

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANILO ZANUCOLI FERNANDES

ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO E
DAS EMISSÕES NA COLHEITA MECANIZADA DE CANA-
DE-AÇÚCAR PARA ETANOL

Bauru

2025

DANILO ZANUCOLI FERNANDES

ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO E
DAS EMISSÕES NA COLHEITA MECANIZADA DE CANA-
DE-AÇÚCAR PARA ETANOL

Dissertação de mestrado apresentada como exigência para obtenção do título de mestre em engenharia de produção ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Bauru.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Barbara Stolte Bezerra

Bauru

2025

F363a	<p data-bbox="446 1366 1260 1400">Fernandes, Danilo Zanucoli</p> <p data-bbox="446 1400 1260 1556">Análise comparativa do consumo energético e das emissões na colheita mecanizada de cana-de-açúcar para etanol / Danilo Zanucoli Fernandes. -- Bauru, 2025 90 p.</p> <p data-bbox="446 1601 1260 1713">Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientadora: Barbara Stolte Bezerra</p> <p data-bbox="446 1758 1260 1825">1. Gases de efeito estufa. 2. Ciclo de vida do produto Aspectos ambientais. 3. Consumo de combustível. 4. Etanol. 5. Cana-de-açúcar. I. Título.</p>
-------	--

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANILO ZANUCOLI FERNANDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 22 dias do mês de novembro do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANILO ZANUCOLI FERNANDES, intitulada **AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRANSBORDO NO CORTE MECANIZADO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Professora Associada BARBARA STOLTE BEZERRA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de BauruUNESP Campus Bauru, Prof^a. Dr^a. JOSIANE PALMA LIMA (Participação Virtual) do(a) Instituto de Engenharia de Produção e Gestão - IEPG / Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Prof. Dr. ROGÉRIO LEMOS RIBEIRO (Participação Virtual) do(a) FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL - FECIV / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Professora Associada BARBARA STOLTE BEZERRA



Documento assinado digitalmente

BARBARA STOLTE BEZERRA

Data: 22/11/2024 16:17:34-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO


A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: **DANILO ZANUCOLI FERNANDES**

DE: "AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRANSBORDO NO CORTE MECANIZADO DE CANA-DE-AÇÚCAR"

PARA:

ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO E DAS EMISSÕES NA COLHEITA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA ETANOL

Bauru, 22 de novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **BARBARA STOLTE BEZERRA**
Data: 22/11/2024 16:17:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. Barbara Stolte Bezerra
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Andressa pelo amor, carinho, paciência, incentivo e apoio nesta jornada e na jornada da vida.

Agradeço a meus pais, Celene e Luiz, e minha irmã, Isabele, por sempre acreditarem em mim e me impulsionarem a seguir em frente.

Um agradecimento especial a minha orientadora, Professora Doutora Barbara Stolte Bezerra, pela confiança, direcionamento, disponibilidade, dedicação, incentivo e zelo.

Também sou grato a todos os profissionais que me receberam nas usinas que visitei, renunciaram a parte de seu tempo e compartilharam não apenas dados, mas também suas percepções e experiências sobre os equipamentos e a colheita, além de sugerir ideias e caminhos.

A todos os professores e colegas que dividiram seus conhecimentos e experiências, contribuindo para minha formação e desenvolvimento.

RESUMO

A produção de etanol combustível a partir da cana-de-açúcar demanda elevado consumo de óleo diesel, um combustível fóssil derivado de petróleo, especialmente na etapa de corte, carregamento e transporte (CCT). Essa fase envolve o uso intensivo de colhedoras, caminhões, pulverizadores e tratores responsáveis pelo movimento dos transbordos nos canaviais, elementos cruciais para a colheita mecanizada. Como resposta aos desafios ambientais, algumas usinas têm implementado sistemas inovadores que substituem os tratores e vagões tradicionais por caminhões autônomos no transbordo. Este estudo avaliou os impactos ambientais dessa mudança, com foco nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs), comparando o sistema de transbordo tradicional com o sistema de caminhões autônomos. Utilizando os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) IPCC 2013 e EDIP 2003, os resultados revelaram reduções expressivas nas emissões de GEEs em todos os cenários analisados. Os achados destacam o potencial dos caminhões autônomos como alternativa sustentável para a mitigação de impactos ambientais na colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: colheita de cana-de-açúcar; produção de etanol; Avaliação de Ciclo de Vida; eficiência energética.

ABSTRACT

The production of fuel ethanol from sugarcane requires significant consumption of diesel oil, a fossil fuel derived from petroleum, particularly during the cutting, loading, and transportation (CCT) phase. This phase involves the intensive use of harvesters, trucks, sprayers, and tractors responsible for moving transshipment units in the fields, which are essential components of mechanized harvesting. In response to environmental challenges, some mills have introduced innovative systems replacing traditional tractors and wagons with autonomous trucks for transshipment operations. This study assessed the environmental impacts of this change, focusing on greenhouse gas (GHG) emissions, by comparing the traditional transshipment system with the autonomous truck system. Using Life Cycle Assessment (LCA) methods—IPCC 2013 and EDIP 2003—the results revealed significant reductions in GHG emissions across all analyzed scenarios. These findings underscore the potential of autonomous trucks as a sustainable alternative to mitigate environmental impacts in sugarcane mechanized harvesting.

Keywords: sugarcane harvest; ethanol production; Life Cycle Assessment; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ford 1925 movido a álcool etílico.	33
Figura 2: Componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar mecânica.	38
Figura 3: Etapas do ciclo de vida de um produto.	48
Figura 4: Etapas de uma ACV.	51
Figura 5: Fronteiras do sistema.	58
Figura 6: Distribuição geográfica das usinas.	60
Figura 7: Parâmetros de entrada (input parameters).	63
Figura 8: Definição do processo dentro da base de dados.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normas NBR ISO 14000 que estabelecem os conceitos de ACV.....	50
Tabela 2: Cenários avaliados.....	57
Tabela 3: Distribuição geográfica das usinas.	59
Tabela 4: Dados da operação nas usinas.	66
Tabela 5: Dados referentes ao consumo de diesel e tipo de solo.	67
Tabela 6: Valores médios de quantidade de cana colhida e distância percorrida em cada cenário por litro de diesel consumido.....	68
Tabela 7: Valores médios de litros de diesel consumido por tonelada de cana colhida.	70
Tabela 8: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 1) e trator (Cenário 5) em terrenos arenosos e planos através do método IPCC 2013.....	72
Tabela 9: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 2) e trator (Cenário 6) em terrenos arenosos e inclinados através do método IPCC 2013.....	72
Tabela 10: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 3) e trator (Cenário 7) em terrenos argilosos e planos através do método IPCC 2013.	72
Tabela 11: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 1) e trator (Cenário 5) em terrenos arenosos e planos através do método EDIP 2003.....	74
Tabela 12: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 2) e trator (Cenário 6) em terrenos arenosos e inclinados através do método EDIP 2003.....	75
Tabela 13: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 3) e trator (Cenário 7) em terrenos argilosos e planos através do método EDIP 2003.	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Produção de etanol no território brasileiro, em bilhões de litros.	46
Gráfico 2: Produção de biodiesel no Brasil, em bilhões de litros.....	47
Gráfico 3: Quantidade de cana colhida [kg] por litro de diesel.....	69
Gráfico 4: Distância percorrida [km] por litro de diesel	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACV** - Avaliação de Ciclo de Vida
- ANL** - Argonne National Laboratory
- ANP** - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- B3** - Brasil, Bolsa, Balcão
- CIMA** - Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool
- CNP** - Conselho Nacional do Petróleo
- CNPE** - Conselho Nacional de Política Energética
- CH₄** - metano
- CO** - monóxido de carbono
- CO₂** - dióxido de carbono
- CONAB** - Companhia Nacional de Abastecimento
- CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- EAC** - etanol anidro combustível
- EDIP** - *Environmental Design of Industrial Products*
- EECM** - Estação Experimental de Combustíveis e Minérios
- EHC** - etanol hidratado combustível
- EMPA** - *Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt*
- EPE** - Empresa de Pesquisa Energética
- ESG** - *Environmental, Social and Corporate Governance*
- FAME** - *fatty acid methyl esters*
- GEE** – gás de efeito estufa
- GLP** - gás liquefeito de petróleo
- GNC** - gás natural comprimido
- GNV** - gás natural veicular
- GREET** - *Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*
- GTP** - *Global Temperature change Potential*
- GWP** - *Global Warming Potential*

IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICV - Inventário de Ciclo de Vida

INT - Instituto Nacional de Tecnologia

IPCC - *Intergovernment Panel on Climate Change*

ISE - Índice de Sustentabilidade Empresarial

ISO - *International Organization for Standardization*

LCA - *Life Cycle Assessment*

LUC - *land use change*

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MME - Ministério de Minas e Energia

N₂O - óxido nitroso

NMVOC - compostos orgânicos voláteis não-metanos

NO_x – óxido de nitrogênio

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU - Organização das Nações Unidas

OPEP - Organização dos Países Exportadores de Petróleo

ORPLANA - Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

Proálcool - Programa Nacional do Alcool

PROCONVE - Programa de Controle de Emissões Veiculares

SO₂ – óxido de enxofre

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 Objetivos.....	29
1.2 Relevância e justificativa.....	30
2. REFERENCIAL TEÓRICO	33
2.1 Contexto histórico da utilização do etanol como combustível no Brasil	33
2.2 Produção de cana-de-açúcar	35
2.2.1 Colheita.....	36
2.3 Produção de etanol.....	41
2.4 Produção de óleo diesel	42
2.4.1 Biodiesel.....	44
2.5 Cenário de biocombustíveis no Brasil	45
2.6 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	48
2.6.1 Contexto histórico do surgimento da ACV	48
2.6.2 Normas técnicas.....	49
2.6.3 Etapas de uma ACV	50
2.6.4 Ferramentas de ACV	54
3. MÉTODO.....	57
3.1 Função	57
3.2 Fronteiras do sistema	58
3.3 Unidade funcional e fluxo de referência.....	58
3.4 Levantamento dos dados	59
3.5 Inventários	61
3.6 Modelagem.....	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Comparação entre cenários.....	68
4.2 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	70
4.2.1 IPCC 2013	71
4.2.2 EDIP 2003	73
5. CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição relevante no cenário mundial na busca por alternativas de mobilidade e geração de energia com menores emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e outros agentes poluentes, pois uma parcela significativa da sua matriz energética provém de fontes renováveis de energia (Brasil, 2022). Dentre as fontes renováveis destaca-se a produção de energia a partir de biomassa e recursos hídricos, além de parques de energia eólica e solar.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2022, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia (MME), 44,7% da energia consumida pelo país em 2021 vieram de fontes renováveis, enquanto em 2019 a média mundial foi de 14,1% e nos países da OCDE de 11,5% (Brasil, 2022).

Em relação à energia utilizada no setor de transportes, o país é referência na produção e comercialização de biocombustíveis, tanto em relação à utilização em larga escala do etanol hidratado como combustível para veículos leves, à adição compulsória de etanol anidro na gasolina e à adição de biodiesel no óleo diesel derivado de petróleo comercializados no país (EPE, 2021).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (THOMAZ et al., 2022). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), empresa pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a safra brasileira 2023/2024 de cana-de-açúcar foi de 713 milhões de toneladas, o que representa uma alta de aproximadamente 16,8% em relação à safra anterior. A área plantada foi cerca de 0,5% superior à anterior, de 8,33 milhões de hectares, e a produtividade por hectare foi de 85.580 kg/ha, 16,2% acima da safra 2022/2023 (CONAB, 2024).

Em 2015, 193 países membros das Nações Unidas estabeleceram os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que resultaram na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada por todos os Estados membros e que propõe um plano compartilhado para a paz e a prosperidade das pessoas e do planeta, no presente e no futuro (ONU, 2015).

As políticas de bioenergia se alinham a diversos ODSs da Agenda 2030 e apresentam potencial para gerar mudanças em nível nacional rumo ao desenvolvimento sustentável, principalmente fomentando oportunidades econômicas, inovação tecnológica e mitigação de mudanças climáticas (MARTINELLI et al., 2022).

Entretanto, apesar de sua renovabilidade, os impactos ambientais causados pela produção do etanol e dos demais biocombustíveis ainda levantam dúvidas e questionamentos. Cavalett et al. (2013), por exemplo, compararam avaliações de ciclo de vida (ACVs) do uso do etanol e da gasolina em motores de combustão interna de veículos leves através de quatro métodos distintos: ReCiPe, IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 e Ecological Scarcity 2006. O etanol apresentou resultado favorável apenas no modelo ReCiPe.

De acordo com Bordonal et al. (2013), as práticas agrícolas envolvidas nos processos de plantio e colheita da cana-de-açúcar exigem máquinas que consomem quantidades consideráveis de óleo diesel para suas operações, o que causa emissões de gases de efeito estufa como CO₂, CH₄ e N₂O.

Cenário semelhante é apontado por Chen et al. (2018), que demonstram que a fase de cultivo da matéria-prima e produção de biocombustíveis pode resultar em emissões de GEEs relativamente elevadas devido à grande demanda por combustíveis fósseis durante essas etapas do processo.

Sharma e Strezov (2017) desenvolveram e compararam Avaliações de Ciclo de Vida (ACVs) referentes a produção do etanol, gasolina, diesel, biodiesel, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural comprimido (GNC), eletricidade e hidrogênio. Os resultados demonstraram que, para os parâmetros de monóxido de carbono (CO), material particulado e compostos orgânicos voláteis não-metanos (NMVOCs), o etanol de primeira geração (1G) produzido a partir de cana-de-açúcar, o mais difundido no Brasil, possui o maior nível de emissões de poluentes atmosféricos na etapa do poço ao tanque (*well to tank*) entre todos os demais combustíveis avaliados.

Além disso, o etanol 1G de cana-de-açúcar emitiu cerca de 60% mais óxidos nitrosos (NO_x) do que a gasolina. O etanol apresentou resultado melhor que o derivado de petróleo em apenas um critério de emissões, o óxido de enxofre (SO₂), que ficou aproximadamente 25% abaixo. O etanol também foi responsável pelas maiores emissões de nitratos para a água entre todos os avaliados e foi o combustível que emitiu

mais cádmio ao solo, além de superar a gasolina nos parâmetros de zinco e manganês (SHARMA E STREZOV, 2017).

