

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO E SISTEMAS

THAMINE GOMES RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA
CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS**

2023

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS

THAMINE GOMES RODRIGUES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Ricardo Luiz Machado, Dr.

Goiânia - Goiás
Maio/2023

Catálogo na Fonte - Sistema de Bibliotecas da PUC Goiás

R696a Rodrigues, Thamine Gomes

Avaliação do ciclo de vida da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Estado de Goiás / Thamine Gomes Rodrigues. -- 2023.

107 f.: il.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (mestrado) -- Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica, Goiânia, 2023.

Inclui referências: f. 89-107.

1. Cana-de-açúcar. 2. Álcool. 3. Agroindústria canavieira - Goiás (Estado). 4. Logística empresarial. 5. Sustentabilidade. 6. Ciclo de vida do produto. I. Machado, Ricardo Luiz. II. Universidade Católica de Goiás - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - 29/05/2023. III. Título.

CDU: Ed. 2007 -- 658.7(043)

633.61(817.3)

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS

THAMINE GOMES RODRIGUES

Esta Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 29 de maio de 2023.

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS LAJOVIC CARNEIRO**
Data: 05/07/2023 13:44:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Lajovic Carneiro, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO LUIZ MACHADO**
Data: 05/07/2023 19:27:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ricardo Luiz Machado, Dr.
Orientador
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC)

Documento assinado digitalmente
 **CASSIA DA SILVA CASTRO ARANTES**
Data: 05/07/2023 19:40:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Cássia da Silva Castro Arantes, Dra.
Instituto Federal Goiano

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO VIZINE DA CRUZ**
Data: 06/07/2023 10:46:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Thiago Vizine da Cruz, Dr.
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC)

Goiânia – Goiás
Maio/2023

Dedico este trabalho a todos os que me apoiaram e ajudaram ao longo desta caminhada.

Agradecimentos

Nesse breve trecho, eu gostaria de expressar minha imensa gratidão a todos que contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado. Em especial, eu gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Ricardo Luiz Machado, pela orientação, paciência e pelo conhecimento compartilhado, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Também quero agradecer ao Dr. Thiago Vizine da Cruz, pela ajuda, apoio e pela disponibilidade sempre que precisei. Gostaria de estender meus agradecimentos a Myllenna Rodrigues de Abreu e a Clarice Barreto pela amizade e apoio ao longo desse percurso.

Não poderia deixar de agradecer aos professores Dra. Maria José pelo grande carinho, apoio e disponibilidade sempre, e Dr. José Elmo que também se disponibilizou a esclarecer minhas dúvidas sempre que o procurei. Agradeço também a todos os professores do programa de mestrado que contribuíram para a minha formação como aluno e crescimento como pessoa.

Gostaria de agradecer também a todos os colegas, amigos e familiares que me deram apoio ao longo dessa caminhada.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) financiadoras desse projeto de pesquisa.

Por fim, mais uma vez, agradeço imensamente e humildemente a todos que fizeram parte desta caminhada. Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda de cada um de vocês.

Resumo da Dissertação apresentada ao MEPROS/ PUC Goiás como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE GOIÁS

Thamine Gomes Rodrigues

Maio/2023

Orientador: Ricardo Luiz Machado, Dr.

Resumo: A indústria sucroalcooleira é um setor de destaque para o mercado brasileiro, sendo um dos principais contribuintes para seu desenvolvimento econômico. A fim de contribuir com os estudos existentes na literatura, esse trabalho propõe uma avaliação dos impactos ambientais, na saúde humana e em relação ao uso de recursos, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar. O estudo apresenta uma abordagem quantitativa, com a utilização do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A abordagem possui como delimitação a análise da cadeia de suprimentos da microrregião de Anápolis, no Estado de Goiás. No estudo são consideradas as etapas de cultivo da cana-de-açúcar, transporte para a usina, produção e transporte do etanol para o centro de distribuição. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que as etapas de transporte possuem melhor desempenho ambiental, em comparação aos demais processos analisados, tendo os maiores fatores de impactos para as categorias de uso de recursos fósseis e mudanças climáticas, devido aos resíduos pelo uso de óleo e gás natural. Já a produção de etanol aparece com as maiores contribuições de impactos ao meio ambiente e a saúde humana, devido às emissões de dióxido de carbono e metano, resíduos associados ao uso de óleo cru, gás natural e carvão duro, além dos impactos à saúde humana atribuídos ao cromo, zinco, mercúrio e arsênio. O cultivo da cana-de-açúcar apresenta o segundo maior impacto para as categorias de uso da terra (ocupação da terra, modificações no solo e desmatamento), ecotoxicidade (considerando a geração de atrazina, ametrina, cromo e zinco), mudanças climáticas (nas emissão de dióxido de carbono e gás metano). Com o trabalho, pretende-se contribuir com a melhoria da eficiência da cadeia de suprimentos da região em análise, apontando os principais contribuintes para os impactos ambientais e para a saúde humana, e ainda cooperar com as metas de descarbonização assumidas pelo Brasil na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP 21).

Palavras-chave: Cadeia de Suprimentos; Cana-de-açúcar; Etanol; Sustentabilidade; Avaliação de Ciclo de Vida.

Abstract: The sugar and alcohol industry is an essential sector of the Brazilian industry and one of the main contributors to its economic development. In order to contribute to the former research, this work proposes an assessment of the environmental impacts on human health concerning the use of resources in the sugarcane supply chain. The study presents a quantitative approach using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The approach has as delimitation the analysis of the supply chain of the Anápolis micro-region in the State of Goiás. The study considers the stages of sugarcane cultivation, transport to the plant, production, and ethanol transport to the distribution center. The results obtained in this research indicate that the transport stages have better environmental performance, compared to the other analyzed processes, with the highest impact factors for fossil resource use and climate change due to oil and gas Natural waste. Ethanol production, on the other hand, appears with the most significant contributions to impacts on the environment and human health due to carbon dioxide and methane emissions, waste associated with crude oil, natural gas, and hard coal, in addition to impacts on human health attributed to chromium, zinc, mercury, and arsenic. The cultivation of sugarcane has the second highest impact for the categories of land use (land occupation, soil modifications, and deforestation), ecotoxicity (considering the generation of atrazine, ametrine, chromium, and zinc), climate change (in the emission of carbon dioxide and methane gas). With the work, it is intended to contribute to improving the efficiency of the supply chain in the region under analysis, pointing out the main contributors to environmental impacts and human health, and also cooperating with the decarbonization goals assumed by Brazil at the Conference of United Nations on Climate Change 2015 (COP 21).

Keywords: Supply chain; Sugarcane; Ethanol; Sustainability; Life Cycle Assessment.

Lista de figuras

Figura 1: Valor Bruto da Produção no Brasil em 2020 e 2021 (R\$ bilhões)	25
Figura 2: Estimativa de evolução da cana-de-açúcar (Safr 2021/22)	25
Figura 3: Participação relativa dos estados brasileiros na produção de cana-de-açúcar (Safr 2021/22)	27
Figura 4: Evolução do PIB nominal de Goiás e do Brasil (R\$ bilhões)	28
Figura 5: Microrregiões do Estado de Goiás	39
Figura 6: Cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar adotado na pesquisa	40
Figura 7: Sistema de Análise do Ciclo de Vida (entradas e saídas)	47
Figura 8: Mapeamento da cadeia de suprimentos da indústria submetida ao estudo	50
Figura 9: Contribuição pelo uso da água	52
Figura 10: Contribuição pelo uso de combustível	53
Figura 11: Contribuição pelo uso de veículos de transporte	54
Figura 12: Contribuição pelo uso da mão de obra	55
Figura 13: Contribuição pelo uso de defensivos	56
Figura 14: Contribuição pelo uso de mudas de cana-de-açúcar	57
Figura 15: Emissão de CO ₂	58
Figura 16: Danos ao ecossistema - acidificação	62
Figura 17: Danos ao ecossistema - mudanças climáticas	63
Figura 18: Danos ao ecossistema – ecotoxicidade (água doce)	64
Figura 19: Danos ao ecossistema – eutrofização marinha	65
Figura 20: Danos ao ecossistema – eutrofização (água doce)	66
Figura 21: Danos ao ecossistema – eutrofização (terrestre)	67
Figura 22: Danos ao ecossistema – destruição da camada de ozônio	68
Figura 23: Danos à saúde humana - toxicidade humana (cancerígena)	69
Figura 24: Danos à saúde humana - toxicidade humana (não cancerígeno)	70
Figura 25: Danos à saúde humana - radiação ionizante	71
Figura 26: Danos à saúde humana - material particulado	72
Figura 27: Danos à saúde humana - formação fotoquímica de ozônio	73
Figura 28: Uso de recursos - uso da terra	74
Figura 29: Uso de recursos - fósseis	75
Figura 30: Uso de recursos – minerais e metais	76
Figura 31: Uso de recursos - água	77
Figura 32: Comparação dos impactos ambientais pelo método <i>Environmental Footprint (Mid-point indicator)</i>	80

Lista de quadros e tabelas

Quadro 1: Descrição dos critérios considerados no protocolo de pesquisa.....	22
Quadro 2: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (cultivo da cana)	43
Quadro 3: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (transporte da cana)	44
Quadro 4: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (Produção de etanol).....	45
Quadro 5: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (Transporte de etanol).....	46
Quadro 6: Utilização dos fluxos técnicos em artigos científicos.....	47
Quadro 7: Contribuição dos resíduos para o sistema produtivo.....	59
Quadro 8: Comparação dos resultados do AICV para as variantes do projeto de sistema de produto	78

Lista de abreviaturas e siglas

2G	Etanol de Segunda Geração
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AVC	Avaliação de Ciclo de Vida
BEN	Balanco Energético Nacional
C ₆ H ₆	Benzeno
Ca	Cálcio
CBIO	Crédito de Descarbonização
CE	Comissão Europeia
CFC	Clorofluorcarbono
CH ₄	Metano
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COP 21	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015
CTUe	Unidades Tóxicas Comparativas
DEA	Análise Envoltória de Dados
EF	<i>Environmental Footprint</i>
ELCD	Banco de Dados Europeu do Ciclo de Vida
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETENE	Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste
EU	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FAEG	Federação da Agricultura e Pecuária de Goiás
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HCFC	Hidrofluorcarbonetos

ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IFA	<i>International Fertilizer Association</i>
IMB	Instituto Maro Borges
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
Mg	Magnésio
MILP	Programação Linear Inteira Mista
MJ	Megajoules
MME	Ministério de Minas e Energia
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NH ₃	Amônia
NMVOC	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio:
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
K	Potássio
PC	Pegada de Carbono
PEF	Pegada Ambiental do Produto
PIB	Produto Interno Bruto
SC	Cadeia de Suprimentos
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
UE	União Europeia
UNECE	Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa

ÚNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar
UV	Raios Ultravioleta
VBP	Valor Bruto da Produção

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Motivação	14
1.2	Lacuna de pesquisa	15
1.3	Problemática de Pesquisa.....	16
1.3.1	Questão Geral	17
1.3.2	Questões Específicas	17
1.4	Objetivos	17
1.4.1	Objetivo Geral	17
1.4.2	Objetivos Específicos.....	17
1.5	Justificativa	18
1.6	Síntese do método de pesquisa	21
1.7	Estrutura da pesquisa	21
2	Revisão bibliográfica.....	22
2.1	Introdução	22
2.2	A indústria sucroalcooleira no Brasil.....	24
2.3	A influência da indústria canavieira na economia do estado de Goiás.....	27
2.4	Sustentabilidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.....	29
2.5	Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.....	35
3	Metodologia de Pesquisa.....	38
3.1	Abordagem e delineamento da pesquisa.....	38
3.2	Objeto de estudo e delimitação da pesquisa	38
3.3	Descrição da cadeia de suprimentos (SC).....	40
3.4	Instrumento de análise	41
3.5	Inventário do ciclo de vida (ICV) e base de dados	42
3.6	Estruturação do modelo de ACV	46
4	Resultados e discussões	50
4.1	Mapeamento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar em Goiás	50
4.2	Inventário de ciclo de vida (ICV)	51
4.2.1	Fluxos técnicos.....	52
4.2.1.1	Fluxos elementares.....	57
4.2.1.2	Resíduos	59
4.2.1.3	Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV).....	61
4.2.1.3.1	Danos ao ecossistema.....	61

4.2.2 Danos à saúde humana	68
4.2.3 Uso de recursos	74
4.2.4 Comparação dos resultados por processos do sistema produtivo	78
4.3 Comparação com estudos anteriores.....	81
4.3.1 Cultivo da cana-de-açúcar	81
4.3.2 Transporte.....	82
4.3.3 Produção de etanol	83
4.4 Considerações parciais.....	84
5 Conclusões.....	87
Referências	89

1 Introdução

1.1 Motivação

Conforme Gilani, Sahebi e Oliveira (2020), nos últimos anos, a tendência crescente de consumo de energia levou a uma crise energética global. Adedoyin *et al.* (2020) enfatizam que as preocupações internacionais sobre a capacidade de fornecimento de energia para acompanhar a demanda e o aumento dos níveis de CO₂, associados ao aquecimento global e às mudanças climáticas, são um sério desafio em relação às políticas econômicas, energéticas, de inclusão social e de sustentabilidade ambiental. Logo, essas preocupações exigem explorar melhor as ligações causais entre consumo de energia, crescimento econômico e as emissões de CO₂.

Embora o consumo cada vez maior de energia obtida a partir de combustíveis fósseis tenha levado ao rápido crescimento econômico em vários segmentos da sociedade, esse combustível tem causado mudanças ameaçadoras, devido ao aumento das emissões de CO₂ e outros agentes poluentes na atmosfera (GILANI, SAHEBI e OLIVEIRA, 2020).

O aumento da demanda energética e a crescente conscientização das mudanças climáticas devido às emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) relacionadas aos combustíveis fósseis aumentaram o interesse pelo uso da biomassa para a produção de energia, o que resultou no aumento significativo da produção global anual de biocombustíveis (JONKER *et al.*, 2016).

Segundo Gilani, Sahebi e Oliveira (2020), à medida que a pressão por uma geração de energia mais limpa e sustentável aumenta, os formuladores de políticas e as empresas priorizam os combustíveis mais verdes, fontes de energia renováveis e tecnologias mais limpas. Nesse cenário, os autores destacam a biomassa como fonte de energia sustentável, devido à sua extensa gama de recursos primários e baixos custos de produção.

Devido às vantagens oferecidas pela utilização da biomassa na geração de energias renováveis (bioenergia e biocombustíveis), especialmente a proveniente da cana-de-açúcar, muitos pesquisadores vêm explorando as aplicações dessa abordagem (Ometto, Hauschild e Roma, 2009; Tsiropoulos *et al.*, 2014; García *et al.*, 2016; Prasara-A *et al.*, 2019). Dentre as possibilidades de produção a partir da cana-de-açúcar, o bioetanol é destacado por Gilani, Sahebi e Oliveira (2020) como o combustível renovável mais desenvolvido quando comparado aos outros biocombustíveis, pois além de

demonstrar grande potencial como uma alternativa crescente para o consumo de combustíveis fósseis, sua utilização pode contribuir para a redução das emissões de GEE.

Diante disso, a motivação para a realização dessa pesquisa é contribuir com a melhoria da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, apontando os principais contribuintes para os impactos ambientais e para a saúde humana, e fornecer aos produtores regionais uma análise que contribua com a tomada de decisão acerca das práticas de produção que podem reduzir os impactos ambientais na cadeia de suprimentos.

1.2 Lacuna de pesquisa

Diversos estudos adotam a cana-de-açúcar como objeto de estudo, seja em um contexto em que buscam uma otimização (Jonker *et al.*, 2016; Khatiwada *et al.*, 2016; Shavazipour, Stray e Stewart, 2020; Gilani, Sahebi e Oliveira, 2020, Abdali, Sahebi e Pishvae, 2021) ou realizam uma análise de eficiência (Lemos *et al.*, 2019; Duarte *et al.*, 2019; Carlucci *et al.*, 2021). Apesar dessas aplicações, Singh, Srivastava e Jangirala (2021) afirmam que não tem sido apresentada atenção suficiente pelos pesquisadores para questões como fatores sociais e ambientais da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar até o momento.

Considerando a cadeia produtiva da cana-de-açúcar brasileira, Bordonal *et al.* (2018) citam o Brasil como um grande produtor, em que sua produção se elevou de maneira significativa nas últimas décadas para atender às demandas por fontes enérgicas renováveis e mitigar as mudanças climáticas. No entanto, segundo os autores, esse crescimento teve como consequência o comprometimento da sustentabilidade na produção dessa cultura, especialmente em relação aos impactos ambientais resultantes do uso de insumos agrícolas e dos processos produtivos dessa cadeia. Com isso, a busca pela minimização das emissões de GEE tornou-se cada vez mais necessária, de acordo com Wiedmann e Minx (2007), Fang *et al.* (2014) e García *et al.* (2016).

Buscando identificar as causas das emissões de GEE, muitos pesquisadores destacam o método *Life Cycle Assessment* (LCA) ou Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), usado para estimar os impactos ambientais em um processo produtivo, tais como os estudos de De Figueiredo *et al.* (2010), que avaliaram a Pegada de Carbono (PC) na produção de açúcar; Khatiwada e Silveira (2011) que analisaram as emissões na produção de etanol e na cogeração de energia elétrica; e Renouf *et al.* (2013) que realizaram uma

comparação dos impactos ambientais na produção de diferentes produtos derivados da cana.

Pode-se observar que diversos estudos abordam a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e exploram o método de ACV em diferentes contextos (Ometto, Hauschild e Roma, 2009; Tsiropoulos *et al.*, 2014; Rebolledo-Leiva *et al.*, 2017; Prasara-A *et al.*, 2019; Hoffmann, Morais e Teodoro, 2020; Sierra, Cubillos-Varela e Franco, 2022). Apesar disso, foi identificado que poucos estudos foram feitos para analisar os impactos ambientais e na saúde humana, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar e avaliar o ciclo de vida dessa cultura no Brasil.

A fim de contribuir com o estado da arte e com a melhoria da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Brasil, esse estudo propõe realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida para identificar os principais contribuintes para os impactos ambientais, na saúde humana e em relação ao uso de recursos, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Estado de Goiás. A cadeia de suprimentos analisada aborda as etapas de cultivo da cana-de-açúcar, transporte para a usina, produção de etanol, a partir da cana processada, e o transporte do etanol para o centro de distribuição. A utilização da cana-de-açúcar nesse estudo foi direcionada apenas para a produção de etanol de primeira geração.

1.3 Problemática de Pesquisa

Além de ser um dos principais contribuintes para o progresso rural e desenvolvimento econômico, conforme destacado por Singh, Srivastava e Jangirala (2021), a cultura da cana-de-açúcar está diretamente ligada às questões sociais e ambientais no Brasil. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a indústria canavieira é relevante para o Brasil desde o período colonial, tendo grande importância para o agronegócio, devido ao seu grande potencial de produção, tanto para o setor de biocombustíveis quanto para seus subprodutos. Além disso, segundo Gonçalves *et al.* (2021), existem mais de 350 usinas de cana-de-açúcar em todo o Brasil, responsáveis pela geração de diferentes produtos e empregos para a população.

Apesar dessa representatividade, para aumentar a concorrência e otimizar o desempenho da cultura, Duarte *et al.* (2019) enfatizam que as unidades produtivas

precisam melhorar sua eficiência e buscar constantemente a melhoria em relação ao uso de seus insumos.

1.3.1 Questão Geral

A fim de sintetizar a problemática abordada neste estudo, o trabalho busca responder a seguinte questão de pesquisa: quais os principais impactos ambientais, na saúde humana e em relação ao uso de recursos, da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no estado de Goiás?

1.3.2 Questões Específicas

Como desdobramentos da questão geral, emergem as seguintes questões específicas de pesquisa:

- Quais os impactos ambientais da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Estado de Goiás?
- Quais os impactos na saúde humana da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Estado de Goiás?
- Quais os impactos pelo uso de recursos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no Estado de Goiás?

1.4 *Objetivos*

1.4.1 Objetivo Geral

O trabalho possui como objetivo geral avaliar os impactos ambientais, na saúde humana e em relação ao uso de recursos, da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no estado de Goiás, utilizando o método de Avaliação de Ciclo de Vida.

1.4.2 Objetivos Específicos

Como desdobramento do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram formulados:

- Mapear a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar da microrregião de Anápolis, no Estado de Goiás;

- Elaborar o modelo de avaliação de ciclo de vida da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, no que se refere a produção de etanol de primeira geração.

1.5 Justificativa

Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (ÚNICA, 2021), isoladamente, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar posiciona o Brasil como referência global em energias limpas, com uma participação de 13,8% na produção de fontes renováveis na matriz energética mundial. Além disso, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2021), a cana-de-açúcar é fonte de 19% da energia consumida no Brasil, sendo a principal fonte de energia renovável do país.

De acordo com a ÚNICA (2021), o etanol de cana-de-açúcar é o biocombustível com menor pegada de carbono do mundo, representando sua eficiência energética por ser uma fonte limpa e renovável de energia, pela sustentabilidade em toda sua cadeia e pela geração de empregos e renda no campo. Segundo Kota *et al.* (2022), a cana-de-açúcar é uma fonte potencial de energia renovável, de baixo custo, que pode ser utilizada como uma alternativa de substituição ao combustível convencional, além de desempenhar um papel significativo na redução da poluição ambiental e dependência de combustíveis fósseis. Além disso, de acordo com o Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE, 2021), a constante procura por combustíveis renováveis que substituam o petróleo e não sejam tão nocivos ao meio ambiente, torna a cana-de-açúcar uma cultura de importância mundial na busca pela sustentabilidade. Em complemento, Parsaee, Kiani e Karimi (2019) destacam que, dentre os diversos tipos de energia renovável disponível, a energia proveniente da produção de cana-de-açúcar tem grande potencial, e é uma alternativa adequada aos combustíveis fósseis. Diante disso, Bordonal *et al.* (2018) destacam que a produção da cana-de-açúcar é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, com potencial para consolidar a posição do Brasil no mercado mundial e desempenhar um importante papel na mitigação de GEE.

Além da importância do objeto de estudo para a economia do Brasil, a realização desse trabalho relaciona-se com as metas de descarbonização assumidas pelo Brasil na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP 21), e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) para 2030.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2020), como um dos esforços para cumprir os compromissos assumidos na COP 21, o Brasil estabeleceu metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, com o intuito de aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030. Nesse contexto, tem-se o Crédito de Descarbonização (CBIO) como um dos instrumentos adotados pelo RenovaBio.

Segundo o MME (2020), o RenovaBio é uma política de Estado que reconhece o papel estratégico de todos os biocombustíveis na matriz energética brasileira no que se refere às suas contribuições para a segurança energética, à previsibilidade do mercado e à mitigação de emissões dos GEE no setor de combustíveis, viabilizando uma oferta de energia mais sustentável, competitiva e segura.

Com a adoção do CBIO, cada tonelada de CO₂ que deixa de ser emitida gera um crédito de carbono, avaliado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Com isso, os produtores de combustíveis podem obter renda a partir das metas anuais de descarbonização calculadas pela ANP, além de contribuir com a redução de gases poluentes na atmosfera.

Nesse contexto, a proposta deste estudo também pretende contribuir com o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) para 2030. Os ODS são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade (ONU, 2015).

Dentre os 17 ODS, considera-se que esta proposta se relaciona com os seguintes objetivos:

- Fome zero e agricultura sustentável (ODS 2), que preconiza garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo (ONU, 2015);
- Trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8), o qual preconiza melhorar a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o

Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança (ONU, 2015);

- Cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), que visa reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros (ONU, 2015);
- Consumo e produção responsáveis (ODS 12), que almeja alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente (ONU, 2015);
- Ação contra mudanças climáticas (ODS 13), que visa tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (ONU, 2015).

Dessa forma, ao analisar a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar por meio da ACV, é possível contribuir para diversos ODS, promovendo práticas mais sustentáveis, incentivando a redução dos impactos ambientais e sociais, e impulsionando o desenvolvimento econômico de forma responsável.

Diante dos conceitos apresentados, a principal contribuição dessa pesquisa é avaliar os impactos ambientais, na saúde humana e sobre o uso de recursos, presentes nos processos de cultivo da cana-de-açúcar, produção de etanol e transporte da cana e etanol.

O objetivo do método é permitir reduzir os impactos ambientais dos bens, serviços e organizações, tendo em conta as atividades da cadeia de suprimentos (desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e utilização até à gestão final dos resíduos). Este objetivo é alcançado através do fornecimento de requisitos pormenorizados para a modelização dos impactos ambientais dos fluxos de material/energia e das emissões e fluxos de resíduos associados a um produto ou a uma organização ao longo do ciclo de vida (*European Commission*, 2011).

Nesse contexto, a realização do estudo sobre a avaliação do ciclo de vida da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é fundamental para fornecer informações e embasar ações que impulsionem a transição para uma matriz energética mais sustentável e para o cumprimento dos ODS relacionados. Além disso, a justificação deste estudo sustenta-se na importância estratégica da cultura da cana-de-açúcar no contexto da matriz energética brasileira, da mitigação das mudanças climáticas e dos compromissos assumidos pelo Brasil. Através desse estudo, será possível fornecer informações embasadas para o

desenvolvimento de políticas e práticas que promovam uma produção mais sustentável e cause menos danos ambientais e à saúde humana na cadeia produtiva da cana-de-açúcar.

1.6 Síntese do método de pesquisa

Para o cumprimento dos objetivos apresentados, esse estudo emprega uma abordagem metodológica quantitativa, em que é utilizada a ACV na elaboração do modelo de análise. A investigação é de natureza exploratória, onde se busca analisar o funcionamento da cadeia de suprimentos e identificar os principais contribuintes para os impactos abordados no estudo.

1.7 Estrutura da pesquisa

O presente estudo está organizado em 5 capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, usada como base teórica para o desenvolvimento desse estudo. No capítulo 3 é apresentada a metodologia de pesquisa, descrevendo o método utilizado para a obtenção dos resultados da pesquisa. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e uma discussão acerca da proposta desenvolvida de avaliação de ciclo de vida. Por fim, no capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Segundo Pacheco *et al.* (2022), Dresch, Lacerda e Antunes (2015) e Tranfield, Denyer e Smart (2003), a revisão de literatura permite uma compreensão do estado da arte, e um melhor auxílio e domínio de pesquisa. Como base para a realização da revisão, foi desenvolvido um protocolo de pesquisa baseado nos estudos de Pacheco *et al.* (2022), Gauss, Lacerda e Cauchick Miguel (2021), Dresch, Lacerda e Antunes (2015) e Moher *et al.* (2009). O protocolo de pesquisa elaborado (Quadro 1), formaliza a estratégia de busca adotada, incluindo bancos de dados, período considerado, palavras-chave utilizadas no processo de busca e os critérios de inclusão e exclusão aplicados (PACHECO *et al.*, 2022).

Quadro 1: Descrição dos critérios considerados no protocolo de pesquisa

Elemento	Descrição
Bases de busca	<i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i>
Tipos de publicações	Artigos revisados por pares publicados em revistas de alto impacto e livros.
Idioma	Inglês
Intervalo de busca	De 2010 a 2022
Campos de pesquisa	Título, resumo e palavras-chaves
Termos pesquisados	Foram utilizadas diferentes palavras-chaves que combinavam os termos: cadeia de suprimentos, cana-de-açúcar, etanol, avaliação de ciclo de vida, sustentabilidade na cadeia da cana. i) Artigos que realizam a avaliação do ciclo de vida, na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar ou em alguma etapa do elo dessa cadeia; ii) Artigos que realizam a avaliação do ciclo de vida, na cadeia de suprimentos do etanol;
Critérios de inclusão	iii) Artigos que abordam a ecoeficiência (Avaliação de Ciclo de Vida e Análise Envoltória de Dados); iv) Artigos que abordam critérios sociais, econômicos e/ou ambientais na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar ou etanol, incluindo propostas de melhoria e/ou otimização.
Critérios de exclusão	i) Artigos duplicados; ii) Artigos não relacionados à cadeia de suprimentos.

Quadro 1: Descrição dos critérios considerados no protocolo de pesquisa (continuação)

Elemento	Descrição
Análise dos artigos	Foram analisados os conteúdos dos artigos, considerando os critérios de inclusão e a relação com a proposta desse estudo. Artigos abordando propostas de avaliação do ciclo de vida da cadeia de suprimentos ou em alguma etapa do elo da cadeia, foram priorizados.

Posteriormente, foi feita uma verificação dos artigos obtidos, onde foram descartados artigos duplicados e artigos que não se relacionavam ao tema desse estudo. Como auxiliar para a seleção, foram utilizados os critérios de inclusão e exclusão apresentados no Quadro 1. Dessa forma, os artigos similares à proposta de pesquisa foram selecionados.

Além dos 85 artigos obtidos pelo processo de busca nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*, foram incluídos outros 54 artigos pelo método denominado como bola de neve¹. De acordo com Jalali e Wohlin (2012), para garantir melhores resultados em uma revisão de literatura, deve-se considerar diferentes abordagens para identificar estudos relevantes. Os autores recomendam que seja feita a bola de neve das listas de referência dos artigos identificados, além das pesquisas nas bases de dados, ou seja, para identificar artigos relevantes adicionais através das listas de referência dos artigos encontrados utilizando as sequências de pesquisa. A bola de neve, ao contrário, significa usar as referências selecionadas no estudo para identificar trabalhos adicionais para incluir.

Segundo Pacheco *et al.* (2022), a bola de neve significa usar as referências selecionadas no estudo para identificar trabalhos adicionais que serão incluídos. Além disso, segundo os autores, o uso desse método para complementar as revisões da literatura é uma abordagem bem estabelecida na literatura. Conforme Wohlin (2014), a bola de neve é útil para estender um estudo de literatura, já que novos estudos quase certamente devem citar pelo menos um artigo entre os estudos anteriormente relevantes, ou o estudo sistemático já realizado na área.

Com a inclusão dos demais artigos obtidos pelo método de bola de neve, tem-se um total de 139 artigos para serem utilizados como base para a realização desse estudo.

¹ A bola de neve se refere-se à um método de identificação de novos artigos com base nos artigos selecionados em uma busca anterior que estão sendo examinados. Esse método pode ser utilizado de duas formas: usando a lista de referência para identificar novos artigos a serem incluídos (bola de neve para trás) e utilizando as citações mencionadas no artigo (bola de neve para frente) (WOHLIN, 2014).

2.2 A indústria sucroalcooleira no Brasil

Segundo Monteiro (2009), Ray *et al.* (2015) e Monteiro e Sentelhas (2017), a agricultura desempenha uma importante atividade econômica em diversos países ao redor do mundo. Nesse contexto, o agronegócio tem sido reconhecido como um setor crucial para o crescimento econômico brasileiro.

