

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição (FACFAN)
Curso de Engenharia de Alimentos

EMILY FLORES DA SILVA BEZERRA

**IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA CADEIA
PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Campo Grande, MS

2026



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



EMILY FLORES DA SILVA BEZERRA

**IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA CADEIA
PRODUTIVA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos
da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
como parte das exigências para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador(a): Profa. Dra. Camila Gabriel Kato

Campo Grande, MS

2026



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Resumo

A cana-de-açúcar ocupa posição de destaque na agroindústria brasileira, tanto pela produção de açúcar e etanol quanto pelo aproveitamento de sua biomassa para geração de energia, utilização de subprodutos agroindustriais para obtenção de embalagens (biopolímeros) e outros produtos de interesse industrial. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar os impactos socioambientais associados à expansão da cultura canavieira no Brasil, considerando aspectos históricos, ambientais, sociais e tecnológicos relacionados ao desenvolvimento do setor sucroalcooleiro. A pesquisa foi realizada por meio de revisão bibliográfica de artigos científicos, livros, documentos técnicos e institucionais e legislações acerca do tema. Os estudos analisados demonstraram que a expansão da cana-de-açúcar contribuiu para o desenvolvimento econômico e para a consolidação do Brasil como um dos principais produtores mundiais de açúcar e etanol. Entretanto, esse processo também esteve associado a impactos ambientais, como alterações nos ecossistemas, uso intensivo de recursos naturais e geração de resíduos, além de desafios sociais relacionados às condições de trabalho no campo. A literatura evidencia ainda que tecnologias voltadas à produção de biocombustíveis, ao aproveitamento de subprodutos agroindustriais e ao desenvolvimento de embalagens e materiais renováveis podem contribuir para a redução dos impactos ambientais e para o uso mais eficiente da matéria-prima. Conclui-se que a adoção de práticas sustentáveis, aliada à inovação tecnológica e ao fortalecimento de políticas públicas podem contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva mais eficiente, com menor geração de resíduos e maior equilíbrio entre desenvolvimento econômico, responsabilidade social e preservação ambiental.

Palavras-chave: bioeconomia; biocombustíveis; biorrefinaria; justiça ambiental; resíduos agroindustriais; biotecnologia.

Abstract

Sugarcane plays a prominent role in the Brazilian agroindustry, not only due to the production of sugar and ethanol but also because of the use of its biomass for energy generation, the utilization of agro-industrial by-products for the production of packaging materials (biopolymers), and other products of industrial interest. In this context, this study aims to analyze the socio-environmental impacts associated with the expansion of sugarcane cultivation in Brazil, considering historical, environmental, social, and technological aspects related to the development of the sugar-energy sector. The research was conducted through a literature review of scientific articles, books, technical and institutional documents, and legislation on the subject. The analyzed studies demonstrated that the expansion of sugarcane cultivation contributed to economic development and to the consolidation of Brazil as one of the world's leading producers of sugar and ethanol. However, this process has also been associated with environmental impacts, including ecosystem changes, intensive use of natural resources, and waste generation, as well as social challenges related to labor conditions in rural areas. The literature further indicates that technologies aimed at biofuel production, the utilization of agro-industrial by-products, and the development of renewable packaging and materials can contribute to reducing environmental impacts and promoting a more efficient use of raw materials. It is concluded that the adoption of sustainable practices, combined with technological innovation and the strengthening of public policies, can contribute to the development of a more efficient production chain, with reduced waste generation and a better balance between economic development, social responsibility, and environmental preservation.



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Keywords: bioeconomy; biofuels; biorefinery; environmental justice; agro-industrial residues; biotechnology.