Outra questão que tem ganhado relevância é a mudança no uso do solo (*land use change* - LUC), visto que a produção de etanol concorre com a produção de alimentos na busca por terras cultiváveis e, assim, compõe um fator de impacto ambiental negativo relevante durante a fase de produção da matéria-prima para o biocombustível.

De acordo com Glensor e Muñoz (2019), para converter toda a frota de veículos leves do Brasil para etanol até 2050 seria necessário destinar 16% de todas as terras agriculturáveis do país para a produção de cana-de-açúcar. O fator mudança de uso do solo para produção de cana-de-açúcar pode elevar as emissões de gases de efeito estufa do etanol a até 60% acima dos derivados de petróleo (JESWANI et al., 2020).

Kocak et al. (2022) avaliaram se a produção de etanol resultou em algum tipo de influência nos preços do milho nos Estados Unidos da América. Os resultados de seu trabalho apresentaram evidências de que a produção de etanol está pressionando os preços do milho para cima.

Portanto, embora os biocombustíveis apoiem objetivos críticos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030, como crescimento econômico, redução de emissões de gases de efeito estufa e contribuição para a segurança energética, eles têm efeitos discutíveis sobre os preços dos alimentos e, conseqüentemente, sobre a segurança alimentar (KOCAK et al., 2022).

Nesse sentido, este trabalho analisa oportunidades de melhoria no ciclo de vida de produção do etanol através da comparação de dois modelos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar distintos. O trabalho fornece subsídios técnicos sobre a sustentabilidade das duas alternativas e, assim, fomenta a discussão a respeito dos processos produtivos desse biocombustível.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é comparar consumos energéticos e emissões resultantes da queima de combustível na colheita mecanizada de cana-de-açúcar em

diferentes cenários, considerando o tipo de solo, declividade/inclinação do terreno e tipo de equipamentos utilizados.

Com relação ao solo, foram levantados dados em terreno argiloso ou arenoso (tipo) e plano ou inclinado (relevo). Com relação aos equipamentos, foram mapeados dois métodos mecanizados distintos, o primeiro utilizando o modelo tradicional com um trator tracionando um transbordo e o segundo através de um caminhão autônomo.

Para atingir o objetivo principal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever os processos de plantio e colheita de cana-de-açúcar no contexto brasileiro;
- Descrever as formas de obtenção de etanol e óleo diesel no contexto brasileiro;
- Levantar dados empíricos dos dois sistemas de colheita avaliados;
- Levantar dados empíricos dos dois tipos de solo avaliados;
- Levantar dados empíricos das duas declividades de solo avaliadas;
- Realizar ACVs para cada cenário avaliado.

1.2 Relevância e justificativa

Nas últimas décadas, a preocupação com sustentabilidade tem aumentado cada vez mais. O Protocolo de Kyoto, assinado em 1997 por diversos países, já evidenciava o interesse dos signatários quanto à emissão de gases poluentes na atmosfera e seus potenciais impactos para as gerações futuras (SZWARCFITER et al., 2005).

Assim, países, organizações e cidadãos têm buscado alternativas para mobilidade e geração de energia com menores emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e outros agentes poluentes (PHILP, 2015).

O Brasil é referência na utilização de biocombustíveis, pois adota políticas públicas de adição compulsória de etanol anidro na gasolina e biodiesel no óleo diesel derivado de petróleo comercializados no país (EPE, 2024b). Além disso, o país dispõe ainda de etanol hidratado para veículos leves.

Entretanto, a produção e distribuição de etanol consome uma quantidade relevante de óleo diesel nas máquinas agrícolas utilizadas no processo de colheita mecanizada, caminhões canavieiros que transportam a cana-de-açúcar até as usinas processadoras e caminhões-tanque que distribuem o etanol pelos postos revendedores do país.

Assim, a proposta de um novo equipamento para transbordo da cana durante a colheita mecanizada tem potencial para reduzir as emissões de GEEs desta etapa do processo produtivo. E a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), uma ferramenta de gestão ambiental que quantifica impactos ambientais gerados por produtos e serviços através de dados de insumos, energia e emissões ambientais (CARB, 2016) pode demonstrar as diferenças de emissões entre os dois modelos de equipamentos de transbordo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre o contexto histórico do uso do etanol como combustível, a produção de cana-de-açúcar, etanol, óleo diesel e os conceitos de avaliação de ciclo de vida.

2.1 Contexto histórico da utilização do etanol como combustível no Brasil

As primeiras iniciativas de desenvolvimento de etanol como combustível no Brasil surgiram na década de 1920. Em 1925, a Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (EECM), órgão governamental de pesquisa que viria a ser o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) em 1933, testou um automóvel Ford com motor quatro cilindros abastecido com álcool etílico hidratado 70% e 30% de água (SOUSA et al., 2013). Em agosto daquele ano, o Ford (Figura 1) participou da primeira prova automobilística promovida pelo Automóvel Clube do Brasil e percorreu 230 km no Circuito da Gávea no Rio de Janeiro.

Figura 1: Ford 1925 movido a álcool etílico.



Fonte: Arquivo INT, 2005.

Em 1931, o presidente Getúlio Vargas, através do decreto-lei número 19.717, de 20 de fevereiro, determinava "a aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada" (BRASIL, 1931) e para "automóveis de propriedade ou a serviço da União, dos Estados e dos Municípios, sempre que for possível, deverão consumir álcool ou, na falta deste, carburante que contenha, pelo menos álcool na proporção de 10%." (BRASIL, 1931).

Em 1933 é fundado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), que passou a controlar o percentual de mistura do álcool à gasolina. De acordo com Vian (1997), o IAA também foi responsável, entre outras ações, por incentivar a diversificação do portfólio das usinas, estabelecendo a produção de álcool anidro e ofertando financiamento para a criação de destilarias.

Com a crise do petróleo, em 1973, consequência da Guerra do *Yom Kippur* deflagrada entre Egito e Síria contra Israel, o preço do barril do óleo cru quadruplicou (BARROS, 2007). Os países árabes membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), criada em 1960 e presidida pela Arábia Saudita, derrubaram a produção mundial em mais de 4 milhões de barris por dia, numa resposta ao apoio dos países ocidentais a Israel.

Nesse contexto, o presidente Ernesto Geisel instituiu em 1975 o Programa Nacional do Alcool (Proálcool) através do decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975 (BRASIL, 1975). O objetivo do programa era substituir derivados de petróleo por etanol (MICHELLON et al., 2008), reduzindo a dependência do Brasil em relação ao mercado externo. A Portaria 164/1976, do Conselho Nacional do Petróleo (CNP), determinou que a "percentagem de álcool anidro a ser misturado à gasolina 'A' situar-se-á entre 10 e 15%" (CNP, 1976).

Em 1979 o Proálcool entra em uma nova fase e tem início no Brasil a produção de etanol hidratado como combustível substituto direto da gasolina. Ainda em 1979 é lançado no país o Fiat 147 totalmente movido a etanol, primeiro automóvel a etanol produzido em série no mundo (Foto 1). Neste mesmo ano estouraria a segunda crise do petróleo, consequência da Revolução Iraniana e da guerra entre o Irã e o Iraque (SHIKIDA, 1997).

Foto 1: Primeira unidade do Fiat147 a etanol na pista de teste da Fiat em Betim.



Fonte: Leo Lara/Studio Cerri, 2019.

A produção nacional entrou em declínio, principalmente como consequência da queda e estabilização do preço do petróleo nos anos seguintes e o aumento nos preços do açúcar na década de 1990, quando a produção e exportações de açúcar cresceram 79,7% e 88,3% respectivamente, enquanto a produção de etanol diminuía em média 10,6% ao ano (VIAN, 1997).

O cenário volta a ficar favorável para o etanol com o início da comercialização de veículos equipados com tecnologia bicomcombustível (*flex fuel*), em 2003, que permitem aos consumidores utilizarem gasolina ou etanol em qualquer proporção em seus veículos. Esses modelos de veículos conquistaram rapidamente a preferência dos consumidores e as montadoras passaram a adotar esse tipo de motor em escala cada vez maior (FRUTUOSO et al., 2022).

2.2 Produção de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é um vegetal longo, rígido e com tecidos resistentes e elásticos, que pode atingir até seis metros de comprimento, cultivada em regiões de clima tropical ou subtropical (MAZZONETTO et al., 2021). Os principais produtos resultantes do cultivo da cana-de-açúcar são o açúcar e o etanol,

combustível renovável que representa uma fonte de energia alternativa aos derivados de petróleo (MARQUES et al., 2018).

O etanol é um biocombustível formado por compostos orgânicos oriundos de diversas fontes de biomassa (SOUZA, 2015). No Brasil, a principal matéria-prima do etanol é a cana-de-açúcar, mas é possível produzi-lo a partir de outras matérias orgânicas com alta concentração de açúcar, como a beterraba, ou presença de amido, como o milho ou o trigo.

A primeira etapa da produção da cana-de-açúcar é a preparação do solo, cujo objetivo é atingir as melhores condições físico-químico-biológicas da terra para a germinação das sementes do vegetal (OMETTO, 2005).

A etapa seguinte é o plantio, cuja execução pode ser manual, mecanizada ou mista. O processo de plantio exige análise topográfica inicial da área a ser plantada e posterior e subdivisão em talhões, onde serão definidos os corredores principais e auxiliares (ALVES E DENADAI, 2022).

2.2.1 Colheita

Após o plantio, a etapa seguinte é a colheita que, conforme Ometto (2005), também pode ter três diferentes modelos de manejos:

- totalmente manual, ou seja, tanto o corte quanto o transporte são realizados por operários;
- semimecanizado, com corte ainda manual mas carregamento e transporte mecanizado;
- totalmente mecanizado, ou seja, desde o corte até o carregamento e transporte são mecanizados.

O modelo de colheita da cana-de-açúcar definido para uma determinada área influencia a produção e a longevidade da cultura naquele local, já que afeta as propriedades do solo da plantação, além de influenciar também o meio ambiente e saúde pública (SOUZA et al., 2005).

A colheita totalmente manual exige a queima da cana para tornar o vegetal mais quebradiço, facilitando o corte pelos operários (MARQUES et al., 2022). Por sua vez, a queimada elimina matéria seca e reduz o teor de matéria orgânica do solo, além de emitir dióxido de carbono na atmosfera, um dos gases de efeito estufa (GEE), gerando impactos ambientais negativos (RIBEIRO, 2008).

O sistema de colheita semimecanizada também exige a queima antecipada do canavial para na sequência o corte ser executado manualmente por operários com facões (OMETTO, 2005). Conforme Thomaz et al. (2022), entre 2021 e 2022 o percentual de colheita manual associada a queimadas no Brasil é estimado em 10,8% do total da área cultivada.

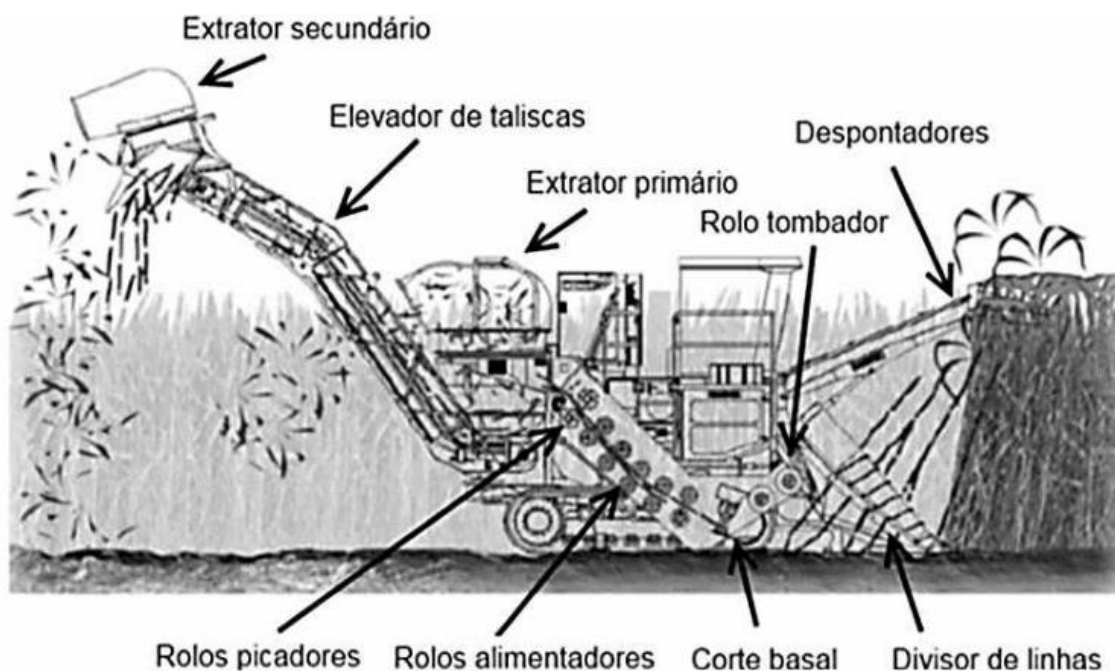
De acordo com Cervi et al. (2015), o sistema de colheita da cana passou por inúmeras mudanças no decorrer dos últimos anos e o sistema semimecanizado foi sendo gradativamente substituído pelo mecanizado. Segundo a CONAB, a expectativa para a safra 2024/25 é de que mais de 92% da colheita realizada no território nacional seja mecanizada (CONAB, 2024).

O Estado de São Paulo concentra pouco mais de 50% da área plantada com cana-de-açúcar do Brasil (CONAB, 2024). Conforme Souza et. al (2005), o decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003, que regulamentou a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, foram definidos prazos para a eliminação gradativa das queimadas para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas e que previa a eliminação total da prática para 2031 (SÃO PAULO, 2002).

Em 2007, a União da Indústria da Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA) assinou o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista com o governo do Estado de São Paulo, que previa a antecipação da extinção das queimadas em canaviais de 2031 para 2017, além de proteção a matas ciliares e recuperação de nascentes de corpos hídricos (UNICA, 2017). No ano seguinte o protocolo foi assinado também pela Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA), representante dos fornecedores de cana (BACCARIN, 2019).

Conforme Mazzonetto et al. (2021), o sistema mecanizado dispensa a queimada. Nesse modelo a cana é colhida pela colhedora mecânica, equipamento robusto que corta o colmo da planta em sua base. A Figura 2 apresenta os principais componentes de uma colhedora mecânica de cana-de-açúcar.

