                        | Rendimento de açúcar (kg) | Bagaço comercializado (kg) | Eletricidade excedente (kWh) | Representatividade                                                                                                                                              |
|----------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1970-1985      | Nogueira, 1987              | 257,6                  | 11,3                          | 0                    | 14,6 (etanol hidratado)                         | 85,1                      | 22,4                       | 0                            | 70 usinas anexas; região: Estado de São Paulo.                                                                                                                  |
| 1986-1995      |                             | 238                    | 0                             | 0                    | 53,9 (etanol hidratado)                         | 37,2                      | 42                         | 0                            |                                                                                                                                                                 |
| 1996-2005      | Seabra <i>et al.</i> , 2011 | 255,3                  | 0                             | 0,07                 | 41,3 (etanol hidratado)<br>21,5 (etanol anidro) | 54,2                      | 8,7                        | 10,7                         | 168 usinas; região: Centro-Sul do Brasil.                                                                                                                       |
| 2006-2015      |                             | 255,3                  | 0                             | 0,07                 | 41,3 (etanol hidratado)<br>21,5 (etanol anidro) | 54,2                      | 8,7                        | 10,7                         |                                                                                                                                                                 |
| 2016-2023 (UP) | Bonomi <i>et al.</i> , 2016 | 252,2                  | 0                             | 0,07                 | 53,2 (etanol anidro)                            | 51,3                      | 27,8                       | 0                            | Usina padrão (UP) simulada por software; região: Condições médias do Brasil.<br>Usina otimizada (UO) simulada por software; região: Condições médias do Brasil. |
| 2016-2023 (UO) |                             | 280                    | 0                             | 0,07                 | 53,5 (etanol anidro)                            | 51,4                      | 0                          | 185,8                        |                                                                                                                                                                 |

**Tabela 6:** Parâmetros da fase agrícola da produção de milho (unidade/ha).

| Período   | Fonte                        | Produção de milho (t) | Nitrogênio (kg) | Fósforo (kg) | Potássio (kg) | Calcário (kg) | Pesticidas (kg) | Sementes (kg) | Eletricidade (kWh) | Diesel (kg) |
|-----------|------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|--------------------|-------------|
| 2013-2023 | Moreira <i>et al.</i> , 2020 | 7                     | 100             | 50           | 50            | 200           | 5               | 13            | 7                  | 50          |

**Tabela 7:** Parâmetros da fase de produção de etanol de milho (unidade/tonelada de milho).

| Período   | Fonte                        | Cavaco de eucalipto (kg) | Eletricidade (kWh) | Rendimento de DDGS (kg) | Rendimento (l etanol) | Rendimento de óleo de milho (kg) | Eletricidade excedente (kWh) | Representatividade                                                                                      |
|-----------|------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2013-2023 | Moreira <i>et al.</i> , 2020 | 464                      | 151                | 363                     | 430 (etanol anidro)   | 13                               | 151                          | 1 usina autônoma de etanol de milho instalada no estado do Mato Grosso; região: Centro-Oeste do Brasil. |

**Tabela 8:** Parâmetros da fase agrícola da produção de soja (unidade/ha).

| Período   | Fonte                       | Produção de soja (t) | Nitrogênio (kg) | Fósforo (kg) | Potássio (kg) | Calcário (kg) | Gesso (kg) | Sementes (kg) | Diesel (kg) | Biodiesel (kg) |
|-----------|-----------------------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|------------|---------------|-------------|----------------|
| 2005-2023 | Branco <i>et al.</i> , 2025 | 3,34                 | 9,4             | 91,0         | 109,4         | 832,8         | 178,3      | 58,2          | 27,1        | 3,1            |

**Tabela 9:** Parâmetros da fase de extração do óleo de soja (unidade/tonelada de soja).

| Período   | Fonte                       | Eletricidade (kWh) | Diesel (l) | Cavaco de madeira (kg) | Lenha (kg) | Resíduos florestais (kg) | Bagaço de cana (kg) | Rendimento de óleo (kg) | Rendimento de farelo (kg) | Representatividade                                                  |
|-----------|-----------------------------|--------------------|------------|------------------------|------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 2005-2023 | Branco <i>et al.</i> , 2025 | 35,22              | 0,034      | 111,93                 | 6,54       | 0,48                     | 0,11                | 204,9                   | 720,2                     | Quinze usinas industriais de biodiesel certificadas pela RENOVARIO. |

**Tabela 10:** Parâmetros da fase de transesterificação para produção de biodiesel de óleo de soja (unidade/tonelada de óleo de soja).

| Período   | Fonte                       | Metanol (t) | Metilato de sódio (l) | Hidróxido de sódio (kg) | Eletricidade da rede (kg) | Eletricidade de biomassa (kg) | Diesel (kg) | Gás natural (kg) | Cavaco de madeira (kg) | Lenha (kg) | Resíduos florestais (kg) | Glicerina pura (t) | Glicerina bruta (t) | Biodiesel (m³) | Representatividade                                                  |
|-----------|-----------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|------------------|------------------------|------------|--------------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| 2005-2023 | Branco <i>et al.</i> , 2025 | 0,1         | 0,012                 | 0,005                   | 0,041                     | 0,002                         | 0,001       | 0,44             | 0,067                  | 0,018      | 0,001                    | 0,004              | 0,10                | 1,12           | Quinze usinas industriais de biodiesel certificadas pela RENOVARIO. |

### 2.3.3 Estimativa das emissões de GEE

#### Emissões do poço à roda

As emissões associadas ao uso dos biocombustíveis, foi estimada a partir da Equação 1, onde os fatores de emissão referem-se às emissões de CO<sub>2eq</sub> estimadas na perspectiva do ciclo de vida do biocombustível. Esses fatores foram diferenciados temporalmente, segmentando-se a série histórica (1970-2023) em cinco períodos: 1970-1985, 1986-1995, 1996-2005, 2006-2015 e 2016-2023. Esta periodização buscou retratar os marcos tecnológicos que alteraram a intensidade de emissões de CO<sub>2</sub> na produção de biocombustíveis em duas etapas principais ciclo de vida: (i) a fase agrícola, que inclui a obtenção da matéria-prima (cana-de-açúcar, soja e milho.), sujeita a mudanças no uso do solo, manejo do cultivo e produtividade das lavouras; e (ii) a fase industrial, referente ao processamento nas usinas, que passou por ganhos substantivos de eficiência energética e otimização de processos.

Para os combustíveis fósseis, utilizaram-se os valores fornecidos pela RenovaCalc, 87,57 gCO<sub>2eq</sub>/MJ para o Diesel A e 90,61 gCO<sub>2eq</sub>/MJ para a Gasolina A para todo o período de estudo.

A partir dos dados anuais de proporção dos combustíveis, foram estimadas as emissões relacionadas ao consumo dos combustíveis, utilizando a equação abaixo:

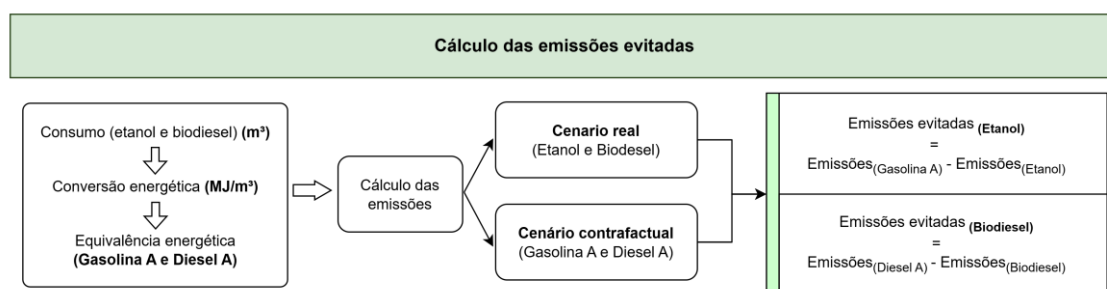
$$Emissões_{combustível(gCO_{2eq})} = Consumo_{MJ} \times FE_{(gCO_{2eq}/MJ)} \quad (1)$$

Onde:

- *Emissões<sub>combustível</sub>*: Representa as emissões relacionadas ao consumo de cada combustível em gCO<sub>2eq</sub>;
- *Consumo<sub>MJ</sub>*: Representa o consumo anual de cada combustível em MJ;
- *FE<sub>(gCO<sub>2eq</sub>/MJ)</sub>*: Representa o fator de emissão de cada combustível em gCO<sub>2eq</sub>/MJ para um determinado período analisado.

Os impactos associados ao consumo de biocombustíveis no período de 1970 a 2023 foram quantificados com base no conceito de emissões evitadas. Essa abordagem consiste na comparação entre as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao uso de biocombustíveis e aquelas que seriam observadas em um cenário de equivalência energética, no qual a mesma demanda energética seria integralmente suprida por combustíveis fósseis.

Inicialmente, os fluxos volumétricos de consumo de combustíveis foram convertidos em unidades energéticas (MJ) por meio da aplicação do poder calorífico inferior (PCI), expressos em megajoule por metro cúbico (MJ/m<sup>3</sup>), conforme segue: Etanol Hidratado (21.341,4 MJ/m<sup>3</sup>), Etanol Anidro (22.353,7 MJ/m<sup>3</sup>), Gasolina A (32.306,7 MJ/m<sup>3</sup>), Diesel A (35.523,6 MJ/m<sup>3</sup>) e Biodiesel (33.158,4 MJ/m<sup>3</sup>). A partir dessa conversão, a demanda energética atendida pelos biocombustíveis foi utilizada para estimar o consumo equivalente de combustíveis fósseis, assumindo equivalência energética entre os combustíveis. Em seguida, foram aplicados fatores de emissão específicos, expressos em gCO<sub>2eq</sub>/MJ, tanto para os biocombustíveis quanto para os combustíveis fósseis. Com base nesses fatores, foram estimadas: (i) as emissões associadas ao cenário real, correspondente ao uso de biocombustíveis, e (ii) as emissões do cenário contrafactual, correspondente ao uso exclusivo de combustíveis fósseis.



**Figura 8:** Etapas de trabalho para estimativa das emissões evitadas devido ao uso de biocombustíveis no Brasil.

### Emissões devido à mudança do uso do solo

As emissões de CO<sub>2eq</sub> ocasionadas pela mudança do uso do solo (MUS) podem ser estimadas a partir da diferença do estoque de carbono nas transições observadas entre dois anos em uma determinada área (Sanquetta *et al*, 2020). As emissões relacionadas à MUS são altamente heterogêneas em todo o Brasil e nos usos da terra, variando de positivas e negativas. Em geral, elas são maiores no bioma Amazônia, devido ao desmatamento, e menores no Leste do Brasil, onde as áreas agrícolas são mais consolidadas (Garofalo *et al*, 2022).

As emissões associadas a mudanças no uso do solo (MUS) para a produção de biocombustíveis no Brasil estão diretamente relacionadas à expansão das áreas agrícolas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar e soja, principais matérias-primas para a produção de etanol e biodiesel no país. Em função da limitação de dados históricos referentes às emissões de MUS para essas culturas, adotou-se um único FE ao longo de

todo o período de análise. Com base na ferramenta BRLUC v2.1, os FEs associados à MUS utilizados foram:  $0,07 \text{ tCO}_2\text{.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$  para a cultura da cana-de-açúcar e de  $1,72 \text{ tCO}_2\text{.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$  para a soja (EMBRAPA, 2026).

A taxa de emissão devido a MUS da cana-de-açúcar é muito inferior em comparação com a soja, devido à capacidade da cana-de-açúcar de remoção líquida de carbono sob as práticas de manejo, sua natureza perene e a dinâmica específica do carbono considerada no modelo BRLUC, que reflete um balanço de carbono mais favorável para a cana-de-açúcar. Isso contrasta com a soja, que geralmente é emissora líquida, devido às diferentes características da cultura e às abordagens típicas de manejo agrícola (Batista *et al.*, 2025).

No caso do etanol de milho, assumiu-se que a maior parte da produção nacional de milho destinada à produção de etanol ocorre no sistema de segunda safra (milho safrinha), cultivado em sucessão à soja, sem induzir nova conversão de uso do solo (Moreira *et al.*, 2020). Assim, as emissões diretas associadas à MUS foram alocadas integralmente à soja, enquanto o milho foi considerado isento de emissões.