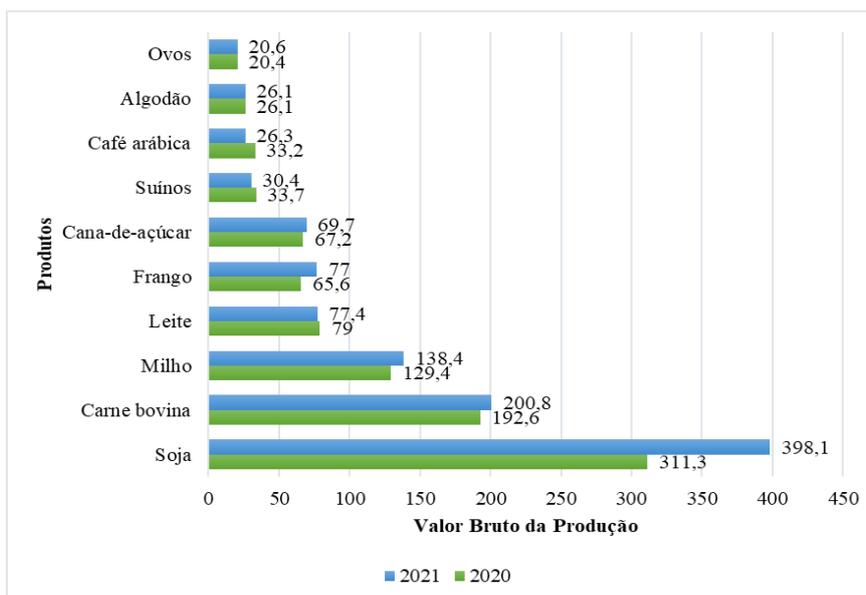
De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2021), o Brasil é o quarto maior exportador de produtos agropecuários do mundo, com aproximadamente USD 100,7 bilhões em valores de produtos exportados, atrás apenas da União Europeia, EUA e China.

De acordo com a CNA (2021), em 2020, a soma de bens e serviços gerados no agronegócio chegou a R\$ 1,98 trilhão ou 27% do PIB brasileiro. Dentre os segmentos do agronegócio, a maior parcela é do ramo agrícola, que corresponde a 70% desse valor (R\$ 1,38 trilhão), enquanto a pecuária corresponde a 30%, ou R\$ 602,3 bilhões.

No segmento da pecuária, destacam-se as atividades relacionadas à criação de animais para produção de carne, leite, ovos e outros produtos de origem animal, como a carne bovina, suína e de aves, o leite e os ovos. Dentro do segmento agrícola, existe uma ampla variedade de culturas e atividades, sendo os principais destaques os grãos, a cana-de-açúcar, o café, as frutas, as hortaliças e os grãos oleaginosos, de acordo com a CNA (2021).

O Valor Bruto da Produção (VBP) da agropecuária alcançou R\$ 1,10 trilhão em 2020, dos quais R\$ 712,4 bilhões foram gerados na produção agrícola e R\$ 391,3 no segmento pecuário (CNA, 2021). A Figura 1 apresenta o ranking do VBP da agropecuária no Brasil, onde tem-se a cana-de-açúcar como 6º colocado.

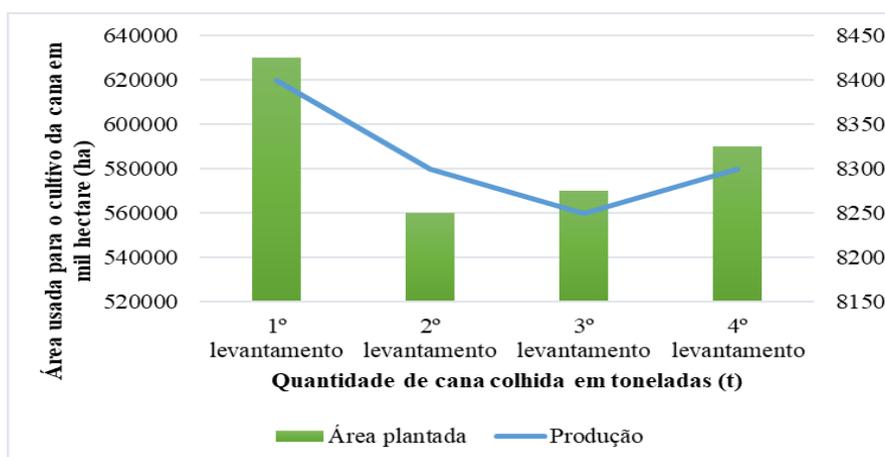
Figura 1: Valor Bruto da Produção no Brasil em 2020 e 2021 (R\$ bilhões)



Fonte: CNA (2021)

De acordo com o Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2022), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e, na safra 2020/21, foi responsável pela produção de 654,5 milhões de toneladas de cana destinados à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol. A Figura 2 ilustra a estimativa da produção de cana-de-açúcar para a safra 2021/22, de acordo com dados da CONAB (2022).

Figura 2: Estimativa de evolução da cana-de-açúcar (Safra 2021/22)



Elaboração: Elaborado pela autora (2023). Fonte: CONAB (2022)

Nesse contexto, Linnenluecke, Nucifora e Thompson (2017) destacam que a indústria canavieira contribui significativamente para o PIB nas principais economias produtoras de cana-de-açúcar, com cerca de 2% de participação, segundo a ÚNICA (2019).

De acordo com Linnenluecke, Nucifora e Thompson (2017) e Santoro, Soler e Cherri (2017), a cana-de-açúcar é uma planta tropical cultivada em muitas regiões do mundo, que pode ser usada, dentre outras finalidades, para produzir açúcar, etanol de primeira e segunda geração, fertilizantes e bioeletricidade. Segundo Scheiterle *et al.* (2018) e Lemos *et al.* (2019), uma grande variedade de produtos são derivados da cana-de-açúcar brasileira, incluindo alimentos (açúcar e produtos relacionados), bioenergia (etanol e bioenergia), bioplásticos e até substâncias que são utilizadas no campo farmacêutico, o que enfatiza ainda mais a importância dessa cultura no Brasil.

Segundo Singh, Issac e Narayanan (2019) e Singh (2020), a cana-de-açúcar é uma cultura comercial de extrema importância que cresce na maioria das economias do mundo. Para Santoro, Soler e Cherri (2017), o cultivo da cana-de-açúcar é importante para a economia de muitos países, em especial para o Brasil, que, conforme dados da ÚNICA (2021), é historicamente o maior produtor de açúcar do mundo. De acordo com IEA (2021), na safra 2020/21, a produção mundial de açúcar foi de 179,9 milhões de toneladas, e a produção brasileira representou 22% do total produzido.

Machado e da Cruz (2022) destacam o Brasil como o maior produtor de cana do mundo. Além disso, Carlucci *et al.* (2021) destacam que o Brasil possui a maior área de cultivo de cana-de-açúcar do mundo, alcançando a marca de segundo maior produtor mundial de etanol e um dos maiores consumidores de energia renovável do mundo, com cerca de 13,2% do consumo total de energia no Brasil sendo proveniente dessa fonte.

Em vista disso, Singh, Srivastava e Jangirala (2021) enfatizam que a indústria canavieira é um setor de destaque para o mercado brasileiro, sendo um dos principais contribuintes para o progresso rural e o desenvolvimento econômico do país.

Segundo Salgado Junior *et al.* (2017), Hussain, Arif e Aslam (2017), Lemos *et al.* (2019) e Duarte *et al.* (2019), o Brasil ocupa uma posição tecnológica e produtiva de destaque em todo o mundo, em termos de produção de biocombustíveis, contribuindo para a economia emergente de baixo carbono e a crescente demanda mundial por fontes alternativas e renováveis de energia, principalmente por meio da industrialização da cana-de-açúcar.

Carlucci *et al.* (2021) destacam que a cana-de-açúcar é responsável pela movimentação de uma grande parcela da economia no Brasil e pela geração de rendas através da produção de biocombustíveis, açúcar, etanol e bebidas destiladas. Além disso, segundo Khatiwada *et al.* (2016), a cana-de-açúcar é uma das principais fontes renováveis do Brasil. Segundo os autores, além da utilização do suco, o bagaço (resíduo fibroso que sobra após espremer a cana-de-açúcar para obter seu suco) e a palha podem ser subutilizados na queima no campo durante a colheita. Esses resíduos podem ser coletados e utilizados para a geração de energia ou biocombustível de segunda geração. Portanto, fica claro que a cana-de-açúcar é importante tanto para os setores de alimentos quanto de energia, com seu cultivo exigindo desenvolvimento contínuo no Brasil.

2.3 A influência da indústria canavieira na economia do estado de Goiás

Segundo o Instituto Maro Borges (IMB, 2020), o estado de Goiás é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, sendo uma das regiões com maior representatividade econômica no país, devido à evolução registrada no seu agronegócio e comércio, e ao crescimento e diversificação do setor industrial, tendo como destaque a cadeia produtiva da cana-de-açúcar. A Figura 3 apresenta o ranking dos principais Estados produtores de cana-de-açúcar do Brasil, indicando que Goiás aparece como segundo colocado, com uma participação de 11,9% na produção de cana do Brasil.

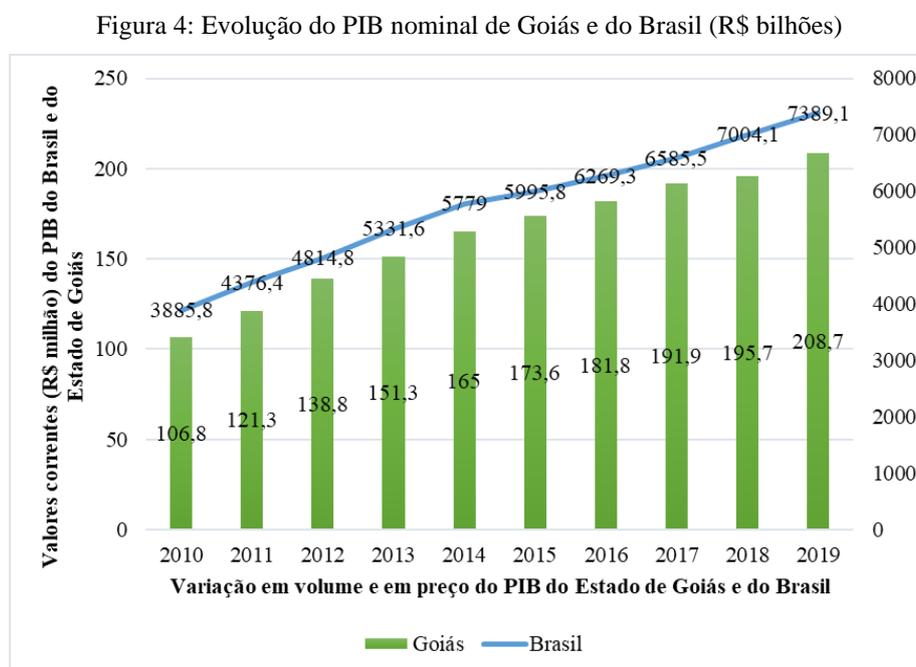
Figura 3: Participação relativa dos estados brasileiros na produção de cana-de-açúcar (Safra 2021/22)

Posição	Estado	Produção (mil t)	Participação %
1º	São Paulo	316.446,00	50,2
2º	Goiás	75.188,00	11,9
3º	Minas Gerais	74.568,40	11,8
4º	Mato Grosso do Sul	47.260,60	7,5
5º	Paraná	34.578,80	5,5
6º	Alagoas	18.307,00	2,9
7º	Mato Grosso	17.344,50	2,8
8º	Pernambuco	14.375,40	2,3
9º	Paraíba	5.786,70	0,9
	Demais Estados	26.273,50	4,2
	Produção Total	630.128,80	100

Fonte: Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (2022)

Conforme dados do IMB (2021), desde o ano de 2010 houve um crescimento contínuo no PIB do Estado de Goiás. De acordo com a base de dados desse instituto, em

2019, o PIB de Goiás cresceu 6,6%, enquanto o PIB brasileiro cresceu 5,5% em relação ao ano de 2018. A Figura 4 mostra a evolução do PIB nominal de Goiás e do Brasil de 2010 a 2019.



Fonte: IBGE/ órgãos estaduais de estatística.

Elaboração: Instituto Mauro Borges/ Secretaria Geral da Governadoria de Goiás (2021)

De acordo com os dados da CONAB (2022) referentes ao primeiro levantamento da safra 2022/23, a produção total de cana-de-açúcar no Brasil foi estimada em 596,06 milhões de toneladas. Goiás apresenta uma produção de 74,54 milhões de toneladas, ficando atrás apenas do estado de São Paulo, com uma produção de 301,38 milhões de toneladas, e à frente de Minas Gerais, com 67,03 milhões de toneladas.

Em relação à produção de açúcar e etanol, de acordo com a CONAB (2022), foram produzidos 2,19 milhões de toneladas de açúcar e 4,62 bilhões de litros de etanol na safra 2021/22 no Estado de Goiás. Em relação às exportações, o boletim da Seapa (2021) destaca o Estado de Goiás como o quinto maior exportador nacional de açúcar e o segundo maior exportador nacional de etanol.

Além da produção de açúcar e etanol, a bioeletricidade gerada a partir da cana-de-açúcar é a quarta fonte mais importante da matriz elétrica brasileira (ÚNICA, 2022). Em Goiás, a Jalles Machado foi pioneira na cogeração de energia a partir do bagaço da cana, com a implantação da termelétrica na Unidade Jalles Machado em 2000. Em 2011, foi

inaugurada a Unidade Otávio Lage, segunda unidade industrial, também em Goianésia, que desde então conta com uma termelétrica para cogeração de energia. Em 2015, a Unidade Otávio Lage iniciou a utilização da palha da cana para a cogeração de energia, além do bagaço. Atualmente, as duas termelétricas são controladas pela multinacional francesa Albioma. A parceria ocorreu em decorrência da expertise da Albioma na produção de energia elétrica a partir da biomassa e da possibilidade de expansão e recebimento de novos investimentos (FAEG, 2021).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), a energia proveniente das fontes renováveis solar, eólica e geotérmica correspondem a apenas 2% da matriz energética mundial. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as energias renováveis totalizam aproximadamente 14% da matriz energética mundial. Já no Brasil, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, a participação brasileira na matriz energética mundial, somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, totalizam 48,3%, conforme dados da EPE (2021). Segundo dados do BEN (2021), a biomassa proveniente da cana-de-açúcar apresentou uma participação de 19,1% na matriz energética brasileira, em 2020.

De acordo com a ÚNICA (2022), apenas 15% do potencial brasileiro para a geração de energias provenientes de fontes renováveis são aproveitados. Conforme a ÚNICA, se houvesse o aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais, a bioeletricidade teria potencial técnico para chegar a 151 mil GWh, o que representaria um atendimento de mais de 30% do consumo de energia no Sistema Integrado Nacional (SIN). Além disso, em 2021, a produção de bioeletricidade de cana foi de 20,2 mil GWh, representando 79,5% de toda a geração de energia elétrica a partir de biomassa no país. Em Goiás, a geração de energia elétrica proveniente do bagaço da cana-de-açúcar em 2021 foi estipulada em 3.660 GWh, sendo a região do centro-oeste com maior geração de energia elétrica proveniente dessa fonte, de acordo com o BEN (2022).

2.4 Sustentabilidade na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar

Segundo Rentizelas *et al.* (2019), muitos países ao redor do mundo se comprometeram a reduzir as emissões de GEE, aumentando sua participação na geração de energias renováveis. Um exemplo é o Acordo de Paris, de 2015, que objetiva a redução

do aumento da temperatura global, através da diminuição das emissões de GEE. De acordo com Peters *et al.* (2013), Tavoni *et al.* (2015), Rogelj *et al.* (2015), van Vuuren *et al.* (2017) e Nie *et al.* (2019), para que o objetivo de conter o aumento do aquecimento global seja alcançado, mudanças drásticas e ações imediatas para a redução das emissões de carbono, incluindo aplicações de projetos de bioenergia em larga escala e implementações de tecnologias negativas de emissão no sistema de energia devem ser implementadas.

De acordo com Murphy e McCarthy (2005), a utilização de fontes renováveis pode reduzir os níveis de emissões de CO₂, quando comparado com o uso do carvão, petróleo e do gás natural. Em complemento, Nie *et al.* (2019), destacam que, em comparação com outras fontes de bioenergia, as culturas energéticas não são apenas adequadas para aplicações comerciais em larga escala, mas também podem ser a principal fonte de biocombustíveis recém-adicionados nos próximos anos. Nesse contexto, a biomassa vem sendo utilizada como uma fonte renovável para geração de energia limpa e sustentável e de biocombustíveis.

De acordo com Khatiwada *et al.* (2016) e Rentizelas *et al.* (2019), além da biomassa ser uma das principais fontes de energia renovável existentes, no Brasil o estoque existente é suficiente para suprir a demanda por fontes de energia renovável. Além disso, Jonker *et al.* (2016) citam que o aumento da demanda energética e a crescente conscientização das mudanças climáticas devido às emissões de GEE relacionadas a combustíveis fósseis aumentaram o interesse pelo uso de biomassa para a geração de energia limpa.

Cavalcanti, Carvalho e da Silva (2020) defendem que uma das estratégias viáveis para reduzir os impactos ambientais associados à geração de energia é o uso de recursos renováveis, como biomassa ou resíduos. De acordo com Rentizelas *et al.* (2019), a geração de energia é responsável por mais de 30% das emissões globais, onde foi colocado um foco significativo na geração de energia renovável.

Apesar da matriz energética global ser predominantemente baseada em recursos não renováveis (54,7%), ao considerar a oferta de energia renovável, a biomassa de cana-de-açúcar é responsável por 17,4% da matriz energética brasileira, afirmam Cavalcanti, Carvalho e da Silva (2020). Além disso, dados da ÚNICA destacam que cerca de 30% dos créditos de carbono de energia renovável do Brasil vêm da cogeração do bagaço.

Nesse contexto, a utilização do bagaço da cana-de-açúcar vem sendo abordada em diferentes contextos na literatura. Khatiwada *et al.* (2016) analisaram usos alternativos da biomassa de cana-de-açúcar para a produção de etanol e bioeletricidade, no estado de São Paulo, assumindo melhorias tecnológicas das usinas existentes. Os autores concluíram que fatores de mercado e tecnológicos como preços de energia, eficiência e custos das plantas, tipo de eletricidade substituída e instrumentos políticos como imposto sobre o carbono e apoio ao biocombustível, são os fatores que mais influenciam a cadeia de suprimentos no contexto analisado. Jonker *et al.* (2016) otimizaram a localização e o tamanho das usinas de produção de etanol para uma expansão da área de abastecimento de biomassa. O modelo proposto pelos autores minimiza os custos totais de produção de etanol, respeitando a demanda de biomassa e atendendo às restrições do modelo. Os resultados mostraram que o processamento industrial em larga escala é preferido devido à oferta de biomassa agrupada, baixos custos de transporte e economias de escala para o processamento industrial. Além disso, os autores concluíram que os locais ideais para cultivo diferem entre as diferentes abordagens de expansão utilizadas, sendo mais vantajosas as regiões de fornecimento de biomassa de alto rendimento para reduzir os custos médios de transporte. Souza *et al.* (2018) realizaram um estudo em uma usina sucroalcooleira no Mato Grosso do Sul, Brasil, para verificar a viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica utilizando bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados obtidos pelos autores mostram que a eletricidade produzida a partir da cogeração da cana-de-açúcar tem vantagens para os produtores com a venda de energia excedente, representando receita adicional para a produção de etanol e açúcar. Rentizelas *et al.* (2019) realizaram a avaliação de eficiência das vias da cadeia de fornecimento de biomassa entre o Brasil e o Reino Unido, utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA). No estudo, os autores consideraram múltiplos critérios relativos ao desempenho econômico e ambiental simultaneamente, como o custo de biomassa entregue, o impacto ambiental e o consumo de energia fóssil. A análise dos autores comprovou que as vias mais eficientes são bastante sensíveis às mudanças nos valores de entrada (custos totais e consumo total de energia). Portanto, os tomadores de decisão precisam considerar também a estabilidade da via da cadeia de suprimentos escolhida nas mudanças de entrada, juntamente com sua eficiência. Rivera-Cadavid *et al.* (2019) propuseram um modelo de programação mista inteira para otimizar a cadeia de suprimentos para cogeração de energia, usando resíduos de cultura de cana-de-açúcar. Jonker *et al.* (2019)

analisaram o desempenho econômico e a intensidade de emissão de GEE de biocombustíveis derivados de cana-de-açúcar e eucalipto no Brasil. Os autores concluíram que as emissões de GEE de etanol petroquímico e etileno são em grande parte devido ao carbono incorporado em produtos equivalentes fósseis. Além do etileno, a intensidade de emissão de GEE dos produtos de referência fóssil depende das emissões de GEE na cadeia de suprimentos, especialmente as emissões relacionadas à demanda energética do processo. Mahjoub e Sahebi (2020) elaboraram um modelo multiobjetivo para projetar uma rede de fornecimento sustentável de bioenergia. Buscando a minimização do custo total, a redução dos impactos ambientais, a maximização da produção de energia e a minimização do consumo de água para produzir bioenergia, os autores concluíram que produzir energia a partir da biomassa é mais viável em comparação com resíduos agrícolas e estrume animal. Shavazipour *et al.* (2020) realizaram o planejamento estratégico das cadeias de fornecimento de açúcar a bioetanol, propondo uma otimização multiobjetivo, visando a maximização do lucro, a minimização das emissões de CO₂, e a maximização da criação de empregos. Os resultados mostram que o modelo elaborado pelos autores auxilia na tomada de decisões que são essenciais na maioria dos problemas da vida real, avaliando o desempenho da cadeia em diferentes critérios (econômico, ambiental e social). Gilani, Sahebi e Oliveira (2020) propuseram um *design* sustentável da rede da cadeia de suprimentos de cana a bioetanol, considerando a sustentabilidade em sua implementação com objetivos de maximizar o lucro, minimizar os efeitos ambientais e maximizar o desempenho social. Como resultado, o modelo considera possíveis áreas de abastecimento e locais candidatos para a construção de fábricas e centros de demanda para a produção de cana-de-açúcar e bioetanol. Ying, Phun Chien e Van (2020) apresentaram uma revisão da literatura com o objetivo de avaliar os métodos de pesquisa de gestão operacional utilizados no planejamento da cadeia de fornecimento de biocombustíveis. De acordo com os autores, os estudos que se concentram na otimização da cadeia de suprimentos se concentram no desempenho econômico, apenas, ou em fatores ambientais e sociais. Para os autores, a integração dos fatores ambientais e sociais ao fator econômico, ofereceria uma melhor tomada de decisão sobre a otimização sustentável da cadeia de suprimentos. Wheeler *et al.* (2020) utilizaram MILP para projetar as cadeias de suprimentos de biomassa em indústrias de cana-de-açúcar e etanol na Argentina, identificando a combinação ideal de tecnologias e layout de rede que minimizam o impacto sobre fronteiras ecológicas. Os resultados

destacam que existe a necessidade de rever as iniciativas governamentais atuais que visam aumentar as ações de etanol nos combustíveis. Além disso, os autores destacam que os impactos ambientais, além das mudanças climáticas, devem ser analisados mais profundamente durante o desenvolvimento de novas políticas. You, Han e Kim (2021) desenvolveram um modelo de otimização utilizando uma programação linear mista para identificar simultaneamente a configuração ideal do processo de uma planta de produção e a rede de fornecimento ideal de bioetanol, para atender às necessidades da sociedade (energia, água e alimentos) sob os recursos limitados e disponibilidades fundiárias e capacidade tecnológica. Os autores concluíram que a cadeia de suprimentos considerando os critérios energia, água e alimentos, requer um custo e um fornecimento de energia mais elevado. Apesar disso, a abordagem pode satisfazer as demandas da sociedade com consumo relativamente menor de terras ocupadas (2%) e água doce (30%). Abdali, Sahebi e Pishvae (2021) desenvolveram um modelo sustentável de uso da terra para projetar uma rede de cadeia de suprimentos de bioenergia para mitigar as mudanças ambientais globais. Os autores determinaram as regiões mais adequadas para o cultivo de cana-de-açúcar com base em técnicas de tomada de decisão multicritérios. A adequação das regiões foi avaliada de acordo com três grupos de critérios, incluindo critérios climáticos, ecológicos e sociais.

Em vista dos diferentes contextos de aplicação da biomassa, a sustentabilidade é uma questão de crescente importância na gestão da cadeia de suprimentos. Segundo Mozaffari, Ostovan e Wanke (2020), uma cadeia de suprimentos sustentável é criada por *feedbacks* entre dimensões ou fatores de sustentabilidade principalmente relacionados às esferas ambiental, econômica e social. Essas interações têm sido estudadas por meio de uma diversidade de abordagens alternativas, envolvendo diferentes pesquisas que vão desde indústrias e setores específicos até cidades e estilos gerenciais, destacam os autores.

Para Cavalcanti, Carvalho e da Silva (2020), as demandas energéticas globais aumentam em paralelo com o desenvolvimento tecnológico e econômico dos países. Nesse contexto, os autores citam questões como esgotamento de combustíveis fósseis, segurança do fornecimento e sustentabilidade, que levam à necessidade de uma matriz energética mais ambientalmente correta.

Além do uso da biomassa na geração de energia limpa, Nie *et al.* (2019) destacam o biocombustível proveniente das culturas energéticas como um derivado que desempenhará um papel importante na redução das emissões de GEE.

Conforme Lamers *et al.* (2011) e Chum *et al.* (2013), a produção mundial de biocombustíveis é dominada pelo etanol, que tem origem principalmente nos Estados Unidos da América (EUA) e no Brasil. Para Jonker *et al.* (2016), mais da metade da produção brasileira de etanol de primeira geração está localizada na região Centro-Sul.

Embora a cana-de-açúcar seja a matéria prima de biomassa para a produção de etanol no Brasil, a utilização de novas tecnologias de processamento industrial utilizando matéria prima lignocelulósica poderia permitir o uso de uma gama mais ampla de matéria prima de biomassa para a produção de etanol (JONKER *et al.*, 2016).

Higgins (2006) destaca que a pesquisa da cadeia de suprimentos deve prestar atenção às dimensões técnicas e sociais, a fim de encontrar um equilíbrio adequado entre inovações em procedimentos técnicos e novos arranjos sociais e organizacionais. Porém, a conquista do equilíbrio entre metas sustentáveis coloca novos desafios do ponto de vista da modelagem matemática, afirma Chavéz *et al.* (2020). Do ponto de vista do autor, a sustentabilidade implica uma perspectiva de desempenho multidimensional que busca o equilíbrio entre as metas econômicas, ambientais e sociais, em conjunto. Em exemplo, Chavéz *et al.* (2020) destaca que a partir das dimensões econômicas versus sociais, se a força de trabalho for substituída por métodos mecânicos de colheita, a fim de aumentar a eficiência e os benefícios econômicos para os agricultores, os níveis regionais de emprego e a renda dos trabalhadores certamente serão afetados.

Nesse sentido, Mota *et al.* (2015), Neutzling *et al.* (2018) e Chavéz *et al.* (2020), destacam que alcançar a sustentabilidade dentro da cadeia de suprimentos ainda é um dos desafios a serem superados.

Já pela visão de Masoud (2016), a integração das etapas da cadeia de suprimentos da indústria agrícola contribui com o aumento da eficiência geral de cada elo da cadeia. Nesse contexto, Gauthier (2005) enfatiza que as empresas estão cada vez mais focadas em dimensões de sustentabilidade, como fatores ambientais e sociais, com o objetivo de reduzir os resíduos industriais e as fontes de energia não renováveis, observando os direitos humanos e a segurança ocupacional no processo de entrega de bens e serviços.

A cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é constantemente examinada em diferentes níveis, sejam eles estratégico, tático ou operacional, a fim de se obter métodos que viabilizem a melhoria das diferentes etapas que compõe esse elo. Apesar da importância econômica da cana-de-açúcar e das diferentes práticas que implicam para o crescimento e desenvolvimento desse mercado, ainda existem uma série de critérios que

devem ser considerados ao longo da cadeia de suprimentos para que o desenvolvimento sustentável seja alcançado (SHAVAZIPOUR, STRAY E STEWART, 2020).

2.5 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar

Conforme Chavéz *et al.* (2020), uma cadeia de suprimentos é composta por uma rede de organizações, que envolvem organizações desde o provedor inicial (produtor de matéria prima) até o consumidor final (mercado final de produtos). De acordo com Higgins (2006), Kadwa e Bezuidenhout (2015) e Chavéz *et al.* (2020), a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar é composta por diversas atividades que incluem o cultivo, a colheita, o transporte, o processamento industrial e a distribuição para os consumidores finais, como os principais elos que compõem essa cadeia.

Segundo Walters e Lancaster (2000), o principal objetivo das cadeias de suprimentos é agregar valor para os *stakeholders*, sejam eles empresários ou trabalhadores de campo. Nesse contexto, uma abordagem de destaque usada para analisar os impactos de uma cadeia de produção é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Segundo García *et al.* (2016), a ACV é um método padronizado útil, baseado nas *International Organization for Standardization (ISO)* ou Organização Internacional de Normalização ISO 14040 e 14044, usado para estimar o impacto ambiental de processos e produtos. Para García *et al.* (2016) e Khatiwada e Silveira (2011), o método ACV pode ser utilizado para medir o desempenho ambiental total de um produto do berço ao túmulo. Ou seja, a ACV avalia o potencial de impacto ambiental de produtos e serviços em uma cadeia de suprimentos, reunindo entradas e saídas de um sistema de produtos (fase de inventário do ciclo de vida) e empregando uma etapa de avaliação de impacto, conforme definição de Rebolledo-Leiva *et al.* (2017). De acordo com García *et al.* (2016), este método contabiliza os insumos de energia e materiais necessários ao desenvolvimento de um produto, bem como os subprodutos e as emissões que ocorrem durante um processo de produção. Dessa forma, Rebolledo-Leiva *et al.* (2017) destacam que a ACV pode ser utilizada como um instrumento de apoio à decisão para autoridades e empresas e tem sido aplicada ao longo de uma vasta gama de estudos agrícolas.

García *et al.* (2016) destacam que esse método tem sido amplamente utilizado para identificar produtos com menores fatores de impactos negativos ao meio ambiente,

ou para localizar as etapas de produção onde ocorrem os maiores impactos ambientais em uma cadeia de suprimentos.