Figura 2: Componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar mecânica.



Fonte: Voltarelli, 2015.

Após o corte, ainda na colhedora, a cana é picada e limpa (SANTANNA, 2020). Por fim, o extrator da colhedora direciona a cana picada para um conjunto de transbordo para transporte e carga. As duas máquinas trabalham ao mesmo tempo e em paralelo, com a colhedora deslocando-se entre as faixas de cana acompanhada pelo transbordo.

O conjunto transbordo é composto por um trator que reboca um ou mais implementos, conformes Fotos 2 e 3. O transbordo canavieiro é uma espécie de vagão composto por uma caçamba e diversos eixos. Trata-se de um equipamento sem motorização, assim para mover-se pelos canaviais o transbordo deve ser acoplado a um trator. Esses conjuntos acompanham as colhedoras durante a operação de colheita e recebem a cana colhida. Quando o volume de cana atinge a capacidade máxima da caçamba dos vagões, os tratores os rebocam até um ponto determinado na lavoura, onde a carga é transferida para caminhões canavieiros (MAZZONETTO et al., 2021).

Foto 2: Transbordo canavieiro (vagão) de 5 eixos e capacidade de até 30 toneladas de carga acoplado a um trator.



Fonte: autor, 2023.

Foto 3: Operação de colheita de cana-de-açúcar mecanizada.



Fonte: autor, 2023.

Um projeto de transbordo distinto do tradicional foi desenvolvido por uma empresa situada em Lençóis Paulista, interior do Estado de São Paulo. O modelo é composto por um caminhão autônomo capaz de substituir o conjunto trator e transbordo (GRUNNER, 2023), conforme Fotos 4 e 5.

O equipamento é baseado na linha Axor 3131 da Mercedes Benz porém traz uma série de alterações em seu projeto original, como pneus de alta flutuação, suspensão mista com ajuste e nivelamento automático, escapamento posicionado na vertical (anti-incêndio), faróis auxiliares para melhor visibilidade noturna, grades de proteção frontais com quebra mato, para-choques com sinalizadores de segurança, kit de proteção em pontos estratégicos, sistema de piloto automático para controle de velocidade, ajuste de bitolas para evitar pisoteio da linha de cana, entre outras (GRUNNER, 2023).

Foto 4: Grunner ATR 320X.



Fonte: autor, 2023.

Foto 5: Operação de colheita com um caminhão Grunner ATR 320X seguida por um transbordo tradicional.



Fonte: autor, 2023.

2.3 Produção de etanol

O etanol é um biocombustível formado por compostos orgânicos derivados de diversas fontes de biomassa (SOUZA, 2015). Esse combustível pode ser produzido a partir de qualquer matéria orgânica com alta concentração de açúcar, como a beterraba, ou concentração de amido, como o milho e o trigo. No caso do Brasil, a principal matéria-prima para a produção de etanol é a cana-de-açúcar

Após a colheita e o transbordo, a cana-de-açúcar é encaminhada para a unidade industrial para processamento. Na indústria, o primeiro processo é a lavagem do vegetal colhido para eliminar terra, pedras e outras impurezas. Em seguida a cana é picada, desfibrada e direcionada para as moendas. Na etapa da moagem é obtido o caldo, que tem alta concentração de sacarose (CORTEZ, 2010).

O caldo recebe um tratamento para remoção de impurezas e, em seguida, é encaminhado para fermentação, onde ocorrerá a conversão do açúcar em álcool através da adição de leveduras. Após essa etapa, a mistura é submetida a um processo de centrifugação que resulta no vinho. Na sequência o vinho é enviado para as colunas de destilação, onde ocorre a destilação do álcool. Inicialmente obtém-se etanol com aproximadamente 6% de água, conhecido como hidratado. O resíduo do processo de destilação é a vinhaça, normalmente numa proporção 10 vezes superior ao volume de etanol hidratado produzido (OMETTO, 2005).

Por fim, o etanol hidratado passa por uma coluna de desidratação para a produção do etanol anidro, com até 0,5% de água (ANP, 2015). Tanto o etanol anidro quanto o hidratado seguem para as distribuidoras de derivados de petróleo. Nessas instalações, o etanol anidro será adicionado à gasolina A, derivada do petróleo puro cuja venda aos consumidores finais é proibida no Brasil, para formar a gasolina C, que será comercializada nos postos revendedores do país. O etanol hidratado é o biocombustível disponível nos postos revendedores para os consumidores finais.

De acordo com Ogura et al. (2022), o Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, respondendo por 54% de toda a produção do país. O segundo maior produtor é o Estado de Goiás, responsável por 11,4%, e o terceiro é o Estado de Minas Gerais, com 10,6% da cana-de-açúcar do Brasil.

A Resolução ANP n° 19/2015 estabelece as especificações técnicas do etanol anidro combustível (EAC) e do etanol hidratado combustível (EHC), e a Resolução ANP n° 828/2020 atualiza as obrigações referentes ao controle da qualidade do produto contidas na anterior.

2.4 Produção de óleo diesel

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 20 carbonos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio (THOMAS, 2004). É utilizado principalmente nos motores ciclo diesel, de combustão interna e ignição por compressão, em veículos rodoviários, ferroviários e marítimos e em geradores de energia elétrica.

A maior parte das reservas de petróleo do Brasil está localizada em alto mar. Assim, o óleo cru é extraído de rochas sedimentares localizadas a milhares de metros de profundidade através de poços perfurados por sondas de alta tecnologia (THOMAS, 2004). Uma vez extraído, o petróleo é encaminhado por navios ou oleodutos das plataformas para as refinarias, que são responsáveis por transformar a matéria-prima em derivados, como gasolina, nafta, querosene e óleo diesel.

De acordo com Thomas (2004), os processos de refino têm início com a destilação fracionada do petróleo, que é a separação física das suas diferentes fases. Na torre de destilação o petróleo bruto é aquecido a temperaturas de até 370°C para que os diferentes componentes do óleo se evaporem. Esse vapor então retorna ao estado líquido enquanto esfria dentro dos diferentes níveis da torre. Cada um desses níveis coleta um determinado subproduto do petróleo como gasolina, querosene, óleo diesel (SZKLO e ULLER, 2008).

Algumas partes mais densas e de menor valor do petróleo são "quebradas" em partículas menores, tornando-as derivados mais nobres e aumentando o aproveitamento do óleo cru, num processo chamado de conversão. Essas partículas menores podem ir para todos os níveis da torre, podendo também ser convertidas em óleo diesel (SZKLO e ULLER, 2008).

Ainda na refinaria, o óleo diesel passa por alguns processos finais para adequá-lo às especificações exigidas pelos órgãos reguladores, sendo o principal deles a retirada de enxofre. Atualmente no Brasil temos o diesel S500, produto com no máximo 500 mg/kg, ou 500 ppm, de enxofre total, e o diesel S10, que apresenta no máximo de 10 mg/kg, ou 10 ppm, de enxofre total.

O diesel S10 surgiu como consequência da Resolução 315/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que revisou e definiu novas fases do Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE), instituído em 1986. A fase PROCONVE P7 (Euro 5) estabeleceu novos limites de emissões aceitáveis para veículos pesados movidos a diesel no Brasil a partir de 01/01/2012, limites só possíveis de serem alcançados com a utilização de um diesel com menos enxofre.

O óleo diesel puro, conhecido como tipo A, também sofre alteração antes de sua comercialização final aos consumidores, neste caso adição de biodiesel. Após essa mistura, o produto passa a ser denominado diesel B; convencionou-se o nome BX, em

que X é o percentual de biodiesel presente na mistura. Assim, B10 é o óleo diesel mineral com adição de 10% de biodiesel, enquanto o B100 é o biodiesel puro.

A Resolução ANP n° 50/2013 estabelece as especificações do diesel rodoviário, tanto diesel A quanto B, comercializados no Brasil. A Resolução n° 16/2018 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabelece o percentual mínimo compulsório de mistura de B100 ao óleo diesel.

2.4.1 Biodiesel

Biodiesel é um combustível proveniente de matérias-primas orgânicas e que pode ser utilizado para alimentação de motores de combustão interna de ciclo diesel (SILVA E ALHADEFF, 2022).

Segundo Nogueira (2011), o biodiesel é composto por alquilésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzidos a partir de reação de transesterificação ou esterificação de matérias graxas de gorduras de origem vegetal ou animal. O produto também é conhecido internacionalmente por FAME (*fatty acid methyl esters*).

No Brasil, os principais insumos para a produção de biodiesel são o óleo de soja e o sebo bovino, porém é possível produzir biodiesel a partir de óleo de dendê, canola, macaúba, girassol, colza (*Brassica napus*, vegetação presente na União Europeia, Canadá, EUA, Índia e China), entre outros (JESWANI et al., 2020).

Com a inclusão do biodiesel na matriz energética nacional através da Lei 11.097 de 13/01/2005 (BRASIL, 2005) e leis complementares posteriores, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e tornou-se obrigatório para as distribuidoras a comercialização do chamado diesel B, que é composto pela mistura diesel mineral derivado de petróleo com biodiesel, em percentual definido pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

O teor de biodiesel mínimo obrigatório na mistura do diesel B estabelecido durante todo o ano de 2022 foi de 10% (dez por cento), passando para 12% (doze por cento) a partir de 01/04/2023 (CNPE, 2023).

A Resolução ANP n° 45/2014 aborda a especificação do biodiesel em território nacional. A partir da Resolução ANP n° 798/2019, tornou-se obrigatória a adição de antioxidante ao biodiesel na produção com o objetivo de assegurar o parâmetro mínimo de 12h de estabilidade à oxidação.

Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de biodiesel, atrás apenas dos EUA e da Indonésia, que adota o percentual de 30% de biocombustível (B30) em sua frota (FARDILAH et al., 2022). Em 2021 a produção nacional de biodiesel foi de 6,76 milhões de m³, uma alta de 5,1% em relação a 2020 (ANP, 2022).

Lazaro et al. (2017) destacam que tanto o PNPB quanto o Proálcool foram criados com objetivos de garantia de abastecimento e segurança energética para o país, e os benefícios ambientais dos biocombustíveis foram reconhecidos posteriormente.

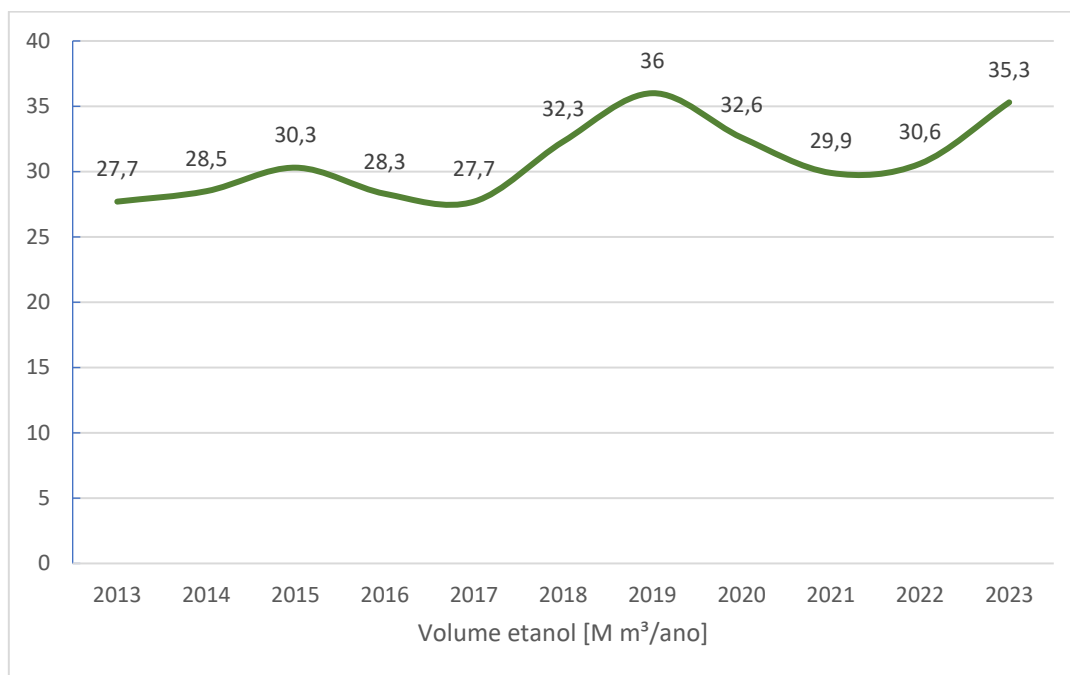
2.5 Cenário de biocombustíveis no Brasil

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), em 2023 o consumo total de energia dos veículos leves ciclo Otto no Brasil foi de 59,1 milhões de metros cúbicos de gasolina equivalente, cerca de 6,6% superior a 2022 e mantendo a trajetória de alta já observada no ano anterior.

A participação da gasolina A nesse mercado foi de 57% em 2023, estável com relação ao registrado no ano anterior, assim como a fatia referente ao etanol hidratado também ficou estável em 27% no mesmo período (EPE, 2024).

Conforme a EPE (2024), a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar foi de 29,5 bilhões de litros em 2023 e de 5,8 bilhões de litros de etanol de milho. Assim, a produção total do Brasil foi de 35,3 bilhões de litros, superando em 15,3% a produção de 2022, conforme pode ser observado no Gráfico 1, que traz o comportamento da produção de etanol no território brasileiro desde 2013. Da produção total de 2023, 21,5 bilhões de litros foram de etanol hidratado (16,8% superior ao ano anterior) e 13,9 bilhões de anidro (13,1% superior ao ano anterior).