Com base nos FEs devido a MUS para soja e cana-de-açúcar, foi possível obter os FEs para o etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de óleo de soja. A estimativa foi realizada para cada período de estudo relacionados à produção de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de óleo de soja, envolvendo três etapas principais: (i) determinação da área média necessária para produção de 1 tonelada de matéria-prima ( $\text{ha.t}^{-1}$ ); (ii) aplicação das taxas de emissão de MUS por unidade de área, resultando em emissões por tonelada de matéria-prima ( $\text{gCO}_2\text{.t}^{-1}\text{.ano}^{-1}$ ); e (iii) conversão do FE para  $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ , por meio da alocação energética ao longo do ciclo de vida dos biocombustíveis.

#### 2.3.4 Relação frota veicular e emissões de GEE

Para a avaliação da relação entre a evolução da frota veicular e as emissões de  $\text{CO}_2$ , foram utilizados dados anuais do número de veículos no Brasil no período de 1970 a 2023. Os automóveis foram classificados como veículos leves, enquanto caminhões e ônibus foram agrupados na categoria de veículos pesados. Essa agregação foi adotada com o objetivo de refletir diferenças estruturais no consumo energético, nos fatores de emissão e nos padrões de uso entre os dois grupos.

Entretanto, ressalta-se que, para o período entre 1986 e 1997 não foram encontrados dados disponíveis, dessa forma, os dados desse período foram estimados a

partir da taxa de crescimento médio anual entre 1985-1998.

$$Frota_{ano} = Frota_{ano-1} + Taxa\ de\ crescimento_{(1985-1998)} \quad (2)$$

$$Taxa\ de\ crescimento_{(1985-1998)} = \frac{Frota_{(1998)} - Frota_{(1985)}}{Período_{anos}} \quad (3)$$

Onde:

- $Frota_{ano}$ : Número da frota de veículos pesados ou leves para determinado ano entre 1986 e 1997;
- $Taxa\ de\ crescimento_{(1985-1998)}$ : Taxa de crescimento média anual para a frota de veículos pesados e leves;
- $Frota_{(1998)}$ : Número da frota de veículos pesados e leves no ano de 1998;
- $Frota_{(1985)}$ : Número da frota de veículos pesados e leves no ano de 1985;
- $Período_{anos}$ : Período em anos entre 1998 e 1985.

As emissões de CO<sub>2eq</sub> relacionadas ao consumo de Diesel A e Biodiesel foram agrupadas às emissões de veículos pesados, enquanto as emissões de CO<sub>2eq</sub> relacionadas ao consumo de Gasolina A, Etanol Anidro e Hidratado foram agrupadas às emissões de veículos leves.

Para relacionar o perfil de emissões com a evolução da frota veicular foram calculados a intensidade de emissões por unidade da frota e a intensidade de consumo de combustíveis por unidade da frota utilizando as equações abaixo:

$$I_{Consumo(t,f)} = \frac{Consumo_{(t,f)}}{Tamanho\ da\ frota_{(t,f)}} \quad (4)$$

$$I_{Emissões(t,f)} = \frac{Emissões\ CO_{2eq}\ (t,f)}{Tamanho\ da\ frota_{(t,f)}} \quad (5)$$

Onde:

- $I_{Consumo(t,f)}$ : Intensidade de consumo de combustíveis expressa em  $(Mm^3/veículo)$  para cada categoria ano (t) e categoria de veículo (v);
- $Consumo_{(t,f)}$ : Consumo de combustíveis expressa em  $(Mm^3)$  para cada ano (t) e categoria de veículo (v);
- $Tamanho\ da\ frota_{(t,f)}$ : Quantidade de veículos expressa em unidades para cada ano

(t) e categoria de veículo (v);

- $I_{Emissões(t,f)}$ : Intensidade de emissões por unidade de veículo expressa em  $\left(MtCO_{2eq}/veículo\right)$  para cada categoria ano (t) e categoria de veículo (v);
- $Emissões_{(t,f)}$ : Emissões de  $CO_{2eq}$  expressa em  $(MtCO_{2eq})$  para cada ano (t) e categoria de veículo (v);

A partir dos dados da evolução da frota veicular brasileira; de emissões de  $CO_{2eq}$  e de consumo de combustíveis foram calculadas a taxa de crescimento anual composta (*Compound Annual Growth Rate* - CAGR) para os 5 períodos analisados no estudo. Ele busca avaliar a evolução da frota veicular; a intensidade de consumo por veículo e a intensidade de emissões de  $CO_{2eq}$  por veículo, possibilitando identificar as relações entre o crescimento da mobilidade motorizada e impactos nas emissões de  $CO_2$ . Ao calcular o CAGR, possibilitou comparar e avaliar os impactos dos principais marcos regulatórios e tecnológicos que moldaram o setor de transporte rodoviário brasileiro. Para isso foram calculados os seguintes indicadores:

$$Tx \text{ de cresc. frota}_{período, frota} = \left( \frac{Frota_{(final)}}{Frota_{(inicial)}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (6)$$

$$Tx \text{ de cresc. consumo}_{período, frota} = \left( \frac{I_{consumo(final)}}{I_{consumo(inicial)}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (7)$$

$$Tx \text{ de cresc. emissões}_{período, frota} = \left( \frac{I_{emissões(final)}}{I_{emissões(inicial)}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (8)$$

Onde:

- $Tx \text{ de cresc. frota}$ : Taxa de crescimento da frota (%);
- $Frota_{(final)}$ : Valor final do número de veículos por tipo de frota;
- $Frota_{(inicial)}$ : Valor inicial do número de veículos por tipo de frota;
- $n$ : Número de anos entre o ano final e inicial;
- $Tx \text{ de cresc. consumo}$ : Taxa de crescimento da intensidade de consumo por unidade da frota (%);
- $I_{consumo(final)}$ : Valor final da intensidade de consumo por tipo de veículos;
- $I_{consumo(inicial)}$ : Valor inicial da intensidade de consumo por tipo de veículos;
- $Tx \text{ de cresc. emissões}$ : Taxa de crescimento da intensidade de emissões de  $CO_{2eq}$  por

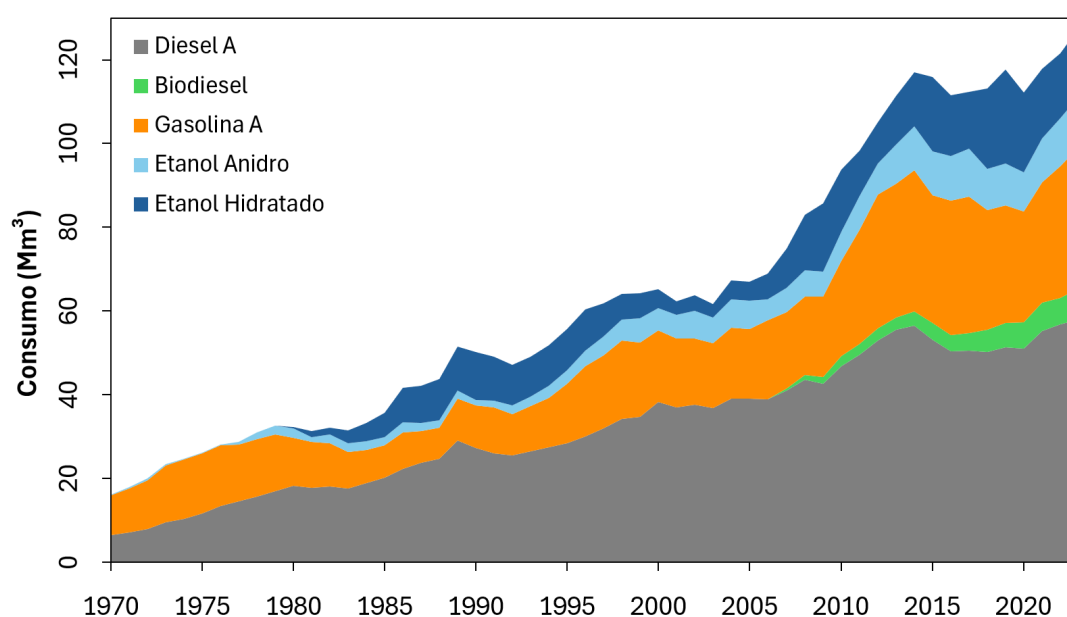
unidade da frota (%);

- $I_{emissões(final)}$ : Valor final da intensidade de emissões de  $CO_{2eq}$  por tipo de veículo;
- $I_{emissões(inicial)}$ : Valor inicial da intensidade de emissões de  $CO_{2eq}$  por tipo de veículo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Evolução do consumo de combustíveis no transporte rodoviário

A Figura 9 apresenta a evolução do consumo de combustíveis no Brasil entre 1970-2023. Observa-se crescimento expressivo do consumo de combustíveis, associado principalmente à expansão da frota de veículos, à criação de políticas de incentivo à produção e ao uso de biocombustíveis e à consolidação do transporte rodoviário como principal modal de cargas e passageiros no país. Entre 1970 e 2023, o consumo de Diesel A aumentou de 6,5 para 57,9 Milhões de metros cúbicos ( $Mm^3$ ), enquanto a gasolina aumentou de 9,5 para 33,7  $Mm^3$ , evidenciando a forte dependência de combustíveis fósseis no Brasil. No entanto, a criação de políticas de incentivo aos biocombustíveis no Brasil (Proálcool - 1975; PNPB - 2004; RenovaBio - 2017), associada à introdução de novas tecnologias veiculares, como veículos leves movidos exclusivamente a Etanol Hidratado na década de 1980 e veículos *flex-fuel* em 2003, promoveu mudanças no padrão de consumo.



**Figura 9:** Evolução do consumo de combustíveis no Brasil em  $Mm^3$  no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023.

No caso da Gasolina A, observa-se impacto mais significativo, com perda de participação para o Etanol Anidro e, principalmente, para o Etanol Hidratado, resultado da substituição iniciada na década de 1970, impulsionada pela crise do petróleo e pela criação do Proálcool. Em contraste, o consumo de Diesel A foi pouco impactado, sendo parcialmente substituído pelo Biodiesel a partir de 2005, contudo, a ausência de alternativas para competir no segmento de transporte pesado mantém sua predominância na matriz.

A criação do Proálcool em 1975 elevou o consumo de Etanol Anidro de 0,2 Mm<sup>3</sup> em 1975 para 1,9 Mm<sup>3</sup> em 1989. O Etanol Hidratado começou a ser consumido em carros movidos exclusivamente a etanol na década de 1980, o consumo cresceu de 0,4 Mm<sup>3</sup> em 1980 para 10,5 Mm<sup>3</sup> em 1989. Na década de 1990, o Proálcool começou a entrar em crise e consequentemente impactou no menor consumo de etanol no Brasil. Entre os anos de 1990 e 2003, o consumo de Etanol Anidro caiu de 11,5 para 3,2 Mm<sup>3</sup> enquanto o consumo de Etanol Hidratado saltou de 1,3 para 6,2 Mm<sup>3</sup>.

A partir de 2004, com a popularização dos veículos *flex-fuel*, houve uma mudança no consumo de combustíveis dedicados à frota de veículos leves, destacando-se o Etanol Hidratado como um dos principais combustíveis utilizado no setor de transporte rodoviário, nesse sentido, o consumo de Etanol Hidratado saltou de 3,2 Mm<sup>3</sup> em 2003 para 16,3 Mm<sup>3</sup> em 2009.

Em relação ao consumo de Etanol Anidro e Hidratado, observa-se o crescimento do consumo desde a década de 1970, impulsionado pela criação do Proálcool em 1975. O programa estimulou inicialmente o maior uso de Etanol Anidro misturado à Gasolina A. Esta mistura passou de cerca de 4% na década de 1970 para 18% nos anos 1980, superando 20% após 2003 e atingindo 27% em 2023 (ANP, 2025b). Posteriormente, na década de 1980, promoveu o Etanol Hidratado, destinado aos veículos movidos exclusivamente a esse combustível. A partir de 2003, a introdução dos veículos *flex-fuel* na frota veicular brasileira intensificou a demanda por Etanol Hidratado (Aguilar *et al.*, 2024).

Já o Biodiesel apresenta inserção restrita, uma vez que seu consumo está totalmente associado à política de mistura obrigatória ao Diesel B<sub>x</sub>, sem competir diretamente com o Diesel A. Desde sua introdução em 2005, o consumo aumentou gradualmente, impulsionado pelo aumento de sua concentração no Diesel B<sub>x</sub>, que passou de 1% em 2007 para 7% em 2016, atingindo 12% em 2023 (ANP, 2025b).