Existem diversos estudos que abordam a ACV, buscando identificar os impactos ambientais em diversas cadeias de suprimentos. Blengini e Busto (2009) realizaram a avaliação do ciclo de vida na cadeia de produção do arroz, em Vercelli, na Itália. Conforme os autores, o estudo constatou uma emissão de 2,9 quilogramas (kg) de CO₂, um consumo de energia primária de 17,8 megajoule (MJ) e o uso de 4,9 metros cúbicos (m³) de água para fins de irrigação, por kg de arroz cultivado. Além disso, os autores concluíram que a agricultura orgânica tem o potencial para diminuir o impacto por unidade de área cultivada. Keyes, Tyedmers e Beazley (2015) realizaram a avaliação dos impactos ambientais na produção de maçãs, na Escócia e no Canadá, utilizando a ACV. De acordo com os autores, os resultados mostraram que no processo de cultivo, a combustão de combustível diesel, a produção e as emissões associadas ao uso de fertilizantes (sintéticos e estrume) e produtos para o manejo de pragas e doenças, foram os principais contribuintes para os impactos ambientais na cadeia. Hoffmann, Morais e Teodoro (2020) fizeram uma comparação dos impactos ambientais e na saúde humana pelo uso de fraldas de pano e fraldas descartáveis, utilizando o método de ACV, no Brasil. Os resultados do estudo indicaram que as fraldas de pano apresentam melhor desempenho em comparação as fraldas descartáveis. Para os autores, isso se deve, principalmente, ao seu tratamento em fim de vida em aterros sanitários ou insalubres, o que provoca altas emissões de gases de efeito estufa. Em relação aos resultados para danos à saúde humana, a mudança climática se apresentou como a categoria de impacto mais relevante, seguida pela toxicidade humana e formação de material particulado, conforme os autores.

Além das diversas abordagens envolvendo diferentes cadeias de suprimentos, muitos estudos abordam a ACV nos impactos da cadeia da cana ou produtos derivados dessa cultura. Por exemplo, Renouf e Wegener (2007) realizaram a avaliação do ciclo de vida da cana-de-açúcar em Queensland, na Austrália. Comparando a produção da cana com o milho e a beterraba, os autores constataram que quando comparada a essas outras culturas, a cana-de-açúcar apresenta vantagens em relação aos critérios de esgotamento de combustíveis fósseis não renováveis e a emissão de gases com efeito de estufa, devido à disponibilidade de bagaço excedente, que pode ser usado como combustível renovável. Além disso, segundo os autores, a cana-de-açúcar não apresentou uma boa classificação em relação ao potencial de eutrofização e o uso de água doce. Tsiropoulos *et al.* (2014)

compararam os impactos da produção de etanol na Índia com o Brasil. Segundo os autores, em comparação com o etanol brasileiro, o etanol indiano causa menores emissões de gases de efeito estufa no uso de energia não renovável, nos impactos na saúde humana e nos impactos ao ecossistema. Para os autores, uma das razões é que o etanol indiano é produzido exclusivamente a partir do melaço da cana-de-açúcar, um coproduto da produção de açúcar, resultando na alocação da carga ambiental. Além disso, os autores destacam que as usinas de açúcar e destilarias indianas produzem eletricidade excedente pela qual recebem créditos por substituir a eletricidade da rede com intensidade de emissão de CO₂ relativamente alta. Além disso, os resultados mostraram que o uso de energia não renovável é maior para o etanol indiano, principalmente devido aos requisitos de energia para irrigação. Para o uso da água e impactos relacionados, o etanol indiano possui pior pontuação, devido à irrigação de águas subterrâneas, apesar do efeito de amortecimento da alocação. A variação nas emissões de gases de efeito estufa e no uso de energia não renovável das usinas indianas é superior para alto e baixo desempenho em comparação ao sistema de produção no Brasil, destacam os autores. García *et al.* (2016) avaliaram os impactos ambientais na produção de açúcar, no México. Os autores concluíram que a pegada de carbono da cadeia do açúcar varia de 0,45 a 0,63 kg de CO₂ equivalente por kg de açúcar produzido. Além disso, segundo resultados do estudo, os fertilizantes nitrogenados são os principais contribuintes para as emissões de carbono. Outro exemplo é o estudo de Prasara-A *et al.* (2019), em que os autores realizaram uma avaliação ambiental e social da cadeia da cana na Tailândia. Segundo os autores, os resultados do estudo indicaram que a queima de lixo de cana e o uso excessivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos são as principais causas do desempenho ambiental e social negativos.

Além dos estudos mencionados anteriormente, outros exemplos de abordagem são os estudos de Ramjeawon (2008), Campbell *et al.* (2009), Cherubini *et al.* (2009), De Figueiredo *et al.* (2010), Rein (2010), Nguyen *et al.* (2010), Plassmann *et al.* (2010), Cherubini e Strømman (2011), Seabra *et al.* (2011), Yuttitham *et al.* (2011), Khatiwada e Silveira (2011), Klenk *et al.* (2012), Renouf *et al.* (2013), Dunkelberg *et al.* (2014), e Soam *et al.* (2015). Nesses estudos, os autores utilizam a ACV para avaliar os impactos ambientais e as emissões na cadeia da cana-de-açúcar.

3 Metodologia de Pesquisa

3.1 Abordagem e delineamento da pesquisa

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa, em que o objetivo é realizar a avaliação do ciclo de vida da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

A ACV foi escolhida como método para atingir o objetivo desta pesquisa, pois, segundo Dewulf *et al.* (2000), Dewulf e Van Langenhove (2002) e Gunawan *et al.* (2019), a ACV é considerada a melhor ferramenta para avaliar a sustentabilidade ambiental de uma cadeia de suprimentos, considerando diferentes características tecnológicas. Isso porque a ACV considera fatores relacionados ao ecossistema e populacionais que causam impactos negativos às gerações presentes e futuras, afirmam os autores.

Para a realização da avaliação de ciclo de vida, a metodologia utilizada nesta pesquisa envolveu as seguintes etapas:

- Revisão de literatura sobre a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar;
- Revisão de literatura sobre a cadeia de suprimentos do etanol;
- Revisão de literatura sobre a ACV;
- Mapeamento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no estado de Goiás;
- Definição dos elos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar;
- Coleta dos dados;
- Determinação dos *inputs* e *outputs* para o modelo de ACV;
- Modelagem do sistema de produto no OpenLCA;
- Análise dos resultados e identificação dos principais contribuintes para impactos relacionados ao meio ambiente, a saúde humana e uso de recursos.

3.2 Objeto de estudo e delimitação da pesquisa

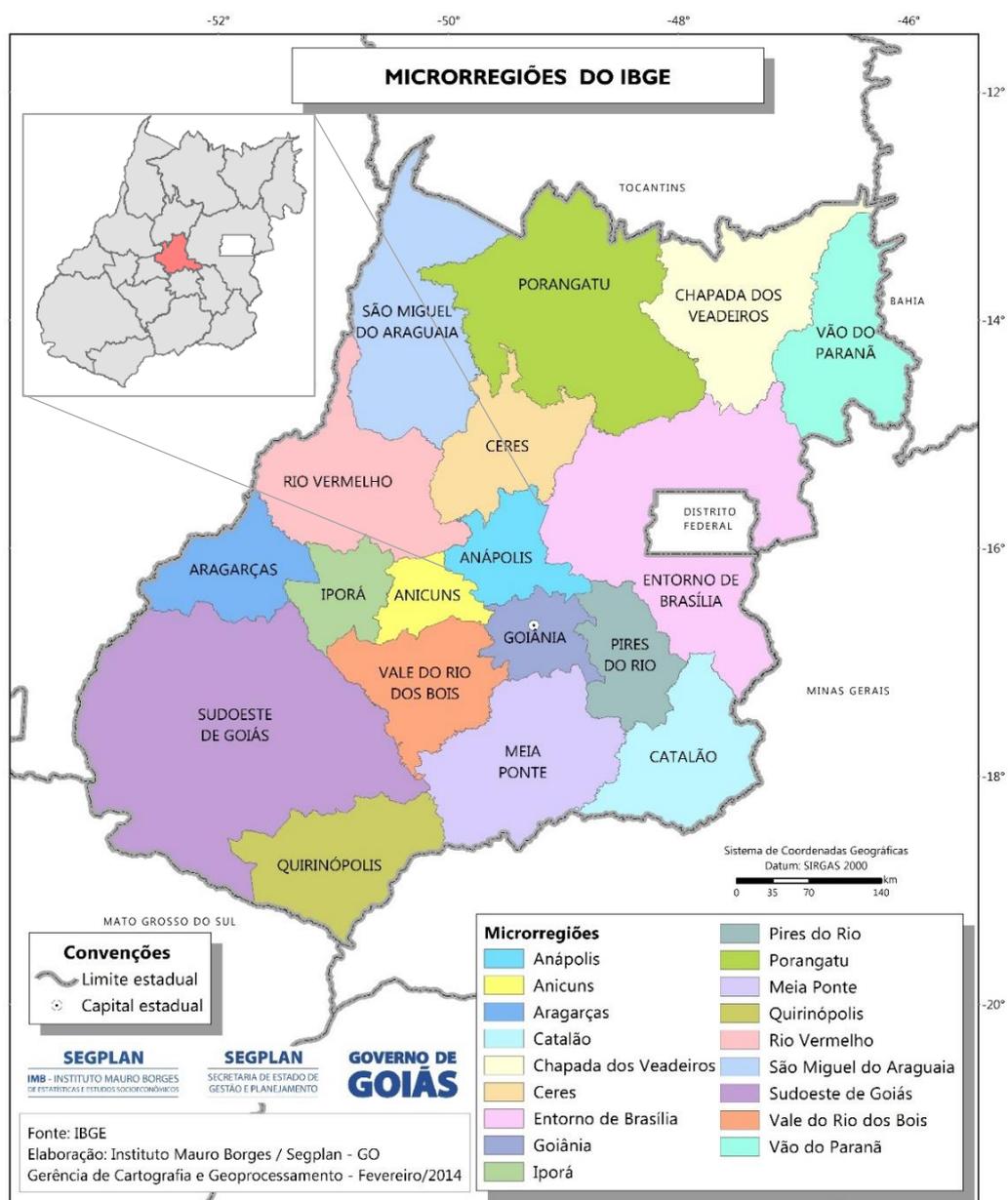
O objeto de estudo adotado na pesquisa é a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar no estado de Goiás. Para a análise da cadeia de suprimentos foi considerada dentre as 18 microrregiões existentes no Estado de Goiás, apenas a microrregião de Anápolis.

O estudo se delimita para a análise de uma cadeia de suprimentos de uma indústria do segmento sucroalcooleiro localizada na microrregião de Anápolis, no Estado de Goiás. Apesar dessa delimitação, o estudo pode ser adaptado para outras cadeias da cana, já que

o banco de dados utilizado é representativo para a cadeia da cana e etanol no Brasil. Além disso, com base no perfil do objeto de estudo, a empresa de Anápolis foi escolhida devido à oportunidade de acesso aos dados necessários para a pesquisa.

A figura 5 apresenta o mapa contendo as 18 microrregiões do Estado de Goiás, onde pode-se visualizar que a microrregião abordada (Anápolis) está situada na região central do Estado.

Figura 5: Microrregiões do Estado de Goiás



Fonte: Adaptado de IBGE (2018)

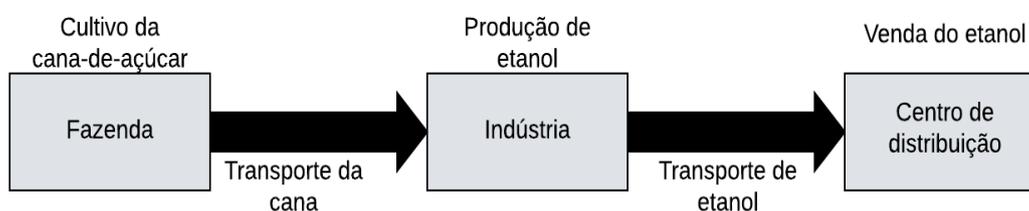
Elaboração: IMB/ Segplan

Além da delimitação regional para a microrregião mencionada anteriormente, esse estudo não abordou no elo da cadeia de suprimentos a geração de etanol de segunda geração (2G), a produção de açúcar, e a cogeração de energia elétrica, visto que a indústria abordada no estudo produz apenas etanol hidratado.

3.3 Descrição da cadeia de suprimentos (SC)

Nesse estudo, são consideradas na estrutura da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar as fases agrícola (cultivo da cana-de-açúcar), industrial (produção de etanol) e de transporte (da cana até a usina de processamento e do etanol produzido até o centro de distribuição). Na Figura 6 é apresentado o modelo da cadeia de suprimentos adotado para este estudo.

Figura 6: Cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar adotado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Conforme apresentado na Figura 6, na primeira etapa, tem-se o cultivo da cana-de-açúcar, onde ocorre o preparo do solo, o plantio e a colheita da cana. Segundo Ometto, Hauschild e Roma (2009), o modelo convencional de cultivo da cana usada para a produção de etanol no Brasil, baseia-se principalmente em um sistema de plantio com uso extensivo de terras agrícolas, uso intensivo de fertilizantes e defensivos agrícolas, além do alto consumo de água para irrigação.

No cultivo realizado da indústria de Anápolis, a safra é renovada a cada ano ou ano e meio, e o método de colheita predominante é feito de forma mecanizada.

Na etapa seguinte da cadeia, a cana-de-açúcar colhida é transportada para a fase industrial, onde ocorre o processamento da cana e a produção de etanol. A transformação industrial em etanol hidratado começa com a lavagem da cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar lavada é transportada por correias transportadoras até as moagens, onde é extraído o caldo de cana. Os produtos da moagem da cana-de-açúcar são o suco, o bolo de filtro e o bagaço. O suco é usado para produzir o etanol e o bolo de filtro é usado como fertilizante de campo (OMETTO, HAUSCHILD E ROMA, 2009).

O bagaço resultante da moagem é vendido para outros produtores, com base nas informações fornecidas pela usina de Anápolis. O suco extraído na moagem é convertido em etanol hidratado. Posteriormente, o etanol produzido é transportado para a última fase da cadeia de suprimentos, onde ocorre a venda do produto acabado.

3.4 Instrumento de análise

Foi utilizado o software *OpenLCA*®, versão *Desktop 1.11.0* (*openLCA_win64_1.11.0_2022-02-09.exe*) para realizar a avaliação do ciclo de vida da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

O *software OpenLCA*® é uma ferramenta de avaliação de ciclo de vida (ACV) de código aberto que permite avaliar o impacto ambiental de produtos e serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida. O *software* é baseado nas normas internacionais de ACV, como a ISO 14040 e a ISO 14044. Ele oferece uma plataforma para modelar, analisar e otimizar os impactos ambientais de produtos, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. Além disso, é possível realizar análises de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados, além de comparar diferentes produtos ou processos para identificar oportunidades de melhoria (OPENLCA, 2021).

O *OpenLCA*® é amplamente utilizado por pesquisadores, empresas e governos para avaliar a sustentabilidade de produtos e processos e tomar decisões informadas sobre estratégias de redução de impactos ambientais. Ele é uma ferramenta valiosa para ajudar a alcançar objetivos de sustentabilidade e aprimorar a tomada de decisões em todos os setores, desde a produção de bens de consumo até a indústria de energia (BAUMANN & TILLMAN, 2004).

3.5 Inventário do ciclo de vida (ICV) e base de dados

De acordo com a ISO 14044, dentre os componentes do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), se destacam o sistema de produto, os processos elementares e as categorias de dados. Com base nisso, os dados necessários para a construção do modelo no *OpenLCA* foram categorizados em fluxos econômicos ou técnicos, fluxos elementares (de intervenção ambiental) e resíduos.

Os fluxos elementares são aqueles que ocorrem entre o ambiente externo e o sistema de produto em estudo; os fluxos de produto ocorrem entre dois sistemas de produto; enquanto os fluxos de produto intermediário e/ou resíduos são aqueles estabelecidos entre os processos elementares (ISO, 2006).

O banco de dados para os fluxos técnicos, utilizado para a realização do estudo, foi obtido nas bases de dados da Embrapa, CNA, Nova Cana, e em uma indústria do segmento, localizada na microrregião de Anápolis, no estado de Goiás. Além disso, foram utilizados também, dados disponíveis na base de dados *OpenLCA nexus*, referentes aos processos de produção da cana-de-açúcar e etanol, no Brasil, e dados de artigos relacionados ao tema para complementar os dados faltantes. Os dados obtidos no *OpenLCA nexus*, foram usados como fluxos elementares no modelo elaborado.

Dessa forma, o modelo ACV é composto por 4.282 variáveis, sendo 628 de entrada (20 técnicos e 608 elementares) e 3.654 de saída (5 técnicos, 3.607 elementares e 42 resíduos).

Os quadros 2, 3, 4 e 5 apresentam os dados referentes aos fluxos técnicos que são utilizados no modelo de ACV, obtidos através da usina de Anápolis e das fontes alternativas mencionadas anteriormente. Os dados utilizados como fluxos elementares, obtidos na base *OpenLCA nexus* são apresentados no material complementar desse trabalho.

Quadro 2: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (cultivo da cana)

Input	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Água	Uso da água para irrigação/fertirrigação	50.000 – 80.000	Kg/ha/dia	Embrapa (2022)
Corretivos	Uso do potássio (K ₂ O) para aumento da produtividade	80 - 150	Kg/ha	Embrapa (2022)
Fertilizantes	Adubação com nitrogênio para aumento da produtividade	30	Kg/ha	Aegro (2022)
Fungicidas	Consumo de fungicidas no cultivo da cana	0	Kg/ha	Nova Cana e Arrigoni (2005)
Herbicidas	Volume de herbicidas usado no cultivo da cana	200	l/ha	Cana Online (2015)
Inseticidas	Consumo de inseticidas no cultivo da cana	0,54	Kg/ha	Nova Cana e Arrigoni (2005)
Mão de obra	Número de pessoas por hectare de terra cultivada	0,08	Operadores/ha	Shavazipour, Stray e Stewart (2020)
Mudas	Quantidade de mudas de cana utilizadas n cultivo	10000 - 18000	Kg/ha	Revista cultivar (2020)
Nematicidas	Nematicidas usados no cultivo da cana	10	Kg/ha	Dinardo-Miranda, Pivetta e Fracasso (2008)
Output	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Cana-de-açúcar	Quantidade de cana colhida	4560000	Kg/dia	Usina de Anápolis

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Pode-se observar no Quadro 2 que, na etapa de cultivo da cana-de-açúcar, as fontes de impactos referentes aos fluxos técnicos incluem o uso de corretivos, fertilizantes, herbicidas, inseticidas, nematicidas e água, para melhorar o desempenho da safra, além das mudas de cana e a mão de obra necessária nessa etapa da cadeia. Para o fluxo de referência, a área de cultivo abordada é de 4.760,50 hectares. Em relação aos fluxos elementares, os dados foram obtidos no banco de dados *Agri-footprint 3.0* e Base de Dados Banco de Dados Europeu do Ciclo de Vida ou *European Life Cycle Database (ELCD)*, contido no *OpenLCA nexus*.

Segundo *Agri-footprint (2022)*, essas bases têm sido amplamente utilizadas por indústrias alimentícias, por pesquisadores da área de ACV, pela comunidade científica e por instituições governamentais. Além disso, conforme essa base, muitos processos são modelados em alinhamento com a orientação da *Product Environmental Footprint (PEF)* ou Pegada Ambiental do Produto da Comissão Europeia. O banco de dados usado para

complementar a etapa de cultivo da cana, foi desenvolvido usando o método ReCiPe Midpoint H (versão 1.07, 2016).

O processo de cultivo é baseado na metodologia Agri-footprint (2017) e inclui o rendimento da cultura no cultivo agrícola com base no FAOSTAT (2000), para dados médios de 5 anos (2010-2014). Os fluxos elementares incluem emissões de campo para o ar e a água, mudanças diretas no uso da terra, uso da água e emissões devido ao uso de pesticidas e fertilizantes. Os rendimentos das colheitas foram derivados principalmente das estatísticas da FAO (2016) de 2010 a 2014. As taxas de aplicação de fertilizantes (em termos de requisitos de N, P e K) foram derivadas de Pallière (2011), Rosas (2011) e FAOSTAT (2000). As quantidades específicas de fertilizantes são calculadas com base nos requisitos de nutrientes específicos da cultura e na mistura de fertilizantes específica do país, derivada das estatísticas da *International Fertilizer Association* (IFA), (IFA, 2015).

De acordo com a metodologia Agri-footprint (2017), as emissões de metais pesados devido à aplicação de esterco e fertilizantes artificiais foram calculadas com base em uma metodologia adaptada de Nemecek e Schnetzer (2012), onde é considerado o balanço de metais pesados em função do uso de fertilizantes e absorção pela cultura usando literatura sobre teores de metais pesados no esterco (Amlinger *et. al.*, 2004) e em fertilizantes (Mels, Bisschops e Swart, 2008). Já o uso da água foi baseado no estudo de Mekonnen e Hoekstra (2010). O Quadro 3 apresenta os fluxos técnicos usados na etapa de transporte da cana-de-açúcar até a usina de processamento.

Quadro 3: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (transporte da cana)

Input	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Cana-de-açúcar	Quantidade de cana colhida	4560000	Kg/dia	Usina de Anápolis
Combustível	Caminhão simples com capacidade de 15 toneladas.	30	ml/t/km	Nova Cana e CTC (2004)
Mão de obra	Número de pessoas no transporte da cana.	0,02	Operadores /t/km	Shavazipour, Stray e Stewart (2020)
Veículo	Veículo de transporte da cana	4560000	Kg*km	Usina de Anápolis
Output	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Cana-de-açúcar transportada	Quantidade de cana transportada da fazenda para usina de processamento.	4560000	Kg*km	Usina de Anápolis

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação ao transporte da cana, considera-se o caminhão como um veículo pesado ou leve para transporte rodoviário. O conjunto de dados de transporte refere-se a 4.560 toneladas de cana, vezes a distância percorrida em km, como fluxo de referência. Nessa etapa, são consideradas a amônia (NH₃), benzeno (C₆H₆), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), óxido nitroso (N₂O), e dióxido de enxofre (SO₂), como as emissões consequentes da combustão.

No Quadro 4 são apresentados os dados usados no processo de fabricação do etanol, específicos para os fluxos técnicos do modelo.

Quadro 4: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (Produção de etanol)

Input	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Água	Quantidade de água usada no processo industrial para a produção de etanol	8080	Kg/t	Embrapa (2022)
Cana-de-açúcar	Quantidade de cana transportada da fazenda para a usina	4560000	Kg	Usina de Anápolis
Mão de obra	Número de pessoas necessárias na produção de etanol	22,82	Operadores /t	Shavazipour, Stray e Stewart (2020)
Output	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Etanol produzido	Volume de etanol hidratado produzido	424080	l/dia	Usina de Anápolis
Bagaço	Quantidade de bagaço residual do processamento da cana	0,28	t/t de cana	Usina de Anápolis

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Conforme o Quadro 4, nota-se que foram incluídos o uso de água na produção de etanol e a mão de obra, além da cana transportada da fazenda. De acordo com Ometto, Hauschild e Roma (2009), a fase industrial começa com a lavagem da cana-de-açúcar. Posteriormente, a cana passa pelo processo de moagem, onde é extraído o caldo da cana e tem-se também, o bagaço residual da cana. O caldo extraído é usado para produzir o etanol e o bagaço é vendido para outros produtores.

Em relação aos fluxos elementares, o uso de água é modelado considerando a liberação e evaporação de água no processo. As emissões relacionadas aos GEE

consideram uma base de 20 anos com valores do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). No modelo, não são consideradas compensação de emissões de GEE.

Quadro 5: Dados de entrada e saída para o modelo de ACV (Transporte de etanol)

Input	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Combustível	Caminhão simples com capacidade de 15 toneladas.	30	ml/t/km	Nova Cana e CTC (2004)
Etanol produzido	Volume de etanol hidratado a ser transportado para o mercado	424080	l/dia	Usina de Anápolis
Mão de obra	Número de pessoas no transporte da cana.	6,64	Operadores /t	Shavazipour, Stray e Stewart (2020)
Veículo	Veículo de transporte do etanol	424080	l*km	Usina de Anápolis
Output	Descrição	Dado	Unidade de medida	Fonte
Etanol transportado	Quantidade de etanol transportado da indústria para o mercado	424080	l*km	Usina de Anápolis

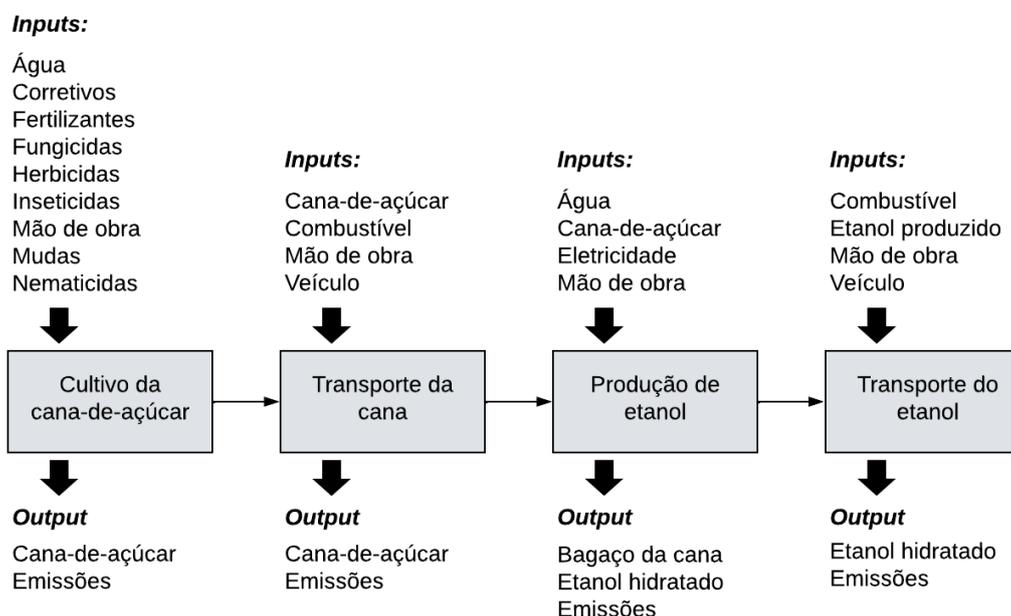
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Para a distribuição do etanol, foram considerados os mesmos fluxos presentes no transporte da cana. Porém, foram feitas alterações com base nos fluxos de referência desse processo. Nessa etapa, foi considerado uma carga de 424.080 litros de etanol a serem transportados por uma distância de 74 quilômetros, enquanto no transporte da cana, são transportadas 4.560 toneladas em uma distância média de 26 quilômetros.

3.6 Estruturação do modelo de ACV

A elaboração do modelo de ACV parte das variáveis de entrada (*input*) e saída (*output*) que serão utilizadas na análise. Segundo Hoffmann, Morais e Teodoro (2020), a definição dos limites de um sistema deve ser definida com base nas entradas e saídas que estão diretamente ligadas aos processos e que são necessárias para o cumprimento do sistema de produto. Com base nisso, considerou-se os fluxos apresentados na subseção anterior (3.5), para formulação do sistema de produto no modelo de avaliação de ciclo de vida elaborado nesse trabalho. A Figura 7 ilustra o sistema de produto elaborado, considerando apenas os fluxos técnicos.

Figura 7: Sistema de Análise do Ciclo de Vida (entradas e saídas)



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

O limite do sistema para este estudo, apresentado na Figura 7, abrange o cultivo da cana-de-açúcar, o transporte da cana, a produção de etanol e o transporte do etanol. Os fluxos do sistema foram determinados incluindo as entradas e saídas mais comumente usadas na literatura sobre ACV. O quadro abaixo ilustra a utilização dos fluxos técnicos apresentados na Figura 7, em artigos usados como base para este estudo.

Quadro 6: Utilização dos fluxos técnicos em artigos científicos

	Água	Combustível	Corretivos	Eletricidade	Fertilizantes	Fungicidas	Herbicidas	Inseticidas	Mão de obra	Mudas	Nematicidas	Pesticidas	Veículo
García <i>et al.</i> (2016)	x	x		x	x							x	x
Gunawan <i>et al.</i> (2019)	x	x		x	x					x		x	x
Ometto, Hauschild e Roma (2009)	x	x		x	x					x		x	x
Prasara-A <i>et al.</i> (2019)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Rebolledo-Leiva <i>et al.</i> (2017)		x		x	x							x	x
Renouf e Wegener (2007)	x	x		x	x							x	x
Tsiropoulos <i>et al.</i> (2014)	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Yang <i>et al.</i> (2022)		x	x		x						x	x	

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Com base da análise dos fluxos usados nos periódicos apresentados no Quadro 6, os fluxos técnicos de entrada e saída para os limites do sistema foram determinados.

O desempenho ambiental da cadeia da cana-de-açúcar foi analisado por meio da ACV seguindo a estrutura ISO 14040 (ISO, 2006) e ISO 14044 (ISO, 2006) que detalham os requisitos para a elaboração de uma Avaliação do Ciclo de Vida.

Para avaliar os impactos na cadeia e identificar os principais contribuintes para 19 categorias de impactos (toxicidade humana não cancerígena, toxicidade humana cancerígena, impacto da radiação ionizante na saúde humana, destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade na água doce, eutrofização marinha, eutrofização na água doce, eutrofização terrestre, acidificação, formação fotoquímica de ozônio, material particulado, alterações climáticas, uso da terra, uso da água, uso de minerais e metais, uso de recursos fósseis, mudanças climáticas pelo uso da terra, mudanças climáticas relacionada a recursos fósseis, e mudanças climáticas biogênicas), foi utilizado o método *Environmental Footprint (EF) (Mid-point indicator)*. Além disso, foi utilizado o método de alocação econômica e a normalização e ponderação foi feita utilizando o *Product Environmental Footprint (PEF) standard weighting and normalization factors*, incluído no método de avaliação de impacto.

O método de Avaliação de Pegada Ambiental ou *Environmental Footprint*, em inglês (EF) é uma técnica que visa avaliar o impacto ambiental de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esse método é baseado em uma análise de ciclo de vida que envolve uma série de etapas, desde a extração de matérias-primas até o descarte final do produto. A Comissão Europeia (CE) propôs os métodos da Pegada Ambiental dos Produtos ou *Product Environmental Footprint (PEF)* e da Pegada Ambiental ou *Environmental Footprint (EF)* como uma forma comum de medir o desempenho ambiental.