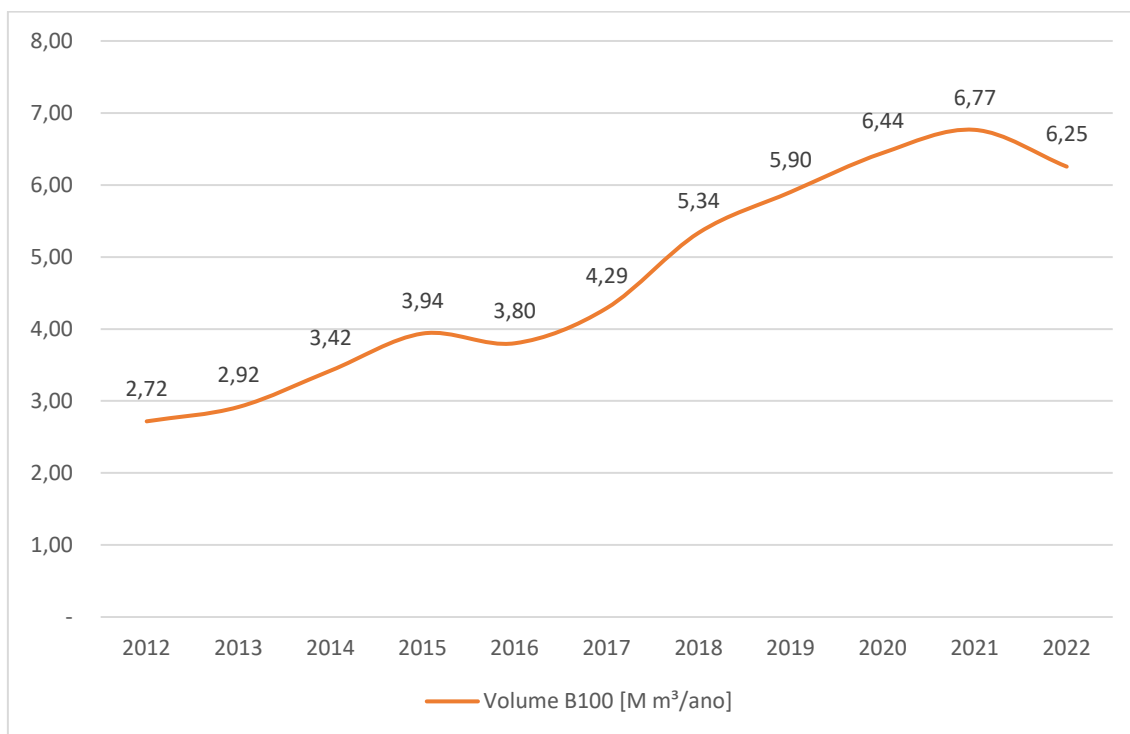
Gráfico 1: Produção de etanol no território brasileiro, em bilhões de litros.



Fonte: UNICA, 2024.

Em 2022, a produção brasileira de biodiesel misturado compulsoriamente ao óleo diesel rodoviário atingiu 6,25 milhões de metros cúbicos (ANP, 2023), queda de quase 8% em relação a 2021. O Gráfico 1 mostra a evolução da produção deste biocombustível no Brasil desde 2012, de acordo com números divulgados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2023).

Gráfico 2: Produção de biodiesel no Brasil, em bilhões de litros.



Fonte: ANP, 2023.

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) foi lançada em dezembro de 2017 para consolidar as políticas de biocombustíveis implementadas anteriormente e colaborar para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris (MARTINELLI et al., 2022).

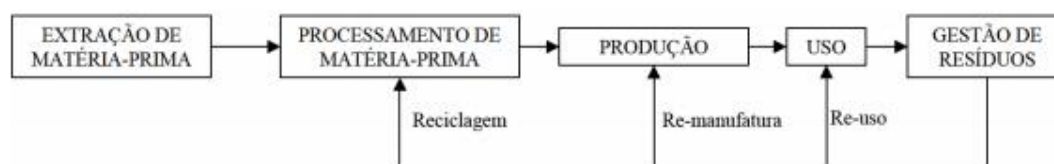
De acordo com Grangeia et al. (2022), o RenovaBio prevê mecanismos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), comercialização e previsibilidade do mercado de combustíveis. O objetivo é incrementar a segurança energética nacional e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) através do aumento do consumo de biocombustíveis e sua expansão na matriz energética nacional através de incentivos aos produtores e da criação de um mercado aberto de créditos de redução de carbono (CBIO).

2.6 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A ABNT NBR ISO 14040:2009 define que a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) quantifica os insumos de entrada de um produto ou processo, tais como energia, água e matéria-prima, e suas saídas resultantes, como o produto final, resíduos e emissões. O balanço entre esses fluxos permite avaliar os impactos ambientais causados por cada um dos diferentes estágios de uma cadeia de produção (ABNT, 2009a).

As principais etapas do ciclo de vida de um produto são a extração da matéria-prima, transporte até a unidade produtora, processamento da matéria-prima, produção do produto, distribuição, uso final e destinação de seus resíduos, que podem retornar à cadeia produtiva através de reuso, remanufatura ou reciclagem (SOUZA, 2015).

Figura 3: Etapas do ciclo de vida de um produto.



Fonte: Souza, 2015.

2.6.1 Contexto histórico do surgimento da ACV

O desenvolvimento do método da ACV teve início na década de 1970. Em outubro de 1973 estourou a Guerra do Yom Kippur, entre Egito e Síria contra Israel. Os EUA e diversos outros países ocidentais apoiaram os israelenses e, como resposta, os países árabes membros da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), criada em 1960 e presidida pela Arábia Saudita, derrubaram a produção mundial de petróleo em mais de 4 milhões de barris por dia até o início de 1974, o que fez com que o preço do barril quadruplicasse (BARROS, 2007).

Diante deste cenário da primeira crise do petróleo, houve um impulso nas pesquisas por fontes alternativas de energia (CHEHEBE, 2002). E a busca por uma utilização mais racional dos recursos naturais, assim como a crescente preocupação com sustentabilidade das décadas seguintes favoreceu o desenvolvimento e aperfeiçoamento do conceito de ACV, expandindo sua utilização para as mais diversas áreas (MANZINI et al., 2002).

2.6.2 Normas técnicas

As normas de gestão ambiental NBR ISO 14000:2002 apresentam conceitos, procedimentos e subsídios para o desenvolvimento de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) nas NBR ISO 14040:2009, NBR ISO 14044:2009, NBR ISO 14046:2017 e NBR ISO 14047:2016, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Normas NBR ISO 14000 que estabelecem os conceitos de ACV.

Norma	Título	Descrição
ABNT NBR ISO 14040: 2009	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura	Descreve os princípios e a estrutura de uma ACV
ABNT NBR ISO 14044: 2009	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações	Especifica os requisitos e fornece orientações para a ACV
ABNT NBR ISO 14046: 2017	Gestão ambiental — Pegada hídrica — Princípios, requisitos e diretrizes	Especifica os princípios, requisitos e diretrizes relacionados com a avaliação da pegada hídrica de produtos, processos e organizações com base na ACV
ABNT ISO/TR 14047: 2016	Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto	Fornece exemplos para ilustrar a prática atual da avaliação de impacto do ciclo de vida de acordo com ABNT NBR ISO 14044:2009

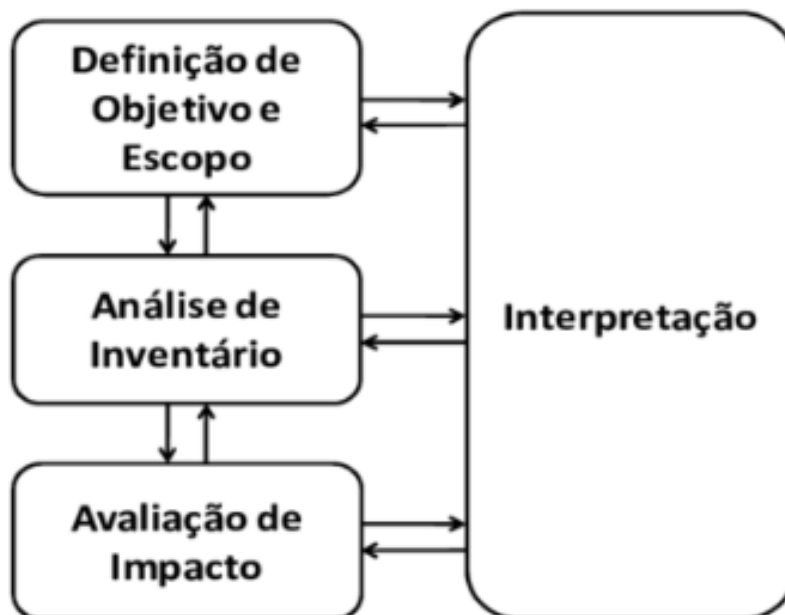
Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

2.6.3 Etapas de uma ACV

Uma ACV é dividida em quatro etapas distintas, porém interdependentes entre si, conforme demonstrado na Figura 4:

- Definição de objetivos e escopo;
- Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV);
- Avaliação de impacto;
- Interpretação.

Figura 4: Etapas de uma ACV.



Fonte: ABNT (2009a).

2.6.3.1 Definição de objetivos e escopo

O objetivo de uma ACV deve informar de maneira clara qual a aplicação pretende-se explorar, as razões para conduzir tal estudo, a qual público-alvo se destina e, ainda, se existe a intenção de utilizar os resultados obtidos em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente (ABNT, 2009a).

Para a definição do escopo de uma ACV, devem ser considerados e descritos objetivamente o sistema que será avaliado, suas funções, a unidade funcional adotada, as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação definidos, os tipos de impacto e a metodologia de avaliação, assim como a interpretação subsequente que será utilizada (DALMORA et al., 2023).

A ABNT (2009a) estabelece que um sistema pode ter várias funções possíveis e a(s) selecionada(s) para o estudo depende(m) do objetivo e do escopo da ACV. A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas e seu principal objetivo é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas serão relacionadas. Essa referência assegura a comparabilidade dos resultados da ACV (ABNT, 2009a).

O escopo ainda deve informar requisitos iniciais em relação à validade dos dados, suposições adotadas, limitações da análise, tipo de análise crítica (se aplicável) e tipo e formato do relatório requerido para o estudo (ABNT, 2009a).

De forma a assegurar que a extensão, a profundidade e o detalhamento do estudo sejam compatíveis para atender ao objetivo estabelecido, o escopo deve ser definido de maneira objetiva (ABNT, 2009a). Além disso, a ACV é iterativa, ou seja, o escopo pode ser ajustado durante o desenvolvimento do estudo, conforme novas informações são coletadas, para garantir o atendimento do objetivo original (ABNT,2009a).

Conforme a ABNT (2009a), as fronteiras definem os processos elementares que serão incluídos no sistema. A definição do objetivo e escopo do estudo, sua aplicação e público-alvo, os pressupostos adotados, as restrições de dados e de custos são alguns dos fatores que devem ser considerados na definição das fronteiras.

O sistema deve ser modelado de forma que as entradas e saídas na sua fronteira sejam fluxos elementares, porém não é necessário despende recursos na quantificação de entradas e saídas que "não irão alterar de forma significativa as conclusões gerais do estudo" (ABNT, 2009a).

De acordo com a ABNT (2009a), para se estabelecer as fronteiras do sistema, diversos estágios do ciclo de vida, processos e fluxos devem ser levados em consideração, como:

- aquisição de matérias-primas;
- entradas e saídas na cadeia principal de manufatura/processamento;
- distribuição/transporte;
- produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- uso e manutenção de produtos;
- disposição final de resíduos de processos e de produtos;
- recuperação de produtos usados (incluindo reuso, reciclagem e recuperação de energia);
- manufatura de materiais auxiliares;
- manufatura, manutenção e descomissionamento de equipamentos;
- operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

Da mesma forma que o escopo, as fronteiras do sistema definidas inicialmente podem ser refinadas com o decorrer dos estudos, conforme novas informações são levantadas.

2.6.3.2 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

A análise do inventário do ciclo de vida (ICV) abrange a coleta de dados e definições de procedimentos de cálculo para quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto que será avaliado (ABNT, 2009a).

Os dados de entrada de interesse de cada processo dentro da fronteira do sistema incluem entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas. Já as saídas incluem os produtos, coprodutos e resíduos dos processos, suas emissões atmosféricas, descargas para a água e solo ou, ainda, outros aspectos ambientais (ABNT, 2009a).

A ABNT (2009a) ressalta, ainda, que a análise de ICV é um processo iterativo e, portanto, conforme a coleta de dados avança, novos requisitos ou limitações podem ser identificadas. Assim, pode ser necessário reavaliar os procedimentos de coleta de dados para garantir que os objetivos do estudo sejam satisfeitos, ou mesmo revisar os objetivos caso seja identificado algum obstáculo.

Com os dados coletados tem início os procedimentos de cálculo, que envolvem a validação desses dados, sua correlação aos processos elementares e a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional (ABNT, 2009a).

Esses procedimentos são essenciais para que os resultados do inventário do sistema definido, para cada processo elementar, estejam relacionados à unidade funcional estabelecida para o sistema modelado (ABNT, 2009a).

A norma recomenda, ainda, que o cálculo dos fluxos energéticos considere diferentes combustíveis e fontes de energia e a eficiência de conversão e distribuição do fluxo de energia, assim como suas entradas e saídas (ABNT, 2009a).

A maior parte dos processos industriais não fornece apenas um produto único. Assim, a ABNT (2009a) estabelece a necessidade de procedimentos de alocação quando a ACV envolver sistemas que envolvem múltiplos produtos e sistemas de reciclagem em seu fluxo.

2.6.3.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

O objetivo da avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é, através dos resultados do ICV, estudar a significância dos impactos ambientais potenciais. Dessa forma, a AICV associa dados de inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria para entender esses impactos.

Durante a etapa da AICV pode-se desenvolver uma análise crítica do objetivo e escopo do estudo da ACV através de processo iterativo para determinar se os objetivos foram atingidos. Em caso negativo, pode-se ajustar o objetivo e escopo se essa análise indicar que eles não poderão ser alcançados.

A avaliação de impacto do ciclo de vida enfoca somente as questões ambientais definidas no objetivo e escopo da ACV, ou seja, a AICV não é uma avaliação completa de todas as questões ambientais envolvidas no sistema que está sob estudo.

2.6.3.4 Interpretação

A interpretação da ACV busca analisar em conjunto as constatações levantadas nas etapas de ICV e AICV. A interpretação da ACV deve fornecer resultados consistentes com o objetivo e escopo definidos e que permitam conclusões, apresentem suas limitações e recomendações (ABNT, 2009a).

Ainda conforme a ABNT (2009a), a etapa de interpretação pode fomentar análises críticas e revisões iterativas do escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma a avaliar sua consistência com o objetivo definido.

2.6.4 Ferramentas de ACV

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernment Panel on Climate Change – IPCC*) apresenta parâmetros e métodos para desenvolvimento de ACVs voltados especificamente para as emissões de gases de efeito estufa (ESTEVEZ et al., 2017). O IPCC é um órgão de pesquisa científica fundado em

1988 pela Organização das Nações Unidas (ONU) para reunir os mais avançados estudos referentes a mudanças climáticas que afetam o planeta.