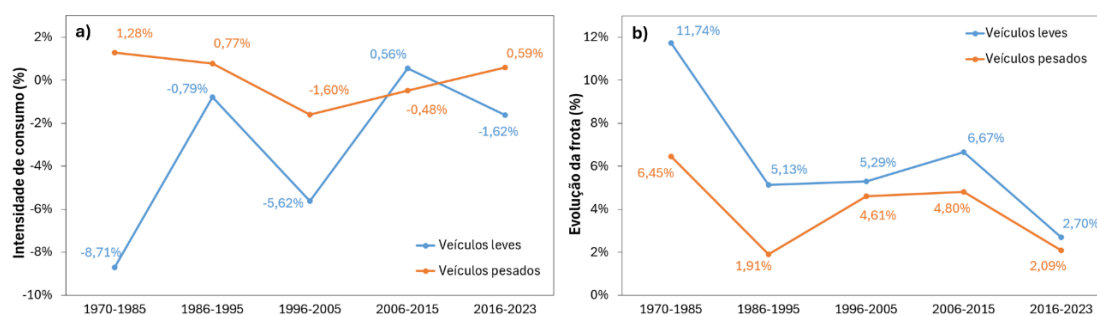
A Figura 10a apresenta a evolução da taxa de crescimento anual da intensidade de

consumo de combustíveis no transporte rodoviário brasileiro. No segmento de veículos leves, observa-se uma tendência de redução ao longo das décadas, com taxas negativas expressivas nos períodos de 1970-1985 (-8,71%), em que a intensidade de consumo passou de 0,17 para 0,04 MJ/unidade, e de 1996-2005 (-5,62%), quando houve redução de 0,05 para 0,03 MJ/unidade. Esses resultados estão associados a ganhos de eficiência no consumo da frota de veículos leves no Brasil.

Para a frota de veículos pesados, observou-se aumento da intensidade de consumo nos períodos iniciais da análise, especialmente em 1970-1985 (1,28%), com elevação de 0,54 para 0,68 MJ/unidade, e em 1986-1995 (0,77%), quando a intensidade aumentou de 0,71 para 0,76 MJ/unidade. Durante esses períodos, verificou-se um aumento da demanda energética no transporte de cargas. Nos períodos seguintes, contudo, foram observadas reduções na intensidade de consumo, como em 1996-2005 (-1,60%), com queda de 0,79 para 0,68 MJ/unidade, e em 2016-2023 (-0,48%), com redução de 0,65 para 0,62 MJ/unidade.

A Figura 10b apresenta a evolução da taxa de crescimento anual da frota de veículos leves e pesados no Brasil. Observa-se crescimento acentuado em todos os períodos, especialmente entre 1970-1985. Nesse intervalo, a frota de veículos leves aumentou de 1,8 para 9,5 milhões de unidades (taxa de crescimento anual de 11,74%), enquanto a frota de veículos pesados passou de 0,4 para 1,1 milhões de unidades (taxa de crescimento anual de 6,45%).

Ao longo das décadas, verifica-se uma redução gradual nas taxas de crescimento da frota, embora estas permaneçam positivas. No período de 2016-2023, a frota de veículos leves aumentou de 51,2 para 61,8 milhões de unidades (taxa de crescimento anual de 2,7%), enquanto a frota de veículos pesados evoluiu de 3,3 para 3,8 milhões de unidades (taxa de crescimento anual de 2,09%).



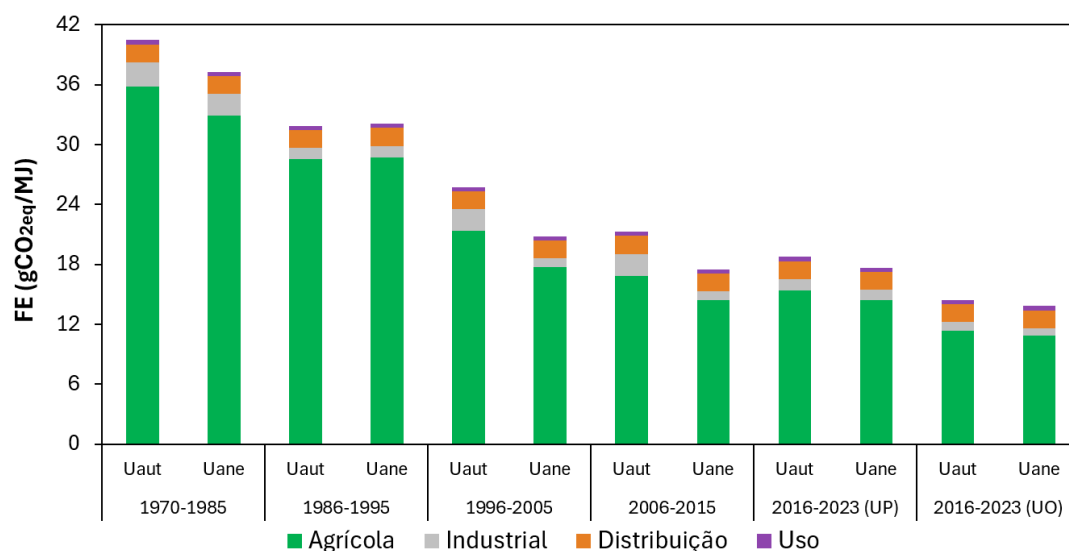
**Figura 10:** Taxa de crescimento anual de intensidade consumo de combustíveis para veículos leves e pesados (Figura 10a). Taxa de crescimento anual de veículos leves e pesados (Figura 10b).

Esses resultados refletem transformações estruturais na economia brasileira, como o processo de urbanização acelerada, a consolidação do transporte rodoviário como principal modal de deslocamento de pessoas e cargas e a baixa integração de modais alternativos. Esses fatores também foram observados por Huertas (2025) e ICCT (2021), que destacam a consolidação do transporte rodoviário como principal meio transporte de cargas no Brasil, com elevada dependência do Diesel. Esse padrão resulta da expansão da malha rodoviária e da atuação estatal no financiamento e regulação da infraestrutura. O processo esteve associado à urbanização e industrialização, reforçando a centralidade do caminhão na circulação de mercadorias.

### 3.2 Fatores de emissão

Os FEs dos biocombustíveis, calculados para o período de 1970-2023, consideraram as emissões provenientes das seguintes etapas do ciclo de vida: i) Agrícola, ii) Industrial; iii) Distribuição e iv) Uso. As emissões associadas ao consumo de etanol anidro de cana-de-açúcar (Figura 11), indicam uma redução gradual dos FEs ao longo do período analisado. Observa-se que o FE associado à produção de etanol anidro produzido em usinas autônomas reduziu de 40,45 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1970-1985) para 18,75 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (2016-2023), considerando uma usina autônoma padrão (UAP), e para 14,44 gCO<sub>2eq</sub>/MJ quando considerada uma usina autônoma otimizada (UAO) no mesmo período.

As emissões totais por etapas do ciclo de vida devido ao consumo de etanol anidro de cana-de-açúcar (Figura 11) mostra que a etapa agrícola foi a principal fonte de emissões de CO<sub>2eq</sub>. No entanto, as emissões nessa etapa apresentam redução gradual ao longo dos anos, assim como sua contribuição relativa. Essa redução está associada ao avanço tecnológico nos setores agrícola e industrial, aliado à adoção de melhores práticas ambientais na etapa agrícola. No período de 1970-1985, as atividades da etapa agrícola para a produção de etanol anidro de cana-de-açúcar emitiram cerca de 35,84 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (88,6% das emissões totais). Em 1996-2005, as emissões foram de 21,34 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (82,9% das emissões totais), reduzindo-se para 11,37 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (78,7% das emissões totais) no período mais recente (2016-2023).



**Figura 11:** Fatores de emissão para o consumo de etanol anidro de cana-de-açúcar considerando as fronteiras do poço à roda.

Os FEs estimados para o etanol anidro de cana-de-açúcar apresentaram valores semelhantes aos reportados na literatura (Tabela 11). As diferenças observadas entre os estudos podem ser atribuídas, sobretudo, às variações nos parâmetros de produção e nas fronteiras do sistema adotadas. Macedo *et al.* (2008) e Liu *et al.* (2023), ao considerarem a fronteira “poço ao portão”, reportaram valores entre 17,9 e 27,4 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Por outro lado, Seabra *et al.* (2011), ao adotarem a fronteira “poço à roda”, que incorpora as etapas de distribuição e uso do combustível, obtiveram um fator de emissão de 27,4 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Essas diferenças evidenciam a sensibilidade dos FEs às escolhas metodológicas em ACV, particularmente no que se refere à definição das fronteiras do sistema, aos ICV e aos critérios de alocação de coprodutos.

**Tabela 11:** Fatores de emissão observados na literatura para o etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Nota: As estimativas em kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> foram convertidas para gCO<sub>2</sub>/MJ de etanol, considerando que 1 m<sup>3</sup> de etanol anidro equivale a 22.353,7 MJ.

| Fonte                     | Tipo de usina | Valor (gCO <sub>2</sub> /MJ) | Período   | Alocação | Fronteira      |
|---------------------------|---------------|------------------------------|-----------|----------|----------------|
| Macedo <i>et al.</i> 2008 | Autônoma      | 17,9                         | 2002      | Energia  | poço ao portão |
| Macedo <i>et al.</i> 2008 | Autônoma      | 19,5                         | 2005/2006 | Energia  | poço ao portão |
| Seabra <i>et al.</i> 2011 | Anexa         | 21,3                         | 2008      | Energia  | poço à roda    |
| Liu <i>et al.</i> 2023    | Anexa         | 27,4                         | 2019/2020 | Energia  | poço ao portão |

A diminuição dos FEs associadas ao consumo de etanol anidro de cana-de-açúcar entre 1970 e 2023, ocorre devido à fatores como: aumento da produtividade canavieira; eliminação gradativa das queimadas em canaviais; diminuição de aplicação de fertilizantes e calcário nas áreas de produção e por último o aumento da eficiência energética das usinas que passaram a produzir mais energia excedente com a mesma quantidade de matéria-prima.

Resultados semelhantes foram observados por Liu *et al.* (2023) e Macedo *et al.* (2008), os quais indicam que alterações nas práticas de manejo agrícola exercem influência direta sobre o perfil de emissões. Nesse contexto, fatores como o aumento da produtividade, a intensificação da mecanização da colheita, a eliminação da queima da palha e a redução do uso de fertilizantes estão associados à diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Já para a etapa industrial, observaram que a ampliação do uso do bagaço para cogeração de energia, bem como o incremento na exportação de excedentes de eletricidade, contribui significativamente para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no ciclo produtivo dos biocombustíveis.

Considerando a fase agrícola para produção de cana-de-açúcar para produção de etanol em uma Uaut. Observa-se que as principais atividades que contribuem para as emissões de CO<sub>2eq</sub> são as emissões relacionadas aplicação de *fertilizantes sintéticos e organominerais*; correção de solo com *calcário*; *queima da palha da cana-de-açúcar* e *queima de diesel*. A aplicação de fertilizantes sintéticos e organominerais representou cerca de 34,9 a 39,5% das emissões da fase agrícola nos períodos de 1970-1985 e 1986-1995, respectivamente. Nos períodos mais recentes, a sua participação nas emissões reduziu-se para 24% e 30,9% da fase agrícola em 2006-2015 e 2016-2023, respectivamente. As emissões associadas à aplicação e *calcário* representaram cerca de 19,3 a 30,5% das emissões entre 1970-1985 e 1996-2015, no período de 2016-2023 sua contribuição caiu para cerca 7,9% das emissões da fase agrícola.

As emissões associadas à *queima da palha da cana-de-açúcar* reduziram-se gradativamente entre os períodos analisados, foram de 6,8 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1970-1985); 6,0 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1986-1995), 6,0 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1996-2005); 5,2 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1996-2005); 2,3 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (2006-2015) e 0,2 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (2016-2023). Essa mudança está associada à implementação de leis e programas envolvendo o setor sucroenergético em âmbito nacional e estadual (especialmente São Paulo, o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil) que estabeleceram metas para erradicação das queimadas em áreas de canaviais. Em 2002, por exemplo, o governo de São Paulo através da Lei nº 11.241, de 2002,

regulamentou a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Em 2007, visando à proteção ambiental, a Secretaria de Meio Ambiente, a Secretaria da Agricultura e Abastecimento e a União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram o Protocolo Agroambiental, que reduziu ainda mais os prazos para a eliminação da queima. Em 2017, o Protocolo Agroambiental conseguiu reduzir para 90% a área de queima dos canaviais em São Paulo (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2025).