Resumen

La caña de azúcar ocupa una posición destacada en la agroindustria brasileña, tanto por la producción de azúcar y etanol como por el aprovechamiento de su biomasa para la generación de energía, la utilización de subproductos agroindustriales para la obtención de envases (biopolímeros) y otros productos de interés industrial. En este contexto, este estudio tiene como objetivo analizar los impactos socioambientales asociados a la expansión del cultivo de caña de azúcar en Brasil, considerando aspectos históricos, ambientales, sociales y tecnológicos relacionados con el desarrollo del sector sucroenergético. La investigación se realizó mediante una revisión bibliográfica de artículos científicos, libros, documentos técnicos e institucionales y legislación relacionada con el tema. Los estudios analizados demostraron que la expansión del cultivo de caña de azúcar contribuyó al desarrollo económico y a la consolidación de Brasil como uno de los principales productores mundiales de azúcar y etanol. Sin embargo, este proceso también ha estado asociado a impactos ambientales, como alteraciones en los ecosistemas, uso intensivo de recursos naturales y generación de residuos, además de desafíos sociales relacionados con las condiciones laborales en el medio rural. La literatura también evidencia que las tecnologías orientadas a la producción de biocombustibles, al aprovechamiento de subproductos agroindustriales y al desarrollo de envases y materiales renovables pueden contribuir a la reducción de los impactos ambientales y al uso más eficiente de la materia prima. Se concluye que la adopción de prácticas sostenibles, junto con la innovación tecnológica y el fortalecimiento de las políticas públicas, puede contribuir al desarrollo de una cadena productiva más eficiente, con menor generación de residuos y un mayor equilibrio entre desarrollo económico, responsabilidad social y preservación ambiental.

Palabras clave: bioeconomía; biocombustibles; biorrefinería; justicia ambiental; residuos agroindustriales; biotecnología.



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) constitui uma das culturas agrícolas mais importantes da história econômica e social do Brasil. Desde o período colonial, sua produção esteve diretamente associada à formação das estruturas produtivas do país, influenciando o desenvolvimento territorial, as relações de trabalho e a dinâmica econômica nacional. Ao longo dos séculos, o setor sucroenergético consolidou-se como um dos pilares do agronegócio brasileiro, desempenhando papel relevante tanto no mercado alimentício quanto na produção de bioenergia e insumos industriais (Conab, 2023).

Nesse contexto histórico, a expansão da cultura canavieira esteve fortemente associada a impactos socioambientais e trabalhistas significativos. Entre os principais efeitos destacam-se o desmatamento de biomas nativos, especialmente da Mata Atlântica, a degradação do solo, o uso intensivo de recursos naturais e a exploração da mão de obra em diferentes períodos históricos da formação econômica brasileira. Esses aspectos evidenciam a necessidade de uma análise crítica da trajetória da agroindústria canavieira, considerando suas implicações sociais e ambientais ao longo do tempo (Dean, 1996; Furtado, 2007).

Nas últimas décadas, entretanto, o setor passou por um processo significativo de transformação estrutural, impulsionado por avanços tecnológicos, mudanças regulatórias e demandas globais por sustentabilidade. O desenvolvimento de tecnologias voltadas à agricultura de precisão, mecanização agrícola, melhoramento genético e automação industrial tem ampliado a eficiência produtiva da cadeia sucroenergética. Simultaneamente, o avanço da digitalização no campo e a modernização dos processos industriais têm permitido maior aproveitamento dos recursos e redução de perdas produtivas ao longo da cadeia.

Além do setor energético tradicional, a cana-de-açúcar também passou a desempenhar um papel estratégico na transição para modelos de produção mais sustentáveis na indústria de alimentos. A utilização de seus derivados na produção de biopolímeros e embalagens sustentáveis representa uma alternativa aos materiais de origem fóssil, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao descarte de resíduos e ao consumo de plásticos convencionais. Dessa forma, a cadeia sucroenergética amplia sua inserção na economia circular e na inovação em materiais renováveis.