De acordo com Esteves et al. (2017), os estudos iniciais do IPCC nesta área tiveram início em 1994, com a divulgação das primeiras diretrizes referentes ao assunto. Após revisão, essas premissas foram publicadas em 1996 no documento Diretrizes Revisadas do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (*Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*).

A última versão disponível, divulgada pelo IPCC em 2019, está no Refinamento para as Diretrizes do IPCC sobre Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2019), documento que revisou as Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, de 2006 (IPCC, 2006).

O modelo *Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation* (GREET, Gases de efeito estufa, Emissões Reguladas e uso de Energia em Transportes) é uma ferramenta de ACV criada pelo Argonne National Laboratory (ANL), do Departamento de Energia dos Estados Unidos, no ano de 1999 com o objetivo de mensurar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) para o ciclo de vida do petróleo e gasolina (WANG, 1999).

Conforme Cai et al. (2022), a ferramenta GREET é amplamente utilizada para ACVs de combustíveis de transporte e tecnologias de veículos, sejam fósseis ou não, inclusive por agências reguladoras.

O modelo GREET avalia os impactos de GEEs do poço à roda (*well to wheel*), ou seja, desde a extração das matérias-primas para a produção dos combustíveis avaliados até sua combustão nos motores dos veículos (CAI et al., 2022).

3. MÉTODO

Este trabalho se propõe a comparar os desempenhos ambientais da operação de colheita de cana-de-açúcar mecanizada através do sistema de transbordo tradicional, composto por trator e vagão, e com a adoção de um caminhão autônomo na substituição do conjunto trator-vagão, em solos arenosos ou argilosos com relevo plano ou inclinado.

Dessa forma foram mapeados dados em 8 cenários distintos:

Tabela 2: Cenários avaliados.

Equipamento	Solo	Relevo	Cenário
Transbordo tradicional (trator)	Arenoso	Plano	Cenário 1
		Inclinado	Cenário 2
	Argiloso	Plano	Cenário 3
		Inclinado	Cenário 4
Caminhão autônomo (Grunner)	Arenoso	Plano	Cenário 5
		Inclinado	Cenário 6
	Argiloso	Plano	Cenário 7
		Inclinado	Cenário 8

Fonte: autor.

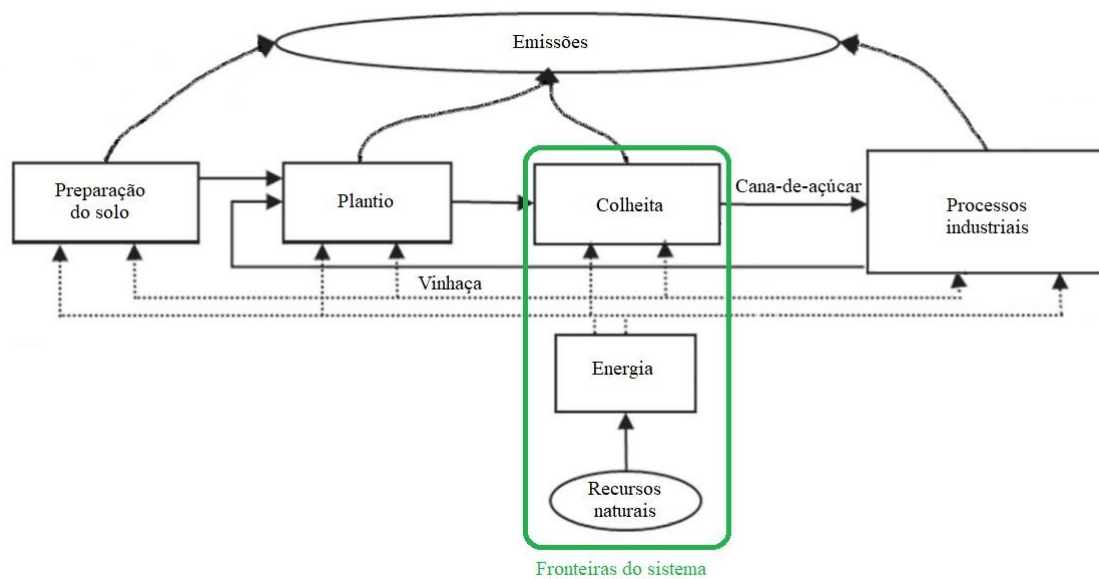
3.1 Função

As operações de colheita e transbordo através do modelo tradicional e o proposto pelo caminhão autônomo trazem semelhanças em relação às variáveis ambientais e operacionais. Assim, para efetuar a comparação entre os dois modelos, definiu-se como função: energia consumida durante o processo de colheita de cana-de-açúcar.

3.2 Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema estão limitadas à operação de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, última etapa da fase agrícola do processo de produção de etanol, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5: Fronteiras do sistema.



Fonte: autor.

3.3 Unidade funcional e fluxo de referência

De acordo com a função estabelecida, a unidade funcional foi definida como: quantidade de óleo diesel consumida pelo equipamento avaliado durante a colheita de 1 tonelada de cana-de-açúcar.

Os fluxos de referência dos dois casos serão calculados com base em dados coletados em campo.

3.4 Levantamento dos dados

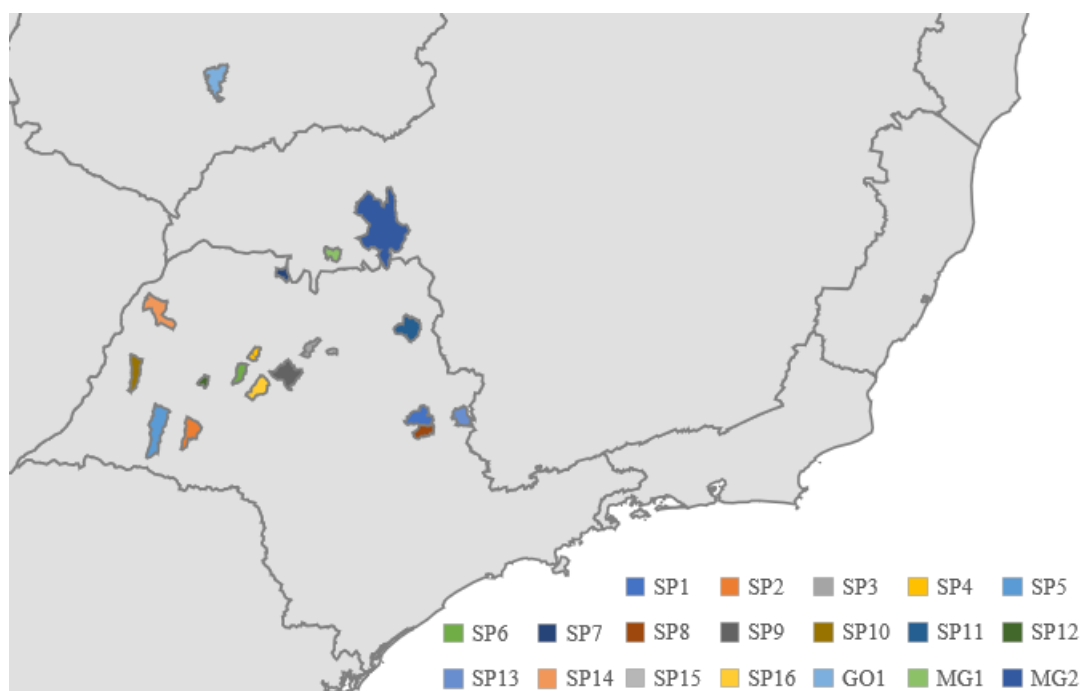
Os dados de consumo dos 8 cenários foram obtidos empiricamente junto a 16 usinas de produção de açúcar e etanol do Estado de São Paulo, duas do Estado de Minas Gerais e uma de Goiás, conforme Tabela 3 e Figura 6. Todas as indústrias envolvidas no estudo produzem etanol de primeira geração.

Tabela 3: Distribuição geográfica das usinas.

Identificação da usina	Cidade	UF
SP1	Pirassununga	SP
SP2	Quatá	SP
SP3	Catanduva	SP
SP4	Ubarana	SP
SP5	Martinópolis	SP
MG1	Pirajuba	MG
SP6	Avanhandava	SP
SP7	Orindiuva	SP
SP8	Leme	SP
SP9	Novo Horizonte	SP
SP10	Junqueirópolis	SP
SP11	Batatais	SP
SP12	Clementina	SP
SP13	São João da Boa Vista	SP
MG2	Uberaba	MG
SP14	Pereira Barreto	SP
SP15	Vista Alegre do Alto	SP
SP16	Lins	SP
GO1	Turvelândia	GO

Fonte: autor.

Figura 6: Distribuição geográfica das usinas.



Fonte: autor.

Todas as unidades industriais trabalharam na safra 2021/2022 com os dois sistemas, parte da produção sendo colhida através de transbordos tradicionais e parte através dos caminhões autônomos.

3.5 Inventários

Os inventários de ciclo de vida foram obtidos através da base de dados Ecoinvent, uma organização sem fins lucrativos que disponibiliza diversos inventários de entradas e saídas de materiais, substâncias e energia ligados a vários ciclos de vidas, com mais de dez mil processos de diversos setores industriais (ECOINVENT, 2022).

A primeira versão do Ecoinvent, lançada em 2003, foi desenvolvida pelos Laboratórios Federais Suíços para Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA - *Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt*), em parceria com diversos institutos governamentais suíços.

A organização é mundialmente reconhecida como um banco de dados consistente para inventários de ciclo de vida e suas bases são utilizadas para muitos projetos de avaliação de ciclo de vida, ecodesign e levantamento de informações ambientais de produtos. Além disso, suas bases são compatíveis com estudos e avaliações baseadas nas normas ISO 14040 e ISO 14044, possuem dados para diversos setores e oferece atualizações quando novos dados estão disponíveis.

O Ecoinvent também apresenta algumas limitações, principalmente ligadas às incertezas dos inventários de ciclo de vida, onde os dados podem considerar apenas uma região específica do globo e não um valor genérico universal. Por exemplo, a maior parte da sua base vem de processos europeus, chineses e norte-americanos, o que pode enviesar os resultados de alguns processos (BAIOCHI e SILVA, 2021).

3.6 Modelagem

O software utilizado para as simulações de ACV foi o OpenLCA, que é gratuito, *open source* e apto para o desenvolvimento de projetos de Avaliação do Ciclo de Vida. O banco de dados adotado foi o Ecoinvent e o método de cálculo dos impactos foi o IPCC 2013, que tem como base fatores de conversão publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas das Nações Unidas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), um método que caracteriza as diferentes emissões gasosas conforme seu potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potential*) e agrega essas emissões dentro da categoria “mudanças climáticas” (RALUY et al., 2014).

O primeiro passo foi a criação do fluxo:

- ✓ Criação de nova categoria de fluxo (*Flows, Add new child category*)
- ✓ Criação de novo fluxo dentro da categoria criada (*New flow*)
- ✓ Definição do tipo de fluxo: físico (*Physical*)
- ✓ Definição da localização geográfica: Brasil

Na sequência, criou-se o processo:

- ✓ Criação de nova categoria de processo (*Process, Add new child category*)
- ✓ Criação de novo processo dentro da categoria criada (*New process*)
- ✓ Banco de dados utilizado: Ecoinvent Database
- ✓ Definição da localização geográfica: Brasil

Após a criação do processo, foram definidos os parâmetros de entrada (*Input parameters*): Massa, que se refere à quantidade de cana-de-açúcar colhida com a queima de 1 litro de óleo diesel em quilogramas, e Distância, que se refere à distância percorrida pelo equipamento com a queima de 1 litro de óleo diesel em quilômetros, como pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7: Parâmetros de entrada (*input parameters*).

▼ Input parameters + ✕

Name	Value	Uncertainty	Description
Distancia	1.0	none	km percorridos
Massa	1.0	none	Kg de cana colhida

Fonte: autor.

Com os parâmetros de entrada estabelecidos foi definido o processo dentro da base de dados do Ecoivent importada no software. Dentro do macroprocesso A: Agricultura, silvicultura e pesca (*Agriculture, forestry e fishing*), grupo de processos 016: Atividades de apoio à agricultura e atividades pós-colheita (*Support activities to agriculture and post-harvest crop activities*), subgrupo 0161: Atividades de apoio à produção agrícola (*Support activities for crop production*), foi definido o processo 0161: diesel, queimado em máquinas agrícolas (*diesel, burned in agricultural machinery*), na abordagem Cutoff, conforme Figura 8.

Figura 8: Definição do processo dentro da base de dados.

- ▼ 01: Crop and animal production, hunting and related service activities
 - > 011: Growing of non-perennial crops
 - > 012: Growing of perennial crops
 - > 013: Plant propagation
 - > 014: Animal production
 - ▼ 016: Support activities to agriculture and post-harvest crop activities
 - ▼ 0161: Support activities for crop production
 - 📄 diesel, burned in agricultural machinery | diesel, burned in agricultural machinery | Cutoff, S - BR-SP

Fonte: autor.

Finalmente criou-se o sistema de produto dentro do OpenLCA:

- ✓ Criação de nova categoria de sistema de produto (*Product system, Add new child category*) com o mesmo nome do processo
- ✓ Criação de novo sistema dentro da categoria criada (*New product system*) com o mesmo nome do processo

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção apresenta os resultados levantados durante o trabalho e propõe discussões baseadas nos cenários observados.

A Tabela 4 compila os dados de um dia de colheita referentes à distância percorrida pelos equipamentos, quantidade de viagens de transbordo realizadas, total de metros colhidos, quantidade total de cana transportada e o tempo total da operação.

A Tabela 5 compila dados de consumo de cada equipamento em litros de diesel por tonelada de cana colhida (Consumo 1), litros de diesel por hora trabalhada (Consumo 2) e quilômetros rodados por litro consumido (Consumo 3), além da quantidade de cana colhida em toneladas por hora trabalhada, o tipo de solo (arenoso ou argiloso) e sua declividade.

Tabela 4: Dados da operação nas usinas.