A PEF e a EF são os métodos baseados na ACV recomendados pela União Europeia (UE) para quantificar os impactos ambientais dos produtos e das organizações. O objetivo do PEF e EF é permitir reduzir os impactos ambientais dos bens, serviços e organizações, tendo em conta as atividades da cadeia de suprimentos (desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e utilização até à gestão final dos resíduos). Este objetivo é alcançado através do fornecimento de requisitos pormenorizados para a modelização dos impactos ambientais dos fluxos de material/energia e das emissões e

fluxos de resíduos associados a um produto ou a uma organização ao longo do ciclo de vida (EUROPEAN COMMISSION, 2011).

De acordo com Ren *et al.* (2019), durante a análise de ciclo de vida, são avaliados diversos impactos ambientais que podem ser gerados em cada etapa da cadeia produtiva. Esses impactos são classificados em diferentes categorias, como danos à saúde humana, ecossistema e uso de recursos. Cada categoria de impacto pode ter diferentes subcategorias, que são analisadas de forma separada. Para avaliar os impactos em cada categoria de impacto, é utilizado o método de avaliação de impacto EF, que utiliza indicadores de meio-termo (*mid-point indicators*) para quantificar e comparar os impactos em diferentes categorias.

O método de alocação econômica é utilizado para alocar os impactos ambientais aos diferentes produtos ou serviços produzidos em cada etapa da cadeia produtiva. Isso é importante para garantir que os impactos sejam distribuídos de forma justa entre os diferentes produtos e serviços produzidos, levando em consideração a sua contribuição relativa para o impacto ambiental total (Pizzol *et al.*, 2017). Já a normalização e ponderação são etapas da ACV que visam a comparabilidade dos resultados da análise do ciclo de vida entre diferentes categorias de impacto ambiental. A normalização é usada para gerar uma pontuação numérica única, ponderando cada categoria de impacto e totalizando-as. As pontuações de impacto ambiental na ACV são exibidas em unidades físicas que representam o potencial de impacto ambiental (Mendes, Bueno e Ometto, 2016).

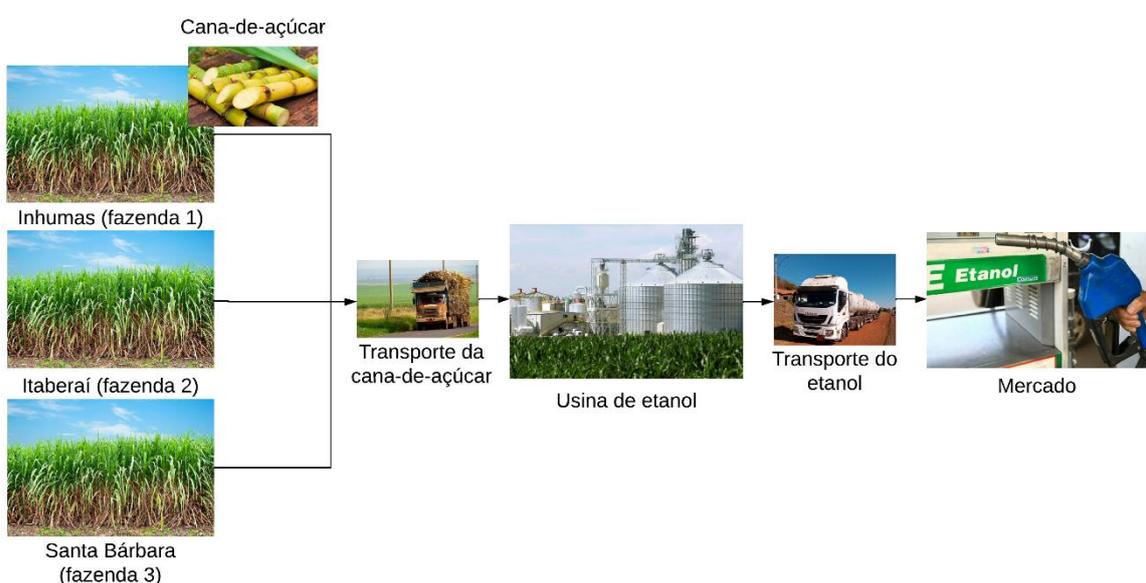
Segundo Ren *et al.* (2019), estudos relacionados à cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar têm utilizado o método de Avaliação de Pegada Ambiental para avaliar o impacto ambiental da produção de cana-de-açúcar e seus derivados. Além disso, o método de avaliação de impacto EF, em conjunto com a alocação econômica e a normalização e ponderação utilizando o PEF *standard weighting and normalization factors*, permite uma avaliação mais objetiva e comparável dos impactos em diferentes categorias de impacto ambiental, afirmam os autores.

4 Resultados e discussões

4.1 Mapeamento da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar em Goiás

Segundo o levantamento sobre a indústria adotada como objeto de estudo, realizado na etapa de mapeamento, a cadeia produtiva da empresa conta com quatro etapas: o cultivo da cana-de-açúcar, o transporte da cana para a usina, a produção de etanol de primeira geração e o transporte do etanol para o centro de distribuição. A figura 8 ilustra as etapas da cadeia de suprimentos da indústria.

Figura 8: Mapeamento da cadeia de suprimentos da indústria submetida ao estudo



Elaborado pela autora (2023)

Na etapa de cultivo, a indústria conta com o uso de três regiões diferentes: Inhumas, Santa Bárbara e Itaberaí, tendo cada uma área cultivada de 3.731 hectares, 308,4 hectares e 721,4 hectares, respectivamente. Esses pontos de produção, durante a última safra, forneceram, em média 4.560 toneladas de cana-de-açúcar, diariamente, para a produção de etanol na usina, onde 2.040 toneladas são transportadas da área de cultivo de Inhumas, 1.440 toneladas de Santa Bárbara e 1.080 toneladas de Itaberaí. Segundo informações da indústria, 52% (2.898 toneladas) do corte, carregamento e transporte são feitos manualmente e 48% (2.330 toneladas), de forma mecanizada. Segundo o levantamento, as atividades manuais são realizadas 5,5 dias por semana, sendo de segunda

à sexta, e sábado pela manhã. Já as atividades mecanizadas são feitas 7 dias por semana, 24h por dia. Em comparação com o processo de colheita manual, a forma mecanizada possui um rendimento 6% maior diariamente.

Para o transporte, o raio médio da distância entre as áreas de cultivo e a usina de processamento são de 26 km, sendo 18 km de Inhumas, 24 km de Santa Bárbara e 37 km de Itaberaí. A capacidade média dos caminhões de transporte é de 49,5 toneladas de cana por viagem. A usina conta com um total de 33 caminhões para realizar o transporte da cana, com uma taxa de quebra dos veículos que varia entre 17% e 24%.

Na fase industrial, a produtividade média é de 93 litros de etanol por tonelada de cana processada. A capacidade da moenda é 5.800 toneladas de cana por dia, porém a usina trabalha com a programação de 4.560 toneladas diárias.

O processo de moagem rende cerca de 1.035 litros de caldo por tonelada de cana, o que equivale a 4.719.600 litros de caldo extraídos diariamente. Além do caldo, o processo de moagem gera o bagaço da cana que é usado na própria indústria ou destinado a venda para outros produtores. A moagem diária gera aproximadamente 1.277 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar.

Para a fermentação, a usina conta com 8 tanques com capacidade de 540.000 litros de caldo por tanque ou 4.320.000 litros por dia. Conforme dados da usina, a cada 8 horas são fermentados 180.000 litros de caldo de cana.

Na destilação, a usina possui 2 unidades de colunas de destilação com capacidade de 600.000 litros por coluna ou 1.200.000 litros por dia, considerando as duas colunas. A produção média diária de vinhaça é 4.295.520 litros e a produção de etanol é de 424.080 litros por dia. Para armazenar o etanol, existem 5 tanques de armazenamento, com capacidade para 35.000.000 litros ou aproximadamente 83 dias de produção.

4.2 Inventário de ciclo de vida (ICV)

Nesta sessão, são apresentados os resultados da avaliação de ciclo de vida dos processos que compõem os elos da cadeia de suprimentos estudada e os principais contribuintes em cada sistema de produto.

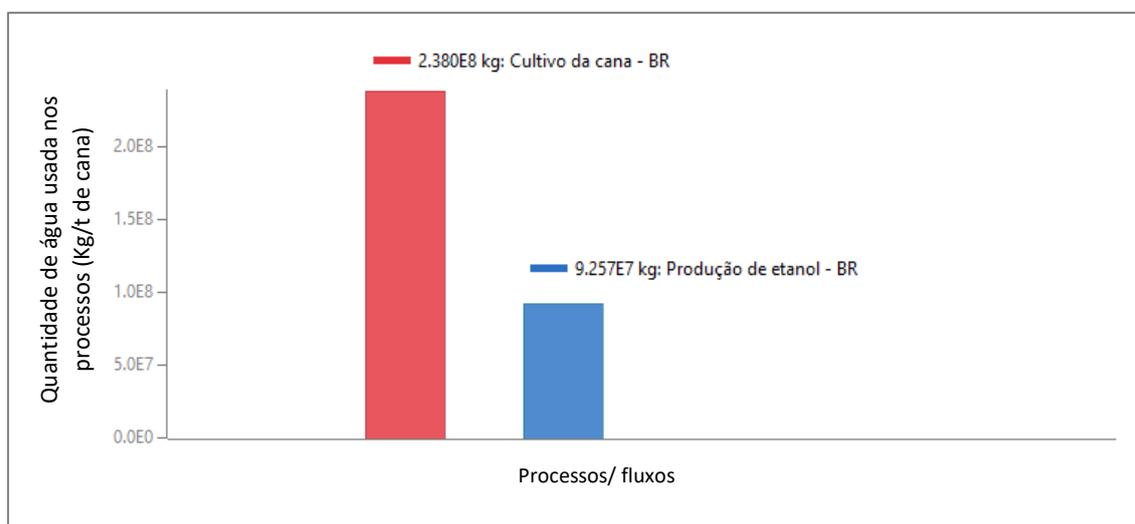
Os impactos para as categorias de danos à saúde humana, ecossistema e uso de recursos foram analisados pelo método de avaliação de impacto *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*. Além disso, foi utilizado o método de alocação econômico e a

normalização e ponderação foi feita utilizando o *PEF standard weighting and normalization factors*, incluído no método de avaliação de impacto.

4.2.1 Fluxos técnicos

Esta subseção apresenta as contribuições diretas para os resultados de fluxos técnicos calculados no modelo de ACV. A Figura 9 ilustra as contribuições de impacto em relação ao uso de água nos processos de cultivo da cana-de-açúcar e na produção de etanol. Os resultados relacionados ao uso da água são dados em quilograma por tonelada de cana (kg/t).

Figura 9: Contribuição pelo uso da água

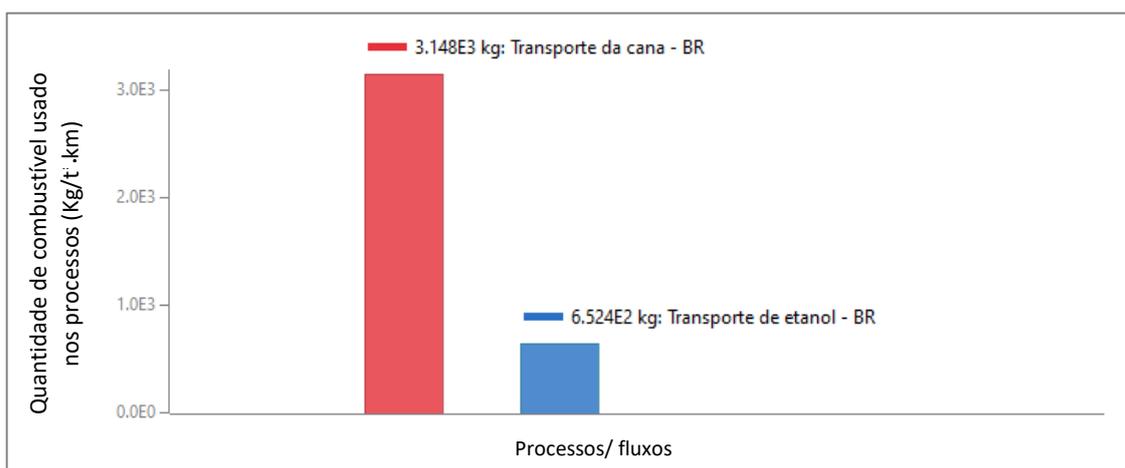


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

De acordo com a Figura 9, o cultivo da cana-de-açúcar apresenta maiores contribuições em relação ao uso da água, tendo como resultado o uso de 2,380E8 kg de água, diariamente, com irrigação na etapa de cultivo. Quando comparado ao processo de produção do etanol, nota-se que a etapa de processamento demanda uma menor quantidade de água, sendo necessário 9,257E7 kg de água, considerando a moagem de 4.560 toneladas de cana por dia. Isso ocorre devido à alta demanda de água para irrigação da cana durante seu cultivo. Segundo dados da Embrapa (2022), essa demanda pode variar de 50.000 a 80.000 kg de água por hectare, diariamente, enquanto a média de uso da água na produção de etanol é de 8.080 kg por tonelada de cana processada.

Na Figura 10 são apresentados os resultados para as contribuições decorrentes do uso de combustível nos transportes da cana-de-açúcar e etanol. Os resultados indicam a quantidade de diesel, usado como combustível, em kg de combustível por tonelada de cana, vezes a distância percorrida em quilometro (km).

Figura 10: Contribuição pelo uso de combustível

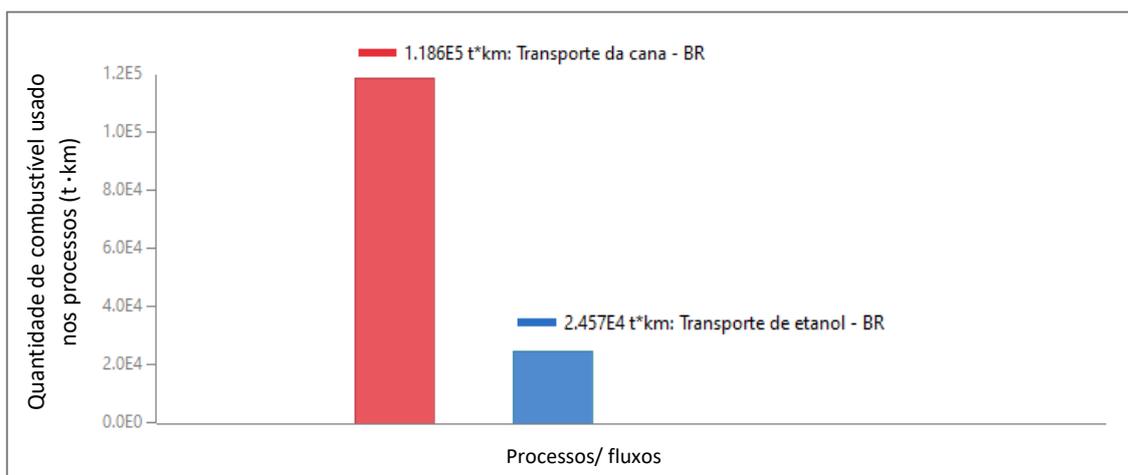


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação ao uso de combustível (Figura 10), nota-se que a contribuição é visivelmente superior no transporte da cana-de-açúcar, tendo um uso de 3,148E3 kg de combustível usados diariamente, em comparação ao transporte do etanol, com 6,524E2 kg. Isso porque os caminhões da empresa estudada possuem uma capacidade média de transporte de 49,5 toneladas de cana, segundo dados fornecidos pela indústria. Logo, para que seja transportada uma média de 4.560 toneladas de cana-de-açúcar diariamente, são necessárias cerca de 92 viagens por dia, o que eleva o nível de uso dos veículos e a quantidade de combustível necessário no transporte da cana quando comparado ao transporte do etanol.

A Figura 11 ilustra as contribuições causadas pelo uso de veículos no transporte da cana-de-açúcar (da fazenda para a usina) e do etanol (da usina para o centro de distribuição), onde os resultados são dados em tonelada de produto transportado (cana ou etanol), vezes a distância percorrida, em km. A usabilidade dos veículos foi obtida através da multiplicação dos parâmetros distância percorrida (dado em km) e pela quantidade de produtos carregados (dado em toneladas).

Figura 11: Contribuição pelo uso de veículos de transporte

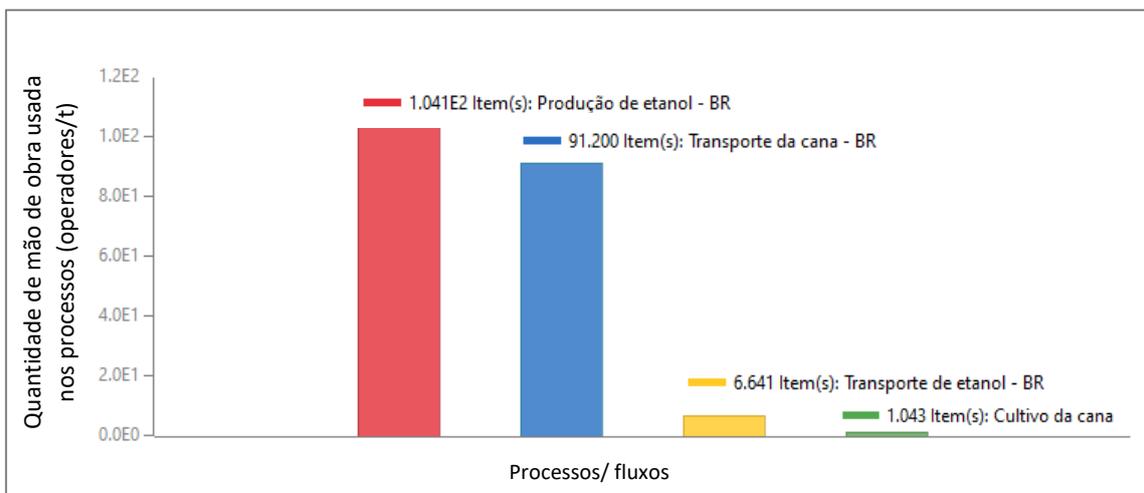


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Assim como os resultados das contribuições pelo uso de combustível, o uso de veículos de transporte, como ilustrado na Figura 11, é significativamente superior na etapa de transporte da cana. Os resultados indicam 1,186E5 t.km para o transporte da cana-de-açúcar e 2,457E4 t.km para o transporte do etanol. Isso porque a usabilidade dos veículos nessa etapa é superior devido a capacidade dos veículos (49,5 toneladas) e a quantidade de cana a ser carregada (4.560 t) que demanda maior usabilidade dos veículos, quando comparado ao transporte do etanol.

Em relação ao uso da mão de obra, a Figura 12 apresenta os resultados de contribuição obtidos para esse fluxo. Os resultados são dados em números de operadores por tonelada de cana (operadores/t).

Figura 12: Contribuição pelo uso da mão de obra

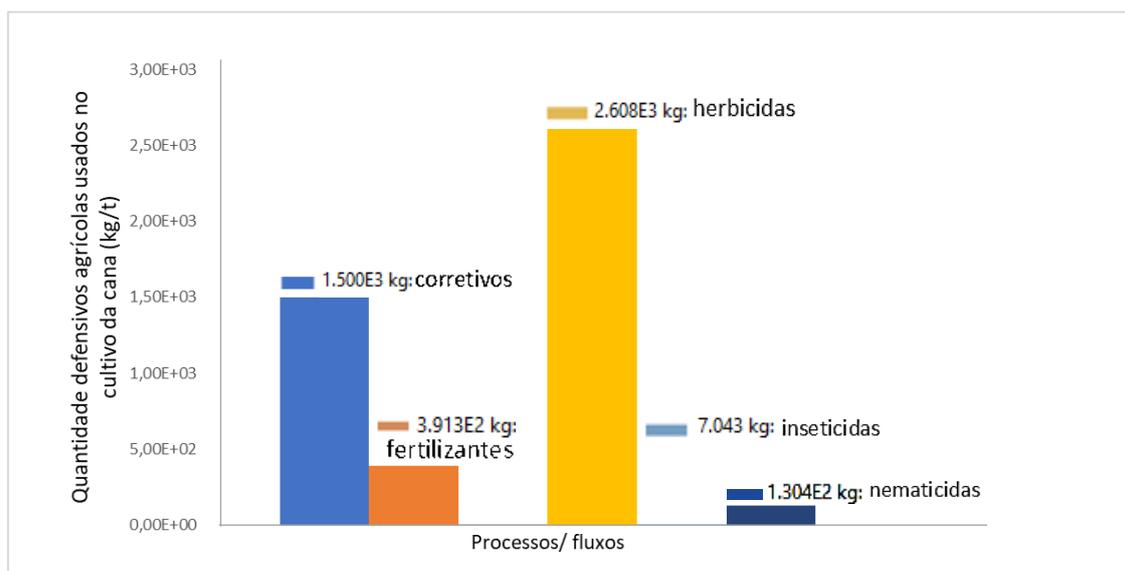


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação à mão de obra (Figura 12), a produção de etanol é o processo com maior contribuição, sendo necessários 22,82 operadores por tonelada de cana processada, segundo dados de Shavazipour, Stray e Stewart (2020). Outro processo a ser destacado é o transporte da cana-de-açúcar. Apesar do uso da mão de obra ser extremamente inferior, com 0,02 operadores por tonelada de cana transportada, segundo Shavazipour, Stray e Stewart (2020), o uso elevado de veículos nesta etapa aumenta significativamente a contribuição desse fluxo no transporte da cana-de-açúcar. Dessa forma, tem-se como resultado o uso de 1,041E2 operadores na produção de etanol, 91,200 e 6,641 operadores no transporte da cana e do etanol, respectivamente, e 1,043 no cultivo da cana-de-açúcar.

Na Figura 13, tem-se as contribuições dadas pelo uso de defensivos no cultivo da cana-de-açúcar, tais como corretivos, fertilizantes, herbicidas, inseticidas e nematicidas. Os resultados são dados em kg de defensivos por hectare de terra cultivada (kg/ha).

Figura 13: Contribuição pelo uso de defensivos



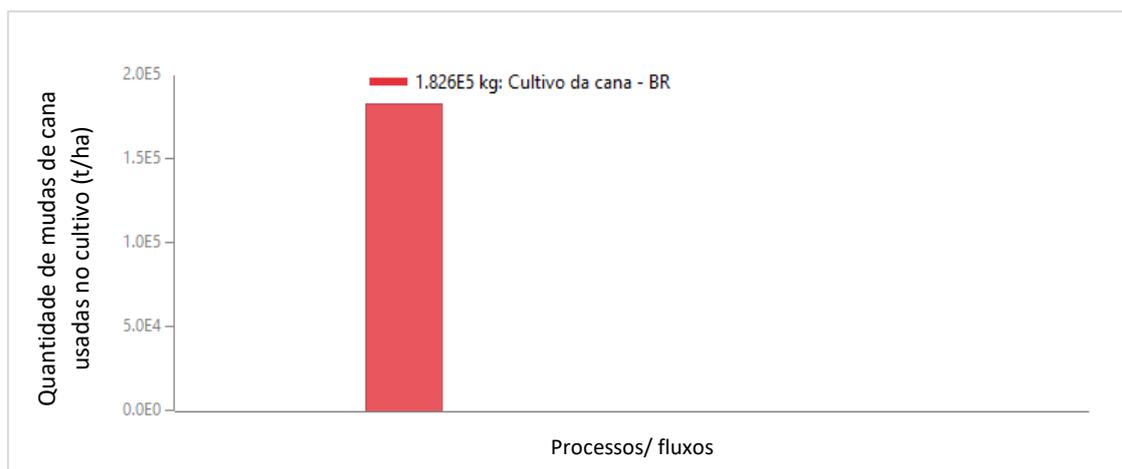
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

De acordo com os resultados apresentados na Figura 13, é notável um destaque para o uso de herbicidas (2,608E3 kg), corretivos (1,500E3 kg), fertilizantes (3,913E2 kg) e nematicidas (1,304E2 kg). Dentre os defensivos usados no cultivo da cana-de-açúcar, o herbicida é o fluxo mais utilizado nessa etapa da cadeia. Segundo dados da Nova Cana (2022), isso se explica porque as plantas daninhas são grandes responsáveis pelas perdas na cultura da cana-de-açúcar, com reduções de produtividade variando de 10% a 80%. Logo, o alto volume de herbicidas usados tenta contornar esse problema para que a produtividade da safra não seja impactada. Em relação ao uso de corretivos, de acordo com a Embrapa (2022), se dá para corrigir a acidez e adubação do solo, sendo outro fator determinante da produtividade dessa cultura. Ainda conforme a Embrapa (2022), considera-se como práticas corretivas o uso do calcário para corrigir a acidez, o uso do gesso para diminuir a atividade do alumínio e acrescentar cálcio em profundidade, e a fosfatagem, que adiciona fósforo em área total para aumentar o teor de fósforo em solos muito pobres deste elemento. Já o uso de fertilizantes é relativamente baixo comparado aos demais defensivos. De acordo com a Nova Cana (2022), a cana-de-açúcar no Brasil tem um nível baixo de utilização de fertilizantes quando comparada a outros países. No caso da cultura da cana no Brasil, uma característica importante é o reciclo integral dos resíduos para o campo, que reduz o uso de fertilizantes e os impactos causados por eles. Por fim, o uso de inseticidas apresenta a menor contribuição no cultivo da cana. O uso de

inseticidas é relativamente baixo, porém usado nessa cultura para fazer o controle de cigarrinhas.

Na Figura 14, tem-se a contribuição decorrente do uso de mudas de cana-de-açúcar no cultivo dessa cultura, onde o resultado é dado em tonelada de mudas de cana por hectare (t/ha).

Figura 14: Contribuição pelo uso de mudas de cana-de-açúcar



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

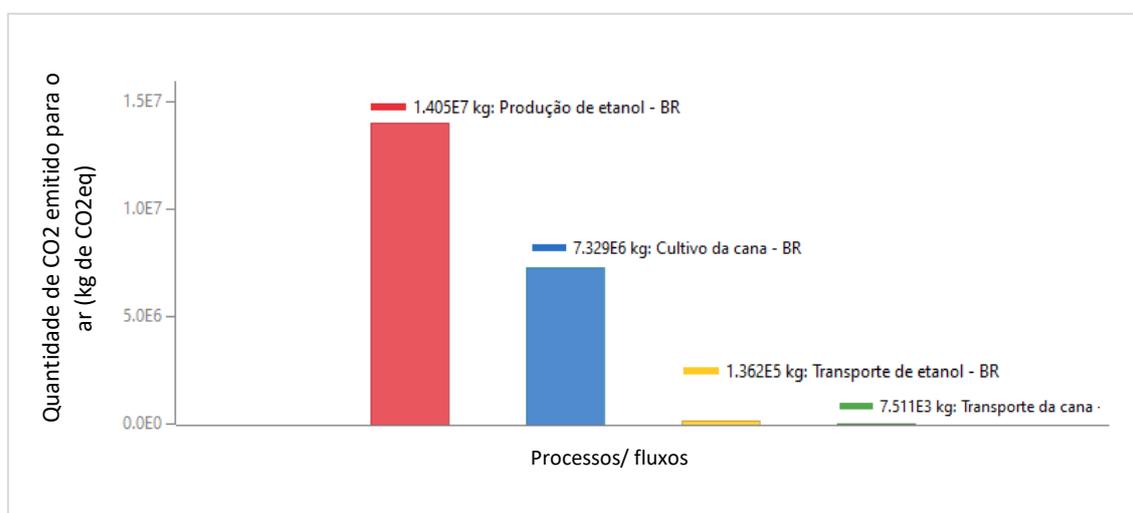
Para a obtenção do resultado da Figura 14, foi utilizado o valor médio de mudas obtido pela base da Embrapa, considerando a área de cultivo da indústria de Anápolis. Dessa forma, tem-se uma contribuição de 182.600 kg de mudas de cana-de-açúcar usados na etapa de cultivo da cana. Segundo dados da Embrapa (2022), a quantidade necessária de mudas de cana varia entre 10 e 15 toneladas de mudas por hectare cultivado. Apesar da quantidade relativamente alta de mudas, a renovação dos talhões acontece em um período de cerca de cinco anos, segundo a Embrapa (2022).

4.1.2 Fluxos elementares

Devido ao grande número de fluxos elementares presentes no modelo, os resultados exibidos nessa subseção serão voltados apenas para as emissões de dióxido de carbono ao longo da cadeia analisada. Os resultados são referentes a categoria de impacto de mudança climática - Potencial de Aquecimento Global ou *Global Warming Potential* (GWP). De acordo com o IPCC (2014) e a ISO (2019), o GWP é uma medida utilizada para avaliar o impacto das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera que contribuem

para o aquecimento global. O GWP compara as capacidades de aquecimento de diferentes gases de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono (CO₂). O GWP é uma importante categoria de impacto na análise do ciclo de vida e na avaliação da pegada de carbono porque permite a comparação de diferentes gases de efeito estufa e fornece informações sobre a contribuição relativa de diferentes atividades para o aquecimento global. Conforme o IPCC (2014), cada gás de efeito estufa é capaz de reter calor em determinada intensidade, sendo que tal capacidade pode ser comparada à capacidade do dióxido de carbono (CO₂) de realizar a mesma função. Essa relação pode ser expressa através do GWP. Na Figura 15 é ilustrada a contribuição dos processos para as emissões de CO₂.

Figura 15: Emissão de CO₂



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

A Figura 15 ilustra a contribuição de CO₂ para a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar estudada. Conforme a figura, a produção de etanol se destaca pela quantidade de CO₂ equivalente emitido na atmosfera. Em comparação aos demais processos, essa etapa da cadeia é responsável por cerca de 65,35% das emissões de CO₂ equivalente de toda a cadeia da cana, com um total de 14.050.000 kg de CO₂ emitidos. O cultivo da cana-de-açúcar é o segundo processo mais emissivo da cadeia analisada, com 34,09% das emissões totais do sistema de produto, o que corresponde a 7.329.000 kg de CO₂ emitidos. Já os processos de transporte, tanto da cana-de-açúcar quanto do etanol, possuem uma participação significativamente menor nas emissões totais de CO₂, com 0,03% e 0,63%, respectivamente, correspondendo a 7.511 kg e 136.200 kg de CO₂ emitidos.

4.1.3 Resíduos

Analisando os resultados obtidos, foi notado que os processos com maior contribuição de resíduos são o cultivo da cana e os transportes da cana e do etanol. O Quadro 7 apresenta as quantidades de resíduos gerados pelos processos de cultivo da cana-de-açúcar e transporte da cana e do etanol, com informações sobre o tipo de resíduo e sua respectiva contribuição em kg.