Paralelamente, observa-se o fortalecimento do conceito de biorrefinaria, no qual a cana-de-açúcar deixa de ser apenas uma matéria-prima para açúcar e etanol e passa a ser utilizada de forma integral. Nesse modelo, subprodutos como bagaço, palha, vinhaça e resíduos industriais são reaproveitados para a geração de bioenergia, biocombustíveis avançados, fertilizantes e outros insumos industriais, promovendo maior eficiência do sistema produtivo e redução de impactos ambientais.

Nesse cenário, a sustentabilidade torna-se um eixo central de análise da cadeia produtiva. A expansão da bioenergia, especialmente a cogeração de eletricidade a partir da biomassa, contribui para a diversificação da matriz energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, políticas públicas e instrumentos regulatórios voltados à transição energética, como programas de incentivo a biocombustíveis e metas internacionais de descarbonização, reforçam a importância estratégica do setor no contexto global.

Dessa forma, a análise integrada da cadeia produtiva da cana-de-açúcar permite compreender não apenas sua relevância histórica e econômica, mas também seus impactos socioambientais, trabalhistas, tecnológicos e industriais. O entendimento dessas múltiplas dimensões é essencial para avaliar os desafios e as oportunidades associados ao desenvolvimento sustentável do setor sucroenergético brasileiro no século XXI.



2. Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão de literatura com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar evidências relacionadas aos impactos socioambientais da produção de cana-de-açúcar no Brasil, bem como discutir alternativas voltadas à adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e tecnologias limpas no setor sucroalcooleiro. Essa abordagem permite a integração de diferentes perspectivas teóricas e empíricas, proporcionando uma análise abrangente e crítica do tema.

A coleta de dados foi realizada por meio de consultas a bases de dados acadêmicas, incluindo SciELO, Web of Science, Periódicos CAPES e Google Acadêmico, além de documentos institucionais, legislações pertinentes ao setor e livros adequados ao tema. Foram selecionadas publicações majoritariamente dos últimos 25 anos, período no qual o debate sobre sustentabilidade e seus desdobramentos no setor agrícola ganhou maior relevância científica e institucional.

Para a busca dos materiais, foram utilizadas palavras-chave como “sustentabilidade”, “cana-de-açúcar”, “impactos socioambientais”, “indústria sucroalcooleira”, “biocombustíveis”, “inovações em sustentabilidade” e “biotecnologia”, “bioeconomia”, “biorrefinaria”, “justiça ambiental”, “resíduos agroindustriais”. combinadas por meio de operadores booleanos quando necessário, a fim de ampliar e refinar os resultados obtidos.

A seleção dos estudos seguiu critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Foram incluídos trabalhos que abordassem especificamente a produção de cana-de-açúcar no contexto brasileiro, contemplando análises dos impactos ambientais, sociais e econômicos, bem como estudos que apresentassem propostas, tecnologias ou reflexões voltadas à sustentabilidade no setor. Foram excluídos materiais de caráter genérico, sem aplicabilidade direta ao contexto nacional, ou que não apresentassem fundamentação técnica consistente.

Por fim, a análise dos dados foi conduzida de forma interpretativa, buscando estabelecer relações entre os impactos identificados e as alternativas tecnológicas e sustentáveis discutidas na literatura. Essa abordagem permitiu evidenciar não apenas os desafios associados ao modelo produtivo vigente, mas também as possibilidades de transição para sistemas mais equilibrados, que conciliem eficiência produtiva, conservação ambiental e justiça social.

3. Resultados e Discussão

3.1 Histórico da Cana-de-Açúcar no Brasil.

A introdução da cana-de-açúcar no Brasil ocorreu durante o período colonial, impulsionada pelo elevado valor econômico do açúcar no mercado europeu (Furtado, 2007). Originária do Sudeste Asiático e pertencente ao gênero *Saccharum*, a cultura apresenta elevada capacidade de adaptação às regiões tropicais, característica associada às condições climáticas favoráveis ao seu desenvolvimento e ao alto potencial de acúmulo de sacarose (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011). Essas características contribuíram para a expansão do cultivo em diferentes regiões do mundo ao longo da história.