Usina	Equipamento	Distância percorrida (km)	Quantidade de viagens (transbordos)	Metros colhidos	Massa transportada (t)	Tempo operação (h)
SP1	Grunner	15,10	4	7575	74,00	2,60
SP1	John Deere	24,75	6	7475	73,00	2,80
SP2	Grunner	26,70	4	5075	70,38	3,43
SP2	John Deere	N/I	8	5040	66,08	4,00
SP3	Grunner	10,40	2	6760	31,83	1,75
SP3	Valtra	N/I	2	6700	30,16	2,70
SP4	Grunner	7,40	2	6400	33,78	1,71
SP4	John Deere	7,00	2	6150	38,08	1,60
SP5	Grunner	14,30	4	2900	90,00	2,61
SP5	John Deere	N/I	4	3050	92,56	2,90
MG1	Grunner	20,50	4	5720	84,50	3,25
MG1	John Deere	N/I	4	5700	84,10	3,60
SP6	Grunner	11,30	4	6605	87,26	3,35
SP6	New Holland	12,50	4	6620	84,48	3,90
SP7	Grunner	9,30	3	3050	53,26	1,65
SP7	John Deere	10,40	3	4200	74,26	2,10
SP8	Grunner	13,70	4	6500	80,60	2,43
SP8	Case	13,80	4	6400	79,84	3,00
SP9	Grunner	21,00	4	12480	82,78	4,00
SP9	Valtra	20,70	4	12380	78,46	3,80
SP10	Grunner	12,30	4	4150	80,42	2,33
SP10	John Deere	N/I	5	4230	81,30	2,70
SP11	Grunner	18,80	4	8500	87,00	2,95
SP11	John Deere	24,30	4	8800	89,00	3,60
SP12	Grunner	14,90	4	7500	76,28	3,06
SP12	John Deere	N/I	6	7100	70,20	3,60
SP13	Grunner	20,10	4	7100	68,00	2,75
SP13	John Deere	N/I	4	7700	75,80	3,20
MG2	Grunner	11,90	4	4960	78,98	2,00
MG2	John Deere	N/I	4	4728	76,72	2,20
SP14	Grunner	16,10	5	8700	106,68	2,40
SP14	John Deere	N/I	5	8800	110,00	2,60
SP15	Grunner	N/I	4	5200	56,14	2,60
SP15	Trator	N/I	4	5200	60,18	2,80
SP16	Grunner	14,00	3	8000	60,20	3,00
SP16	Trator	N/I	3	8000	62,10	3,40
GO1	Grunner	N/I	4	6720	58,58	2,70
GO1	Massey Ferguson	N/I	4	6700	55,87	3,00

Fonte: autor.

Tabela 5: Dados referentes ao consumo de diesel e tipo de solo.

Usina	Equipamento	Consumo 1 (l/t)	Consumo 2 (l/h)	Consumo 3 (km/l)	Colheita (t/h)	Tipo de solo	Declividade
SP1	Grunner	0,158	4,500	1,2906	28,462	Argiloso	Plano
SP1	John Deere	0,282	7,357	1,2015	26,071	Argiloso	Plano
SP2	Grunner	0,171	3,499	2,2250	20,519	Argiloso	Plano
SP2	John Deere	0,605	10,000	N/C	16,520	Argiloso	Plano
SP3	Grunner	0,173	3,143	1,8909	18,189	Arenoso	Plano
SP3	Valtra	0,763	8,519	0,0000	11,170	Arenoso	Plano
SP4	Grunner	0,237	4,678	0,9250	19,754	Arenoso	Plano
SP4	John Deere	0,412	9,813	0,4459	23,800	Arenoso	Plano
SP5	Grunner	0,156	5,375	1,0192	34,483	Argiloso	Plano
SP5	John Deere	0,333	10,617	0,0000	31,917	Argiloso	Plano
MG1	Grunner	0,205	5,323	1,1850	26,000	Argiloso	Plano
MG1	John Deere	0,375	8,750	0,0000	23,361	Argiloso	Plano
SP6	Grunner	0,154	4,000	0,8433	26,048	Arenoso	Plano
SP6	New Holland	0,340	7,359	0,4355	21,662	Arenoso	Plano
SP7	Grunner	0,169	5,455	1,0333	32,279	Argiloso	Plano
SP7	John Deere	0,350	12,381	0,4000	35,362	Argiloso	Plano
SP8	Grunner	0,140	4,650	1,2124	33,169	Argiloso	Plano
SP8	Case	0,356	9,467	0,4859	26,613	Argiloso	Plano
SP9	Grunner	0,242	5,000	1,0500	20,695	Arenoso	Inclinado
SP9	Valtra	0,484	10,000	0,5447	20,647	Arenoso	Inclinado
SP10	Grunner	0,159	5,494	0,9609	34,515	Arenoso	Inclinado
SP10	John Deere	0,360	10,852	0,0000	30,111	Arenoso	Inclinado
SP11	Grunner	0,186	5,492	1,1605	29,492	Arenoso	Inclinado
SP11	John Deere	0,448	11,064	0,6101	24,722	Argiloso	Plano
SP12	Grunner	0,189	4,706	1,0347	24,928	Arenoso	Inclinado
SP12	John Deere	0,383	7,472	0,0000	19,500	Arenoso	Plano
SP13	Grunner	0,183	4,527	1,6145	24,727	Arenoso	Inclinado
SP13	John Deere	0,459	10,866	0,0000	23,688	Arenoso	Plano
MG2	Grunner	0,128	5,047	1,1790	39,490	Arenoso	Plano
MG2	John Deere	0,389	13,553	0,0000	34,873	Arenoso	Plano
SP14	Grunner	0,117	5,208	1,2880	44,450	Arenoso	Plano
SP14	John Deere	0,282	11,923	0,0000	42,308	Arenoso	Plano
SP15	Grunner	0,283	6,115	0,0000	21,592	Arenoso	Plano
SP15	Trator	0,409	8,786	0,0000	21,493	Arenoso	Plano
SP16	Grunner	0,199	4,000	1,1667	20,067	Arenoso	Plano
SP16	Trator	0,351	6,406	0,0000	18,265	Arenoso	Plano
GO1	Grunner	0,241	5,222	0,0000	21,696	Argiloso	Plano
GO1	MASSEY FERGSUN	0,387	7,200	0,0000	18,623	Arenoso	Plano

Fonte: autor.

4.1 Comparação entre cenários

A Tabela 6 apresenta os valores médios de cana colhida em quilogramas e distância percorrida em quilômetros por cada equipamento em cada um dos oito cenários possíveis. Não foi mapeada nenhuma área argilosa e com inclinação, assim esse cenário ficou como não determinado (n.d.) para ambos os equipamentos.

Tabela 6: Valores médios de quantidade de cana colhida e distância percorrida em cada cenário por litro de diesel consumido.

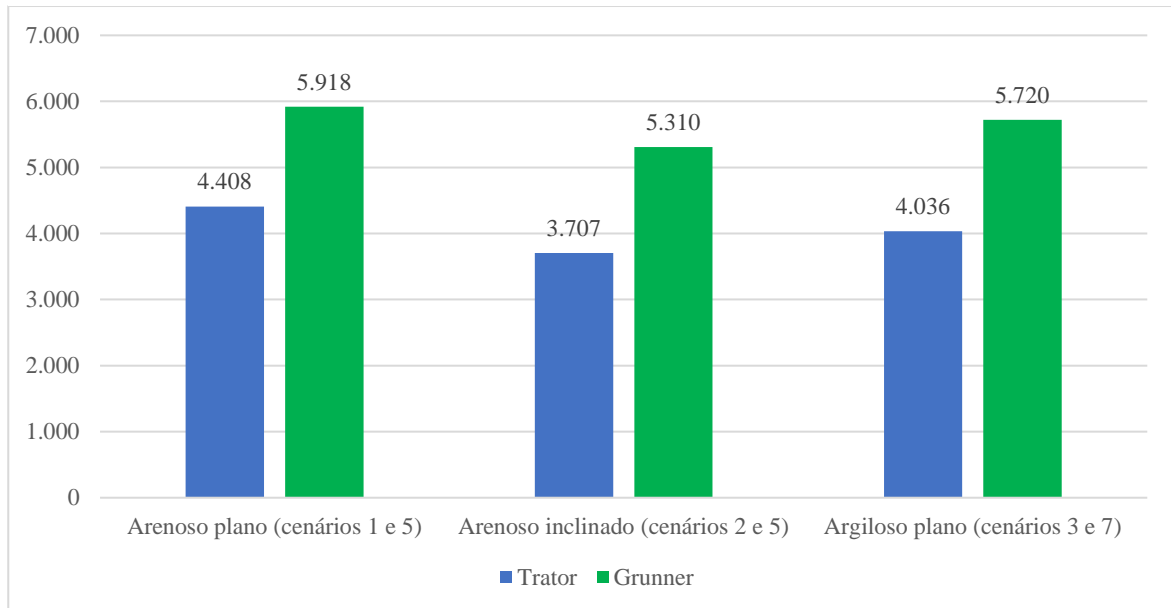
Cenário	Equipamento	Tipo de solo	Declividade	Cana colhida (kg)	Distância (km)
1	Grunner	Arenoso	Plano	5.918	1,215
2	Grunner	Arenoso	Inclinado	5.310	0,723
3	Grunner	Argiloso	Plano	5.720	1,328
4	Grunner	Argiloso	Inclinado	n.d.*	n.d.*
5	Trator	Arenoso	Plano	4.408	0,441
6	Trator	Arenoso	Inclinado	3.707	0,545
7	Trator	Argiloso	Plano	4.036	0,674
8	Trator	Argiloso	Inclinado	n.d.*	n.d.*

*n.d.: não determinado.

Fonte: autor.

Os dados mostram que o equipamento da Grunner apresenta maior eficiência quando comparado ao conjunto tradicional de transbordo em todos os cenários. Nos cenários 1 e 5 (terreno arenoso e plano), por exemplo, o caminhão autônomo colheu 34,3% mais cana com um litro de óleo diesel. A mesma comparação entre os cenários 2 e 6 trouxe um incremento de 43,2% e entre os cenários 3 e 7, o aumento na colheita foi de 41,7%, conforme apresentado no Gráfico 3.

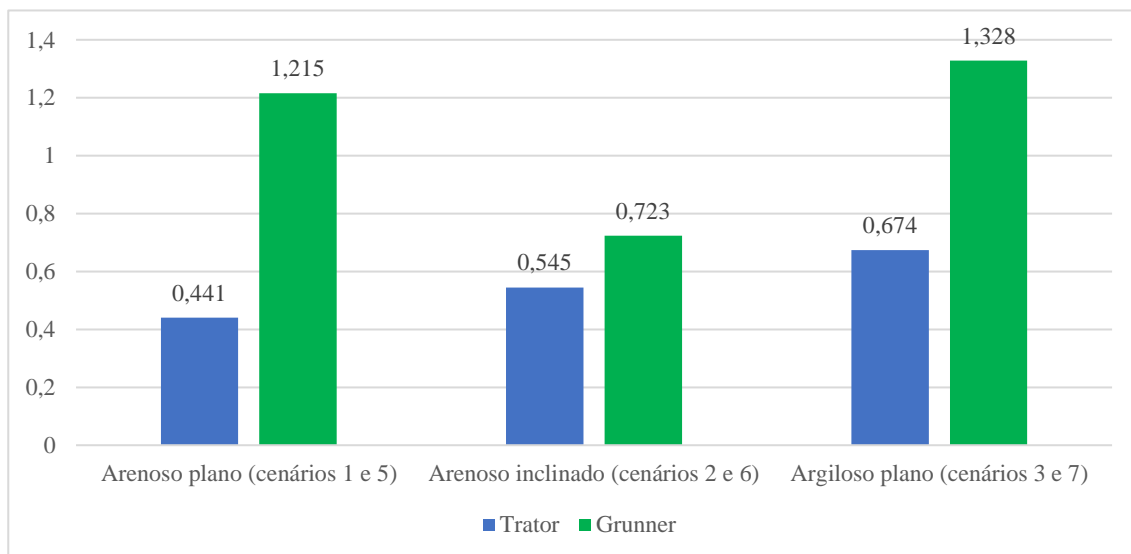
Gráfico 3: Quantidade de cana colhida [kg] por litro de diesel



Fonte: autor.

A maior eficiência do caminhão autônomo também se repete em todos os cenários quando o critério adotado é a distância percorrida no canavial com um litro de óleo diesel consumido. No terreno arenoso e plano o incremento foi de 175,5%, no terreno arenoso inclinado foi de 32,7% e no terreno argiloso e plano, o equipamento da Grunner percorreu uma distância 97% maior com um litro de combustível, conforme Gráfico 4.

Gráfico 4: Distância percorrida [km] por litro de diesel



Fonte: autor.

4.2 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Para viabilizar a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) dos seis cenários distintos mapeados em campo, levantou-se os valores médios de consumo de óleo diesel por tonelada de cana-de-açúcar colhida em cada um. Esses valores compõem a Tabela 7, que agrega os *inputs* de cada ACV.

Tabela 7: Valores médios de litros de diesel consumido por tonelada de cana colhida.

Cenário	Equipamento	Tipo de solo	Declividade	Diesel consumido (l)
1	Grunner	Arenoso	Plano	0,184
2	Grunner	Arenoso	Inclinado	0,192
3	Grunner	Argiloso	Plano	0,177
4	Grunner	Argiloso	Inclinado	n.d.
5	Trator	Arenoso	Plano	0,417
6	Trator	Arenoso	Inclinado	0,422
7	Trator	Argiloso	Plano	0,393
8	Trator	Argiloso	Inclinado	n.d.

Fonte: autor.

O consumo de combustível do caminhão autônomo foi menor em todos os cenários. De forma global, a queda média foi de 54,3% com desvio padrão de 11,1% comparando os dois equipamentos.

Foram utilizados os indicadores de dois métodos distintos dentro do OpenLCA, IPCC 2013 e EDIP 2003. Inicialmente as análises utilizaram o IPCC 2013, método definido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) das Nações Unidas que quantifica os impactos das mudanças climáticas nas emissões de gases de efeito estufa devido às atividades humanas e as agrega em uma unidade padrão, em kg equivalentes de CO₂ (IPCC, 2019).

De acordo com Mendes et al. (2015), o método EDIP (*Environmental Design of Industrial Products*) foi desenvolvido em 1997 pelo programa *Danish EDIP*, que é

composto pela Universidade Técnica da Dinamarca, indústrias locais e a Agência de Proteção Ambiental daquele país.