Quadro 7: Contribuição dos resíduos para o sistema produtivo

Processo	Resíduos	Contribuição	Unidade
Cultivo da cana	Resíduo de bauxita	2,011E-8	Kg
	Farinha de carcaça	9,601E-15	Kg
	Resíduos químicos (não especificados)	1,799E-8	Kg
	Resíduos químicos (tóxicos)	6,739E-8	Kg
	Resíduos de demolição	8,285E-6	Kg
	Resíduos perigosos (não especificados)	6,264E-10	Kg
	Lixo altamente radioativo	2,415E-7	Kg
	Lixo industrial	1,215E-7	Kg
	Jarosita	6,351E-8	Kg
	Resíduo de tratamento mineral	2,493E-4	Kg
	Lixo municipal (não especificado)	8,570E-9	Kg
	Lixo orgânico (não especificado)	7,689E-12	Kg
	Sobrecarga – resíduos de mineração	0,013	Kg
	Resíduos de embalagem (metal)	1,404E-13	Kg
	Resíduos de embalagem (plástico)	3,257E-17	Kg
	Rejeitos radioativos	7,974E-6	Kg
	Resíduos refratário	1,831E-8	Kg
	Resíduos (escórias)	2,700E-4	Kg
	Rejeitos (não especificados)	7,110E-5	Kg
	Óleo usado	1,134E-7	Kg
	Resíduos (não especificados)	3,056E-5	Kg
	Resíduos na produção com aço	2,194E-6	Kg
	Sucata de zinco	8,297E-9	Kg
Escória de zinco	4,484E-10	Kg	

Quadro 7: Contribuição dos resíduos para o sistema produtivo (continuação)

Processo	Resíduos	Contribuição	Unidade
Transporte da cana/ Transporte do etanol	Resíduos perigosos (depositados)	7,845E-8	Kg
	Lixo altamente radioativo	2,176E-9	Kg
	Resíduos de baixa radioatividade/ resíduos inertes e resíduos domésticos comuns	2,799E-8	Kg
	Resíduos de radioatividade média	1,328E-8	Kg
	Sobrecarga (depositado) – mercadorias depositadas/ bens estocados	3,862E-3	Kg
	Rejeitos radioativos	1,445E-6	Kg
	Resíduos (escórias) – tratamento de fim de vida	1,071E-14	Kg
	Resíduos estragados	5,925E-5	Kg
	Rejeitos – tratamento de fim de vida	4,595E-5	Kg
	Resíduos (outros)	8,784E-5	Kg

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Apesar das quantidades de resíduos liberadas ao longo dos processos serem pequenas, como mostrado no quadro acima, esses resíduos causam impactos diretos ao ecossistema e à saúde humana. Tais informações são apresentadas na seção 4.2.

De acordo com o Quadro 7, pode-se observar que o resíduo de bauxita é o que apresenta maior contribuição para os impactos analisados. Apesar da contribuição pequena, de cerca de 2,011E-8 kg, esse resíduo contribui com o aumento dos teores de fósforo (P), nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo cultivado. Além do resíduo de bauxita, os resíduos minerais também se destacam pela sua contribuição. De acordo com a Embrapa (2022), dentre esses resíduos, destacam-se a vinhaça e a torta de filtro.

A torta de filtro é um importante resíduo da indústria sucroalcooleira proveniente da filtração do caldo extraído das moendas no filtro rotativo. A concentração da torta de filtro é constituída de cerca de 1,2 a 1,8% de fósforo e cerca de 70% de umidade, que é importante para garantir a brotação da cana em plantios feitos em épocas de inverno nas Região Sul e Sudeste. A torta também apresenta alto teor de cálcio e consideráveis quantidades de micronutrientes. A vinhaça é utilizada principalmente nas soqueiras, devido à época em que é produzida na agroindústria, fornecendo todo o óxido de potássio

(K₂O) e parte do nitrogênio necessários à cana. Em muitos solos, é necessário complementar a vinhaça com adubos nitrogenados. Entretanto, o excesso de vinhaça provoca retardamento do processo de maturação da planta, o que leva à queda no teor de sacarose e compromete a qualidade final da cana. Além disso, o uso contínuo de vinhaça pode levar à contaminação do lençol freático através da lixiviação de ânions em função do excesso de potássio (EMBRAPA, 2022).

De maneira geral, os processos de cultivo e transporte podem gerar diversos tipos de resíduos, que podem impactar negativamente o meio ambiente e a saúde humana se não forem tratados adequadamente. Nesse contexto, Silva e Modolo (2017), destacam que a gestão adequada dos resíduos é uma questão crítica na cadeia de suprimentos, sendo necessário que as empresas que atuam nessa indústria adotem medidas para minimizar a geração de resíduos e garantir o tratamento adequado dos resíduos gerados.

A adoção de práticas sustentáveis e a implementação de políticas de gestão de resíduos adequadas podem garantir que os resíduos gerados sejam minimizados, reduzindo assim os impactos ambientais e a exposição a riscos à saúde humana. Portanto, é essencial que todas as partes envolvidas na cadeia de suprimentos da cana trabalhem juntas para implementar práticas sustentáveis e garantir a gestão adequada de resíduos (SILVA E MODOLO, 2017).

4.2 Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV)

A análise da avaliação de impacto de ciclo vida foi categorizada em três tipos: danos ao ecossistema, danos à saúde humana e uso de recursos.

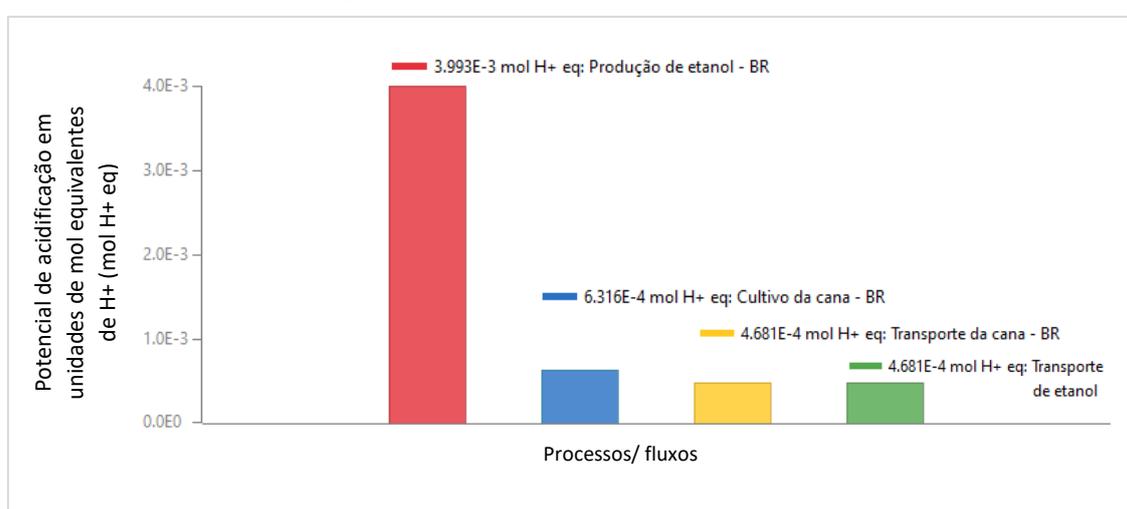
As análises apresentadas a seguir mostram os resultados individuais de cada variante do projeto para o indicador selecionado.

4.2.1 Danos ao ecossistema

Na análise de danos ao ecossistema, são destacadas as categorias de impacto que contribuem para as mudanças climáticas. A Figura 16 ilustra a contribuição do sistema de produto para a categoria de impacto de acidificação, onde se destaca a produção de

etanol. De acordo com o manual *GreenDelta*² (2015), gases ácidos como o dióxido de enxofre (SO₂) reagem com a água na atmosfera para formar a chuva ácida, um processo conhecido como deposição ácida. Quando esta chuva cai, muitas vezes a uma distância considerável da fonte original do gás, ela causa danos aos ecossistemas em graus variados, dependendo da natureza dos ecossistemas da paisagem. Os gases que causam deposição ácida incluem amônia (NH₃), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x). Essa acidificação se dá devido ao uso de fertilizantes, de acordo com o método desenvolvido pelo IPCC. Os resultados são dados em unidades de mol de equivalentes de H⁺ por kg de produto (mol de H⁺ eq).

Figura 16: Danos ao ecossistema - acidificação



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

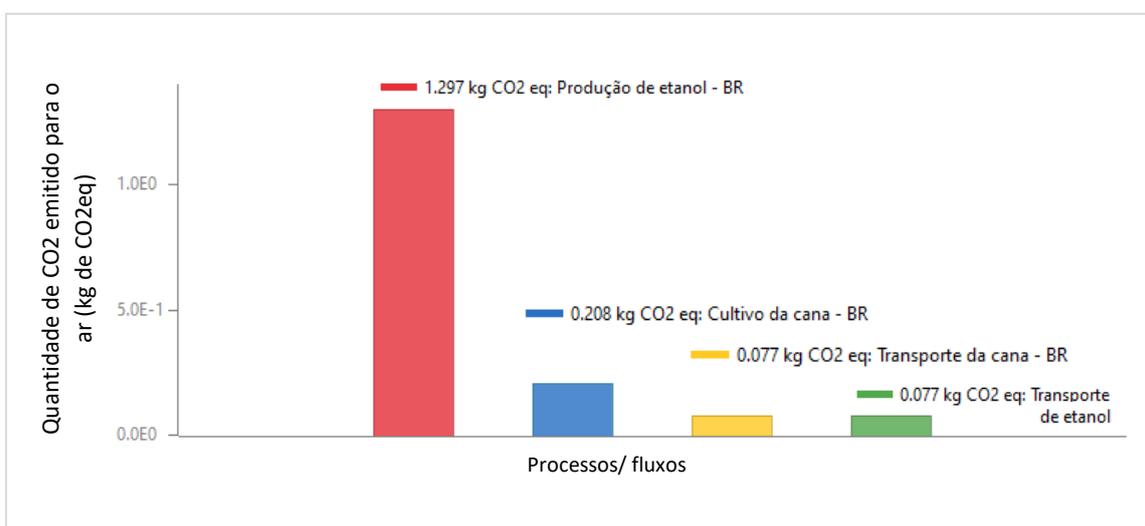
Para a categoria de impacto de acidificação (Figura 16), a produção de etanol se destaca com uma participação de 71,81%, em relação aos demais processos, com 11,36%, e 8,42%, para o cultivo da cana e o transporte de cana e etanol, respectivamente. Essa contribuição vem das emissões decorrentes da amônia, dióxido de nitrogênio, monóxido de nitrogênio, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, óxidos de enxofre e trióxidos de enxofre que podem estar presentes nos processos. Tais emissões resultaram em uma contribuição de 3,993E-3 mol de H⁺ eq para a produção de etanol, 6,316E-4 mol de H⁺ eq para o cultivo da cana, e 4,681E-4 mol de H⁺ eq para os transportes de cana e etanol. De acordo com Resende *et al.* (2014) e Goldemberg *et al.* (2018), essas emissões podem

² O Manual *GreenDelta* é um manual elaborado pela empresa *GreenDelta* que auxilia na elaboração de projetos de Avaliação de Ciclo de Vida, usando o *software* OpenLCA.

reagir com o ar e a água e gerar ácidos, que afetam a qualidade do ar e da água, e consequentemente, causam impactos ao ecossistema.

A Figura 17 apresenta os resultados de contribuição para os danos ao ecossistema relacionados às mudanças climáticas. Para a obtenção da contribuição relacionada às mudanças climáticas (Figura 17), o modelo de caracterização dos *Environmental Profiles* foi baseado nos fatores desenvolvidos pelo IPCC da ONU. Segundo informações do GreenDelta (2015), os fatores são expressos como GWP ao longo do horizonte de tempo de diferentes anos, sendo o mais comum 100 anos (GWP100), medido na unidade de referência, em kg de CO₂ equivalente.

Figura 17: Danos ao ecossistema - mudanças climáticas



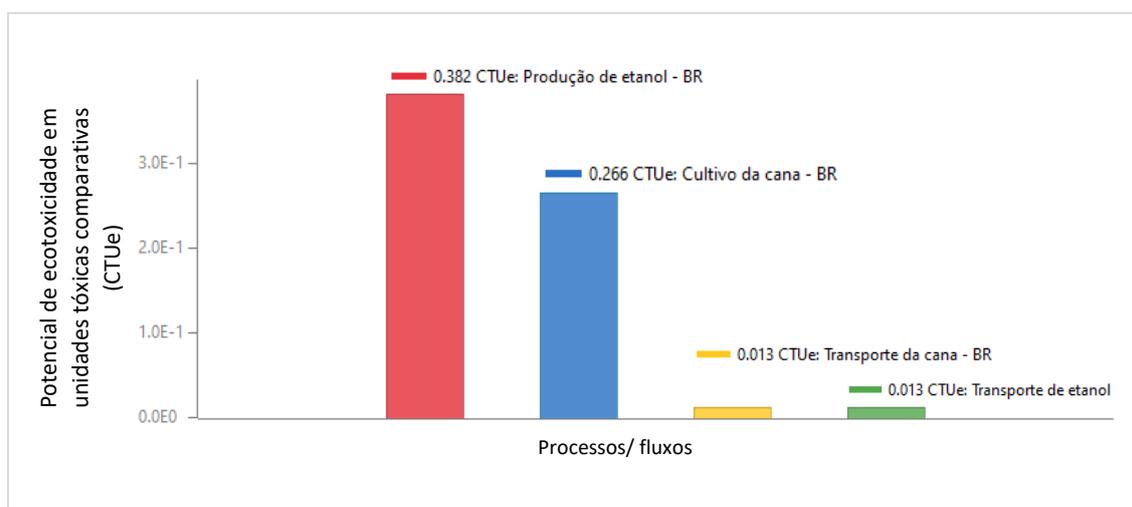
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Na Figura 17, pode-se observar que o processo de produção de etanol possui maior contribuição para as emissões de CO₂ equivalente (78,18%) quando comparado aos demais processos. O nível de contribuição relativamente baixo no cultivo da cana pode ser explicado por Macedo, Leal e Silva (2004), Soares *et al.* (2009) e Garcia e Von Sperling (2010). Os autores explicam que durante a queima da cana-de-açúcar (colheita), e na queima dos resíduos agrícolas, ocorrem emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. Apesar disso, os autores e o IPCC (2006) enfatizam que as emissões de CO₂ não devem ser consideradas na estimativa, já que essas emissões são compensadas na captura de CO₂ durante o próximo cultivo da cana-de-açúcar. De acordo com o estudo de Tcacenco *et al.* (2018), a produção de etanol é responsável por cerca de 0,5% das emissões globais de GEE. A maioria dessas emissões é proveniente da fase de produção de etanol, que envolve o

processamento da cana e a geração de energia para as usinas. Já o cultivo da cana-de-açúcar e o transporte da cana e do etanol, apesar de apresentarem menores contribuição de impacto para essa categoria, esses processos também podem ter impactos significativos em outras categorias de impacto ambiental, como a eutrofização e o consumo de água, citam os autores.

Em relação à toxicidade ambiental, apresentada na Figura 18, os resultados são medidos considerando o impacto na água doce. Conforme o GreenDelta (2015), a emissão de algumas substâncias, como metais pesados, pode causar impactos ao ecossistema. A avaliação da ecotoxicidade foi baseada em concentrações máximas toleráveis na água para os ecossistemas, calculados com o USES-LCA (Zelm, Huijbregts e Meent, 2009), que é baseado no modelo de toxicidade da União Europeia (EU). Isso fornece um método para descrever o destino, a exposição e os efeitos de substâncias tóxicas no meio ambiente. Os resultados são dados em Unidades Tóxicas Comparativas (CTUe).

Figura 18: Danos ao ecossistema – ecotoxicidade (água doce)



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

A categoria de impacto mencionada na Figura 18, avalia os efeitos tóxicos de produtos químicos no ecossistema aquático. De acordo com os resultados apresentados, tanto a produção de etanol quanto o cultivo da cana-de-açúcar apresentam contribuições significativas para essa categoria de impacto, sendo responsáveis por 56,68% (0,382 CTUe) e 39,46% (0,266 CTUe) das emissões, respectivamente. Essas emissões provêm do uso de produtos químicos como herbicidas e pesticidas, que podem contaminar a água e causar danos aos organismos aquáticos. Já as contribuições no transporte são

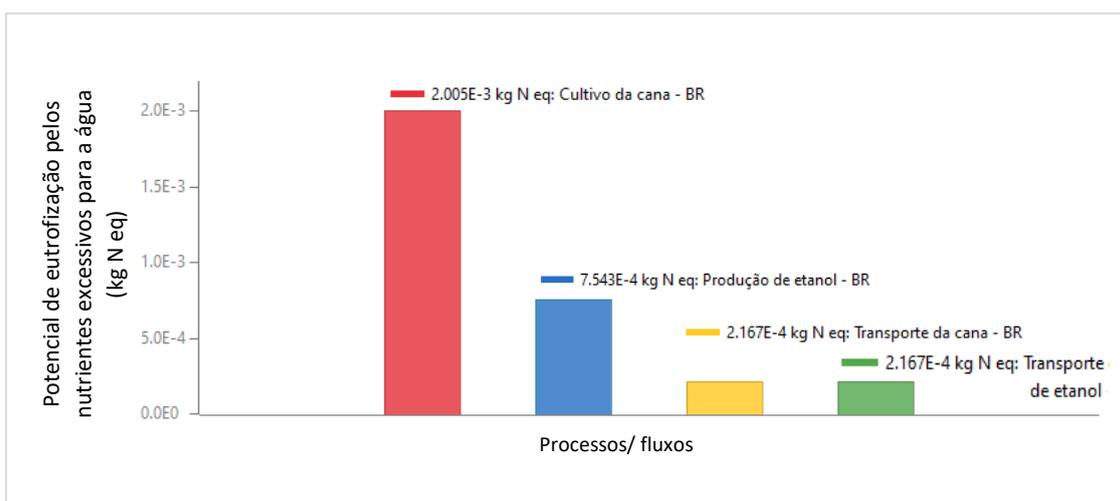
significativamente pequenas, com cerca de 1,93% (0,013 CTUe) de participação no critério ecotoxicidade de água doce, que demonstram os efeitos tóxicos de produtos químicos no ecossistema. Isso sugere que os impactos da categoria de ecotoxicidade de água doce estão mais relacionados às etapas de produção e cultivo do que ao transporte de cana e etanol.

Para categoria de eutrofização, o manual GreenDelta (2015) descreve esse impacto como o acúmulo de uma concentração de nutrientes químicos, como nitrogênio e fósforo, que promovem o crescimento excessivo de algas e outras plantas aquáticas, chamadas de florações de algas. Isso causa crescimento excessivo de plantas como algas em rios, o que resulta em reduções severas na qualidade da água e nas populações de animais. Essas florações podem esgotar o oxigênio da água, causando a morte de peixes e outros animais aquáticos. Além disso, a decomposição da biomassa pode liberar gases que aumentam a acidez da água, tornando-a tóxica para a vida marinha.

As emissões de amoníaco, nitratos, óxidos de azoto e fósforo para o ar ou para a água, presentes nos processos, têm um impacto na eutrofização. Os impactos são calculados usando o método do IPCC para estimar as emissões para a água que causam eutrofização. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras 19, 20 e 21.

Na Figura 19, tem-se a contribuição para os impactos ao ecossistema relacionados a categoria de eutrofização marinha.

Figura 19: Danos ao ecossistema – eutrofização marinha

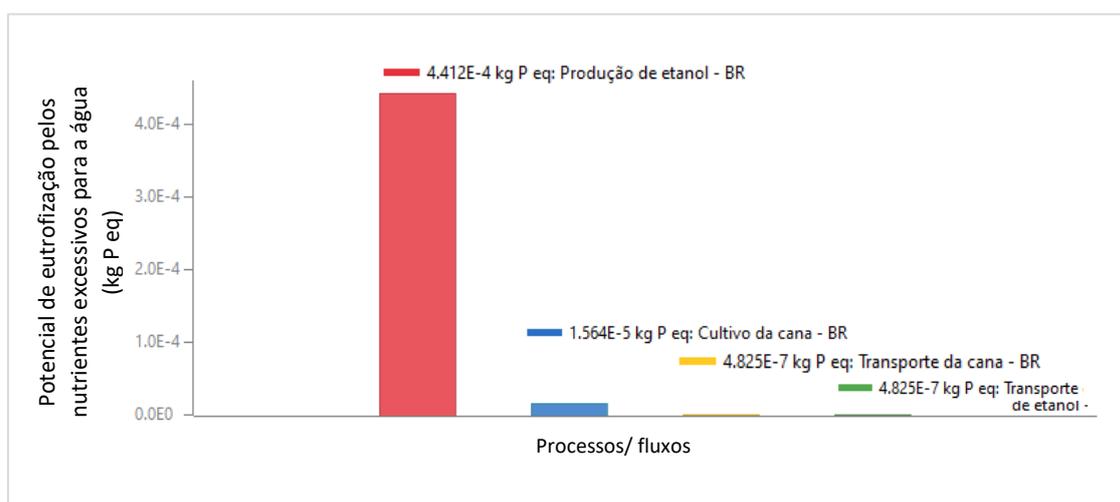


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

De acordo com os resultados da Figura 19, a produção de etanol é responsável pela maior parte das emissões da categoria de eutrofização marinha, seguida pelo cultivo da cana e pelo transporte da cana e do etanol. Conforme os resultados obtidos, tem-se como contribuição 62,80% (0,002005 kg N eq) para a produção de etanol, 23,62% (0,0007543 kg N eq) no cultivo da cana, 6,79% (0,0002167 kg N eq) para o transporte da cana, e 6,79% (0,0002167 kg N eq) para o transporte de etanol. Tais contribuições são provenientes das emissões pelo uso de óxidos de nitrogênio, nitrato e amônia. Além disso, os impactos da categoria de eutrofização causam o aumento das concentrações de azoto e fósforo e a formação de biomassa, como algas, causando danos à qualidade do ecossistema. Além disso, a utilização de fertilizantes nitrogenados no cultivo da cana é uma das principais fontes de emissões de nitrogênio na cadeia produtiva do etanol. As etapas de transporte da cana e do etanol, apesar de pequena, também podem contribuir para a eutrofização marinha, devido às emissões dos veículos que transportam a matéria prima e o biocombustível.

Na Figura 20, os danos ao ecossistema relacionam-se a categoria de eutrofização da água doce.

Figura 20: Danos ao ecossistema – eutrofização (água doce)



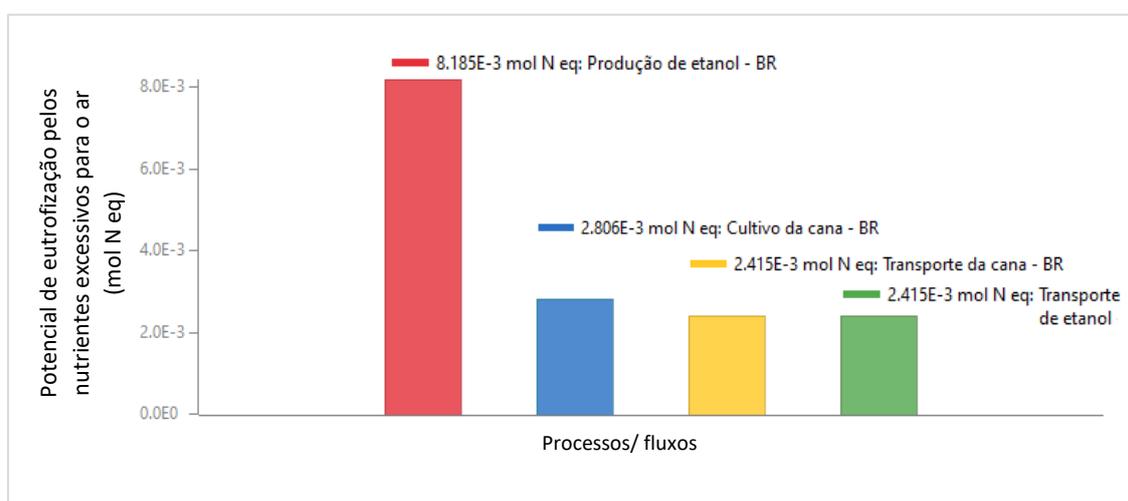
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação à eutrofização da água doce, ela pode ser causada pela lixiviação de nutrientes dos fertilizantes usados no cultivo da cana-de-açúcar e pelo descarte inadequado de resíduos da produção de etanol na água. De acordo com os resultados da Figura 20, pode-se observar que a produção de etanol é a principal responsável pela

eutrofização da água doce, com uma contribuição significativa de 96,37% (0,0004412 kg P eq) para essa categoria de impacto. O cultivo da cana também contribui para a eutrofização, porém em uma proporção significativamente menor, com apenas 3,42% (0,00001564 kg P eq) de participação. O transporte da cana e do etanol apresentam uma contribuição mínima, com apenas 0,1% (0,0000004825 kg P eq) de participação nessa categoria de impacto.

A Figura 21 ilustra os impactos ao ecossistema relacionados a categoria de eutrofização terrestre.

Figura 21: Danos ao ecossistema – eutrofização (terrestre)



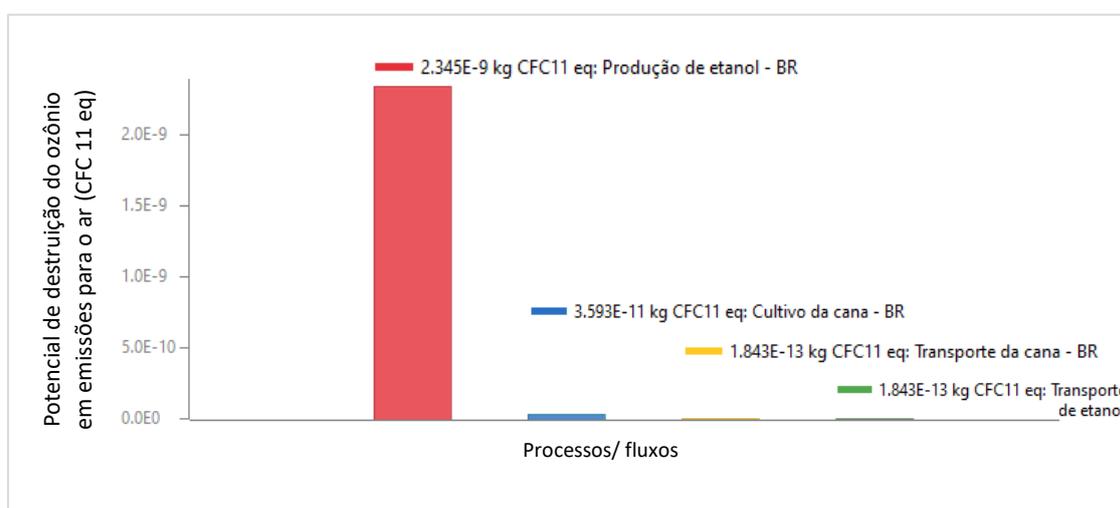
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Em relação a eutrofização terrestre (Figura 21), tem-se com maior contribuição de impacto para os danos ao ecossistema, a produção de etanol (51,74%). Posteriormente, tem-se o cultivo da cana-de-açúcar (17,74%), o transporte da cana e do etanol (15,26%). O processo de cultivo da cana-de-açúcar envolve a utilização de fertilizantes e pesticidas, que podem acabar sendo carregados pela chuva para corpos d'água próximos, contribuindo com os danos relacionados à eutrofização. Além disso, o processo de produção do etanol em si pode gerar efluentes líquidos que contêm açúcares, compostos orgânicos e outros nutrientes que podem contribuir para a eutrofização. Um estudo realizado por Dias *et al.* (2012) avaliou os impactos ambientais associados à produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil, e os resultados indicaram que a eutrofização terrestre é uma das principais categorias de impacto ambiental associadas à produção de etanol. O uso de fertilizantes nitrogenados foi apontado como uma das principais fontes

de emissão de nutrientes para o meio ambiente, contribuindo para os impactos de eutrofização.

De acordo com GreenDelta (2015), os gases que causam danos à camada de ozônio reduzem sua capacidade de impedir que a radiação ultravioleta (UV) entre na atmosfera terrestre, aumentando a quantidade de raios UV cancerígenos que atingem a superfície terrestre. A Figura 22 apresenta a contribuição dos processos da cadeia para a categoria de impacto de destruição da camada de ozônio. Os resultados são expressos em kg de clorofluorcarbono-11 equivalente (kg CFC-11 eq).

Figura 22: Danos ao ecossistema – destruição da camada de ozônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

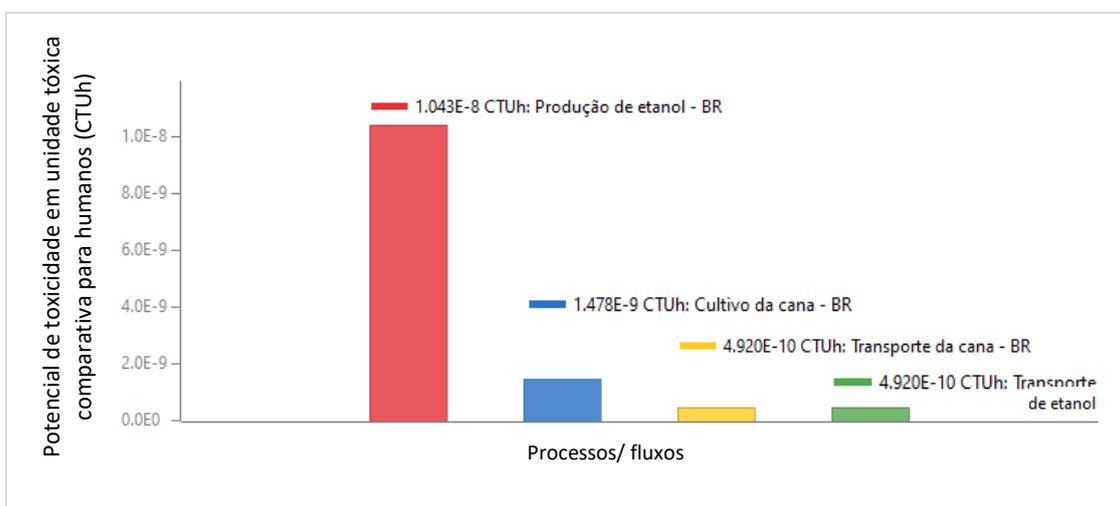
Os resultados da Figura 22, partem da emissão pelo uso de amônia, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre presentes no sistema de produto. Apesar da pequena margem de contribuição, dentre os processos da cadeia, destaca-se a produção de etanol com uma emissão de 2,345E-9 kg CFC11 eq e uma contribuição de 98,53%, em comparação aos demais processos. De acordo com GreenDelta (2015), os clorofluorcarbono (CFC) e hidrofluorcarbonetos (HCFC) são as principais causas da destruição do ozônio, devido a aparelhos de ar-condicionado, refrigeração, retardadores de chamas, aerossóis e solventes, presentes nos processos.