As emissões associadas à *queima de diesel* apresentaram aumento ao longo dos períodos analisados. Em 1970-1985, foram de 1,1 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (3,1% de participação); em 1986-1995, 0,4 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (1,4%); em 1996-2005, 0,5 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (2,4%); em 2006-2015, 0,5 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (2,8%); e, em 2016-2023, 2,48 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (16,1%). Essa mudança está associada à mecanização dos processos de plantio, colheita e transporte da cana-de-açúcar para as usinas. Esse aumento, especialmente no período de 2016-2023, está associado à intensificação da mecanização das operações agrícolas na produção de cana-de-açúcar, com maior uso de máquinas nas etapas de colheita, carregamento e transporte, que demandam elevada utilização de diesel (Ferraz Neto *et al.*, 2024).

Na etapa industrial da produção de etanol de cana-de-açúcar, foi observado uma tendência de redução das emissões. No período de 1970-1985 as emissões da etapa industrial foi de 2,38 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e 1,79 gCO<sub>2eq</sub>/MJ para as Uaut e Uane, respectivamente. Já para o período de 2016-2023 as emissões reduziram para 1,09 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e 0,99 gCO<sub>2eq</sub>/MJ para as Uaut e Uane, respectivamente. Considerando a etapa industrial para uma UO, as emissões nesse período foram ainda menores, com valores de 0,83 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e 0,77 gCO<sub>2eq</sub>/MJ para Uaut e Uane, respectivamente. Essa redução está associada ao aumento da eficiência energética e à maior utilização de sistemas de cogeração nas usinas, com expansão da geração de excedentes energéticos.

Entre 2016-2023, as UO produziram excedentes de 185,8 kWh/TC, refletindo usinas mais eficientes, capazes de suprir a demanda interna e exportar eletricidade para o sistema elétrico. Esse comportamento está associado a maior capacidade de processamento de cana-de-açúcar, maior eficiência na etapa de moagem, aproveitamento integral do bagaço e uso da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia (Bonomi *et al.*, 2016).

O FE associado ao etanol de milho (Figura 12a) foi de 15,85 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e a etapa agrícola foi a principal fonte de emissões de CO<sub>2eq</sub> emitindo cerca de 12,04 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (76% das emissões totais). Considerando a fase agrícola da produção de

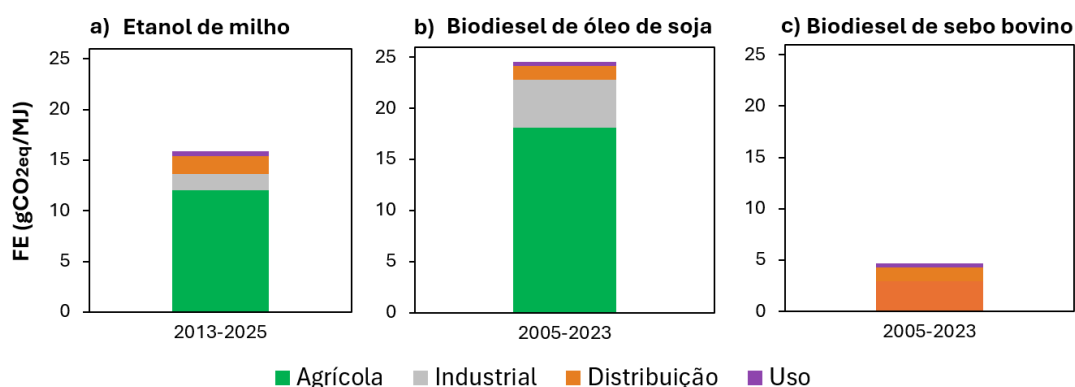
milho, as principais contribuições para as emissões estão associadas ao consumo de *Nitrogênio*, às emissões decorrentes da aplicação de *fertilizantes sintéticos* e à decomposição de *resíduos culturais*. As emissões relacionadas ao consumo de *Nitrogênio* foram de 2,6 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (21,2% das emissões da fase agrícola), enquanto os *fertilizantes sintéticos* de 4,4 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (36,4%), e os *resíduos culturais* de 1,5 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (12,5%). A aplicação de *Nitrogênio*, especialmente por meio das emissões de N<sub>2</sub>O do solo associadas à fertilização, constitui o fator determinante da intensidade de emissões na etapa agrícola (Moreira *et al.*, 2020). As emissões na etapa industrial da produção de etanol de milho, foram de 1,57 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (9,9% das emissões totais). Nessa fase a utilização de *cavaco de madeira* para geração de calor na usina é a principal fonte emissora com emissões de 0,88 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (71% das emissões da fase industrial) e as emissões associadas à *queima dos cavacos de madeira* contribui com 0,16 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (13% das emissões da fase industrial). A etapa de distribuição do etanol de milho apresentou emissões de 1,8 gCO<sub>2eq</sub> /MJ (11,4% das emissões totais). Nessa fase, considerou-se o uso exclusivo do modal rodoviário, com distância média de transporte de 700 km. A predominância desse modal, aliado às longas distâncias envolvidas, contribui para o aumento da intensidade de emissões, devido ao consumo de diesel ao longo do sistema logístico.

Considerando o biodiesel, o FE associado ao biodiesel de óleo de soja (Figura 12b) foi de 24,55 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e a etapa agrícola foi a principal fonte de emissões de CO<sub>2eq</sub> emitindo cerca de cerca de 18,13 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (73,9% das emissões totais). Considerando a fase agrícola da produção de soja, as principais contribuições para as emissões estão associadas ao consumo de *superfosfato simples (SSP)*, às emissões decorrentes da aplicação de *calcário* e à decomposição de *resíduos culturais* no solo. As emissões relacionadas ao uso de *SSP* foram de 3,1 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (17,3% das emissões da fase agrícola), enquanto a decomposição de *resíduos culturais* contribuiu com 3,2 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (17,6%) e a aplicação de *Calcário* com 5,8 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (31,9%). As emissões na etapa industrial da produção de biodiesel de óleo de soja foram de 4,63 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (18,9% das emissões totais). Nessa fase, as principais contribuições estão associadas ao consumo de insumos químicos, como *Metanol*, *Metilato de sódio* e *Ácido clorídrico*, que totalizam 2,48 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (53,5% das emissões da etapa industrial). Essas emissões refletem as contribuições indiretas do ciclo de vida desses insumos, incluindo sua produção e transporte. A etapa de distribuição do biodiesel de óleo de soja apresentou emissões de

1,35 gCO<sub>2eq</sub>/MJ (5,5% das emissões totais), considerando o transporte integral pelo modal rodoviário, com distância média de 700 km.

Finalmente, o FE associado ao biodiesel de sebo bovino (Figura 12c) foi inferior ao observado para o biodiesel de óleo de soja, em função da metodologia adotado pela RenovaCalc. Nesse caso, as emissões associadas à produção da matéria-prima (sebo bovino) é nula, considerando apenas as emissões da etapa industrial, distribuição e uso. O FE para o uso de 1 MJ de biodiesel de sebo bovino foi de 4,72 gCO<sub>2eq</sub>/MJ. A etapa industrial foi responsável por 2,73 gCO<sub>2eq</sub>/MJ, a distribuição por 1,35 gCO<sub>2eq</sub>/MJ e uso por 0,44 gCO<sub>2eq</sub>/MJ.

Estudos sobre emissões de GEE associadas à produção ou consumo de biodiesel de sebo bovino no Brasil ainda são escassos e indicam que diferentes escolhas metodológicas podem resultar em estimativas distintas quando comparadas aos resultados deste estudo. Sousa *et al.* (2017) incluíram as emissões associadas à produção de sebo bovino no Brasil e observaram que, nessa etapa, as emissões corresponderam a 3,3 gCO<sub>2eq</sub>/MJ, enquanto na etapa industrial os valores foram inferiores, com emissões de 1,3 gCO<sub>2eq</sub>/MJ.



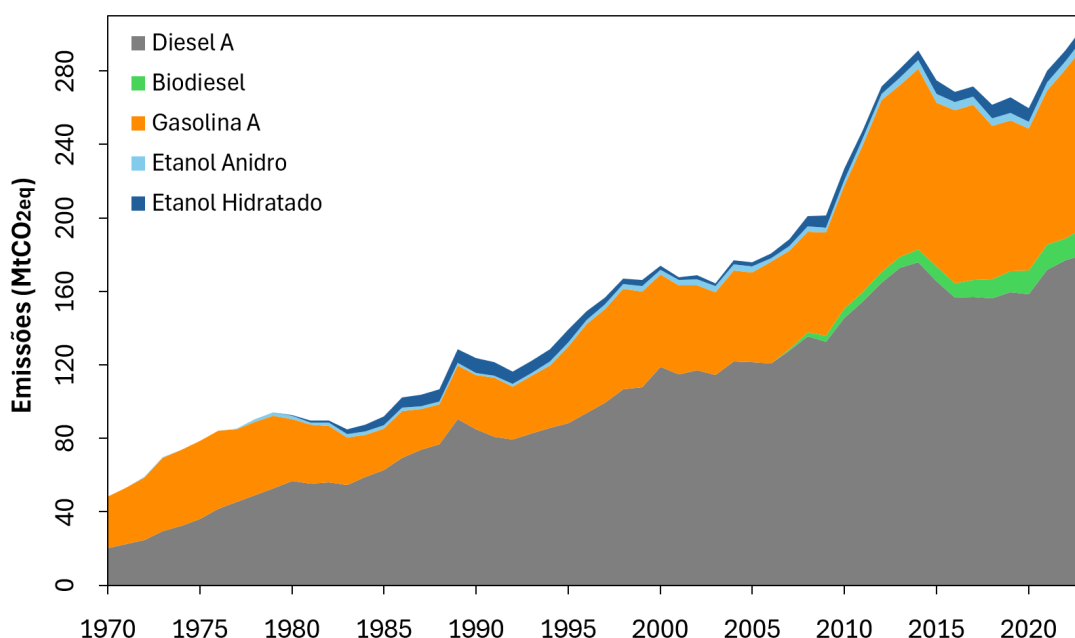
**Figura 12:** Fatores de emissão para o consumo de etanol anidro de milho; biodiesel de óleo de soja e biodiesel de sebo bovino considerando as fronteiras do poço à roda.

### 3.3 Perfil das emissões de GEE no transporte rodoviário

A Figura 13 mostra a evolução das emissões de CO<sub>2eq</sub> associadas ao consumo de combustíveis no transporte rodoviário. Nessa etapa, foram utilizados os FEs considerando as etapas Agrícola; Industrial; Distribuição; Uso e MUS. As emissões acompanham, de modo geral, a tendência de crescimento do consumo energético, refletindo a forte dependência histórica do Diesel A e da Gasolina A. Apesar disso, a taxa de crescimento das emissões de CO<sub>2eq</sub> apresentou desaceleração ou estabilização em determinados

períodos, indicando a atuação de fatores mitigadores. Entre 2014 e 2020, por exemplo, ocorreu uma queda nas emissões totais (de 290 para 251 MtCO<sub>2eq</sub>), impulsionada por mudanças no mix de combustíveis e por incentivos ligados ao RenovaBio. De acordo com a EPE (2024b), esse programa, ao fomentar o uso de biocombustíveis, contribuiu para o avanço da mobilidade sustentável, induzindo ganhos de eficiência energética e reduções de emissões de GEE em toda a sua cadeia produtiva.

Paralelamente, programas governamentais focados em eficiência energética também impactaram o setor. Essas políticas influenciaram diretamente o perfil de eficiência energética e nas emissões da frota veicular brasileira. De acordo com Glyniadakis; Balestieri, (2023), a criação do Programa Nacional de Etiquetagem de Veículos (PBE) em 2008, visou e incentivou os consumidores a escolherem veículos mais eficientes. Esse instrumento foi seguido pelo Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Densificação da Cadeia Produtiva Automotiva (Inovar-Auto), vigente entre 2013 e 2017, que buscou impulsionar a produtividade e a inovação na indústria, concedendo benefícios fiscais para a produção de veículos mais eficientes (MDIC, 2020). Em 2018, veio o Rota 2030, que impôs novas exigências aos fabricantes, como a rotulagem energética obrigatória para a comercialização de veículos no país (MDIC, 2019).