4.2.1 IPCC 2013

O IPCC 2013 classifica os resultados das emissões calculadas como Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potential*) o Potencial de Mudança de Temperatura Global (GTP - *Global Temperature Change Potential*).

O GWP avalia a capacidade de um gás reter calor na atmosfera em comparação ao dióxido de carbono (CO₂) ao longo de um período específico. No caso do IPCC 2013, são adotados o GWP 20a, que traz o GWP de um gás para um período de 20 anos, e o GWP 100a, referente ao GWP de um gás ao longo de 100 anos.

O GTP avalia o impacto de um gás sobre a temperatura global, considerando o aquecimento que ele pode causar em um determinado período. O IPCC 2013 adota o GTP 20a, que se refere ao GTP de um gás ao longo de 20 anos, e o GTP 100a, que apresenta o GTP de um gás para um período de 100 anos.

4.2.1.1 Impactos

O caminhão autônomo Grunner apresentou impactos inferiores em todos os cenários avaliados quando comparados ao conjunto de transbordo tradicional. As Tabelas 8, 9 e 10 consolidam os impactos medidos nas quatro categorias previstas no IPCC 2013 e comparando os cenários com características similares de terreno.

Tabela 8: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 1) e trator (Cenário 5) em terrenos arenosos e planos através do método IPCC 2013.

Categoria	Cenário 1 [kg CO₂ eq]	Cenário 5 [kg CO₂ eq]
GTP 100a	0,800602	1,814408
GTP 20a	0,890125	2,017293
GWP 100a	0,836823	1,896495
GWP 20a	0,919907	2,084789

Fonte: autor.

Tabela 9: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 2) e trator (Cenário 6) em terrenos arenosos e inclinados através do método IPCC 2013.

Categoria	Cenário 2 [kg CO₂ eq]	Cenário 6 [kg CO₂ eq]
GTP 100a	0,778846	1,836163
GTP 20a	0,865936	2,041481
GWP 100a	0,814083	1,919234
GWP 20a	0,89491	2,109787

Fonte: autor.

Tabela 10: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 3) e trator (Cenário 7) em terrenos argilosos e planos através do método IPCC 2013.

Categoria	Cenário 3 [kg CO₂ eq]	Cenário 7 [kg CO₂ eq]
GTP 100a	0,770144	1,709981
GTP 20a	0,856261	1,90119
GWP 100a	0,804987	1,787344
GWP 20a	0,884911	1,964801

Fonte: autor.

A redução nos impactos causados pelo caminhão nos terrenos arenosos e planos em relação aos tratores foi de 55,9%. Nos terrenos arenosos e inclinados, os impactos foram 57,6% inferiores e nos terrenos argilosos e planos, a diferença foi de 55%.

Dentre as quatro categorias do IPCC 2013, o GWP 100a é o mais utilizado em relatórios e regulamentações sobre mudanças climáticas, pois oferece uma visão de longo prazo do impacto dos gases de efeito estufa. Por exemplo, o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris utilizam o GWP 100a como base para suas ações.

Assim, considerando a categoria GWP 100a, a redução média nas emissões considerando-se todos os cenários avaliados foi de 1,049 kg de CO₂ equivalente por tonelada de cana colhida. A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) estima a produção brasileira de cana-de-açúcar para a safra 2024/2025 em 689,8 milhões de toneladas (CONAB, 2024). De acordo com a própria Conab, mais de 92% da colheita brasileira é mecanizada. Portanto, a substituição dos transbordos tradicionais pelo caminhão autônomo tem um potencial de redução de emissões superior a 665 mil toneladas de CO₂ equivalente por ano.

4.2.2 EDIP 2003

O EDIP avalia as seguintes categorias de impacto: aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de recursos e ambiente de trabalho (HAUSCHILD et al., 2008).

4.2.2.1 Impactos

Assim como observado através do método IPCC 2013, nas análises através do método EDIP 2003 o caminhão autônomo Grunner apresentou impactos inferiores em todos os cenários avaliados quando comparados ao conjunto de transbordo tradicional. As Tabelas 11, 12 e 13 consolidam os impactos medidos nas 29 categorias mapeadas no EDIP 2003 e comparando os cenários com características similares de terreno.

Tabela 11: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 1) e trator (Cenário 5) em terrenos arenosos e planos através do método EDIP 2003.

Categoria de impacto	Unidade de referência	Cenário 1	Cenário 5
Toxicidade humana (ar)	m ³ ar	534861,2535	1212158,384
Ecotoxicidade em estações de tratamento de esgoto	m ³ água	6433,823686	14581,00259
Ecotoxicidade crônica na água	m ³ água	4076,773467	9239,209433
Ecotoxicidade aguda na água	m ³ água	581,5667564	1318,007269
Toxicidade humana (águas superficiais)	m ³ água	151,5820673	343,5310981
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na vegetação)	m ² .ppm.h	13,45547009	30,49419038
Ecotoxicidade crônica no solo	m ³ solo	4,498468869	10,19489956
Aquecimento global (GWP 20a)	kg CO ₂ -Eq	0,86418046	1,958495934
Aquecimento global (GWP 100a)	kg CO ₂ -Eq	0,822904883	1,864952915
Aquecimento global (GWP 500a)	kg CO ₂ -Eq	0,802881373	1,819573546
Toxicidade humana (via solo)	m ³ solo	0,291973399	0,661700584
Recursos não renováveis (petróleo)	kg	0,183598773	0,416090696
Eutrofização terrestre	m ²	0,172280536	0,390440127
Aterro (resíduos)	kg	0,124265191	0,281622742
Acidificação	m ²	0,089220079	0,202199853
Recursos não renováveis (carvão)	kg	0,084238779	0,190910711
Recursos não renováveis (gás natural)	kg	0,019270283	0,043672326
Recursos não renováveis (lenha)	kg	0,014539919	0,032951882
Eutrofização potencial combinada	kg NO ₃	0,013289131	0,030117216
Recursos não renováveis (alumínio)	kg	0,004320485	0,009791534
Eutrofização potencial por nitrogênio (N)	kg N	0,002074435	0,004701302
Aterro (escória e cinzas)	kg	0,002065808	0,004681751
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na saúde humana)	pessoa.ppm.h	0,000916574	0,002077236
Eutrofização potencial por fósforo (P)	kg P	0,000125582	0,000284606
Recursos renováveis (madeira)	m ³	8,88589E-05	0,000201381
Aterro (resíduos radioativos)	kg	6,20054E-05	0,000140523
Aterro (resíduos perigosos)	kg	3,66347E-05	8,30254E-05
Recursos não renováveis (cobalto)	kg	2,60708E-07	5,90843E-07
Destruição do ozono estratosférico (ODP total)	kg CFC-11-Eq	1,11421E-07	2,52514E-07

Fonte: autor.

Tabela 12: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 2) e trator (Cenário 6) em terrenos arenosos e inclinados através do método EDIP 2003.

Categoria de impacto	Unidade de referência	Cenário 2	Cenário 6
Toxicidade humana (ar)	m ³ ar	520327	1226693
Ecotoxicidade em estações de tratamento de esgoto)	m ³ água	6258,992	14755,83
Ecotoxicidade crônica na água	m ³ água	3965,992	9349,991
Ecotoxicidade aguda na água	m ³ água	565,7633	1333,811
Toxicidade humana (águas superficiais)	m ³ água	147,463	347,6502
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na vegetação)	m ² .ppm.h	13,08983	30,85983
Ecotoxicidade crônica no solo	m ³ solo	4,376228	10,31714
Aquecimento global (GWP 20a)	kg CO ₂ -Eq	0,840697	1,981979
Aquecimento global (GWP 100a)	kg CO ₂ -Eq	0,800543	1,887314
Aquecimento global (GWP 500a)	kg CO ₂ -Eq	0,781064	1,841391
Toxicidade humana (via solo)	m ³ solo	0,284039	0,669635
Recursos não renováveis (petróleo)	kg	0,17861	0,42108
Eutrofização terrestre	m ²	0,167599	0,395122
Aterro (resíduos)	kg	0,120888	0,285
Acidificação	m ²	0,086796	0,204624
Recursos não renováveis (carvão)	kg	0,08195	0,1932
Recursos não renováveis (gás natural)	kg	0,018747	0,044196
Recursos não renováveis (lenha)	kg	0,014145	0,033347
Eutrofização potencial combinada	kg NO ₃	0,012928	0,030478
Recursos não renováveis (alumínio)	kg	0,004203	0,009909
Eutrofização potencial por nitrogênio (N)	kg N	0,002018	0,004758
Aterro (escória e cinzas)	kg	0,00201	0,004738
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na saúde humana)	pessoa.ppm.h	0,000892	0,002102
Eutrofização potencial por fósforo (P)	kg P	0,000122	0,000288
Recursos renováveis (madeira)	m ³	8,64E-05	0,000204
Aterro (resíduos radioativos)	kg	6,03E-05	0,000142
Aterro (resíduos perigosos)	kg	3,56E-05	8,4E-05
Recursos não renováveis (cobalto)	kg	2,54E-07	5,98E-07
Destruição do ozono estratosférico (ODP total)	kg CFC-11-Eq	1,08E-07	2,56E-07

Fonte: autor.

Tabela 13: Comparação entre os impactos do caminhão autônomo (Cenário 3) e trator (Cenário 7) em terrenos argilosos e planos através do método EDIP 2003.

Categoria de impacto	Unidade de referência	Cenário 3	Cenário 7
Toxicidade humana (ar)	m ³ ar	514513,3	1142394
Ecotoxicidade em estações de tratamento de esgoto	m ³ água	6189,059	13741,81
Ecotoxicidade crônica na água	m ³ água	3921,679	8707,456
Ecotoxicidade aguda na água	m ³ água	559,4419	1242,151
Toxicidade humana (águas superficiais)	m ³ água	145,8154	323,7595
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na vegetação)	m ² .ppm.h	12,94358	28,73913
Ecotoxicidade crônica no solo	m ³ solo	4,327331	9,608143
Aquecimento global (GWP 20a)	kg CO ₂ -Eq	0,831304	1,845777
Aquecimento global (GWP 100a)	kg CO ₂ -Eq	0,791599	1,757617
Aquecimento global (GWP 500a)	kg CO ₂ -Eq	0,772337	1,71485
Toxicidade humana (via solo)	m ³ solo	0,280866	0,623617
Recursos não renováveis (petróleo)	kg	0,176614	0,392143
Eutrofização terrestre	m ²	0,165726	0,367969
Aterro (resíduos)	kg	0,119538	0,265414
Acidificação	m ²	0,085826	0,190562
Recursos não renováveis (carvão)	kg	0,081034	0,179923
Recursos não renováveis (gás natural)	kg	0,018537	0,041159
Recursos não renováveis (lenha)	kg	0,013987	0,031055
Eutrofização potencial combinada	kg NO ₃	0,012784	0,028384
Recursos não renováveis (alumínio)	kg	0,004156	0,009228
Eutrofização potencial por nitrogênio (N)	kg N	0,001996	0,004431
Aterro (escória e cinzas)	kg	0,001987	0,004412
Formação fotoquímica de ozônio (impactos na saúde humana)	pessoa.ppm.h	0,000882	0,001958
Eutrofização potencial por fósforo (P)	kg P	0,000121	0,000268
Recursos renováveis (madeira)	m ³	8,55E-05	0,00019
Aterro (resíduos radioativos)	kg	5,96E-05	0,000132
Aterro (resíduos perigosos)	kg	3,52E-05	7,82E-05
Recursos não renováveis (cobalto)	kg	2,51E-07	5,57E-07
Destruição do ozono estratosférico (ODP total)	kg CFC-11-Eq	1,07E-07	2,38E-07

Fonte: autor.

As reduções observadas nos impactos causados pelos dois equipamentos foram da mesma ordem observada através do método IPCC 2013. Considerando a categoria GWP 100a pelo método EDIP 2003, a redução média nas emissões entre os cenários 1 e 5 foi de 1,042 kg de CO₂ equivalente por tonelada de cana colhida. Na comparação entre os cenários 2 e 6, observou-se um decréscimo de 1,087 kg de CO₂ equivalente, e entre os cenários 3 e 7, as emissões foram 0,966 kg de CO₂ equivalente inferiores, o que equivale a uma redução média de 1,032 kg de CO₂ equivalente por tonelada de cana-de-açúcar colhida.

Retomando a estimativa da Conab de produção brasileira para a safra 2024/2025 de 689,8 milhões de toneladas mecanização superior a 92% (CONAB, 2024), a substituição dos transbordos tradicionais pelo caminhão autônomo tem um potencial de redução de emissões superior a 654 mil toneladas de CO₂ equivalente por ano, de acordo com o método EDIP 2003.

5. CONCLUSÕES

O consumo de óleo diesel é um fator crítico no processo de colheita de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, na produção de etanol e açúcar. Este estudo demonstrou que a substituição do modelo tradicional de transbordo, composto por tratores e vagões, por caminhões autônomos pode reduzir significativamente os impactos ambientais negativos dessa operação.

A mudança, que envolve apenas a substituição de equipamentos na etapa de colheita, apresenta um potencial de redução de emissões de aproximadamente 1 kg de CO₂ equivalente por tonelada de cana colhida. Essa redução traz benefícios ambientais diretos, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas, a sustentabilidade e a preservação ambiental.

Adotar práticas mais sustentáveis também gera vantagens competitivas, como a melhoria da reputação corporativa e a diferenciação no mercado. Empresas que demonstram responsabilidade ambiental se tornam mais atrativas para investidores e parceiros de negócios, especialmente em um cenário onde critérios ESG (ambientais, sociais e de governança) têm ganhado relevância estratégica. Ações como essa podem facilitar a obtenção de certificações ambientais e a inclusão em índices de sustentabilidade, como o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da B3.

Além dos benefícios ambientais e reputacionais, a economia financeira é um aspecto relevante. Com a substituição de tratores por caminhões autônomos, há uma redução média de 0,225 litro de diesel por tonelada de cana colhida. Por exemplo, em uma safra de 3 milhões de toneladas, isso equivale a uma economia de aproximadamente 675 mil litros de combustível. Considerando o preço médio do diesel no estado de São Paulo em outubro de 2024 (R\$ 6,02 por litro, segundo a ANP), a economia total pode chegar a R\$ 4 milhões por safra, neste exemplo.

A redução no consumo de combustíveis fósseis também contribui para a segurança energética das empresas e do país, diminuindo a dependência de recursos não renováveis e a exposição à volatilidade dos preços.