No século XVI, os portugueses introduziram a cana-de-açúcar no território brasileiro devido às condições climáticas favoráveis encontradas principalmente no litoral nordestino, o que possibilitou a implantação de um sistema agrícola voltado à produção em larga escala para exportação (Furtado, 2007; Schwartz, 1988). A partir desse processo, a cultura canavieira passou a exercer papel central na organização



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



econômica e social da colônia, influenciando profundamente a ocupação territorial e as relações de trabalho no país.

Durante o período colonial, o Brasil consolidou-se como um dos principais produtores de açúcar do mundo, com destaque para as capitanias de Pernambuco e Bahia. Esse modelo produtivo foi estruturado com base na mão de obra escravizada africana, configurando um sistema econômico altamente concentrador de renda e marcado por intensa exploração humana. Paralelamente, a expansão da monocultura contribuiu para a devastação de extensas áreas da Mata Atlântica, reduzindo significativamente a cobertura de um dos biomas mais biodiversos do planeta (Furtado, 2007; Dean, 1996).

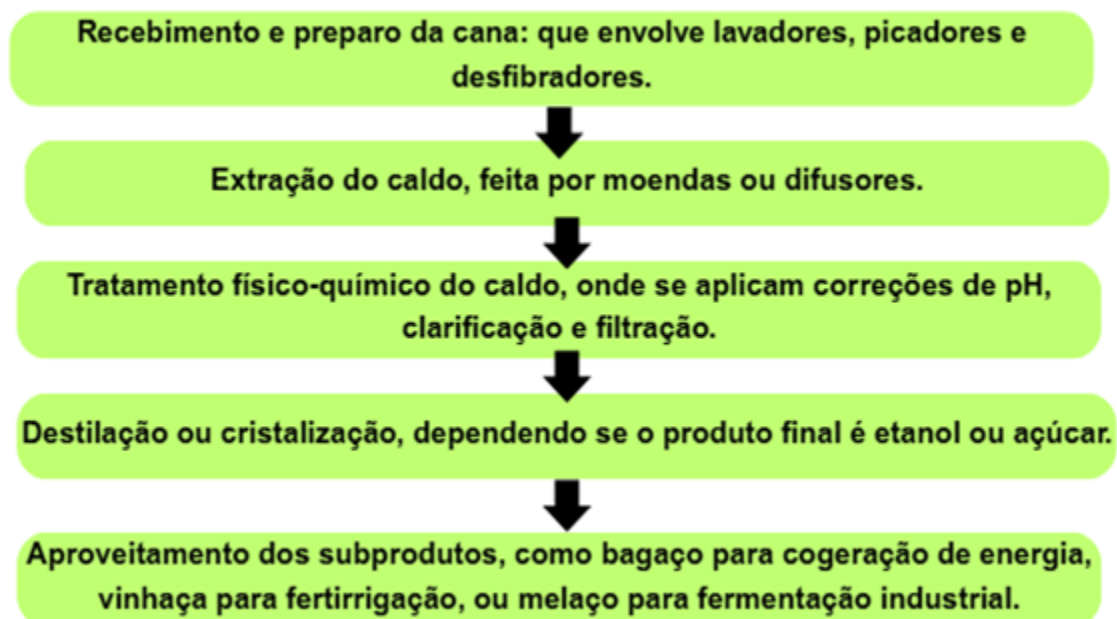
Ainda no século XVI durante o período colonial surgiram as primeiras unidades de processamento da cana-de-açúcar no Brasil na forma dos engenhos para a produção de açúcar. Essas estruturas eram rudimentares, compostas por moendas movidas à tração animal ou hidráulica, caldeiras aquecidas a lenha e tachos para a fervura do caldo. A produção de açúcar ocorria por evaporação e cristalização artesanal, sem controle rigoroso de temperatura, higiene ou eficiência (Furtado, 2007).