**Figura 13:** Emissões de CO<sub>2eq</sub> associadas ao consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023.

A Tabela 12 apresenta a evolução das taxas de intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub>

para as frotas de veículos leves e pesados. No segmento de veículos leves, observa-se uma tendência de redução da intensidade de emissões em todo o período de estudo, destacando-se a queda expressiva entre 1970-1985 (-10,42%) e 1996-2005 (-5,22%). Esse comportamento está associado a avanços tecnológicos nos motores dos veículos leves, diminuição da intensidade de emissões de GEE do etanol e ao aumento do consumo de etanol. De acordo com Carvalho *et al.* (2025), os principais avanços tecnológicos incluem sistemas eletrônicos de injeção de combustível, melhorando a eficiência e o desempenho da combustão. Essas inovações fizeram com que as emissões de GEE durante a fase de uso do etanol diminuísse, reduzindo significativamente as emissões de GEE em comparação aos combustíveis fósseis.

Por outro lado, o segmento de veículos pesados apresenta comportamento distinto, sendo observados aumentos na taxa de intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub> nos períodos de 1970-1985 (1,28%) e 1986-1995 (0,77%). Nos períodos mais recentes, as reduções são limitadas, com valores próximos à estabilidade como no período de 2016-2023 (-0,07%). Esse padrão reflete a elevada dependência do diesel fóssil no transporte de cargas e a ainda limitada penetração de alternativas energéticas de baixa intensidade de emissões de CO<sub>2</sub> nesse segmento. De acordo com Machado *et al.* (2021), alternativas como biodiesel, eletrificação, hidrogênio, gás natural e diesel verde apresentam potencial de mitigação de emissões, no entanto, a sua difusão permanece restrita por barreiras tecnológicas, econômicas e infraestruturais. No caso do biodiesel, apesar de sua cadeia produtiva consolidada, possui expansão limitada pelos teores regulatórios de mistura e às limitações dos motores do Ciclo Diesel. O gás natural e diesel verde, enfrentam restrições relacionadas à infraestrutura e ao arcabouço regulatório, enquanto a eletrificação e o hidrogênio ainda apresentam elevado custo e limitações operacionais para aplicações em transporte pesado.

**Tabela 12:** Taxa de intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub> em porcentagem média anual para as frotas veiculares entre 1970-2023.

| Período   | Taxa de Intensidade de emissões de veículos leves (%) | Taxa de Intensidade de emissões de veículos pesados (%) |
|-----------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1970-1985 | -10,42%                                               | 1,28%                                                   |
| 1986-1995 | -0,12%                                                | 0,77%                                                   |
| 1996-2005 | -5,22%                                                | -1,60%                                                  |
| 2006-2015 | -0,62%                                                | -1,01%                                                  |
| 2016-2023 | -1,89%                                                | -0,07%                                                  |

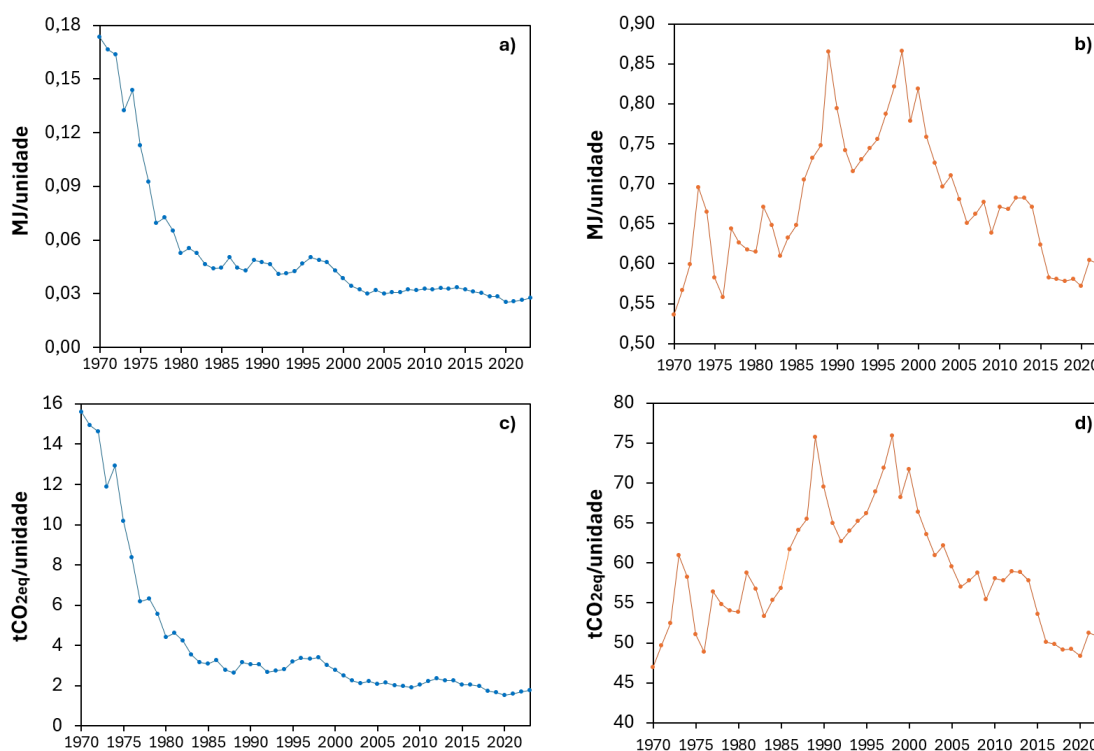
A eletrificação da frota de veículos pesados constitui uma das principais alternativas para a redução das emissões de GEE, especialmente em cenários nos quais a eletricidade é proveniente de fontes de baixa intensidade de emissões, como fontes de energia solar ou eólica. Nesse contexto, a utilização do óleo vegetal hidrotratado (*Hydrotreated Vegetable Oil* - HVO) também se apresenta como uma alternativa para a mitigação das emissões de GEE para a frota de veículos pesados (Prussi *et al.*, 2022). Devido à elevada similaridade do HVO com o diesel fóssil, esse combustível pode ser empregado diretamente em motores do Ciclo Diesel, sem a necessidade de modificações significativas na frota existente, o que representa uma vantagem do ponto de vista de integração tecnológica. Devido à sua composição química, favorece uma combustão mais eficiente, contribuindo para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Ajeeb *et al.*, 2025). No entanto, a adoção do HVO ainda se encontra fortemente concentrada em mercados europeus, como Noruega e Suécia, que apresentam elevada disponibilidade de matérias-primas e infraestrutura consolidada para a produção e distribuição do combustível (Lorenzi *et al.*, 2020).

Por sua vez, embora os caminhões elétricos a bateria represente uma solução promissora para a redução das emissões de GEE, sua difusão em larga escala no transporte pesado permanece condicionada a desafios tecnológicos e infraestruturais, incluindo a necessidade de padronização de sistemas de baterias, os elevados custos de investimento inicial e as emissões associadas à geração de eletricidade e à fabricação dos componentes (Bhardwaj; Mostofi, 2022).

### **3.4 Intensidade de consumo e emissões de combustíveis por tipo de frota**

As Figuras 14a e 14b apresentam a intensidade de consumo de combustíveis (MJ/unidade) para veículos leves e pesados, respectivamente. Os resultados indicam uma redução da intensidade de consumo dos veículos leves. Entre 1970 e 2023, a intensidade emissões caiu de 0,17 para 0,03 MJ/unidade e desde então apresenta estabilidade na intensidade consumo. Esse comportamento reflete a incorporação gradual de avanços tecnológicos, aliada à implementação de políticas públicas voltadas à eficiência energética veicular. Nesse contexto, destacam-se instrumentos regulatórios como o PROCONVE, o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e o programa Inovar-Auto, que contribuíram para a melhoria do desempenho energético da frota (Salvo Junior; Souza, 2018).

Diferentemente dos veículos leves, os veículos pesados apresentaram aumento da intensidade de consumo por veículo, entre 1970 e 1990 o consumo aumentou de 0,54 para 0,87 MJ/unidade, refletindo a expansão do transporte rodoviário de cargas no Brasil e a dependência do Diesel como o principal combustível do setor. Esse comportamento está associado ao crescimento estrutural do setor logístico, ao aumento da carga média transportada por veículo e à consolidação do modal rodoviário como principal eixo da circulação de mercadorias no país. A partir dos anos 2000, pode ser observada uma queda gradual na intensidade de consumo, sendo que em 2023 chegou a 0,61 MJ/unidade. Esse resultado ocorreu devido à fatores como ganho de eficiência energética dos veículos pesados e de políticas governamentais de controle de emissões, como o PROCONVE, e de incentivos, como a Rota 2030.



**Figura 14:** Intensidade de consumo de combustíveis e intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub> da frota veicular: (a) veículos leves - consumo; (b) veículos pesados - consumo; (c) veículos leves - emissões; (d) veículos pesados - emissões.

Conforme o ICCT (2021), o transporte rodoviário de cargas no Brasil, representa o principal meio de transporte de cargas no país e historicamente o modal é fortemente dependente do Diesel como combustível. De acordo com Huertas (2025), o transporte rodoviário de cargas tornou-se dominante devido a fatores históricos e estruturais, incluindo a expansão da malha rodoviária e o papel ativo do Estado na regulação e

financiamento de estradas desde meados do século XX. Esse crescimento acompanhou o processo de urbanização e industrialização do país, reforçando a preferência pelo caminhão como principal meio de circulação de mercadorias no país.

Entre o período de 2003 e 2020, os veículos pesados lançados nesse período começaram a ter maiores ganhos de eficiência em termos de toneladas-quilômetro transportadas, além disso, ganhos de eficiência energética média dos veículos novos vendidos (km/l) (EPE & IEA, 2021). Diferentemente dos veículos leves, os veículos pesados do Brasil ainda não possuem metas de eficiência de combustível, por essa razão, não foram observadas quedas significativas na intensidade de consumo dos veículos pesados.

O padrão dos resultados em relação à intensidade de consumo de combustíveis dos veículos impactou diretamente nos resultados da intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub> (Figuras 14c e 14d). Para a frota de veículos leves, os resultados indicam que houve uma grande redução da intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub>, especialmente entre 1970 e 2005, refletindo a queda na intensidade no consumo de combustíveis. Esses resultados indicam descarbonização do combustível consumido pela frota de veículos leves e um aumento do consumo de etanol devido ao crescimento da frota *flex-fuel* no país. Para a frota de veículos pesados, as taxas de intensidade de emissões acompanharam as taxas de intensidade de emissões, onde os períodos com taxas positivas (negativas) de intensidade de consumo resultaram em taxas positivas (negativas) de intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub>.

A utilização de etanol pela frota de veículos leves no Brasil combinado com a introdução de novas tecnologias no setor de transporte rodoviário, como os veículos *flex-fuel*, tem auxiliado na diminuição da taxa de intensidade de emissões de CO<sub>2eq</sub>. De acordo com Aguiar *et al.* (2024), uma alternativa para os usuários de automóveis reduzirem suas intensidades de emissões de GEE seria com o abastecimento de seus carros com Etanol Hidratado em vez de Gasolina C. Esta é uma escolha do consumidor, já que quase todos os carros produzidos no Brasil são *flex-fuel*. Além disso, mesmo aqueles que usam Gasolina C estão, em certa medida, economizando emissões de CO<sub>2eq</sub>, pois é obrigatório a mistura de Etanol na Gasolina no Brasil.