4.2.2 Danos à saúde humana

O potencial de toxicidade humana é um índice calculado que reflete o dano potencial de uma unidade de produto químico liberado no meio ambiente e é baseado tanto na toxicidade inerente de um composto quanto em sua dose potencial. Esses subprodutos, principalmente arsênico, dicromato de sódio e fluoreto de hidrogênio, são causados, em sua maioria, pela produção de eletricidade a partir de fontes fósseis. Estes são produtos químicos potencialmente perigosos para os seres humanos por inalação, ingestão e até contato (GreenDelta, 2015). O fator cancerígeno, por exemplo, é um ponto de destaque nessa categoria, como é ilustrado nas Figuras 23 e 24.

A Figura 23 apresenta a contribuição do sistema produtivo para a categoria de impacto que causa danos à saúde humana relacionada aos fatores cancerígenos.

Figura 23: Danos à saúde humana - toxicidade humana (cancerígena)

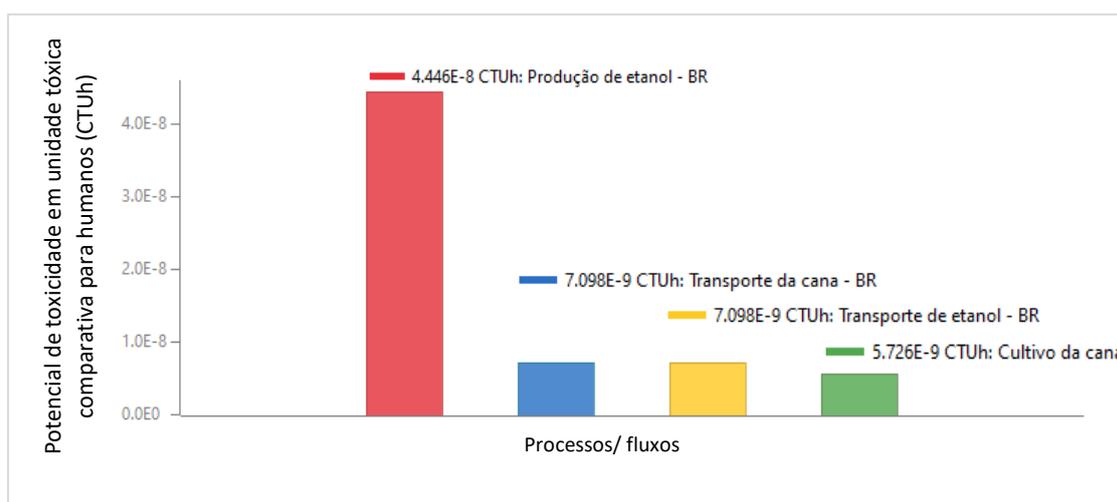


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Para as contribuições com fatores cancerígenos apresentados na Figura 23, a produção de etanol possui maior contribuição de impacto sendo consequente das emissões de cromo para o ar e para a água, com 80,85% de contribuição, enquanto os demais processos possuem 11,46%, 3,81% para o cultivo da cana e o transporte de cana e etanol, respectivamente. A contribuição no processo de produção do etanol está relacionada principalmente à emissão de cromo, um metal pesado altamente tóxico e carcinogênico, para o ar e para a água. Durante o processo de produção de etanol, ocorrem emissões de cromo que podem afetar a qualidade do ar e da água, causando danos à saúde humana. Além disso, o cromo pode se acumular nos tecidos e causar mutações genéticas, aumentando o risco de câncer.

A categoria de impacto de toxicidade humana não cancerígena, como indicado pelo nome, avalia os impactos da exposição a substâncias tóxicas que não estão relacionadas ao câncer. A Figura 24 apresenta os resultados da avaliação do ciclo de vida do etanol em relação a essa categoria de impacto.

Figura 24: Danos à saúde humana - toxicidade humana (não cancerígeno)



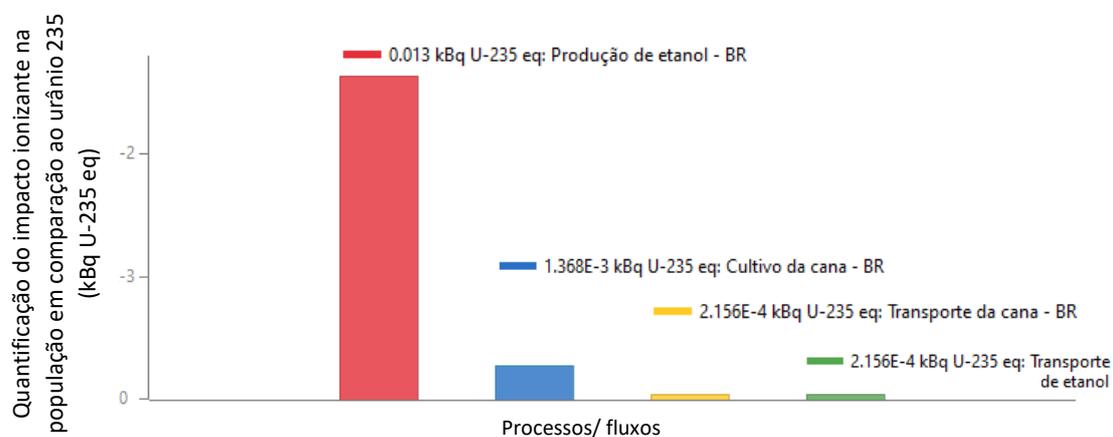
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Os resultados da Figura 24 mostram que a produção de etanol é o processo com a maior contribuição, representando 69,03% do impacto total. Isso ocorre porque a produção de etanol envolve o uso de diversos produtos químicos, como ácido sulfúrico, hidróxido de sódio e ácido clorídrico, que podem ter efeitos tóxicos quando expostos a seres humanos. O cultivo da cana-de-açúcar também tem uma contribuição significativa, representando 8,89% do impacto total. Isso ocorre devido à aplicação de pesticidas e fertilizantes durante o cultivo da cana, que podem causar danos à saúde humana. Os transportes da cana e do etanol apresentam uma contribuição relativamente menor, representando 11,02% do impacto total. É importante notar que esses resultados podem variar dependendo do tipo de produto químico utilizado e das práticas de manejo agrícola adotadas em diferentes regiões.

Outra categoria de impacto à saúde humana é radiação ionizante, apresentada na Figura 25, abaixo. Segundo GreenDelta (2015), essa categoria está relacionada aos danos à saúde humana e aos ecossistemas que estão diretamente ligadas às emissões de radionuclídeos ao longo de um ciclo de vida de um produto, ou seja, é um tipo de radiação

capaz de ionizar átomos e moléculas, gerando espécies reativas que podem causar danos às células e ao DNA humano.

Figura 25: Danos à saúde humana - radiação ionizante



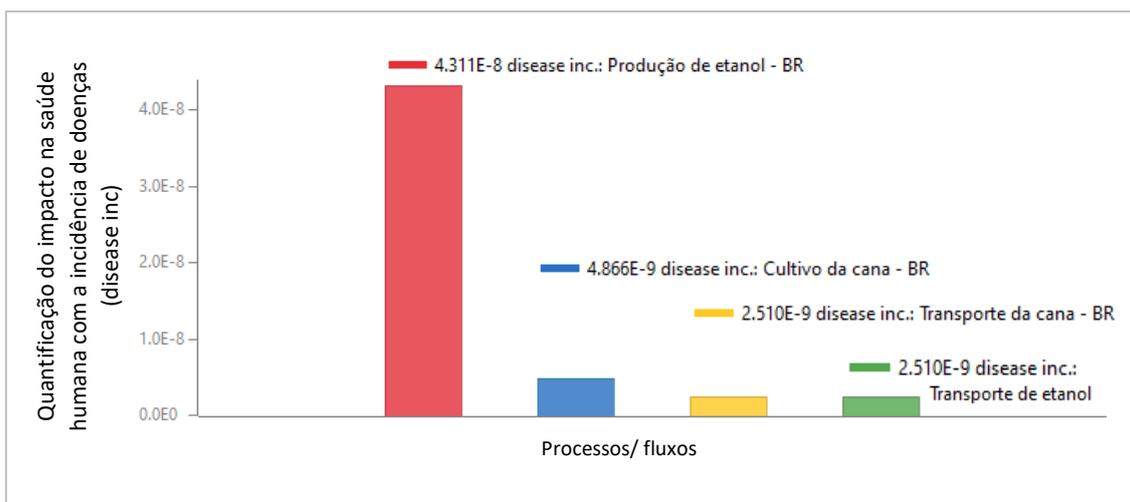
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Na Figura 25, nota-se que a produção de etanol foi o processo que mais contribuiu para o impacto da radiação ionizante, com 87,84% (0,013 kBq U235) de contribuição. Já os demais processos, apresentam margens de contribuições relativamente pequenas, sendo 9,24% para o cultivo da cana-de-açúcar e 1,46% para os transportes de cana e etanol. A contribuição da produção de etanol para o impacto da radiação ionizante pode estar relacionada ao processo de extração do urânio contido no fertilizante utilizado no cultivo da cana-de-açúcar. Esse urânio é um radionuclídeo natural e pode ser concentrado no processo de produção do etanol, gerando resíduos radioativos. Além disso, as emissões de gases radioativos durante a fermentação do caldo de cana também podem contribuir para esse impacto. No caso do cultivo da cana-de-açúcar, a contribuição pode estar relacionada ao uso de fertilizantes fosfatados, que podem conter radionuclídeos como o rádio-226 e o chumbo-210. Já os transportes podem contribuir para o impacto da radiação ionizante devido à exposição dos trabalhadores a materiais radioativos, como o urânio e tório, que podem ser encontrados em equipamentos de proteção individual e em materiais de construção usados nos veículos.

Os resultados apresentados na Figura 26 estão relacionados aos danos à saúde humana causados por material particulado. De acordo com o GreenDelta (2015), o material particulado é composto por partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, que

podem causar efeitos negativos na saúde humana, como respiratórias e cardiovasculares. A poluição por partículas pode ser composta por vários componentes, incluindo ácidos (como nitratos e sulfatos), produtos químicos orgânicos, metais e partículas de solo ou poeira. Uma infinidade de problemas de saúde, especialmente do trato respiratório, está ligada à poluição por partículas.

Figura 26: Danos à saúde humana - material particulado



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

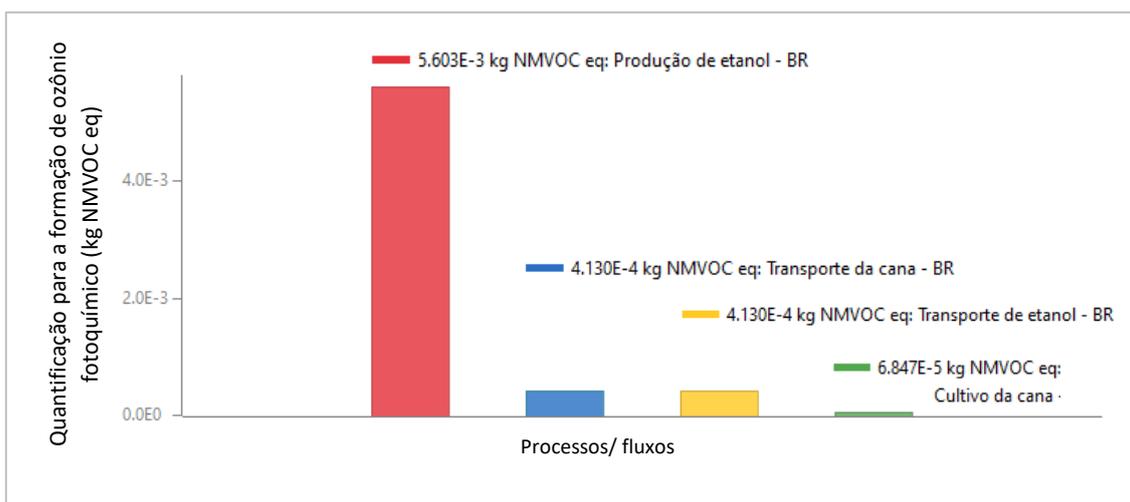
De acordo com a Figura 26, que apresenta os resultados da categoria de impacto de danos à saúde humana pelo material particulado, a produção de etanol é responsável por 81,34% da contribuição dessa categoria de impacto. O cultivo da cana-de-açúcar também contribui para o impacto relacionado ao material particulado, porém em uma proporção inferior, com 9,18%. Essas contribuições vêm da exposição de partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar, como poeira, fuligem e fumaça. Os transportes de cana e etanol também contribuem, mas com um percentual ainda menor, de 4,74%.

O ozônio é protetor na estratosfera, mas no nível do solo é tóxico para os seres humanos em alta concentração. O ozônio fotoquímico, também chamado de ozônio ao nível do solo, é formado pela reação de compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio na presença de calor e luz solar. A categoria de impacto depende em grande parte das quantidades de monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxido de nitrogênio (NO), amônia e NMVOC (compostos orgânicos voláteis não metânicos). O potencial fotoquímico de criação de ozônio (também conhecido como smog de verão) para emissão de substâncias no ar é calculado com o modelo de trajetória da Comissão

Econômica das Nações Unidas para 22 Europa (UNECE) (incluindo destino) e expresso usando a unidade de referência, kg etileno (C₂H₄) equivalente (GreenDelta, 2015).

Na Figura 27 são apresentados os resultados dessa categoria de impacto em relação aos diferentes processos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Figura 27: Danos à saúde humana - formação fotoquímica de ozônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

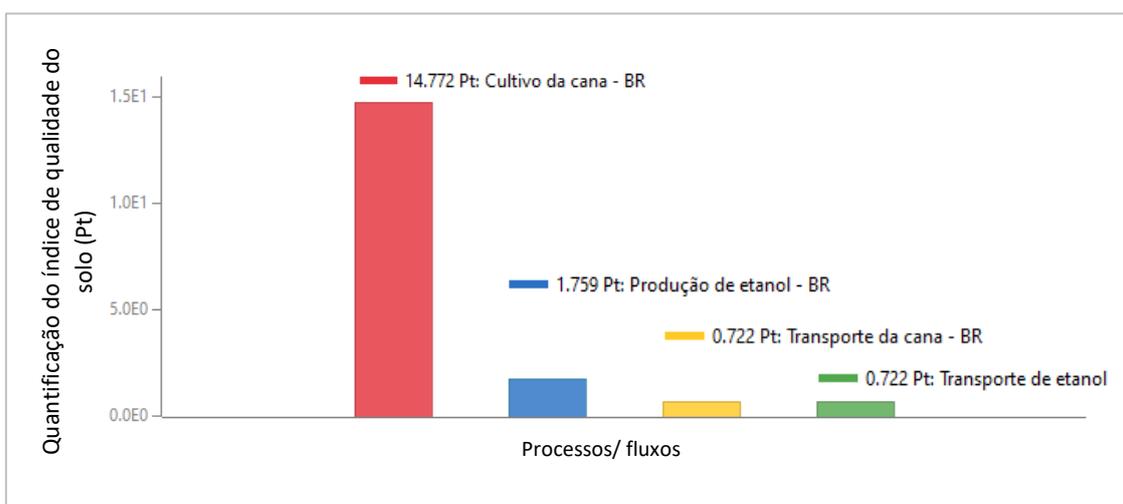
De acordo com os resultados da Figura 27, a produção de etanol é o processo que mais contribui para o impacto de formação de ozônio, com 86,20% de contribuição. Isso ocorre porque a produção de etanol envolve o uso de combustíveis fósseis, o que gera emissões de óxidos de emissão e compostos orgânicos voláteis. Os transportes de cana e etanol também apresentam uma contribuição significativa, com 6,35%, devido à emissão de poluentes atmosféricos pelos veículos utilizados no transporte. Já o cultivo da cana apresenta uma contribuição menor, de apenas 1,05%, uma vez que não há emissão significativa de poluentes atmosféricos nesse processo.

Os resultados apresentados estão de acordo com estudos que apontam a produção de biocombustíveis, como o etanol de cana-de-açúcar, como uma fonte significativa de emissões de poluentes atmosféricos, especialmente óxidos de emissão. Além disso, os transportes são uma fonte importante de emissões de poluentes atmosféricos em geral, uma vez que consomem combustíveis fósseis e geram emissões diretas por veículos e indiretas pela produção desses combustíveis (VASCONCELOS *et al.*, 2016).

4.2.3 Uso de recursos

Para as categorias de impacto relacionadas ao uso de recursos, os resultados apresentados na Figura 28 são baseados na estrutura de avaliação do uso da terra do UNEP/SETAC (Milà i Canals *et al.*, 2007, Koellner *et al.*, 2012) e se concentram nos impactos da ocupação, ou seja, o uso da terra, conforme descrito no *GreenDelta* (2015).

Figura 28: Uso de recursos - uso da terra

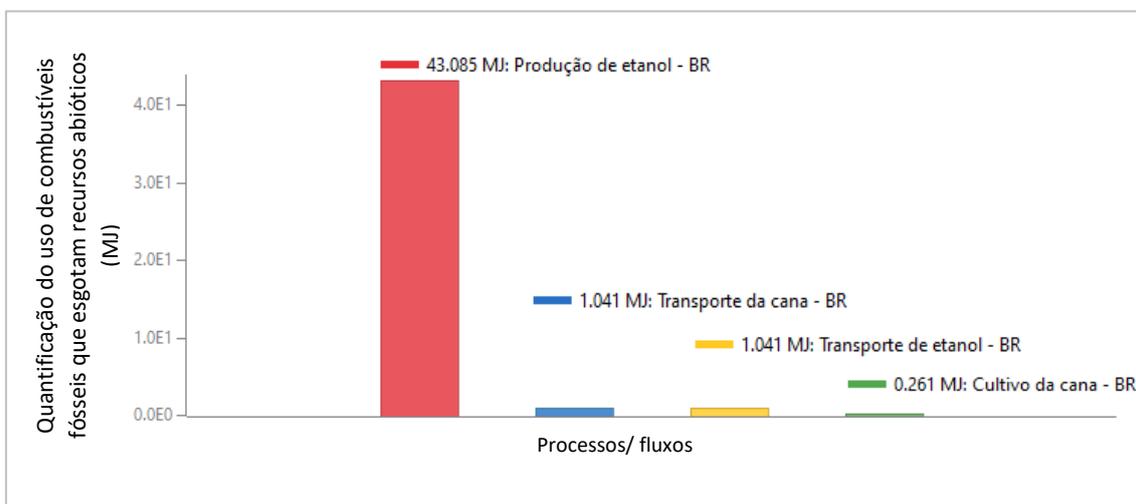


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Nessa categoria ilustrada na Figura 28, destaca-se o cultivo da cana de açúcar com 82,18% de contribuição devido à ocupação e uso da terra para o preparo do solo, cultivo e colheita da cana-de-açúcar. Segundo Silva *et al.* (2014), o cultivo da cana-de-açúcar é um processo intensivo em uso da terra, sendo responsável por grande parte do impacto ambiental nessa categoria. Isso se deve ao fato de que a produção de cana requer grandes áreas de cultivo, o que muitas vezes leva à conversão de áreas naturais em plantações, especialmente na região centro-sul do Brasil, onde a produção de cana é mais intensa. Além disso, Carvalho *et al.*, (2013) destacam que o processo de preparo do solo, plantio e colheita também podem causar impactos negativos na qualidade do solo e na biodiversidade local. Os demais processos possuem uma contribuição relativamente pequena nessa categoria, uma vez que não demandam grandes áreas de terra para sua realização, sendo 9,78% na produção de etanol e 4,02% para os transportes.

Na Figura 29 é apresentada uma análise do impacto ambiental da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar em relação ao uso de recursos fósseis.

Figura 29: Uso de recursos - fósseis

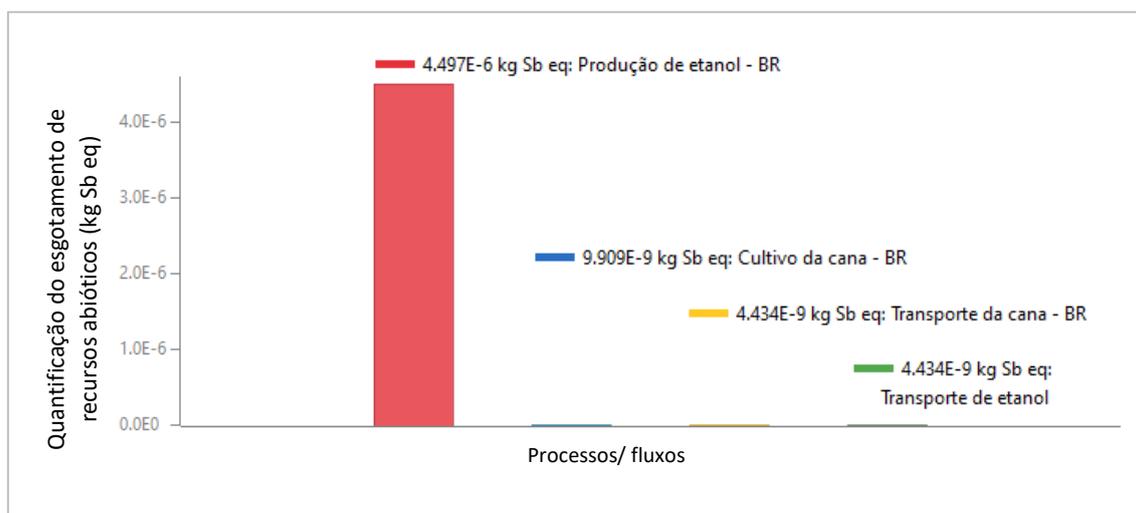


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

O uso de recursos fósseis tem um impacto significativo na saúde humana e no meio ambiente. O estudo realizado por Dias *et al.* (2012) avaliou os impactos ambientais associados à produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil e constatou que a produção de etanol é o processo que mais contribui para os impactos ambientais e de saúde humana relacionados ao uso de recursos fósseis. Em relação a essa categoria de impacto ilustrada na Figura 29, o fator de contribuição é dado em MJ e possui a produção de etanol como maior processo de contribuição, com 94,84%, em relação aos demais. Os transportes da cana e do etanol possuem um percentual de 2,29% e, com menor contribuição, tem-se o cultivo da cana-de-açúcar com 0,57%.

Na Figura 30 tem-se os resultados de contribuição para o uso de recursos, relacionados ao uso de minerais e metais.

Figura 30: Uso de recursos – minerais e metais

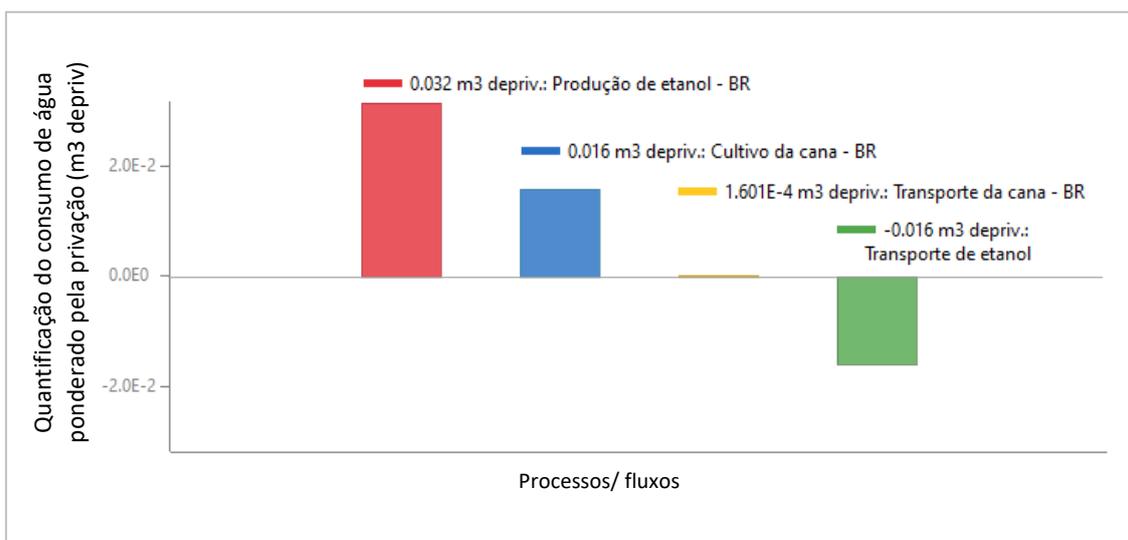


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Conforme apresentado na Figura 30, os efeitos decorrentes do uso de minerais e metais são responsáveis pela maior parte do impacto ambiental relacionado ao uso de recursos na produção de etanol, com 99,49% de contribuição. Em segundo lugar, está o cultivo da cana-de-açúcar, com uma contribuição de 0,22%, seguido pelos transportes da cana-de-açúcar e do etanol, com uma contribuição de 0,09%. É importante destacar que o uso de minerais e metais na produção de etanol pode estar relacionado a diversos aspectos do processo produtivo, desde a fabricação de maquinários até a utilização de fertilizantes e defensivos agrícolas. De acordo com Mello *et al.* (2018), embora o cultivo da cana-de-açúcar apresente uma contribuição relativamente baixa para o impacto ambiental relacionado ao uso de recursos, é importante considerar que o uso de recursos na produção agrícola pode ter impactos indiretos em outros aspectos ambientais, como na perda de biodiversidade e na degradação do solo.

Por fim, o uso da água também é considerado para essa categoria de impacto. Tais resultados são apresentados na Figura 31.

Figura 31: Uso de recursos - água



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Conforme visualizado na Figura 31, a produção de etanol é responsável pela maior parte do impacto ambiental relacionado ao uso da água, com 99,38% de contribuição para essa categoria. Seguido desse processo, tem-se o cultivo da cana-de-açúcar, com um percentual de emissão significativamente alto de 49,68%. Por outro lado, os transportes apresentam um percentual relativamente baixo de contribuição. O transporte da cana-de-açúcar representa apenas 0,49% do impacto total, enquanto o transporte do etanol apresenta um percentual negativo de -49,69%. Esse valor negativo ocorre porque a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar pode gerar créditos de carbono, o que reduz o impacto ambiental total quando considerado todo o ciclo de vida do biocombustível. Vale salientar que em uma avaliação de ciclo de vida, outras etapas da cadeia de suprimentos e seus respectivos consumos também são considerados. Logo, pode-se atrelar esse resultado aos impactos ambientais positivos causados pelo uso do etanol na última etapa da cadeia, a distribuição do produto acabado.

Esses resultados estão de acordo com outros estudos que demonstraram a importância do uso eficiente da água na produção de etanol e dos efeitos ambientais associados ao cultivo da cana-de-açúcar, como Rodrigues *et al.* (2018) e Seabra *et al.* (2011). É importante destacar que os impactos ambientais associados à produção de etanol podem variar de acordo com as práticas de gestão adotadas pelos produtores, bem como com as características específicas de cada região onde a cana-de-açúcar é cultivada e processada.

4.2.4 Comparação dos resultados por processos do sistema produtivo

A fim de analisar a contribuição dos impactos ambientais pela categoria de impacto utilizada e comparar o desempenho dos processos analisados, foi gerado um relatório de projeto a partir do modelo de ACV construído no OpenLCA. Os processos foram comparados utilizando o método AICV *Environmental Footprint (Mid-point indicator)* e considerando todas as categorias de impacto desse método. As variantes de produção assumiram os valores da produção diária de etanol da indústria. Dessa forma, para cada 424.080 litros de etanol, foram necessários o colhimento e o transporte de 4.560 toneladas de cana-de-açúcar.

O quadro abaixo mostra os resultados do AICV das variantes do projeto. Cada categoria AICV selecionada é exibida nas linhas e as variantes do projeto nas colunas. A unidade de medida é a unidade da categoria AICV conforme definido no método ACV.