Com o avanço da industrialização e da expansão agrícola no Brasil, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar passou por um processo gradual de diversificação. Além da produção de açúcar, a cana-de-açúcar passou a ser amplamente utilizada na produção de combustíveis, como o etanol, na geração de energia e para a obtenção de diferentes subprodutos industriais. Esse processo contribuiu para a consolidação do setor sucroalcooleiro como uma das principais atividades agroindustriais do país, ampliando sua relevância econômica e estratégica tanto no mercado interno quanto internacional (Coelho, 2004; Conab, 2023; Goldemberg, 2004; Macedo et al., 2005).

Ao longo do século XX, a indústria sucroalcooleira passou por importantes transformações. Em 1975, foi criado o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), que representou um marco na diversificação da matriz energética brasileira, impulsionando o uso do etanol como alternativa aos combustíveis fósseis. Paralelamente, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, como o PLANALSUCAR, contribuíram para o aumento da produtividade e modernização do setor (Macedo et al., 2005; Shikida & Bacha, 1999).

A partir do século XX, o setor passou por profundas transformações com a consolidação das usinas modernas, que operam com sistemas mecanizados e processos contínuos de extração, fermentação e destilação. Atualmente, a usina sucroalcooleira configura-se como uma unidade agroindustrial integrada, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - fluxograma do aproveitamento da cana-de-açúcar.