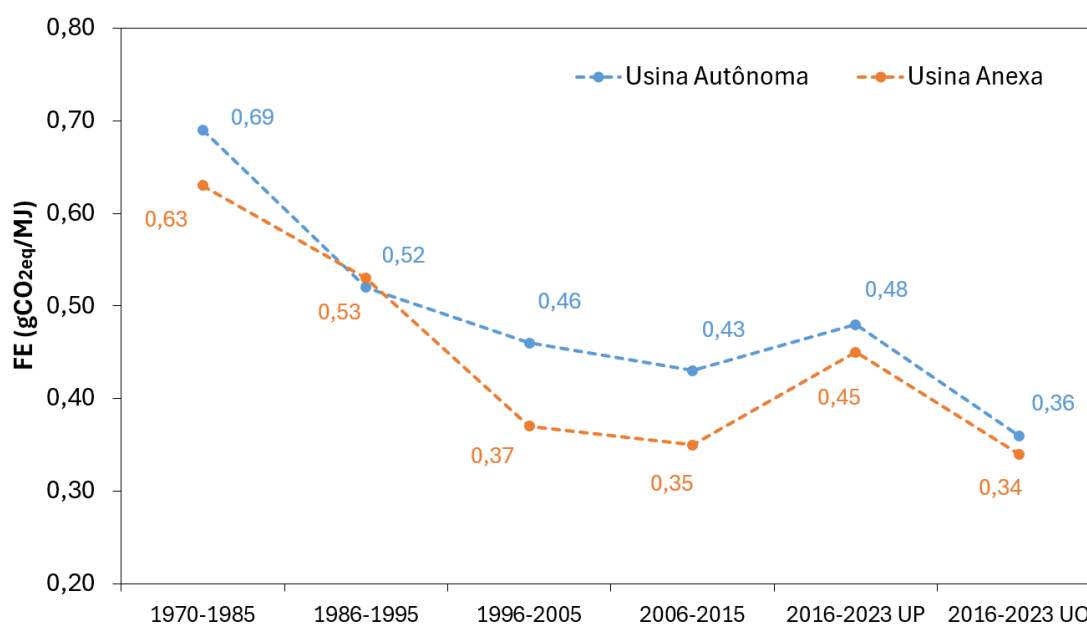
Para Benvenuti *et al.* (2019), a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transporte rodoviário depende de uma combinação entre ganhos de eficiência energética, introdução de biocombustíveis e políticas públicas. No longo prazo, a renovação da frota contribui para a mitigação das emissões apenas quando integrada a esforços contínuos de

aumento da eficiência dos veículos mais novos. No curto e médio prazo, o aumento do uso de etanol mostra-se uma alternativa eficaz, uma vez que depende principalmente de regulamentações e de políticas de incentivo à sua participação na mistura de combustíveis e no uso da frota *flex-fuel*.

### 3.5 Emissões relacionadas à MUS

Os FEs associados à MUS decorrentes do consumo de 1 MJ de etanol anidro de cana-de-açúcar (Figura 15) apresentaram uma tendência de redução ao longo do período analisado. No intervalo de 1970-1985, o FE para o etanol anidro produzido em usinas autônomas foi de 0,69 gCO<sub>2eq</sub>/MJ, atingindo 0,36 gCO<sub>2eq</sub>/MJ em uma UO no período de 2016-2023. Essa redução é atribuída às mudanças associadas aos processos produtivos que diminuíram a intensidade emissões de GEE, principalmente na etapa agrícola. Já a etapa industrial, destaca-se a maior eficiência industrial, ampliação da cogeração de energia e de coprodutos.

No entanto, esses resultados podem estar subestimando as emissões associadas à MUS, uma vez que foi utilizado um único FE estimado pelo BRLUC, representativo das mudanças de uso do solo ocorridas no Brasil entre 2000 e 2019. Consequentemente, as emissões referentes ao período de 1970 a 2000 para o etanol de cana-de-açúcar podem estar subestimadas, devido às diferenças na dinâmica de mudança do uso do solo durante o período de estudo.



**Figura 15:** Emissões de CO<sub>2eq</sub> relacionadas à MUS para o consumo de 1 MJ de Etanol Anidro de cana-de-açúcar.

Segundo Guarenghi *et al.* (2023), as emissões associadas à MUS no Brasil para produção de etanol de cana-de-açúcar são baixas e variam entre 2,5 a -11 gCO<sub>2eq</sub>/MJ. Além disso, as baixas emissões decorrem da expansão da cultura da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagens degradadas, promovendo o aumento dos estoques de carbono no solo e na biomassa e, conseqüentemente, contribuindo para a remoção líquida de CO<sub>2</sub> da atmosfera.

Para o Biodiesel de óleo de soja foi obtido apenas um FE para o período de 2005-2023. O FE obtido foi de 25,04 gCO<sub>2eq</sub>/MJ, representando um valor muito superior ao encontrado para o etanol de cana-de-açúcar.

O FE associado a MUS é elevado devido a alguns fatores principais:

(i) Avanço da fronteira agrícola da soja sobre áreas de vegetação nativa e pastagens, particularmente nos biomas Cerrado e Amazônia. De acordo com Song *et al.* (2021) a área de soja na Amazônia brasileira aumentou mais de dez vezes, passando de 0,4 milhões de hectares (Mha) em 2001 para 4,6 Mha em 2019, sendo que 32% dos 4,2 Mha adicionais tiveram origem em florestas primárias de 2001, 17% em florestas não primárias e 51% em pastagens previamente desmatadas. As áreas cultivadas com soja no Cerrado aumentaram em aproximadamente 100% entre 2001 e 2019, sendo que 18% (1,7 Mha) das novas áreas no Cerrado tiveram origem em áreas de florestas.

(ii) Aumento progressivo da participação do biodiesel na mistura obrigatória ao diesel fóssil (Diesel B<sub>x</sub>). O teor de biodiesel na mistura passou de 2% em 2008 para 5% em 2010, atingindo 12% em 2020 (EPE, 2020a). De acordo com Garofalo *et al.* (2022) e Cerri *et al.* (2017), a elevação do teor de biodiesel intensificou a demanda por óleo de soja, estimulando a expansão da área cultivada, resultando em maiores emissões de CO<sub>2</sub> associadas à MUS.

A Tabela 13 apresenta informações sobre os impactos das emissões devido a MUS em comparação com as emissões do ciclo vida para o consumo de etanol e biodiesel no Brasil. Para o etanol observa-se que o incremento das emissões associadas à MUS não exerceu grande impacto no perfil de emissões do etanol consumido no Brasil. Tanto para o etanol anidro quanto para o hidratado, as diferenças entre os cenários de emissões do ciclo de vida e com o incremento das emissões devido à MUS foram relativamente pequenas. Para o etanol anidro, a mediana das emissões aumentou de 2,20 para 2,24 MtCO<sub>2eq</sub>, enquanto a média variou de 2,29 para 2,34 MtCO<sub>2eq</sub>. Já para o etanol hidratado, a mediana aumentou de 5,21 para 5,34 MtCO<sub>2eq</sub> e a média de 4,76 para 4,86 MtCO<sub>2eq</sub>. Em termos relativos, a contribuição da MUS foram baixas. As medianas foram de 1,95

para o etanol anidro e 2,4% para o etanol hidratado. As médias foram de 2,2 para o etanol anidro e 2,1% para o etanol hidratado. Esses resultados indicam que, a inclusão da MUS não exercem grandes impactos nas emissões totais associadas ao consumo de etanol, sugerindo que o perfil de emissões dessa rota é dominado pelas emissões do próprio ciclo de vida, e não pela MUS.

Em contraste, o biodiesel apresentou grande sensibilidade às emissões devido à MUS, tanto em termos absolutos quanto relativos. A mediana das emissões passou de 4,27 MtCO<sub>2eq</sub> no cenário de ciclo de vida para 7,07 MtCO<sub>2eq</sub> no cenário incluindo a MUS, enquanto a média aumentou de 4,39 para 7,33 MtCO<sub>2eq</sub>. Esse aumento está relacionado com a elevada participação relativa da MUS, com mediana de 65,7% e média de 67,1%, valores muito superiores aos observados para o etanol. A análise dos percentis reforça essa diferença, sendo que para o P<sub>10</sub>, a participação da MUS atinge 70,5%, e para o P<sub>90</sub> atinge 67,9%, indicando que o incremento das emissões devido à MUS continua sendo relevante nos cenários com altas ou baixas emissões associadas ao consumo de biodiesel.

**Tabela 13:** Estatísticas das emissões (MtCO<sub>2eq</sub>) associadas ao consumo de etanol e biodiesel nos cenários com e sem MUS no Brasil. A participação da MUS corresponde ao incremento percentual das emissões no cenário com MUS em relação ao cenário de emissões do ciclo de vida.

| Biocombustível   | Cenários            | Mediana | Média | P <sub>10</sub> | P <sub>90</sub> |
|------------------|---------------------|---------|-------|-----------------|-----------------|
| Etanol Anidro    | Ciclo de Vida       | 2,20    | 2,29  | 0,28            | 4,18            |
|                  | Ciclo de Vida + MUS | 2,24    | 2,34  | 0,29            | 4,29            |
|                  | Participação da MUS | 1,9%    | 2,2%  | 1,8%            | 2,7%            |
| Etanol Hidratado | Ciclo de Vida       | 5,21    | 4,76  | 1,69            | 7,23            |
|                  | Ciclo de Vida + MUS | 5,34    | 4,86  | 1,72            | 7,37            |
|                  | Participação da MUS | 2,4%    | 2,1%  | 2,0%            | 2,0%            |
| Biodiesel        | Ciclo de Vida       | 4,27    | 4,39  | 0,39            | 7,94            |
|                  | Ciclo de Vida + MUS | 7,07    | 7,33  | 0,67            | 123,34          |
|                  | Participação da MUS | 65,5%   | 67,1% | 70,5%           | 67,9%           |

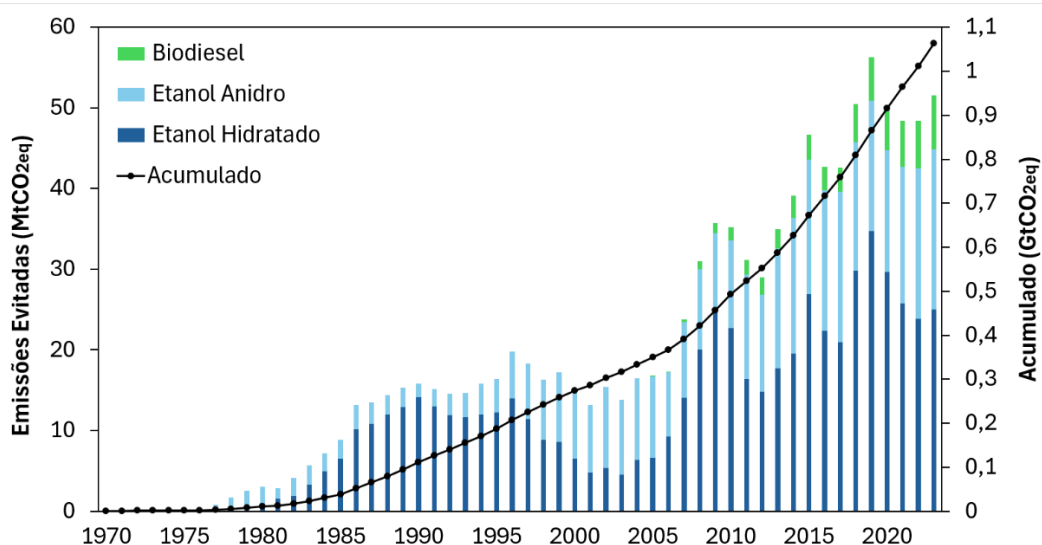
### 3.6 Emissões evitadas pela utilização de biocombustíveis

A Figura 16 apresenta as emissões evitadas de GEE decorrentes do uso de biocombustíveis. Observa-se emissões evitadas abaixo de 2 MtCO<sub>2eq</sub> durante a década de 1970 devido ao consumo de Etanol Anidro pela frota de veículos leves. A partir da década de 1980, com a segunda fase do Proálcool, houve um grande aumento do consumo de

Etanol Hidratado. Nesse período, as emissões evitadas começaram a subir gradualmente, alcançando o valor de 16 MtCO<sub>2eq</sub> em 1989. Na década de 1990, o Proálcool começou a entrar em crise e consequentemente impactou no menor consumo de etanol no Brasil. Entre os anos de 1990 e 2003, o consumo de Etanol Anidro caiu de 11,5 para 3,2 Milhões de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) enquanto o consumo de Etanol Hidratado saltou de 1,3 para 6,2 Mm<sup>3</sup>. Dessa forma, as emissões evitadas devido ao consumo de etanol caíram de 16,8 para 13,9 MtCO<sub>2eq</sub> no período.