Quadro 8: Comparação dos resultados do AICV para as variantes do projeto de sistema de produto

Indicador	Cultivo da cana	Transporte da cana	Produção de etanol	Transporte de etanol	Unidade
Toxicidade humana, não cancerígena	5.72559e-9	7.09834e-9	4.44575e-8	7.09834e-9	CTUh
Radiação ionizante, saúde humana	1.36808e-3	2.15625e-4	1.31765e-2	2.15625e-4	kBq U-235 eq
Destruição do ozônio	3.59266e-11	1.84330e-13	2.34491e-9	1.84330e-13	kg CFC11 eq
Eco toxicidade, água doce	2.65815e-1	1.29910e-2	3.82426e-1	1.29910e-2	CTUe
Toxicidade humana, câncer	1.47766e-9	4.92000e-10	1.04267e-8	4.92000e-10	CTUh
Eutrofização marinha	2.00530e-3	2.16721e-4	7.54317e-4	2.16721e-4	kg N eq
Eutrofização, terrestre	2.80633e-3	2.41488e-3	8.18517e-3	2.41488e-3	mol N eq
Acidificação	6.31577e-4	4.68065e-4	3.99318e-3	4.68065e-4	mol H+ eq
Formação fotoquímica de ozônio – saúde humana	6.84707e-5	4.13018e-4	5.60343e-3	4.13018e-4	kg NMVOC eq

Quadro 8: Comparação dos resultados do AICV para as variantes do projeto de sistema de produto (continuação)

Indicador	Cultivo da cana	Transporte da cana	Produção de etanol	Transporte de etanol	Unidade
Matéria particular	4.86557e-9	2.51044e-9	4.31065e-8	2.51044e-9	disease inc.
Eutrofização, água doce	1.56441e-5	4.82532e-7	4.41246e-4	4.82532e-7	kg P eq
Alterações Climáticas	2.07715e-1	7.65839e-2	1.29678e+0	7.65839e-2	kg CO ₂ eq
Uso da terra	1.47718e+1	7.21686e-1	1.75906e+0	7.21686e-1	Pt
Uso de água	1.57499e-2	-1.62203e-2	3.16267e-2	1.60148e-4	m ³ depriv.
Uso de recursos, minerais e metais	9.90939e-9	4.43371e-9	4.49728e-6	4.43371e-9	kg Sb eq
Uso de recursos, fósseis	2.61173e-1	1.04057e+0	4.30852e+1	1.04057e+0	MJ
Mudanças climáticas –					
Uso da terra e mudança no uso da terra	1.49428e-1	5.51236e-4	5.31494e-5	5.51236e-4	kg CO ₂ eq
Mudança climática-fóssil	5.82758e-2	7.58975e-2	1.29549e+0	7.58975e-2	kg CO ₂ eq
Mudanças climáticas-biogênicas	1.19096e-5	1.35169e-4	1.23947e-3	1.35169e-4	kg CO ₂ eq

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

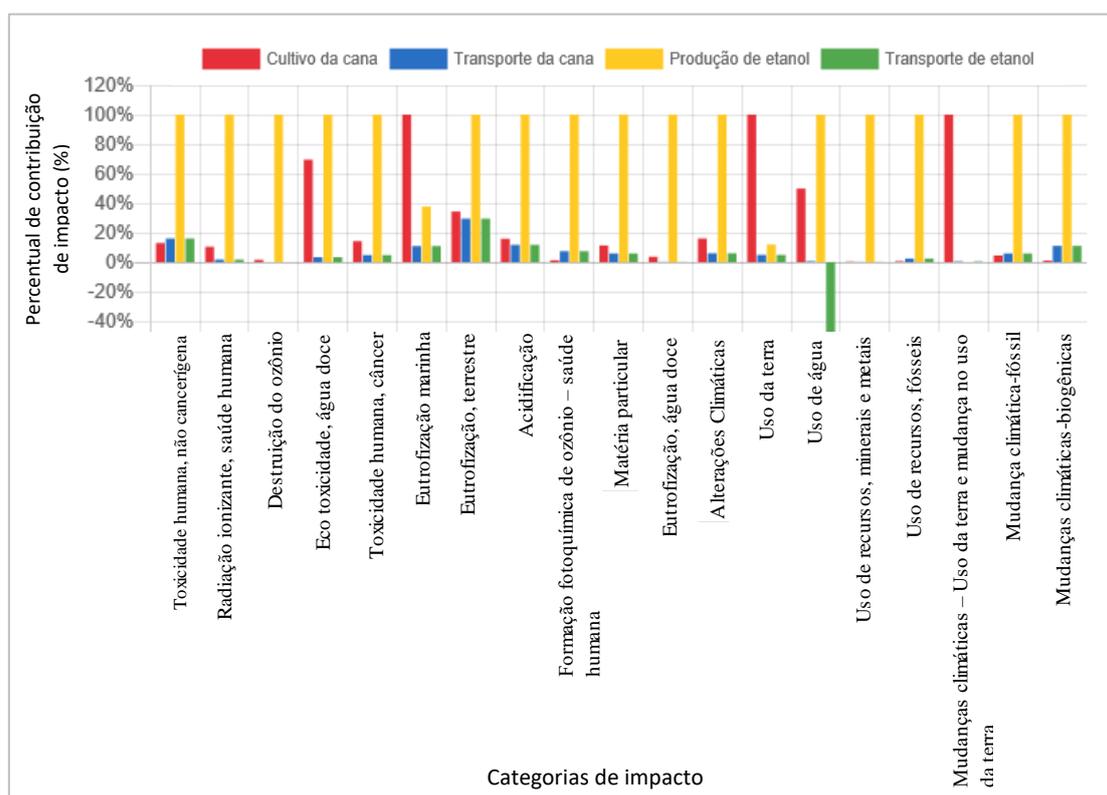
Os resultados apresentados no Quadro 8 referem-se a diferentes indicadores de impacto ambiental associados à produção de etanol a partir do cultivo de cana-de-açúcar e seu transporte. Cada linha indica uma categoria de impacto e cada coluna representa uma etapa diferente da cadeia de suprimentos analisada. As unidades de medida variam de acordo com o indicador da categoria de impacto.

Esses dados são importantes para avaliar o impacto ambiental da produção de etanol e identificar áreas em que é possível reduzir o impacto ambiental da produção de biocombustíveis (GONÇALVES & BONOMI, 2010).

Para comparar os resultados das categorias de impactos, apresentadas no Quadro 8, o modelo de normalização e ponderação definidos para o projeto foi o *PEF standard weighting and normalization factors*, disponibilizado pelo método de avaliação de impacto. As contribuições de impacto podem ser visualizadas na Figura 32. O gráfico

mostra os resultados relativos dos indicadores das respectivas variantes do projeto. Para cada indicador, o resultado máximo é definido como 100% e os resultados das outras variantes são exibidos em relação a esse resultado.

Figura 32: Comparação dos impactos ambientais pelo método *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

A Figura 32 apresenta a análise de impacto ambiental da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, com foco nas categorias de impacto que mais contribuem para o impacto ambiental, saúde humana e uso de recursos. De acordo com a figura, no cultivo da cana-de-açúcar, as categorias de impacto que possuem maior contribuição são ecotoxicidade (água doce), com 70% de contribuição de impacto; eutrofização marinha, uso da terra, e mudanças climáticas pelo uso da terra, com 100% de contribuição; e uso da água com 50% de contribuição de impacto. Em comparação aos demais processos da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, a produção de etanol possui maior contribuição de impacto, com exceção da eutrofização marinha e da ocupação da terra, com 38% e 12% de contribuição, respectivamente. Em relação aos transportes, a maior contribuição se refere à eutrofização terrestre, com 30% de contribuição, seguido pela toxicidade

humana (não cancerígena) com 16%, acidificação com 12%, fatores de mudanças climáticas e eutrofização marinha, com 11% de contribuição de impacto, formação de ozônio fotoquímico com 7%, toxicidade humana (cancerígena) com 5% e ecotoxicidade (água doce) com 3% de contribuição de impacto.

Nota-se que as contribuições mais relevantes no que se refere aos impactos à saúde humana e aos danos ao ecossistema se derivam do processo de produção de etanol, como mostram os resultados. Isso sugere que a produção de etanol é uma atividade particularmente importante para avaliar quando se busca reduzir os impactos ambientais e à saúde humana na cadeia da cana-de-açúcar.

4.3 Comparação com estudos anteriores

Nesta sessão é realizada uma comparação das contribuições desse estudo com outras abordagens envolvendo o método de avaliação de ciclo de vida na cadeia da cana-de-açúcar.

4.3.1 Cultivo da cana-de-açúcar

Os resultados obtidos nesse estudo demonstram que a etapa de cultivo da cana-de-açúcar possui maior relevância nos fatores de impactos relacionados à ecotoxicidade (água doce), eutrofização marinha, uso da terra, mudanças climáticas pelo uso da terra e uso da água. De maneira semelhante, no estudo de Tsiropoulos *et al.* (2014), os resultados apontaram que no cultivo da cana-de-açúcar, as categorias de impacto que contribuem significativamente para os danos ao ecossistema são a ocupação da terra, a ecotoxicidade terrestre, a acidificação e a eutrofização. Segundo os autores, esses impactos estão relacionados com o uso de pesticidas e agrotóxicos usados na produção de cana-de-açúcar.

Outro estudo que corrobora com os resultados obtidos é o de Prasara-A *et al.* (2019). Com base nos resultados deste estudo, o cultivo da cana-de-açúcar gera o maior impacto na ecotoxicidade da água doce, na eutrofização da água doce e na ecotoxicidade marinha a partir da aplicação de agroquímicos. Segundo os autores, os principais fatores que influenciam os impactos ambientais e na saúde humana causados pelo cultivo da cana-de-açúcar são as práticas de cultivo que envolvem o uso excessivo de fertilizantes

e pesticidas. Os resultados apontaram que o dióxido de carbono, o óxido nitroso, o metano e o fósforo são as principais substâncias que contribuem para o impacto nesta categoria. Outra prática que contribui com esses impactos é a queima dos resíduos da cana-de-açúcar. Em complemento a isso, Ometto, Hauschild e Roma (2009), apontaram em seu estudo que a colheita é o processo que mais contribui para o aquecimento global, em comparação com o preparo do solo, plantio da cana, aplicação de produtos químicos, produção de etanol, geração de energia elétrica, distribuição do etanol e uso do etanol como combustível. Para a formação fotoquímica de ozônio, a colheita também é a atividade com as maiores contribuições. Isso se dá devido à queima realizada na colheita da cana-de-açúcar e às emissões provenientes do uso de combustível diesel.

No estudo de García *et al.* (2016), tem-se também a etapa de cultivo da cana como a etapa que apresenta a maior contribuição para a Pegada de Carbono (FC), em comparação aos processos de transporte da cana e produção de açúcar, tendo uma contribuição de 59% a 74% do CO₂ total da cadeia analisada. Segundo os autores, o uso de fertilizantes são os principais contribuintes para as emissões de GEE, com cerca de 40% a 50% de participação.

Em contradição ao estudo de García *et al.* (2016), Gunawan *et al.* (2019) concluíram que o principal contribuinte para as emissões de GEE é a produção de açúcar (fase industrial), comparando com o cultivo da cana e o transporte da cana para a usina de processamento. No cultivo da cana-de-açúcar, os autores concluíram que o uso de fertilizantes é o maior contribuinte para os impactos ambientais, nessa etapa da cadeia, com 73,48% de contribuição (0,29 toneladas de CO₂/tonelada de açúcar produzido), seguido pelo uso de agrotóxicos (22,5%) e a mecanização (4%).

4.3.2 Transporte

Em relação às etapas de transporte, assim como os resultados obtidos nessa pesquisa, os estudos de Ometto, Hauschild e Roma (2009), Tsiropoulos *et al.* (2014), García *et al.* (2016), Gunawan *et al.* (2019) e Prasara-A *et al.* (2019), indicaram a etapa de transporte como a fase da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar com menor fator de contribuição para os impactos ambientais. Por exemplo, no estudo de García *et al.* (2016), essa etapa representa apenas entre 10 e 13% do total das emissões de GEE presentes na cadeia. Resultado semelhante ao obtido nesse estudo, que constatou um

percentual de cerca de 11% para fatores que contribuem com as mudanças climáticas. Vale ressaltar que poucos estudos incluem o transporte do etanol para o centro de distribuição, como é o caso desse estudo e o de Ometto, Hauschild e Roma (2009). Os estudos mencionados anteriormente se limitam a essa etapa apenas como o transporte da cana até a usina de processamento.

Comparando com o estudo de Ometto, Hauschild e Roma (2009), que também se estende para a distribuição do etanol, tem-se como maiores categorias de impacto os fatores que contribuem para as mudanças climáticas e aquecimento global (0,53 kg de CO₂eq/10.000 km), formação de ozônio fotoquímico (0,0010 kg de C₂H₄eq/10.000 km), acidificação (0,0073 kg de SO₂eq/10.000 km), e toxicidade humana (165003,38 m³/10.000 km para o ar e 1,11 m³/10.000 km para a água). De maneira semelhante, nesse estudo tem-se a eutrofização terrestre, toxicidade humana, acidificação, fatores de mudanças climáticas e eutrofização marinha, formação de ozônio fotoquímico, e ecotoxicidade (água doce) como as principais categorias de impacto para o processo de transporte, como é apresentado na seção 4.2.4.

4.3.3 Produção de etanol

Na etapa industrial, os resultados de Garcia *et al.* (2016) apontam essa fase como o segundo maior contribuinte para as emissões de GEE, tendo uma participação que varia entre 14% e 30% de contribuição. Segundo os autores, isso se dá pelo uso de óleo combustível complementar para geração de calor e eletricidade, seguido das emissões de CH₄ e N₂O provenientes da combustão do bagaço nas caldeiras.

No estudo de Prasara-A *et al.* (2019), os resultados mostram que a produção de etanol impacta principalmente no uso de recursos e na saúde humana. O impacto sobre o uso de recursos vem principalmente do carvão, gás natural e petróleo usados na produção de fertilizantes químicos e agroquímicos usados no cultivo da cana-de-açúcar. Além disso, os autores destacam que o impacto na saúde humana é causado pelo dióxido de carbono, óxido nitroso, manganês, óxidos de nitrogênio, partículas e dióxido de enxofre também emitidos pela produção de fertilizantes químicos e pela queima de resíduos de cana no cultivo de cana-de-açúcar.

Já na análise de Gunawan *et al.* (2019), a fase industrial possui maior contribuição para as emissões de GEE. Conforme os resultados desse estudo, a produção de açúcar

possui uma contribuição de 96,4% (10,728 toneladas de CO₂/tonelada de açúcar produzido), em comparação aos demais processos da cadeia analisada.

Os resultados deste estudo indicam que o processo de produção de etanol possui maior contribuição para as seguintes categorias de impactos analisadas: uso de recursos fósseis (94,84%), acidificação (71,81%), mudanças climáticas (78,18%), ecotoxicidade de água doce (56,68%), eutrofização marinha (62,80%), eutrofização terrestre (51,74%), e destruição da camada de ozônio (98,53%).

Uma diferença observada nos resultados desse estudo em comparação aos resultados do estudo de Prasara-A *et al.* (2019) é que os autores indicam o cultivo da cana-de-açúcar como o principal contribuinte de impacto para todos os produtos à base de cana-de-açúcar estudados (açúcar, etanol e eletricidade). Isso pode ocorrer devido a queima de resíduos de cana e durante a colheita, como é apontado por Ometto, Hauschild e Roma (2009), e o uso excessivo de fertilizantes químicos e agrotóxicos que buscam melhorar a produtividade, como é explicado pelos autores. Em exemplo, García *et al.* (2016) destacam que no caso do Brasil, os fertilizantes são aplicados em quantidades menores e possui maior produtividade no cultivo da cana. Outro fator de destaque é a região de estudo que pode possuir características diferentes e demandar diferentes estratégias de cultivo. Outra característica destacada pelos autores é o uso do bagaço da cana na geração de energia, o que melhora o desempenho ambiental da biorrefinaria na etapa industrial.

Além disso, García *et al.* (2016) explicam que outras das razões por trás dessa diferença é que algumas das emissões no Brasil provenientes da queima são atribuídas ao processo de produção de etanol, e não ao cultivo da cana-de-açúcar. Outra razão é que, no Brasil, a cana é queimada para colheita manual em 65% da área total a ser colhida, enquanto em outras regiões, essa queima pode chegar entre 89% e 95%, como é o caso do estudo de García *et al.* (2016) realizado no México. Isso faz com que o processo de cultivo no Brasil apresente menor contribuição de impacto para essa cultura, afirmam os autores.

4.4 Considerações parciais

Com base na análise realizada, nota-se que os principais contribuintes para os impactos ambientais e para a saúde humana na etapa de cultivo da cana-de-açúcar é

proveniente do uso excessivo de fertilizantes, pesticidas e agrotóxicos, bem como a queima da realizada durante a colheita. Já na produção de etanol, as principais contribuições de impacto vêm do uso de óleo cru, gás natural e carvão (recursos fósseis), dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio (acidificação), dióxido de carbono e metano (mudanças climáticas), antimônio, cromo, cobre, zinco, arsênico e vanádio (ecotoxicidade de água doce), fosfato (eutrofização marinha), óxidos de nitrogênio e amônia (eutrofização terrestre), óxidos de nitrogênio, etileno e compostos orgânicos voláteis não metânicos (destruição da camada de ozônio).

Segundo Ometto, Hauschild e Roma (2009), embora o etanol seja considerado um combustível renovável por ser proveniente da biomassa (cana-de-açúcar), ele utiliza uma alta quantidade e diversidade de recursos não renováveis ao longo de seu ciclo de vida. A entrada de recursos renováveis também é alta, principalmente devido ao consumo de água na fase industrial, devido ao processo de lavagem da cana-de-açúcar. Outro ponto de foco é a quantidade de emissões para a atmosfera e a diversidade das substâncias emitidas nessa etapa da cadeia, destacam os autores.

Para tentar amenizar isso, Prasara-A *et al.* (2019) sugeriram que sejam feitas melhorias nas práticas de cultivo e colheita da cana-de-açúcar. Pela visão de Gunawan *et al.* (2019), algumas opções para a melhoria do desempenho ambiental seria o uso otimizado de fertilizantes e pesticidas, a concentração de usinas de sucroalcooleiras para reduzir os percursos de transporte, e a implementação de projetos de cogeração de energia.

García *et al.* (2016) sugerem que a queima da cana-de-açúcar pode ser substituída por um método conhecido como colheita verde, onde toda ou parte da palha é deixada no solo. Segundo os autores, além de reduzir as emissões de GEE (Capaz *et al.*, 2013, Figueiredo e Scala, 2011, De Oliveira Bordonal *et al.*, 2012), esse método de colheita previne a liberação de gases e partículas poluentes, melhorando as condições de saúde das populações próximas (Galdos *et al.*, 2013); diminuindo erosões; aumentando a fertilidade da terra; reduzindo a evaporação do solo, e melhorando a eficiência do uso da água, de acordo com Leal *et al.* (2013) e Garcia *et al.* (2016).

Além disso, García *et al.* (2016) destacam que na fase industrial, é importante eliminar a utilização de combustíveis fósseis e promover a cogeração de energia de maneira eficiente. Além disso, os autores citam que é preciso buscar técnicas para

melhorar a produtividade da cana-de-açúcar, tornar o uso de fertilizantes mais eficiente, minimizar a queima da cana e desenvolver uma cogeração eficiente nas usinas.

Em relação ao transporte, Mele *et al.* (2011), Tieppo *et al.* (2014) e García *et al.* (2016) sugere que para reduzir as emissões de GEE, devem ser feitas melhorias nas estradas, o fomento do uso de trens para o transporte da cana-de-açúcar, bem como a reforma de caminhões, carregadeiras e colheitadeiras.

5 Conclusões

Esse trabalho buscou identificar as etapas da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar com maior impacto ao ecossistema, à saúde humana e em relação ao uso de recursos, na microrregião de Anápolis, em Goiás. A cadeia analisada envolve as etapas de cultivo da cana-de-açúcar, o transporte da cana até a usina de processamento, a produção de etanol e o transporte do etanol para o centro de distribuição.

Comparando os resultados obtidos nessa pesquisa com alguns estudos similares, foram observadas semelhanças e discrepâncias em relação às etapas da cadeia que mais contribuem com os impactos ambientais. Porém, essas diferenças podem ser explicadas pelas características da região de cultivo e pelas práticas adotadas que buscam melhor produtividade, como é o caso de alguns países como México e Tailândia que compensam isso com o excesso de fertilizantes, pesticidas e agrotóxicos. Outro ponto destacado é o uso da queima da cana no processo de colheita manual que pode ser uma prática mais comumente usada em alguns países. Para a região da cadeia em análise, a colheita mecanizada é o procedimento predominante, o que reduz significativamente as emissões ambientais e os danos à saúde humana nessa etapa da cadeia.

Foram observados também, em comparação a outros estudos, que existem pontos em comum sobre os *inputs* que possuem maior contribuição para as categorias de impacto analisadas. No cultivo da cana-de-açúcar, notou-se que os principais contribuintes são os fertilizantes, pesticidas e agrotóxicos, e a prática de queima na colheita. Já na etapa industrial, essas contribuições partem do uso de óleo cru, gás natural e carvão, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e metano, antimônio, cromo, cobre, zinco, arsênico e vanádio, fosfato, amônia, etileno, e compostos orgânicos voláteis não metânicos. Por fim, as fases de transporte, tanto da cana-de-açúcar como do etanol para o centro de distribuição, possuem os menores percentuais de participação para os impactos ambientais, destacando o uso do óleo cru e gás natural, com maior fator de contribuição para as emissões de GEE, nessa etapa.

Acerca das atividades realizadas para o desenvolvimento desse estudo, conclui-se que a cana-de-açúcar possui grande relevância e representatividade para a economia brasileira e para o Estado de Goiás. É notável, na revisão de literatura, que diversos autores abordam essa cultura em seus estudos, visando contribuir com a melhoria do setor canavieiro. Apesar disso, foi identificada uma lacuna na literatura sobre a abordagem

desses estudos. Poucos esforços científicos sistemáticos foram feitos para analisar os impactos na cadeia da cana-de-açúcar e avaliar o ciclo de vida dessa cultura no Brasil. O que torna relevante a contribuição dessa pesquisa para o estado da arte. Além disso, esse trabalho também contribui com as metas de descarbonização assumidas pelo Brasil na COP 21, e com os ODS da ONU para 2030, de crescimento econômico e desenvolvimento sustentável.

Com isso, essa proposta busca contribuir com a melhoria da eficiência da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar, apontando os principais contribuintes para os impactos ambientais e para a saúde humana presentes na cadeia da cana. Apesar do estudo se delimitar à microrregião de Anápolis, em Goiás, o modelo ACV elaborado pode ser utilizado para avaliar outras regiões brasileiras, adaptando os *inputs* e *outputs* conforme a região a ser analisada.

Por fim, com a realização desse estudo, espera-se fornecer aos produtores regionais uma análise que contribua com a tomada de decisão acerca das práticas de produção que podem aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais, sociais e operacionais na cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Outros estudos sobre a cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar podem se estender e incluir na avaliação de ciclo de vida outras etapas de produção como a de açúcar e a cogeração de energia a partir do bagaço da cana. Outra possibilidade é incluir outros aspectos sociais, além dos impactos à saúde humana. Além disso, outra possibilidade é incluir o método de Análise Envoltória de Dados (DEA), estendendo o estudo para uma abordagem de ecoeficiência da cadeia de suprimentos da cana-de-açúcar.

Referências

- Abdali, H., Sahebi, H., Pishvae, M. (2021) The water-energy-food-land nexus at the sugarcane-to-bioenergy supply chain: A sustainable network design model. *Computers e Chemical Engineering*. Volume 145, 2021, 107199, ISSN 0098-1354. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107199>.
- Adedoyin, F.F., Gumede, M.I., Bekun, F.V., Etokakpan, M.U., Balsalobre-Iorente D. (2020) Modelling coal rent, economic growth and CO2 emissions: Does regulatory quality matter in BRICS economies? *Science of The Total Environment*, Volume 710, 2020, 136284, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136284>.
- Akbarian-Saravi, N., Mobini, M., Rabbani, M. (2020) Development of a comprehensive decision support tool for strategic and tactical planning of a sustainable bioethanol supply chain: Real case study, discussions and policy implications. *Journal of Cleaner Production*. Volume 244, 2020, 118871, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118871>.
- Alkahtani, M., Omair, M., Khalid, Q.S., Hussain, G., Sarkar, B. (2020) An Agricultural Products Supply Chain Management to Optimize Resources and Carbon Emission Considering Variable Production Rate: Case of Nonperishable Corps. *Processes* 2020, 8, 1505. <https://doi.org/10.3390/pr8111505>.
- Amin, G. R., Toloo, M., Sohrabi, B. (2006) An improved MCDM DEA model for technology selection. *International Journal of Production Research*, 44:13, 2681-2686, 2006. <https://doi.org/10.1080/00207540500472754>.
- Aparicio, J., Ruiz, J. L., Sirvent, I. (2007) Closest targets and minimum distance to the Pareto-efficient frontier in DEA. *J Prod Anal* 28, 209–218 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11123-007-0039-5>.
- Arabatzis, G., Petridis, K., Galatsidas, S., Ioannou, K. (2013) A demand scenario based fuelwood supply chain: A conceptual model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 25, 2013, Pages 687-697, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.030>.
- Agri-footprint. Agri-footprint 6 Methodology Report. Part 2: Description of Data. Gouda, NL, 15-8-2022, version 2. Disponível em: <https://blonksustainability.nl/tools/agri-footprint>.
- Amlinger, F., Pollak, M., & Favoino, E. (2004). Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers.
- Arrigoni, M. B. Impacto das pesquisas na produção de carne bovina. In: Simpósio de nutrição de ruminantes, 2, 2005, Botucatu. Anais... Botucatu: Unesp, 2005. 35 – 40 p.
- Aegro. Adubo para cana: principais recomendações para alta produtividade. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/adubo-para->

cana/#:~:text=Por%20isso%2C%20em%20geral%20C3%A9,planta%2C%20independente%20da%20produtividade%20esperada. Acesso em: 08 de abril de 2023.

Barros, C. P., Wanke, P., Dumbo, S., Manso, J. P. (2017) Efficiency in angolan hydroelectric power station: A two-stage virtual frontier dynamic DEA and simplex regression approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 78, 2017, Pages 588-596, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.100>.

Balanco Energético Nacional (BEN). Balanço Energético Nacional 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

Balanço Energético Nacional (BEN). Relatório Síntese 2022. Ano base 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

Bravo-Ureta, B. E., Solís, D., Moreira López, V. H., Maripani, J. F., Thiam, A., Rivas, T. (2007) Technical efficiency in farming: a meta-regression analysis. *J Prod Anal* 27, 57–72 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11123-006-0025-3>.

Blengini, G. A., Busto, M. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 3, 2009, Pages 1512-1522, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.006>.

Bordonal, R.d.O., Carvalho, J.L.N., Lal, R. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 13 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.

Blonk Agri-footprint BV. (2017) Methodology of the EC feed database.

Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur AB.

Campbell, J.E., Lobell, D.B., Field, C.B., 2009. Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol. *Science* 324, 1055-1057.

Cherubini, F., Stromman, A.H., 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresour. Technol.* 102, 437-451.

Cherubini, F., Bird, N.D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch, S., 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations. *Resour. Conserv. Recycl.* 53, 434-447.

Cauchik Miguel, P. A. Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., Da Silva, D. R. S. (2020) Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy Conversion and Management*. Volume 222, 2020, 113232, ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232>.

Carlucci, F.V., Lemos, S.V., Salgado Junior, A.P., Rebehy, P. C. P. W. (2021) Environmental, field and impurity factors to increase the agricultural performance of Brazilian and Australian sugarcane mills. *Clean Techn Environ Policy* 23, 2083-2100 (2021). <https://doi-org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10098-021-02105-z>.

Carvajal, J., Sarache, W., Costa, Y. (2019) Addressing a robust decision in the sugarcane supply chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 157, 2019, Pages 77-89, ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.030>.

Chavéz, M. M. M., Sarache, W., Costa, Y., Soto, J. (2020) Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain. *Journal of Cleaner Production*. Volume 276, 2020, 123305, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123305>.

Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. (1978) Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*. Volume 2, Issue 6, 1978, Pages 429-444, ISSN 0377-2217. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).

Chen, C., Yan, H. (2011) Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*. Volume 213, Issue 1, 2011, Pages 147-155, ISSN 0377-2217. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.010>.

Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., . . . Ribeiro, S. (2011). Bioenergy. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, S. Kadner, T. Zwickel, *et al.* (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 209-332). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139151153.006.

Chum, H. L., Warner, E., Seabra, J. E., Macedo, I. C. (2014) A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 8: 205-223. <https://doi.org/10.1002/bbb.1448>.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. v.7 - safra 2019/20 - n.3 - Terceiro levantamento. Brasília, p. 1-62, dezembro, 2020. ISSN 2318-7921. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Conab realiza pesquisa de campo sobre cana-de-açúcar. Julho de 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4688-conab-realiza-pesquisa-de-campo-sobre-cana-de-acucar>. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Análise mensal: cana-de-açúcar. Abril/ maio de 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). PIB do Agronegócio. CNA e CEPEA. 13 de setembro de 2021. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/publicacoes/pib-do-agronegocio-avanca-no-trimestre-e-acumula-alta-de-9-81-no-primeiro-semester-de-2021>. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Valor Bruto da Produção – VBP. 16 de novembro de 2021. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/publicacoes/vbp-e-projetado-em-r-1-20-trilhao-em-2021>. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

Çinar, Y., Atici, K., Menten, C. (2021). Evaluating Technical Efficiency of Turkish Sugar Production in Pre and Post Privatization Periods. *Sosyoekonomi*, 29 (47), 59-78. DOI: 10.17233/sosyoekonomi.2021.01.03.

Carvalho, J. L. N., Cerri, C. C., Cerri, C. E. P., & Feigl, B. J. (2013). Greenhouse gas balance in ethanol production from sugarcane. *Global Change Biology Bioenergy*, 5(3), 372-390.

Cana online. Não é necessário utilizar mais de 100 litros de calda por hectare na aplicação de herbicidas em cana. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/nao-e-necessario-utilizar-mais-de-100-litros-de-calda-por-hectare-na-aplicacao-de-herbicidas-em-cana.html#:~:text=Atualmente%2C%20na%20cultura%20da%20cana,150%20a%20300%20l%20Fha>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

Dias, A.C., Cavalett, O., Filoso, S., Seabra, J.E., Bonomi, A. (2012). Environmental and Land-Use Impacts of Brazilian Sugarcane Ethanol. *Energy and Fuels*, 26(11), 6425-6435. Dias, M. O. S., et al. Avaliação de ciclo de vida da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar no Brasil. In: Anais do VI Congresso Brasileiro de Agroinformática, Angra dos Reis. 2012.

Deepa, N., M, D. R. V. P., N, S. K., Srinivasan, K., Chang, C.-Y., Bashir, A. K. (2019) An Efficient Ensemble VTOPES Multi-Criteria Decision-Making Model for Sustainable Sugarcane Farms. *Sustainability* 2019, 11, 4288. <https://doi.org/10.3390/su11164288>.

Demczuk, A., Padula, A. D. (2017) Using system dynamics modeling to evaluate the feasibility of ethanol supply chain in Brazil: The role of sugarcane yield, gasoline prices and sales tax rates. *Biomass and Bioenergy*. Volume 97, 2017, Pages 186-211, ISSN 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.021>.

De Figueiredo, E.B., Panosso, A.R., Romão, R., La Scala Jr., N., 2010. Research greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. *Carbon Balance Manag.* 5, 3-7.

Dewulf, Jeroen, Herman R. Van Langenhove, J. Mulder, M.M.D. Van den Berg, H. van der Kooi and Jakob de Swaan Arons. "Illustrations towards quantifying the sustainability of technology." *Green Chemistry* 2 (2000): 108-114. <https://doi.org/10.1039/B000015I>.

Dresch, A., Lacerda, D. P., Antunes, J. A. V. (2015). Design Science Research. In: *Design Science Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3_4.

Duarte, A., Salgado Jr, A. P., Lemos, S. V., Souza Jr, M. A. A. de., Antunes, F. De A. (2019) Proposal of operating best practices that contribute to the technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol mills. *Journal of Cleaner Production*. Volume 214, 2019, Pages 173-184, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.204>.

Dunkelberg, E., Finkbeiner, M., Hirschl, B., 2014. Sugarcane ethanol production in Malawi: measures to optimize the carbon footprint and to avoid indirect emissions. *Biomass Bioenergy* 71, 37-45.

Dewulf JP, Van Langenhove HR. Quantitative assessment of solid waste treatment systems in the industrial ecology perspective by exergy analysis. *Environ Sci Technol*. 2002 Mar 1;36(5):1130-5. doi: 10.1021/es010140o. PMID: 11918001.

Elkington, J. *Cannibals with forks: The Triple Bottom Line of 21st century business*. Capstone Publishing, Oxford, 1997.

Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE). Açúcar: cenário mundial e situação de produção no Brasil e no nordeste brasileiro. Caderno Setorial ETENE. Ano 6, nº 162, maio de 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/765/3/2021_CDS_162.pdf. Acesso em: 28 de junho de 2022.