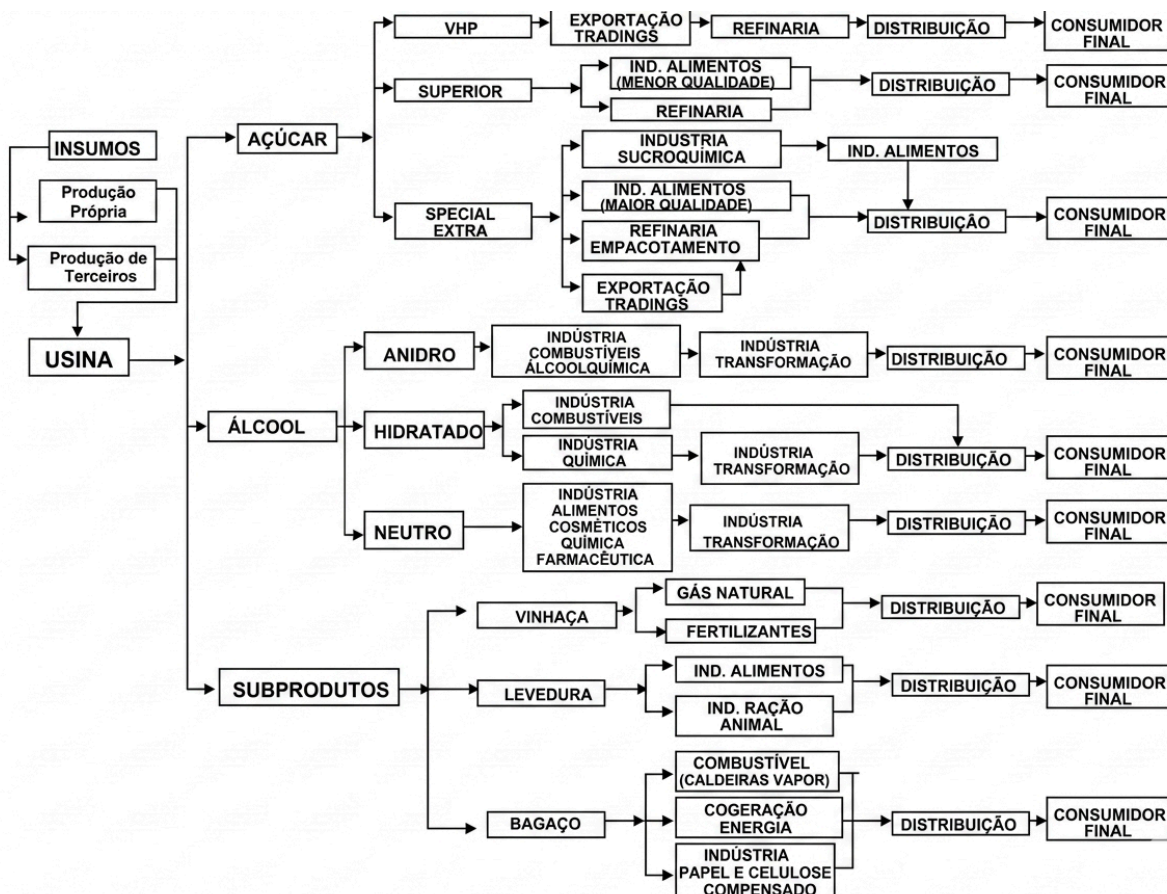


Legenda: Fluxo operacional simplificado do processamento de cana-de-açúcar.

Fonte: Elaborado pela autora.

A compreensão do funcionamento de uma usina sucroalcooleira exige a visualização das diferentes etapas que compõem sua cadeia produtiva. O processo não envolve apenas a extração e o processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, mas também a integração de subprodutos, como a geração de bioenergia a partir do bagaço. Essa visão sistêmica é essencial para compreender os impactos ambientais e sociais do setor, bem como as oportunidades de inovação sustentável. A Figura 2 apresenta de forma simplificada as principais etapas do processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar, incluindo moagem, tratamento do caldo, fermentação, destilação e aproveitamento de subprodutos (Canepelle et al., 2020).

Figura 2 - Fluxograma de direcionamento e ramificações da produção sucroenergética.



Legenda: Diagrama de blocos ilustrando a cadeia integrada de destinação da usina de processamento.

Fonte: Canepelle et al., 2020

Atualmente, o Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de açúcar e etanol, com um sistema produtivo altamente integrado. A utilização do bagaço da cana para cogeração de energia e o desenvolvimento de biocombustíveis avançados, como o etanol de segunda geração e o biometano, evidenciam a evolução tecnológica do setor e sua inserção no contexto da bioeconomia (Coelho, 2004; Goldemberg, 2008; Macedo et al., 2005).

Nesse contexto, a engenharia de alimentos desempenha papel relevante no desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento da biomassa, controle de qualidade e valorização de resíduos agroindustriais. Entretanto, apesar da relevância econômica e tecnológica do setor, a expansão da produção canieira ao longo dos anos também esteve associada a impactos ambientais e sociais significativos, evidenciando a necessidade de práticas mais sustentáveis e eficientes (Conab, 2023; Macedo et al., 2005).



Dessa forma, a transição para um modelo agrícola mais sustentável exige a integração entre inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e práticas produtivas responsáveis, de modo a conciliar produtividade, conservação ambiental e justiça social no contexto da produção de cana-de-açúcar.

3.2 Panorama Atual da Cana-de-Açúcar no Brasil.

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar permanece como um dos segmentos mais relevantes do agronegócio brasileiro, desempenhando papel estratégico na produção de açúcar, etanol e bioenergia. Marin et al. (2022) destacam que os sistemas de produção de cana no Brasil são altamente sensíveis às mudanças climáticas, especialmente em relação à variabilidade de temperatura e precipitação, o que reforça a necessidade de estratégias de adaptação para manutenção da estabilidade produtiva. Mesmo diante de desafios climáticos observados nos últimos ciclos produtivos, o Brasil mantém posição de destaque mundial no setor, sustentado pela elevada produtividade agrícola, pela modernização industrial e pelos avanços tecnológicos incorporados ao longo da cadeia produtiva.

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2024), a safra 2024/25 alcançou aproximadamente 676,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, configurando um dos maiores volumes da série histórica nacional, apesar das condições climáticas adversas observadas no Centro-Sul do país.