A partir de 2004, com a popularização dos veículos *flex-fuel*, houve uma mudança no consumo de combustíveis dedicados à frota de veículos leves, destacando-se o Etanol Hidratado como um dos principais combustíveis utilizado no setor de transporte rodoviário, nesse sentido, o consumo de Etanol Hidratado saltou de 3,2 Mm<sup>3</sup> em 2003 para 16,3 Mm<sup>3</sup> em 2009, consequentemente as emissões evitadas apenas pela utilização do Etanol Hidratado foi de 4,5 MtCO<sub>2eq</sub> para 24,9 MtCO<sub>2eq</sub>. O pico de emissões evitadas pela utilização de Etanol Hidratado e Anidro ocorreu em 2019 com 51,2 MtCO<sub>2eq</sub> evitadas no ano.

Para o Biodiesel, observa-se um crescimento contínuo do consumo desde sua introdução no setor de transporte rodoviário em 2005, impulsionado principalmente pelo aumento progressivo do teor obrigatório de mistura ao Diesel B<sub>x</sub>. O percentual de Biodiesel na mistura passou de B5 em 2010 para B12 em 2023, refletindo a consolidação do PNPB. Consequentemente, as emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> pela substituição parcial do Diesel A pelo Biodiesel vem aumentando significativamente ao longo do período, passando de 5 MtCO<sub>2eq</sub> em 2010 para 16,9 MtCO<sub>2eq</sub> em 2023.



**Figura 16:** Emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> no setor de transporte rodoviário entre 1970-2023 devido à utilização de biocombustíveis.

O ganho ambiental da troca de combustíveis fósseis por renováveis, foi observada em várias regiões. A utilização de biodiesel ao invés do diesel fóssil na frota urbana no Rio de Janeiro possui o potencial de redução de aproximadamente 39% das emissões de CO<sub>2</sub> (Murta *et al.*, 2023). O uso de etanol hidratado de cana-de-açúcar levou a reduções de cerca de 39% das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil entre 1975 e 2015, quando comparado à gasolina (Aguiar *et al.*, 2024). O etanol de milho nos Estados Unidos oferece uma alternativa para reduzir cerca de 58% das emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com a gasolina por meio de tecnologias de captura e armazenamento de carbono durante os processos de produção do biocombustível (Dees, *et al.*, 2023).

Desde a introdução dos veículos *flex-fuel* em 2003, da incorporação do Biodiesel ao mix de combustíveis e da criação de políticas de incentivo ao consumo e produção de biocombustíveis, como o PNPB de 2004 e o Renovabio de 2017, observa-se um aumento consistente do consumo de biocombustíveis no Brasil. Esse crescimento, no entanto, é acompanhado de períodos curtos associadas a recessões econômicas, como a crise financeira internacional de 2008-2009, a recessão econômica brasileira de 2014-2016 e a pandemia da COVID-19 em 2020. Tais eventos podem estar associados ao menor consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário e consequentemente nas emissões evitadas de CO<sub>2eq</sub> no setor de transporte rodoviário.

O acumulado de emissões evitadas pela utilização de biocombustíveis no Brasil (Figura 13) indica que, desde 1970, foram evitadas aproximadamente 1,1 GtCO<sub>2eq</sub>. Esse volume é comparável às emissões anuais decorrentes da queima de combustíveis fósseis em países europeus desenvolvidos, como Reino Unido, Itália, França e Espanha, que, em conjunto, emitiram cerca de 1,1 GtCO<sub>2eq</sub> em 2022 (Worldometers, 2026). Adicionalmente, o volume total de emissões evitadas equivale, aproximadamente, a dois anos das emissões líquidas do setor de agropecuária, três anos do setor de energia e cerca de doze anos das emissões dos setores de processos industriais e resíduos no Brasil (SEEG, 2026). Nesse contexto, os resultados evidenciam a relevância do uso de biocombustíveis como estratégia de mitigação no setor de transporte, demonstrando que a substituição parcial de combustíveis fósseis ao longo de décadas pode gerar impactos cumulativos expressivos na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

#### 4. CONCLUSÕES

Esse estudo analisou a evolução temporal das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário brasileiro entre 1970 e 2023. Para isso foi utilizado a metodologia de ACV atribucional, utilizando a ferramenta RenovaCalc para estimar as emissões do "poço à roda" além de estimar as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas a MUS. Essa abordagem permitiu quantificar as emissões em cada etapa desde a fase agrícola e industrial até a distribuição e o uso final dos combustíveis nos motores. Além disso, relacionou os marcos tecnológicos e regulatórios que moldaram a intensidade de emissões dos biocombustíveis no Brasil ao longo do período de estudo.

Os resultados mostraram que a etapa agrícola é a principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub> para o consumo de etanol e biodiesel. Para o etanol de cana-de-açúcar, essa etapa representou cerca de 88,6% das emissões totais no período de 1970-1985, reduzindo-se para 78,7% no período de 2016-2023, com emissões de 35,84 e 11,37 gCO<sub>2eq</sub>/MJ, respectivamente. De forma semelhante, a etapa agrícola respondeu por 75,8% das emissões do etanol de milho e 78,5% no caso do biodiesel de óleo de soja. Esses resultados confirmam que a fase agrícola constitui o principal *hotspot* de emissões dos biocombustíveis, sendo determinante para o desempenho ambiental dessas rotas no contexto da análise de ciclo de vida

Foi observado uma queda nos valores de FE para o etanol anidro de cana-de-açúcar produzido em usinas autônomas, passando de 40,45 gCO<sub>2eq</sub>/MJ no período de 1970-1985 para 14,44 gCO<sub>2eq</sub>/MJ no período de 2016-2023. O avanço é atribuído à modernização do setor, incluindo ganhos de produtividade agrícola, a eliminação gradual da queima da palha da cana-de-açúcar, diminuição de aplicação de fertilizantes e corretivos e ao aumento da eficiência na cogeração industrial.

Foi observado que as emissões relacionadas à MUS para o uso de etanol de cana-de-açúcar e biodiesel de óleo de soja apresentam comportamentos distintos. No caso do etanol, a contribuição das emissões relacionadas à MUS é marginal, representando incremento médio de 2,2% em relação às emissões do ciclo de vida. Em contraste, para o biodiesel de óleo de soja, a MUS exerce forte influência sobre o perfil de emissões, elevando em média 67,1% as emissões totais em comparação com as emissões do ciclo de vida.

Apesar disso, algumas limitações devem ser consideradas, especialmente a ausência de dados mais precisos para períodos específicos, o que exigiu o uso de

premissas e estimativas para a evolução da frota, da produção de biocombustíveis e de parâmetros produtivos. Destacam-se a adoção de um mesmo consumo de bagaço de cana-de-açúcar nas usinas no período de 1970-1985, independentemente do *mix* de produção, a equivalência entre a participação das usinas autônomas e anexas em termos de produção e número de unidades validada apenas para períodos recentes, e a não consideração explícita de usinas *flex* (cana e milho) na composição das categorias analisadas. Adicionalmente, assumiu-se um único FE para gasolina e diesel, ao longo das décadas.

Como limitações deste estudo, destaca-se a adoção de premissas metodológicas decorrentes da indisponibilidade de dados históricos, o que exigiu simplificações na estimativa da evolução da frota, da produção de biocombustíveis e de parâmetros produtivos. Além disso, a estimativa de emissões de CO<sub>2eq</sub> dos biocombustíveis considerou apenas as principais matérias-primas utilizadas na produção nacional (cana-de-açúcar e milho) para etanol, e (óleo de soja e sebo bovino) para biodiesel, as quais, embora representativas, não capturam integralmente a composição tecnológica do setor. Além do mais, foram utilizados fatores de emissão constantes para gasolina e diesel ao longo das décadas. Ademais, a utilização da RenovaCalc apresenta limitações por utilizar parâmetros fixos, o que reduz a capacidade de representar a variabilidade espacial, tecnológica e temporal, especialmente em análises históricas.

Ademais, outra limitação do estudo refere-se à caracterização dos diferentes tipos de usinas de etanol (autônomas ou anexas) e do mix da cana-de-açúcar entre etanol e açúcar no período de 1970 a 1995, os quais foram estimados com base em premissas adotadas neste estudo. Destacam-se, ainda, a adoção de valores constantes para o consumo de bagaço no período de 1970-1985, a equivalência entre usinas autônomas e anexas validada apenas para períodos recentes, a não consideração explícita de usinas *flex* (cana e milho).

Como principal contribuição, este trabalho apresenta um inventário histórico detalhado e uma base metodológica para apoiar decisões relacionadas à transição energética e ao cumprimento das metas climáticas. Por fim, a análise foi restrita à categoria de impacto “Mudanças Climáticas”. Dessa forma, estudos futuros podem ampliar a abordagem de ACV para múltiplas categorias de impacto e avaliar cenários tecnológicos como eletrificação e uso de hidrogênio, complementando o papel dos biocombustíveis na mitigação das emissões de GEE no transporte rodoviário brasileiro.

## REFERÊNCIAS

Ajeeb, W. *et al.* Life cycle analysis of hydrotreated vegetable oils production based on green hydrogen and used cooking oils. *Fuel*, v. 390, n. 134749, p. 1–14, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134749>

Almeida, V. P. de. Longhi, G. M; Santos, L. R. dos. Etanol: 40 anos de evolução do mercado de combustíveis e automóveis no Brasil. *Teoria e Evidência Econômica*, v. 23, n. 49, p. 462-484, 2025. <http://dx.doi.org/10.5335/rtee.v23i49.8260>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). **CADEIA DA SOJA**. Brasília: ABIOVE, 2026. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 01 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). **MONITORAMENTO DA MORATÓRIA DA SOJA POR IMAGENS DE SATÉLITES**: Material Suplementar. Brasília: ABIOVE, 2022. Disponível em: [https://moratoriadasoja.com.br/assets/files/pt/material\\_motodologico\\_suplementar\\_2022.pdf](https://moratoriadasoja.com.br/assets/files/pt/material_motodologico_suplementar_2022.pdf). Acesso em: 23 dez. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Países – Catálogo de Metadados da ANA**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Brasília, 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7cfd53c4-b4e1-4aba-a79b-857a19649df6>. Acesso em: 23 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Regiões Político-Administrativas – Catálogo de Metadados da ANA**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Brasília, 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/046a1be6-7c41-427d-8d41-32e47345df80>. Acesso em: 23 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Unidades da Federação – Catálogo de Metadados da ANA**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Brasília, 5 jun. 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/5fdd2c95-0280-453d-9e25-c3a291537126>. Acesso em: 23 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Painel Dinâmico de Produtores de Etanol**. Brasília: ANP, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol>. Acesso em: 01 mar. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Renovabio**. Brasília: ANP, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/RenovaCalc>. Acesso em: 15 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis**. Brasília: ANP, 2025b.

Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-biocombustiveis>. Acesso em: 15 out. 2025.

Batista, A. M. *et al.* Carbon stocks and CO<sub>2</sub> emissions uncertainties associated with agricultural land use change in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 524, n. 146494. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146494>

Brito, T. *et al.* Life Cycle Assessment for Soybean Supply Chain: A Case Study of State of Pará, Brazil. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1648, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061648>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **BRLUC** - method for estimating land use change and CO<sub>2</sub> emissions associated with agriculture in Brazil. 2025. Disponível em: [www.brluc.cnpma.embrapa.br](http://www.brluc.cnpma.embrapa.br). Acesso em 20 jun. 2026.

Aguiar, D. R. D. *et al.* Ethanol fuel in Brazil : policies and carbon emission avoidance Ethanol fuel in Brazil : policies and carbon emission avoidance. **Biofuels**, v. 16, n. 3, p. 248-258, 2024. <https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2405765>

Benvenutti, L. M. *et al.* The impact of CO<sub>2</sub> mitigation policies on light vehicle fleet in Brazil. **Energy Policy**, v. 126, n. April 2018, p. 370–379, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.014>

Bermond, V. *et al.* A method to assess the eco-efficiency of a public bus transportation service. **International Journal of Sustainable Transportation**. v. 13, n. 8, p. 567–581, 2018. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1490467>

Bhardwaj, S; Mostofi, H. Technical and Business Aspects of Battery Electric Truck-A Systematic Review. **Future Transportation**. v. 2, n. 2, p. 382–401, 2022. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2020021>

Branco, J. E. H. *et al.* Assessing greenhouse gas emissions and costs of Brazilian light-duty vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 206, n. 114845. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114845>

Branco, J. E. H. *et al.* Evaluation of the greenhouse gas emissions of the Brazilian biodiesel and the impact of the mandatory blending of the biofuel into commercial diesel fuel. **Chemosphere**, 2025. v. 376, n. 144268. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144268>

Bonomi, A.; Cavalett, O.; Cunha, M. P. DA. **Virtual biorefinery**: an optimization strategy for renewable carbon valorization. Cham: Springer, 2016. (Green Energy and Technology). DOI: 10.1007/978-3-319-26045-7. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-26045-7>. Acesso em: 01 abr. 2026.