European Commission. Renewable energy progress report. 2015.

Embrapa. Correção e adubação. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao#:~:text=Doses%20entre%2080%20e%20150,planta%20como%20para%20as%20soqueiras>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

Embrapa. Nematóides. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/fitossanidade/nematoides>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

FAOSTAT. (2000). Technical Conversion Factors for Agricultural Commodities.

FAO. (2016). FAOstat crop statistics. Retrieved from faostat.fao.org/

Fang, K., Heijungs, R., de Snoo, G.R., 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family. *Ecol. Indic.* 36, 508-518.

Federação da Agricultura e Pecuária de Goiás (FAEG). Incentivo à bioeletricidade pode ajudar o Brasil a superar crise hídrica. Disponível em: <https://sistemafaeg.com.br/faeg/noticias/bem-alem-da-calma/incentivo-a-bioeletricidade-pode-ajudar-o-brasil-a-superar-crise-hidrica>. Acesso em: 18 de agosto de 2022.

Ferreira, L. C. G; Sobrinho, F. L. A. (2019). A produção canavieira e o mito do progresso: agronegócio e agricultura familiar na microrregião Ceres, Goiás. *PatryTer – Revista Latinoamericana e Caribenha de Geografia e Humanidades*, 2 (1), 61-77. DOI: <https://doi.org/10.26512/patryter.v2i3.15648>.

Figueiredo, E.B., & Scala, N.L. (2011). Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141, 77-85.

García, C.A., Fuentes, A., Hennecke, A., Riegelhaupt, E., Manzini, F., Masera, O., 2011. Life-cycle and greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy* 88 (6), 2088-2097.

García, C. A., García-Treviño, E. S., Aguilar-Rivera, N., Armendáriz, C. Carbon footprint of sugar production in Mexico. *Journal of Cleaner Production*. Volume 112, Part 4, 2016, Pages 2632-2641, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.113>.

Garcia, J. C. C., & Von Sperling, E. (2010). Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 15(3), 217–222. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000300003>.

Gauss, L., Lacerda, D. P., Cauchick Miguel, P. A. (2021) Module-based product family design: systematic literature review and meta-synthesis. *J Intell Manuf* 32, 265–312 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01572-3>.

Gauthier, C. Measuring Corporate Social and Environmental Performance: The Extended Life-Cycle Assessment. *J Bus Ethics* 59, 199–206 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10551-005-3416-x>.

Gan, G. Y., Lee, H. S. (2019) An alternative MILP-DEA model to choose efficient unit without explicit inputs. *Ann Oper Res* 278, 379–391 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2472-9>.

Gilani, H., Sahebi, H., Oliveira F. (2020) Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model. *Applied Energy*, Volume 278, 2020, 115653, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115653>.

Gonçalves, F., Perna, R., Lopes, E., Maciel, R., Tovar, L., Lopes, M. (2021) Strategies to improve the environmental efficiency and the profitability of sugarcane mills. *Biomass and Bioenergy*, 148, 2021, 106052. ISSN 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106052>.

Goldemberg, J., *et al.* (2018). A contribuição da bioenergia para a matriz energética brasileira. *Estudos Avançados*, 32(93), 7-22.

Gonçalves, R. C., & Bonomi, A. (2010). Indicators of the life cycle assessment for biodiesel production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2717-2725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.010>.

Grigoroudis, E., Petridis, K., Arabatzis, G. (2014) RDEA: A recursive DEA based algorithm for the optimal design of biomass supply chain networks. *Renewable Energy*, 71, 2014. Pages 113-122, ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.001>.

Gunawan, Bantacut, T., Romli, M., Noor, E. (2019) Life Cycle Assessment of Cane-sugar in Indonesian Sugar Mill: Energy Use and GHG Emissions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 536 012059. DOI 10.1088/1757-899X/536/1/012059.

GreenDelta. Life Cycle Assessment with openLCA. GreenDelta GmbH Berlin, Müllerstrasse 135, 13349 Berlin, Germany. Disponível em: https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/1503_GreenDelta_openLCA_Training-info-for-April-9-10-2015.pdf. Acesso em: 27 de abril de 2023.

Hatami-Marbini, A., Tavana, M., Agrell, P. J. Lotfi, F. H., Beigi, Z. G. (2015) A common-weights DEA model for centralized resource reduction and target setting. *Computers e Industrial Engineering*, Volume 79, 2015, Pages 195-203, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.024>.

Higgins, A. (2006) Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research* 170(3):987-1000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.055>.

Hoffmann, B. S., Morais, J. S., Teodoro, P. F. Life cycle assessment of innovative circular business models for modern cloth diapers. *Journal of Cleaner Production*. Volume 249, 2020, 119364, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119364>.

Hulme, M. 1.5 °C and climate research after the Paris Agreement. *Nature Clim Change* 6, 222–224 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate2939>.

Hussain, A., Arif, S. M., Aslam, M. Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017, Pages 12-28. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>.

Instituto Mauro Borges (IMB). Sobre Goiás: Goiás - Visão Geral. Disponível em: https://www.imb.go.gov.br/index.php?option=com_contentview=articleid=79eItemid=458. Acesso em: 18 de agosto de 2022.

Instituto Mauro Borges (IMB). Produto Interno Bruto do Estado de Goiás 2010 – 2018 / Luiz Batista Alves – Goiânia: Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos, 2021. Disponível em:

<https://www.imb.go.gov.br/files/docs/publicacoes/pib-goias/pibgo2019.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2022.

Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE). Mapas das Microrregiões do Estado de Goiás. 2018. Disponível em: https://www.imb.go.gov.br/files/docs/mapas/microrregioes-ibge/microrregioes_do_estado_de_goiás_ibge.jpg. Acesso em: 20 de agosto de 2022.

Instituto De Economia Agrícola (IEA). Alta na Produção e Exportação de Açúcar marca a Safra 2020/21 de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

IFA. (2015). Statistical information. Retrieved from <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/STATISTICS/Production-and-trade>.

IPCC. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

ISO. (2019). ISO 14067:2018 - Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication (2nd ed.). International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization (2006) Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. ISO 14040:2006, 2ª edn. ISO, Genebra.

ISO (2006) ISO 14044: Gestão ambiental–Avaliação do ciclo de vida–Requisitos e diretrizes. Organização Internacional de Normalização, Genebra.

Jalali, S., Wohlin, C. (2012) Systematic literature studies: Database searches vs. backward snowballing. Proceedings of the 2012 ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, 2012, pp. 29-38, doi: 10.1145/2372251.2372257.

Jarumaneeroj, P., Dusadeerungsikul, P. O., Chotivanich, T., Akkerman, R. (2021) A multi-objective modeling approach to harvesting resource scheduling: Decision support for a more sustainable Thai sugar industry. *Computers e Industrial Engineering*. Volume 162, 2021, 107694, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107694>.

Jonker, J. G. G., Junginger, H. M., Verstegen, J. A., Lin, T., Rodríguez, L. F., Ting, K. C., Faaij, A. P. C, Hilst, F. Van Der. (2016) Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. *Applied Energy*. Volume 173, 2016, Pages 494-510, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.069>.

Jonker, J. G., Junginger, M., Posada, J., Ioiart, C.S., Faaij, A.P., Van Der Hilst, F. (2019) Economic performance and GHG emission intensity of sugarcane-and eucalyptus-derived

biofuels and biobased chemicals in Brazil. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 13: 950-977. <https://doi-org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bbb.1986>.

Joshi, S., Singh, R. K., Sharma, M. (2020) Sustainable Agri-food Supply Chain Practices: Few Empirical Evidences from a Developing Economy. *Global Business Review*. March 2020. <https://doi-org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1177/0972150920907014>.

Kadwa, M., Bezuidenhout, C. N. (2015) Modelling sugarcane supply consistency at a sugar mill. *Computers and Electronics in Agriculture* 111:107-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xompag.2014.12.019>.

Keyes, S., Tyedmers, P., Beazley, K. Evaluating the environmental impacts of conventional and organic apple production in Nova Scotia, Canada, through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. Volume 104, 2015, Pages 40-51, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.037>.

Khatiwada, D., Leduc, S., Silveira, S. MCCALLUM, I. (2016) Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy*. Volume 85, 2016, Pages 371-386, ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>.

Klenk, I., Landquist, B., de Imana, O.R., 2012. The product carbon footprint of EU beet sugar (part I). *Sugar Ind. Zuckerind.* 137 (3), 169-177.

Kadwa, M., Bezuidenhout, C. N. (2015) Modelling sugarcane supply consistency at a sugar mill. *Computers and Electronics in Agriculture* 111:107-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xompag.2014.12.019>.

Koellner, Thomas & de Baan, Laura & Beck, Tabea & Brandão, Miguel & Civit, Bárbara & Goedkoop, Mark & Margni, Manuele & Milà i Canals, Llorenç & Müller-Wenk, Ruedi & Weidema, Bo & Wittstock, Bastian. (2012). Principles for life cycle inventories of land use on a global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18. 1-13. 10.1007/s11367-012-0392-0.

Kota, K. B., Shenbagaraj, S., Sharma, P. K., Sharma, A. K., Ghodke, P. K., Chen, W. H. (2022) Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. *Fuel*. Volume 324, Part B, 2022, 124663, ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124663>.

Lamers, P., Hamelinck, C., Junginger, M., Faaij, A. (2011) International bioenergy trade—A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 15, Issue 6, 2011, Pages 2655-2676, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.022>.

Lemos, S. V., Salgado, A. P., Duarte, A., Souza, M. A. A., Antunes, F. A. (2019) Agroindustrial best practices that contribute to technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol production mills. *Energy*, 177, 2019, Pages 397-411. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.053>.

Linnenluecke, M. K., Nucifora, N., Thompson, N. (2018) Implications of climate change for the sugarcane industry. *WIREs Clim Change*, 9: e498. <https://doi.org/10.1002/wcc.498>.

Machado, R. L., Da Cruz, T. V. (2022) An Empirical Approach Analyzing the Socioeconomic Sustainability of the International Sugarcane Trade. *Sustainability* 2022, 14, 2198. <https://doi.org/10.3390/su14042198>.

Macedo, I. C., Leal, M. R. L. V., Silva, J. E. A. R. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. *ResearchGate*. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.

Masoud, M., Kozan, E., Kent, G., Liu, S. Q. (2016) An integrated approach to optimise sugarcane rail operations. *Computers e Industrial Engineering*. Volume 98, 2016, Pages 211-220, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.06.002>.

Mahjoub, N., Sahebi, H. (2020) The water-energy nexus at the hybrid bioenergy supply chain: A sustainable network design model. *Ecological Indicators*. Volume 119, 2020, 106799, ISSN 1470-160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106799>.

Mączyńska, J., Krzywonos, M., Kupczyk, A., Tucki, K., Sikora, M., Pińkowska, H., Bączyk, A., Wielewska, I. (2019) Production and use of biofuels for transport in Poland and Brazil – The case of bioethanol. *Fuel*. Volume 241, 2019, Pages 989-996, ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.116>.

Marchetti, D., Wanke, P. (2020) Efficiency of the rail sections in Brazilian railway system, using TOPSIS and a genetic algorithm to analyse optimized scenarios. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Volume 135, 2020, 101858, ISSN 1366-5545. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101858>.

Mello, C. H. P. et al. Sustentabilidade ambiental dos biocombustíveis no Brasil: desafios e perspectivas. *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*, v. 82, p. 3315-3328, 2018.

Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., 2011. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011, 50, 9, 4939–4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>.

Ministério de Minas e Energia (MME). RenovaBio. Acesso em: 14 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>.

Mozaffari, M. R., Ostovan, S., Wanke, P. F. (2020) A Hybrid Genetic Algorithm-Ratio DEA Approach for Assessing Sustainable Efficiency in Two-Echelon Supply Chains. *Sustainability* 2020, 12, 8075. <https://doi.org/10.3390/su12198075>.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., The Prisma Group. (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement.

Ann Intern Med. 2009; 151:264-269. [Epub 18 August 2009].
<https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135>.

Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., Barbosa-Povoa, A. P. (2015) Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*. Volume 105, 2015, Pages 14-27, ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>.

Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C. (2017) Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? *Crop and Pasture Science*, 68(3), 272-284. <http://dx.doi.org/10.1071/cp16334>.

Monteiro, J. E. B. A. (2009). *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p. il.

Morandi, M. I. W. M., Camargo, L. F. R. (2015). Systematic literature review. *Design Science Research* (p. 161). New York: Springer.

Mels, A., Bisschops, I., & Swart, B. (2008). Zware metalen in meststoffen - vergelijking van urine en zwart water met in Nederland toegepaste meststoffen, 1-10.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products - Volume 1: Main Report (Vol. 1).

Milà i Canals, Llorenç & Bauer, Christian & Depestele, Jochen & Dubreuil, Alain & Freiermuth, Ruth & Gaillard, Gérard & Michelsen, Ottar & Müller-Wenk, Ruedi & Rydgren, Bernt. (2007). Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 12. 10.1065/lca2006.05.250.

Murphy, J. D., McCarthy, K. (2005) Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy*. Volume 82, Issue 2, 2005, Pages 148-166, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.10.004>.

Murali, P., Prathap, P. D. Technical Efficiency of Sugarcane Farms: An Econometric Analysis. *Sugar Tech* 19, 109–116 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0456-8>.

Neutzling, D. M., Land, A., Seuring, S., Nascimento, L. F. M. Do. (2018) Linking sustainability-oriented innovation to supply chain relationship integration. *Journal of Cleaner Production*. Volume 172, 2018, Pages 3448-3458, ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.091>.

Neves, M. F., Kalaki, R. B., Trombin, V. G., Rodrigues, J. M. (2016) Sugarcane Industry Development Analysis from the Perspective of Agro-Industrial System Quantification. *Research in Agriculture*. ISSN 2740-4431 (Print) ISSN 2740-444X (Online). Vol. 1, No. 2, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22158/ra.v1n2p42>.

Nie, Y., Cai, W., Wang, C., Huang, G., Ding, Q., Yu, L., Li, H., Ji, D. (2019) Assessment of the potential and distribution of an energy crop at 1-km resolution from 2010 to 2100

in China – The case of sweet sorghum. *Applied Energy*. Volume 239, 2019, Pages 395-407, ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.214>.

Nguyen, T.L.T., Gheewala, S.H., Sagisaka, M., 2010. Greenhouse gas savings potential of sugar cane bio-energy systems. *J. Clean. Prod.* 18, 412-418.

Nova Cana. Uso de pesticidas e herbicidas no cultivo da cana, 2022. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/uso-pesticidas-herbicidas-cultivo>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

Nova cana. Uso de pesticidas e herbicidas no cultivo da cana. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/uso-pesticidas-herbicidas-cultivo>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

Nemecek, T.; Schnetzer, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems: data v3.0. Zurich: Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Aug. 2012. 34 p.

Olson, K., Vu, L. (2009) Economic efficiency in farm households: trends, explanatory factors, and estimation methods. *Agricultural Economics*, 40: 587-599. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2009.00400.x>

Organização das Nações Unidas (ONU). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Acesso em: 14 de junho de 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>.

OpenLCA. (2021). OpenLCA. Obtido em 03 de Maio de 2023, de <https://www.openlca.org/>

Pacheco, D. A. de J., Caten, C. S. Ten, Jung, C. F., Pergher, I., Hunt, J. D. (2022) Triple Bottom Line impacts of traditional Product-Service Systems models: Myth or truth? A Natural Language Understanding approach. *Environmental Impact Assessment Review*. Volume 96, 2022, 106819, ISSN 0195-9255. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106819>.

Parsaee, M., Kiani, M. K. D., Karimi, K. (2019) A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*. Volume 122, 2019, Pages 117-125, ISSN 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>.

Peters, G., Andrew, R., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., Wilson, C. (2013) The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Clim Change* 3, 4–6 (2013). <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>.

Petridis, K., Dey, P. K. (2018) Measuring incineration plants' performance using combined data envelopment analysis, goal programming and mixed integer linear programming. *Ann Oper Res* 267, 467–491 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2809-z>.

Polloni-Silva, E., Silveira, N., Ferraz, D., De Mello, D. S., Moralles, H. F. (2021) The drivers of energy-related CO₂ emissions in Brazil: a regional application of the STIRPAT

model. *Environ Sci Pollut Res* 28, 51745–51762 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14097-w>.

Prasara-A, J., Gheewala, S.H., Silalertruksa, T. et al. Environmental and social life cycle assessment to enhance sustainability of sugarcane-based products in Thailand. *Clean Techn Environ Policy* 21, 1447–1458 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01715-Y>.

Plassmann, K., Norton, A., Attarzadeh, N., Jensen, M.P., Brenton, P., Edwards-Jones, G., 2010. Methodological complexities of product carbon footprinting: a sensitivity analysis of key variables in a developing country context. *Environ. Sci. Policy* 13, 393-404.

Pallièrè, C. (2011). Personal communication. Director Agriculture and Environment, Fertilisers Europe, Brussels.

Qingyuan, Z., Wu, J., Ji, X., Li, F. (2018) A simple MILP to determine closest targets in non-oriented DEA model satisfying strong monotonicity. *Omega*. Volume 79, 2018, Pages 1-8, ISSN 0305-0483. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.003>.

Qorri, A., Mujkić, Z., Kraslawski, A. (2018) A conceptual framework for measuring sustainability performance of supply chains. *Journal of Cleaner Production*. Volume 189, 2018, Pages 570-584, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.073>.

Renouf, M.A., Pagan, R.J., Wegener, M.K., 2013. Bio-production from Australian sugarcane: an environmental investigation of product diversification in an agro-industry. *J. Clean. Prod.* 39, 87-96.

Roberto Ometto, A., Zwicky Hauschild, M. & Nelson Lopes Roma, W. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 14, 236–247 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0065-9>.

Rebolledo-Leiva, R., Angulo-Meza, L., Iriarte, A., González-Araya, M. C. Joint carbon footprint assessment and data envelopment analysis for the reduction of greenhouse gas emissions in agriculture production. *Science of The Total Environment*. Volumes 593–594, 2017, Pages 36-46, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.147>.

Ren, J., Geng, Y., Wang, Z., Sun, L., Ma, X., & Tian, X. (2019). Avaliação ambiental da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil usando a avaliação do ciclo de vida e o método do eco-indicador 99. *Journal of Cleaner Production*, 218, 1102-1111.

Ray, D. K.; Gerber, J. S.; Macdonald, G. K.; West, P. C. (2015). Climate Variation Explains a Third of Global Crop Yield Variability. *Nature Communications*, 6, 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>.

Ramjeawon, T., 2008. Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *J. Clean. Prod.* 16, 1727-1734.

Rein, P.W., 2010. The carbon footprint of sugar. *Sugar Industry Suckerind* 13, 427-434.
Seabra, J.E.A., Macedo, I.C., Chum, H.L., Faroni, C.E., Sarto, C.A., 2011. Life cycle

assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 5, 519-532.

Revista Cultivar. Plantio mecanizado de cana. 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/plantio-mecanizado-de-cana>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

Rosas, F. (2011). World Fertilizer Model — The World NPK Model. Retrieved from http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/103223/2/11-WP_520.NEW.pdf.

Rentizelas, A., Melo, I. C., Junior, P. N. A., Campoli, J. S., Rebelatto, D. A. do N. (2019) Multi-criteria efficiency assessment of international biomass supply chain pathways using Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*. Volume 237, 2019, 117690, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117690>.

Renouf, M., Wegener, M. K. (2007) Environmental life cycle assessment (LCA) of sugarcane production and processing in Australia. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/43479268>.

Rivera-Cadavid, L., Manyoma-Velásquez, P. C., Manotas-Duque, D. F. Supply Chain Optimization for Energy Cogeneration Using Sugarcane Crop Residues (SCR). *Sustainability* 2019, 11, 6565. <https://doi.org/10.3390/su11236565>.

Rogelj, J., Luderer, G., Pietzcker, R., Kriegler, E., Schaeffer, M., Krey, V., Riahi, K. (2015) Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Clim Change* 5, 519–527 (2015). <https://doi.org/10.1038/nclimate2572>.

Resende, F. L. P., *et al.* (2014). Avaliação do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar no Brasil: Análise crítica e recomendações. São Carlos: Embrapa Instrumentação.

Rodrigues, L. N. *et al.* O papel da água na produção de etanol de cana-de-açúcar brasileiro: uma atualização sobre a pegada hídrica do bioetanol. *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*, v. 82, p. 2973-2984, 2018.

Salgado Junior, A. P., Pimentel, L. A. Dos S., Oliveira, M. M. B. De, Novi, J. C. (2017) O impacto nas variações das matrizes energéticas e uso da terra: estudo sobre a eficiência ambiental do G20. REAd. *Revista Eletrônica de Administração (Porto Alegre)* [online]. 2017, v. 23, n. 2 [Accessed 21 July 2022], pp. 306-332. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1413.2311.013.62781>>. Epub May-Aug 2017. ISSN 1413-2311. <https://doi.org/10.1590/1413.2311.013.62781>.

Santoro, E., Soler, E. M., Cherri, A. C. (2017) Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 141, 2017, Pages 140-146, ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.013>.

Santos, V. E. N., Ely, R. N., Szklo, A. S., Magrini, A. (2016) Chemicals, electricity and fuels from biorefineries processing Brazil's sugarcane bagasse: Production recipes and minimum selling prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 53, 2016, Pages 1443-1458, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.069>.

Saif, Y, Almansoori, A, Bilici, I, Elkamel, A. (2020) Sustainable management and design of the energy-water-food nexus using a mathematical programming approach. *Can J Chem Eng.* 2020; 98: 2056– 2078. <https://doi.org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1002/cjce.23825>.

Salehi, R., Asaadi, M. A., Rahimi, M. H., Mehrabi, A. (2021) The information technology barriers in supply chain of sugarcane in Khuzestan province, Iran: A combined ANP-DEMATEL approach. *Information Processing in Agriculture*. Volume 8, Issue 3, 2021, Pages 458-468, ISSN 2214-3173. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.09.005>.

Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA). Agro em Dados: junho 2021. Disponível em: <https://www.agricultura.go.gov.br/files/AgroemDados21/JUNHO2021-AGROEMDADOS.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2022.

Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. Cana-de-açúcar. Subsecretaria de Política e Economia Agropecuária, setembro de 2022. Belo Horizonte – MG. Disponível em: http://www.agricultura.mg.gov.br/images/Arq_Relatorios/Agricultura/2022/Setembro/p_erfil_cana_setembro_2022.pdf. Acesso em: 26 de outubro de 2022.

Souza, C. C. de, Leandro, J. P., Neto, J. F. dos R., Frainer, D. M., Castelão, R. A. (2018) Cogeneration of electricity in sugar-alcohol plant: Perspectives and viability. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. Volume 91, 2018, Pages 832-837, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.047>.

Soares, L. H. de B., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Boddey, R. M. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Circular Técnica*, 27. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

Scheiterle, L., Ulmer, A., Birner, R., Pyka, A. (2018) From commodity-based value chains to biomass-based value webs: The case of sugarcane in Brazil's bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2018, Pages 3851-3863. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.150>.

Shavazipour, B. Stray, J., Stewart, T. J. (2020) Sustainable planning in sugar-bioethanol supply chain under deep uncertainty: A case study of South African sugarcane industry. *Computers e Chemical Engineering*. Volume 143, 2020, 107091, ISSN 0098-1354. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107091>.

Singh, A. (2020) Benefits of crop diversification in Fiji's sugarcane farming. *Asia Pac Policy Stud.* 2020; 7: 65– 80. <https://doi.org/10.1002/app5.291>.

Singh, S., Srivastava, S. K., Jangirala, S. (2021) System Dynamics Analysis of Sugarcane Supply Chain in Indian Sugar Industry. *Global Business Review*. May 2021. <https://doi.org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1177/0972150921999521>.

Singh, A. K., Issac, J., Narayanan, K. (2019) Measurement of environmental sustainability index and its association with socio-economic indicators in selected Asian economies: an empirical investigation. *International Journal of Environment and Sustainable Development*.
<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJESD.2019.098641>.

Silva, J. E. B., & Modolo, D. M. (2017). Avaliação do ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil: contribuições para a gestão ambiental. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, 13(3), 165-186.

Silva, F. C., Dias, M. O., & Oliveira, L. M. (2014). Avaliação de impacto ambiental do ciclo de vida da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: comparação entre sistemas produtivos convencional e orgânico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(1), 17-23.

SEABRA, J. E. A *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos Brasileiros de Cana-de-Açúcar: Emissões de GEE e Uso de Energia. *Tecnologia de Biorecursos*, v. 102, n. 22, pág. 11150-11159, 2011.

Sierra, D., Cubillos-Varela, A. & Franco, C. Analysis of sugarcane production and transportation in Hoya del Río Suárez from a life cycle perspective. *Clean Techn Environ Policy* 24, 3303–3315 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02380-4>.

Soam, S., Kumar, R., Gupta, R.P., Sharma, P.K., Tuli, D.K., Das, B., 2015. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane molasses in northern and western India and its impact on Indian biofuel programme. *Energy* 83, 307-315.

Tsiropoulos, I., Faaij, A.P.C., Seabra, J.E.A. et al. Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 19, 1049–1067 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0714-5>.

Tavoni, M., Kriegler, E., Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Aboumahboub, T., Bowen, A., Calvin, K., Campiglio, E., Kober, T., Jewell, J., Luderer, G., Marangoni, G., Mccollum, D., Van Sluisveld, M., Zimmer, A., Van Der Zwaan, B. (2015) Post-2020 climate agreements in the major economies assessed in the light of global models. *Nature Clim Change* 5, 119–126 (2015). <https://doi.org/10.1038/nclimate2475>.

Teixeira, E. D. S., Rangel, S., Florentino, H. D. O., De Araujo, S. A. (2022) A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. *Intl. Trans. in Op. Res.* <https://doi-org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1111/itor.13056>.

Tieppo, R. C., Andrea, M. C. S., Gimenez, L. M., Romanelli, T. L. Energy Demand in Sugarcane Residue Collection and Transportation. *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 52-58. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2913>.

Toloo, M. (2013) The most efficient unit without explicit inputs: An extended MILP-DEA model. *Measurement*. Volume 46, Issue 9, 2013, Pages 3628-3634, ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.030>.

Tranfield, D., Denyer, D. Smart, P. (2003), Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14: 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.

Tsiakis, P., Shah, N., Pantelides, C. C. (2001) Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Industrial e Engineering Chemistry Research* 2001 40 (16), 3585-3604. DOI: 10.1021/ie0100030.

Tcacenco, F. A., Dias, M. O. S., Maciel Filho, R., & Bonomi, A. (2018). Life cycle assessment of ethanol production from sugarcane in Brazil: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2902-2919.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA). Cana-de-açúcar é fonte de 19% da energia consumida no Brasil. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/cana-de-acucar-e-fonte-de-19-da-energia-consumida-no-brasil/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA). Indústria brasileira de cana-de-açúcar: uma trajetória de evolução. Disponível em: <http://old.unica.com.br/linha-do-tempo/>. Acesso em: 30 de junho de 2022.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA). Acompanhamento quinzenal da safra na região Centro-Sul. Safra 2022/2023. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/>. Acesso em: 08 de agosto de 2022.

União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (ÚNICA). Bioeletricidade. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em: 11 de agosto de 2022.

UNEP/SETAC. Life Cycle Initiative Life Cycle Impact Assessment Programme. Margni, M., Gloria, T., Bare, J., Seppälä, J., Steen, B., Struijs, J., Toffoletto, L., Jolliet, O. Guidance on how to move from current practice to recommended practice in Life Cycle Impact Assessment. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2008%20-%20Guidance%20to%20move%20to%20LCA.pdf>.

Van Vuuren, D.P., Hof, A.F., Van Sluisveld, M.A., Riahi, K. (2017) Open discussion of negative emissions is urgently needed. *Nat Energy* 2, 902–904 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0055-2>.

Van Zelm, R., Huijbregts, M.A.J. & van de Meent, D. USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model. *Int J Life Cycle Assess* 14, 282–284 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0066-8>.

Vasconcelos, E. C. et al. (2016). Impactos ambientais da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil: abordagem de ACV baseada em processo. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1340-1349.

Walters, D. Lancaster, G. (2000) Implementing value strategy through the value chain. *Management Decision*, Vol. 38 No. 3, pp. 160-178. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005344>.

Wang, Z., Kamali, F. P., Osseweijer, P., Posada, J. A. (2019) Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis. *Journal of Cleaner Production*. Volume 230, 2019, Pages 1036-1050, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.145>.

Wei, Q., Chang, T. S. (2011) Optimal profit-maximizing system design data envelopment analysis models. *Computers e Industrial Engineering*. Volume 61, Issue 4, 2011, Pages 1275-1284, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.001>.

Wheeler, J, Galán-Martín, Á, Mele, Fd, Guillén-Gosálbez, G. (2020) Designing biomass supply chains within planetary boundaries. *AIChE J.* 2021; 67:e17131. <https://doi-org.ez280.periodicos.capes.gov.br/10.1002/aic.17131>.

Wiedmann, T., Minx, J., 2007. A Definition of “Carbon Footprint”. ISA UK Research Report 07-01. Cent. Integr. Sustain. Anal. Durh. UK.

Wohlin. C. (2014) Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE '14). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 38, 1–10. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>.

Wu, S., Devadoss, S., Lu. (2003). Estimation and decomposition of technical efficiency for sugarbeet farms. *Applied Economics*. 35. 471-484. 10.1080/00036840210161819.

Ying, H. P., Phun Chien, C. B., Yee Van, F. (2020) Operational Management Implemented in Biofuel Upstream Supply Chain and Downstream International Trading: Current Issues in Southeast Asia. *Energies* 2020, 13, 1799. <https://doi.org/10.3390/en13071799>.

Yuttitham, M., Gheewala, S.H., Chidthaisong, A., 2011. Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand. *J. Clean. Prod.* 19, 2119-2127.

You, C., Han, S., Kim, J. (2021) Integrative design of the optimal biorefinery and bioethanol supply chain under the water-energy-food-land (WEFL) nexus framework. *Energy*. Volume 228, 2021, 120574, ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120574>.

Yu, M. M., Chen, L. H. (2016) Centralized resource allocation with emission resistance in a two-stage production system: Evidence from a Taiwan’s container shipping company. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Volume 94, 2016, Pages 650-671, ISSN 0965-8564. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.003>.

Zhu, Q., Aparicio, J., Li, F., Wu, J., Kou, G. (2022) Determining closest targets on the extended facet production possibility set in data envelopment analysis: Modeling and

computational aspects. *European Journal of Operational Research*. Volume 296, Issue 3, 2022, Pages 927-939, ISSN 0377-2217. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.019>.