Outro benefício identificado é o aumento da eficiência operacional. Graças à maior velocidade e capacidade de carga dos caminhões autônomos, muitas usinas

estimam que poderiam reduzir de 10% a 15% de sua frota, mantendo ou até melhorando o desempenho geral da operação.

Esses resultados reforçam o potencial dos caminhões autônomos para transformar a operação de colheita, oferecendo ganhos ambientais, econômicos e operacionais. Esse conjunto de vantagens pode subsidiar decisões estratégicas, especialmente em contextos de aumento dos preços dos combustíveis e maior exigência por práticas sustentáveis.

Estudos futuros devem aprofundar a análise de aspectos técnicos e estratégicos que possam contribuir para tornar a produção de etanol ainda mais limpa e sustentável. Primeiramente, sugere-se investigar os cenários 4 e 8 propostos neste trabalho, que não puderam ser analisados devido à ausência de dados empíricos. Além disso, é essencial explorar o impacto dos caminhões autônomos na compactação do solo, já que evidências preliminares indicam que o efeito desse equipamento é menor do que o causado pelos tratores. Isso pode resultar em uma maior longevidade dos canaviais, redução de custos com replantio e ganhos de produtividade ao longo dos ciclos agrícolas.

Uma análise mais detalhada dos impactos operacionais decorrentes do aumento de velocidade e da maior capacidade de carga dos caminhões autônomos também é necessária, especialmente no transporte da cana do campo ao ponto de transbordo. Essa análise deve incluir simulações sobre a possibilidade de redução da frota e impactos logísticos no fluxo de transporte da cana-de-açúcar. Além disso, Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) mais abrangentes poderiam ser realizadas, considerando todas as etapas do ciclo de vida dos equipamentos, como fabricação, manutenção e descarte, para identificar oportunidades adicionais de redução dos impactos ambientais.

A busca por soluções ainda mais sustentáveis pode incluir a combinação de caminhões autônomos com tecnologias limpas, como biocombustíveis, sistemas híbridos ou elétricos, reduzindo ainda mais as emissões associadas à colheita. Pesquisas sobre a viabilidade técnica e econômica dessas soluções, especialmente em usinas de diferentes tamanhos e capacidades, são cruciais para ampliar a adoção dessas práticas no setor.

Além dos benefícios técnicos e ambientais, é importante explorar os desdobramentos econômicos e sociais dessa transição tecnológica. Estudos poderiam

avaliar os impactos sobre o emprego local, a necessidade de requalificação profissional e o potencial de engajamento de talentos em empresas que adotam práticas sustentáveis. Empresas que investem em sustentabilidade não apenas atraem e retêm talentos, mas também fortalecem sua posição no mercado, alinhando-se às expectativas da sociedade e de investidores.

Outro ponto de destaque seria a investigação do papel das políticas públicas e incentivos financeiros na aceleração da adoção de práticas limpas. Exemplos incluem subsídios para aquisição de caminhões autônomos, programas de certificação ambiental e acesso a financiamentos verdes. Também seria relevante examinar o impacto da adoção de tecnologias disruptivas no ciclo produtivo, como a integração da agricultura de precisão e o uso de sensores inteligentes para monitorar em tempo real o desempenho operacional e o uso de recursos.

Essas direções de pesquisa não apenas complementam os resultados apresentados neste estudo, mas também consolidam a viabilidade de ações que promovam a sustentabilidade e a eficiência na produção de etanol. Além disso, reforçam o papel estratégico do setor sucroalcooleiro na transição para uma economia de baixo carbono, destacando sua importância na agenda global de desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2009b.

ALVES, Lorruali Alexandre; DENADAI, Marcelo Scantamburlo. Plantio de cana-de-açúcar manual x convencional. **Tekhne e Logos**, v. 13, n. 1, p. 40-49, 2022.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Série histórica do levantamento de preços.** Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: outubro de 2024.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução n° 50/2013.** Rio de Janeiro, 23 de dezembro de 2013. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: abril de 2023.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução n° 45/2014.** Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2014. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: abril de 2023.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução n° 19/2015.** Rio de Janeiro, 15 de abril de 2015. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: novembro de 2022.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução n° 798/2019.** Rio de Janeiro, 01 de agosto de 2019. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: maio de 2023.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Produção de biocombustíveis.** Rio de Janeiro, 27 de março de 2023. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: maio de 2023.

BACCARIN, José Giacomo. Efeitos ambientais, sociais e econômicos de mudanças tecnológicas recentes na cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Brasil. **Pegada - Revista da Geografia do Trabalho**, v. 20, n. 3, p. 141-173, 2019.

BAIOCHI, Arthur Gusson; DA SILVA, Vanessa Gomes. Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021027-e021027, 2021

BORDONAL, Ricardo de Oliveira et al. Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil. **Biomass and bioenergy**, v. 59, p. 195-207, 2013.

BRASIL. Decreto-lei nº 19.717, de 20 de fevereiro de 1931. Estabelece a aquisição obrigatória de álcool, na proporção de 5% da gasolina importada, e dá outras providências. Diário Oficial da União - Seção 1 - 13/3/1931, página 3736.

BRASIL. CNPE - Conselho Nacional de Política Energética, **Resolução nº 16**, de 29 de outubro de 2018. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 de novembro de 2018. Acesso em: novembro de 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: julho de 2022.

CARB. **Low Carbon Fuel Standard: LCFS Basics: California Environmental Protection Agency Air Resources Board**. Sacramento, Califórnia, EUA, 2016. Disponível em: <<https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/background/basics.htm>>. Acesso em janeiro de 2023.

CAI, Hao et al. Decarbonization potential of on-road fuels and powertrains in the European Union and the United States: a well-to-wheels assessment. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 6, n. 19, p. 4398-4417, 2022.

CAVALETT, Otávio et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647-658, 2013

CERVI, Ricardo Ghantous et al. Avaliação do desempenho operacional da colheita e transbordo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Energia na agricultura**, v. 30, n. 3, p. 232-241, 2015.

CHEHEBE, José Ribamar B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002

CHEN, Rui et al. Life cycle energy and greenhouse gas emission effects of biodiesel in the United States with induced land use change impacts. **Bioresource technology**, v. 251, p. 249-258, 2018

CONAB, 2024. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: setembro de 2024.

CORTEZ, Barbosa Augusto Luiz. **Bioetanol de cana-de-açúcar: P & D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010.

CZYRNEK-DELETRE, Magdalena. M., SMYTH, Beatrice. M., MURPHY, Jerry. D. Beyond carbon and energy: The challenge in setting guidelines for life cycle assessment of biofuel systems. **Renewable Energy Journal**, v. 105, p. 436-448, 2017.

DALMORA, Gabriela, LUZZI, Karine, HEMKEMEIER, Marcelo. A contribuição da Análise do Ciclo de Vida (ACV) para a minimização dos impactos ambientais de processos produtivos: uma abordagem teórica. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 2, 2023.

DRANKA, Géremi Gilson, FERREIRA, Paula. Electric Vehicles and Biofuels Synergies in the Brazilian Energy System. **Energies**, v. 4423, 2020.

ECOINVENT. About ecoinvent, 2022, **Ecoinvent**. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: junho de 2022

ESTEVES, Victor Paulo Peçanha et al. Assessment of greenhouse gases (GHG) emissions from the tallow biodiesel production chain including land use change (LUC). **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 578-591, 2017.

EPE. **Análise da Conjuntura dos Biocombustíveis 2023**; Ministério de Minas e Energia: Brasília, Brasil, 2024a.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2024 – ano base 2023**; Ministério de Minas e Energia: Brasília, Brasil, 2024b.

FARDILAH, Vivi A. et al. Assessment on the Pitting-Corrosion of 1037-Mild Carbon Steel by Bacteria in B30 Biodiesel Product. **Journal of Bio-and Tribo-Corrosion**, v. 8, n. 4, p. 1-10, 2022.

FRUTUOSO, Felipe S. et al. Assessing light flex-fuel vehicle emissions with ethanol/gasoline blends along an urban corridor: A case of Fortaleza/Brazil. **International Journal of Transportation Science and Technology**, 2022.

GLENSOR, Kain, MUÑOZ, Maria Rosa. Life-Cycle Assessment of Brazilian Transport Biofuel and Electrification Pathways. **Sustainability**, v. 11, 2019.

GRANGEIA, Carolina; SANTOS, Luan; LAZARO, Lira Luz Benites. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspect. **Energy Conversion and Management**, v. 13, 2022.

GRUNNER. Grunner Smart Machine. Disponível em: <<https://www.grunnertec.com.br/>>. Acesso em: maio de 2023.

HAUSCHILD, Michael Z. et al. Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals: the search for harmony and parsimony. **Environmental Science & Technology**, 42, p. 7032-7037, 2008.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japão, 2006.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japão, 2013.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories**. Japão, 2019.

JABBOUR, Charbel José Chiapetta. Environmental training in organisations: From a literature review to a framework for future research. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 74, p. 144–155, 2013.

JESWANI, Harish. K., CHILVERS, Andrew, AZAPAGIC, Adisa. Environmental sustainability of biofuels: a review. **The Royal Society Collection**, Londres, Reino Unido, 2020.

KOCAK, Emrah et al. Is ethanol production responsible for the increase in corn prices? **Renewable Energy**, v. 199, p. 689-696, 2022.

- LAZARO, Lira Luz Benites; MELLO-THÉRY, Neli Aparecida; LAHSEN, Myanna. Business storytelling about energy and climate change: The case of Brazil's ethanol industry. **Energy research & social science**, v. 31, p. 77-85, 2017.
- MAGA, Daniel et al. Comparative life cycle assessment of first and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 266–280, 2019.
- MANZINI, Ezio, VEZZOLI, Carlos. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Editora USP, 2002.
- MARQUES, Caroline Araújo et al. Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e31211124675-e31211124675, 2022.
- MARTINELLI, Fernanda Silva et al. Will Brazil's push for low-carbon biofuels contribute to achieving the SDGs? A systematic expert-based assessment. **Cleaner Environmental Systems**, v. 5, p. 100075, 2022.
- MAZZONETTO, Alexandre Witier; GONÇALVES, Eloy Peres; SOARES, Sabrina Stefani. O impacto da tecnologia aplicada ao processo de colheita de cana-de-açúcar na eficiência do setor sucroenergético em uma empresa paulista. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 11, n. 1, p. 09-30, 2021
- MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2015.
- MILAN, Marcos; ROSA, João Henrique Mantellatto. Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para CTT, **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**[S.l: s.n.], 2015.
- MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias; ZILBERMAN, David. **Production of ethanol from sugarcane in Brazil: from State intervention to a free market**. Springer Science & Business Media, 2014.
- NEVES, Jorge Luis Mangolini. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NOCELLI, Roberta Cornélio Ferreira et al. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: contribuições e importância econômica. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**, p. 13, 2017

NOGUEIRA, Luiz A. Horta. Does biodiesel make sense? **Energy**, v. 36, p. 3659-3666, 2011.

NUNES, Thiago dos Santos; FINZER, Jose Roberto Delalibera. A importância do tratamento do caldo de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 24816-24823, 2019

OGURA, Allan Pretti et al. An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts. **Sustainable Production and Consumption**, 2022.

OMETTO, Aldo Roberto. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

ONU – Organização das Nações Unidas. Departamento das Nações Unidas para Assuntos Econômicos e Sociais. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em: maio de 2023.

PEREIRA, Lucas, et al. Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 1-12, 2019.

PIRES, Armando Caldeira et al. Implications of removing straw from soil for bioenergy: an LCA of ethanol production using total sugarcane biomass. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 249-259, 2018.

RALUY, Rosa Gemma et al. Life cycle assessment of central solar heating plants with seasonal storage. **Energy Procedia**, v. 48, p. 966-976, 2014.

RIBEIRO, Helena. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista de Saúde Pública**, v. 42, n. 2, p. 370-376, 2008.

ROSA, Isabela Ferreira. **Análise comparativa das metodologias GREET e BIOGRACE : cálculo de emissões de gases de efeito estufa para o etanol de cana-de-açúcar brasileiro sob mecanismos regulatórios diferenciados**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Produção e Manufatura) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2017.

SANTANNA, Alex Magno Gomes. Disponibilidade mecânica de colhedoras de cana-de-açúcar: efeitos do tempo de uso na gestão da manutenção. 2020.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas.

Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 20 de setembro de 2002, p. 2.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil 1970-2022. São Paulo, Brasil. Observatório do Clima, 2023.

SHARMA, Ashish, STREZOV, Vladimir. Life cycle environmental and economic impact assessment of alternative transport fuels and power-train technologies. **Energy**, v. 133, p. 1132-1141, 2017.

SHIKIDA, Pery Francisco Assis. **A evolução diferenciada da agroindústria canavieira no Brasil de 1975 a 1995. 1997**. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

SILVA, Paulo Roberto; ALHADEFF, Eliana M. Biodiesel from beef tallow: a technological patent mapping. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 38061-38075, 2022.

SOUSA, Raphael Bellis et al. A influência do etanol combustível na emissão de etanol, aldeídos e hidrocarbonetos expelidos pelo escapamento em veículos leves. **São Paulo: AEA**, 2013.

SOUZA, Zigomar Menezes de et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 271-278, 2005.

SOUZA, Lidiane La Picirelli de. **Avaliação do ciclo de vida do sistema veículo/combustível no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SZKLO, Alexandre Salem; ULLER, Victor Cohen; BONFÁ, Marcio Henrique P. **Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008

SZWARCFITER, Lila; MENDES, Francisco Eduardo; LA ROVERE, Emilio Lebre. Enhancing the effects of the Brazilian program to reduce atmospheric pollutant emissions from vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 10, n. 2, p. 153-160, 2005.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

THOMAZ, Edivaldo L.; MARCATTO, Francieli S.; ANTONELI, Valdemir. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: an overview. **Geography and Sustainability**, 2022.

WANG, M. **The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET)**. 1999. Disponível em: <<https://greet.es.anl.gov/publication-h3k81jas>>. Acesso em: maio de 2022.

VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. Implantação, expansão e modernização da produção integrada de açúcar e álcool no Centro-Sul do Brasil. **Leituras Economia Política**, Vol. 3, N. 1 (4), p. 49-83, 1997.

VOLTARELLI, Murilo Aparecido. **Ferramentas da qualidade na colheita mecanizada de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.