Buchal, C.; Karl, H.D.; Sinn, H. W. Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO<sub>2</sub>-Bilanz? **ifo Schnelldienst**, v. 72, n. 08, p. 40–54, 2019.

Carvalho, V. S. B. *et al.* Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science and Policy**, v. 47, p. 68–79, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.11.001>

Capaz, R. S. *et al.* Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 2, p. 502–524, 2021. <https://doi.org/10.1002/bbb.2168>

Carvalho, L. B. DA S. *et al.* Sistema independente de injeção de etanol em motores de ignição por compressão: revisão sistemática. **Recima21**, v. 6, n. 5, p. 656417, 2025. <https://doi.org/10.47820/recima21.v6i4.6417>

Cerri, C. E. P. *et al.* Assessing the greenhouse gas emissions of Brazilian soybean biodiesel production. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1–14, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176948>

Cherubin, M. R. *et al.* Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. **Land**, v. 10, n. 1, p. 72, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10010072>

Cruz, M. G. da; Guerreiro, E.; Raiher, A. P. A evolução da produção de etanol no Brasil, no período de 1975 a 2009. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 43, n. 4, p. 141–160, 2016. <https://doi.org/10.61673/ren.2012.248>

Chowdhury, P. *et al.* Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. **Energy Conversion and Management: X**, v. 25, n. 100889, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100889>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil: edição para a safra 2011/2012**. Brasília, DF: CONAB, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-perfis/perfil-sucroalcooleiro-safra-2011-12>. Acesso em: 01 abr. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil: edição para a safra 2014/2015**. Brasília, DF: CONAB, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-perfis/perfil-sucroalcooleiro-safra-2012-13/view>. Acesso em: 01 abr. 2026.

Costa, F. F. A. *et al.* Evolução do Biodiesel nos Últimos 10 Anos - Uma Revisão de Literatura. **Engineering & Technology Scientific Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2024. <https://doi.org/10.55977/etsjournal.v01i01.e024003>

Dees, J. *et al.* Cost and Life Cycle Emissions of Ethanol Produced with an Oxyfuel Boiler and Carbon Capture and Storage. **Environmental Science & Technology**, v. 57, p. 5391–5403, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04784>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **PNE 2050: Plano Nacional de Energia**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites->

[pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf). Acesso em: 23 dez. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Combustíveis renováveis para uso em motores do ciclo Diesel**. Rio de Janeiro: EPE, 2020a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT\\_Combustiveis\\_renovaveis\\_em\\_%20motores\\_ciclo\\_Diesel.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf). Acesso em: 19 Out 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Demanda Energética do Setor de Transportes**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. 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](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: 17 out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Demanda de energia dos veículos leves: 2025-2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-739/NT-EPE-DPG-SDB-2024-10\\_Demanda%20de%20energia%20veiculos%20leves\\_2025-2034\\_R1.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-331/topico-739/NT-EPE-DPG-SDB-2024-10_Demanda%20de%20energia%20veiculos%20leves_2025-2034_R1.pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Descarbonização do setor de transporte rodoviário: intensidade de carbono das fontes de energia**. Rio de Janeiro: EPE, 2022a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03\\_Intensidade\\_de\\_carbono\\_Transporte\\_Rodoviario.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Eletromobilidade: Transporte Rodoviário**. Rio de Janeiro: EPE, 2025a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao894/PDE%202035\\_Caderno\\_Eletromobilidade.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao894/PDE%202035_Caderno_Eletromobilidade.pdf). Acesso em: 01 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **NOTA DE ESCLARECIMENTO: Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/topico-750/Nota%20de%20Esclarecimentos%20-%20EPE\\_RenovaBio.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/topico-750/Nota%20de%20Esclarecimentos%20-%20EPE_RenovaBio.pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 19 out 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIA). **TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS BRASIL 2021: Benchmarking Internacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em:

[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE\\_Brazilian\\_Road\\_Freight\\_Transport\\_Benchmarking-2021.09.09%20%5BPT%5D.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20%5BPT%5D.pdf). Acesso em: 02 jan 2025.

Ferraz Neto, A. F. *et al.* Advancements of agriculture 4.0 in mechanized sugarcane harvesting: a review. **Ciencia Rural**, v. 54, n. 12, p. 1–8, 2024.

GAN, Y. *et al.* Provincial Greenhouse Gas Emissions of Gasoline and Plug-in Electric Vehicles in China: Comparison from the Consumption-Based Electricity Perspective. **Environmental Science and Technology**, v. 55, n. 10, p. 6944–6956, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08217>

Garofalo, D. F. T. *et al.* Land-use change CO<sub>2</sub> emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, n. 132549, p. 1–11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132549>

Glyniadakis, S.; Balestieri, J. A. P., 2023. Brazilian light vehicle fleet decarbonization scenarios for 2050. **Energy Policy**. 181, 113682. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113682>.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Protocolo Agroambiental**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/tag/protocolo-agroambiental/>. Acesso em: 02 dez 2025.

Guarenghi, M. *et al.* Land Use Change Net Removals Associated with Sugarcane in Brazil. **Land**, v. 12, n. 3, p. 584, 2023. <https://doi.org/10.3390/land12030584>

Huertas, D. M. P. Gênese e expansão dos agentes do transporte rodoviário de carga no Brasil. **Economia e Sociedade**, v. 34, n. 1, p. 1–24, 2025. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-3533.2025v34n1.260181>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2025). **Estatísticas do Século XX**. Disponível em: <https://seculoxx.ibge.gov.br/economicas/tabelas-setoriais/transporte-ecomunicacao.html>. Acesso em: 22 dez. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **FREIGHT IN BRAZIL: An assessment and outlook for improving environmental performance**. Washington: ICCT, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/brazil-freight-assessed-sept21.pdf>. Acesso em: 02 jan 2026.

IPCC, 2022: **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas**. Brasília, DF. 2016. 315 p. ISBN 978-85-7811-269-1. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt->

<br/arquivos/16-03-15-ipea-2015-livro-quarenta-anos-etanol.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2026.

Liang, X. *et al.* Air quality and health benefits from fleet electrification in China. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 10, p. 962–971, 2019. DOI: 10.1038/s41893-019-0398-8. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0398-8>

Liu, X.; Kwon, H.; Wang, M.; Connor, D. O. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Brazilian Sugar Cane Ethanol Evaluated with the GREET Model Using Data Submitted to RenovaBio. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 32, p. 11814–11822, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08488>

Lorenzi, G. *et al.* Use of waste vegetable oil for hydrotreated vegetable oil production with high-temperature electrolysis as hydrogen source. *Fuel*, v. 278, n. 117991, p. 1–12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117991>

Macedo, I. C.; Seabra, J. E. A.; Silva, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, 2008. v. 32, n. 7, p. 582–595. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>

Machado, P. G. *et al.* Natural gas vehicles in heavy-duty transportation – A political-economic analysis for Brazil. **Case studies on transport policy**, v. 9, n. 1, p. 22–39, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2020.06.009>

MAPBIOMAS. **MapBiomass Land Cover and Use**. Brasília, 2026. Disponível em: <https://data.mapbiomas.org/file.xhtml?fileId=457&version=1.0>. Acesso em: 20 jun. 2026.

Matsuura, M. I. S. F. *et al.* **Nota técnica - RenovaCalc<sup>MD</sup>**: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio. Brasília: ANP, 2018. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018\\_nota-tecnica-renova-calc.pdf](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf). Acesso em: 02 nov 2026.

Moreira, M. M. R. *et al.* Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. **Nature Sustainability**, 2020. v. 3, n. 3, p. 209–216. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0456-2> .

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Emissões de GEE por Setor**. Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>. Acesso em: 01 jun. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Capítulo 3 (Consumo de Energia por Setor) 1970 a 2023.xlsx**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024/series-historicas-e-matrizes/capitulo-3-consumo-de-energia-por-setor-1970-a-2023.xlsx/view>. Acesso em: 23 out. 2025.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS (MDIC). **Legislação Rota 2030**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/setor-automotivo/legislacao-rota#:~:text=Decreto%20n%C2%BA%209.557%2C%20de%208,tribut%C3%A1rio%20de%20autope%C3%A7as%20n%C3%A3o%20produzidas>. Acesso em: 29 jun. 2026.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS (MDIC). **Inovar-Auto**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/setor-automotivo/innovar-auto>. Acesso em: 29 jun. 2026.

Murta, A. L. S. *et al.* Redução de emissões de co2 por uso de biodiesel na frota de ônibus urbana do rio de janeiro. **Revista Valore**, 2023. <https://doi.org/10.22408/rev802023135941-56>

Nogueira, L. A. H. **Análise da Utilização de Energia na Produção de Alcool de Cana-de-Açúcar**. 1987. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Campinas, Campinas, 1987.

Nogueira, L. A. H; Capaz, R. S. Biofuels in Brazil: Evolution, achievements and perspectives on food security. **Global Food Security**, 2013. v. 2, n. 2, p. 117–125. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2013.04.001>.

Nogueira, T. *et al.* Evolution of Vehicle Emission Factors in a Megacity Affected by Extensive Biofuel Use: Results of Tunnel Measurements in São Paulo, Brazil. **Environmental Science and Technology**, 2021. v. 55, n. 10, p. 6677–6687. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01006>

Pereira, L. G. *et al.* RenovaCalc: Calculation of Carbon Intensities Under Brazil's National Biofuel Policy. **Sustainability**, 2025. v. 17, n. 23, p. 1-11. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01006>

Prussi, M. *et al.* Comparing e-Fuels and Electrification for Decarbonization of Heavy-Duty Transports. **Energies**, v. 15, n. 8075, p. 1-17, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15218075>

Salvo Junior, O. de; Souza, M. T. S. de. A regulamentação como indutora de tecnologias ambientais para a redução de emissões tóxicas em veículos leves no Brasil. **Cadernos Ebape.br**, v. 16, n. 4, p. 748–760, 2018. <https://doi.org/10.1590/1679-395164314>

Seabra, J. E. A. *et al.* Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofpr**, 2011. v. 5, n. 5, p. 519-532. <https://doi.org/10.1002/bbb.289>

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Emissões totais**. 2026. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 22 jun. 2026.

SECRETARIA NACIONAL DE TRÂNSITO (SENATRAN). **Estatísticas - Frota de Veículos - SENATRAN**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt->

[br/assuntos/transito/conteudoSenatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran](https://br/assuntos/transito/conteudoSenatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran). Acesso em: 22 dez. 2025.

Slovic, A. D., Ribeiro, H. Policy instruments surrounding urban air quality: The cases of São Paulo, New York City and Paris. **Environmental Science & Policy**. v. 81, p. 1-9, 2018.

Sousa, V. M. Z. *et al.* Life cycle assessment of biodiesel production from beef tallow in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 22, p. 1837-1850, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1396-6>

Tiburcio, R. S.; Macêdo, T. R. de; Pereira Neto, A. M. Brazilian Biofuels Policy (RenovaBio): Overview and generation of decarbonization credits by biodiesel production facilities. **Energy for Sustainable Development**, v. 77, p. 101334, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101334>

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **United Nations Climate Change Annual Report**. 2022. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UNClimateChange\\_AnnualReport\\_2022.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UNClimateChange_AnnualReport_2022.pdf). Acesso em: 26 jan. 2026.

OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA (UNICADATA). **Histórico de acompanhamento da safra de açúcar**: Centro-sul: Brasil. Brasília: UNICADATA, 2026a. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=157>. Acesso em: 01 jun. 2026.

OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA (UNICADATA). **Painel de históricos da área de cultivo, moagem e produção de açúcar e etanol**: Brasil. Brasília: UNICADATA, 2026b. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4>. Acesso em: 01 abr. 2026.

Welch, T. F.; Widita, A. Big data in public transportation: a review of sources and methods. **Transport Reviews**, v. 39, n. 6, p. 795–818, 2019. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1616849>

Worldometers. **Emissões de CO2 por país**. 2026. Disponível em: <https://www.worldometers.info/pt/emissoes-co2/emissoes-co2-por-pais/>. Acesso em: 22 jun. 2026.