No campo tecnológico e agrônomico, a competitividade do setor tem sido impulsionada pela adoção de sistemas de agricultura de precisão, mecanização e manejo baseado em ambientes de produção. Sanches et al. (2019) demonstram que o uso de ambientes de produção e técnicas de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar contribuiu significativamente para o aumento da eficiência produtiva, melhoria no uso de insumos e maior estabilidade de rendimento entre áreas cultivadas. Além disso, Stolf e Oliveira (2020) destacam que a evolução histórica do setor sucroenergético brasileiro, especialmente a partir do Proálcool, foi fundamental para a consolidação da matriz bioenergética nacional e para o desenvolvimento tecnológico da cadeia.

A modernização da cadeia sucroenergética brasileira também pode ser observada na predominância da colheita mecanizada nas principais regiões produtoras do país. A substituição gradual da colheita manual associada à queima da palha pela colheita mecanizada contribuiu para a redução dos impactos ambientais, além de favorecer a manutenção de resíduos vegetais sobre o solo. Segundo Maia et al. (2024), os sistemas modernos de colheita apresentam potencial para aumentar os estoques de carbono no solo e melhorar o desempenho ambiental da produção de etanol, reforçando a importância da mecanização para a sustentabilidade do setor.

Além dos avanços operacionais no campo, a eficiência da cadeia produtiva depende do adequado gerenciamento do período entre a colheita e o processamento industrial. Após o corte, a cana-de-açúcar permanece sujeita a processos fisiológicos, microbiológicos e bioquímicos que podem comprometer sua qualidade tecnológica e reduzir o aproveitamento da sacarose. Dessa forma, a rápida condução da matéria-prima para o processamento industrial constitui uma estratégia fundamental para minimizar perdas e preservar a eficiência produtiva das usinas (Misra et al., 2022).

Práticas de manejo conservacionista também vêm sendo incorporadas ao sistema produtivo, incluindo a utilização de leguminosas durante a renovação dos canaviais. O consórcio entre cana-de-açúcar e amendoim tem demonstrado efeitos positivos sobre a qualidade do solo, promovendo melhorias nos atributos microbiológicos e favorecendo a presença de microrganismos benéficos. De acordo com Tang et al. (2021), essa associação



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



contribui para o fortalecimento da fertilidade do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas de longo prazo.

Paralelamente, o conceito de biorrefinaria tem ampliado as possibilidades de aproveitamento integral da biomassa canavieira. Além da produção convencional de açúcar e etanol de primeira geração, resíduos como bagaço e palha podem ser empregados na obtenção de etanol de segunda geração, agregando valor à cadeia produtiva sem a necessidade de expansão das áreas cultivadas. Mendes et al. (2021) destacam que a integração dessas rotas tecnológicas pode ampliar os benefícios socioeconômicos e ambientais do setor sucroenergético, fortalecendo sua inserção na bioeconomia e na transição para sistemas produtivos de baixo carbono.

Outro subproduto de destaque é a vinhaça, tradicionalmente utilizada na fertirrigação devido ao seu elevado teor de nutrientes. Nos últimos anos, esse resíduo também passou a ser utilizado em processos de digestão anaeróbia para a produção de biogás e biometano, permitindo a geração de energia renovável e reduzindo impactos ambientais associados ao seu manejo. Segundo Ferraz Junior et al. (2022), essa estratégia representa uma importante alternativa para o fortalecimento da economia circular nas usinas sucroenergéticas brasileiras.

Essas transformações refletem um cenário de crescente inovação tecnológica e busca por maior sustentabilidade na cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Conforme discutido por Teixeira et al. (2024), o setor sucroenergético brasileiro apresenta oportunidades estratégicas associadas à valorização da biomassa, à expansão dos biocombustíveis e à redução das emissões de gases de efeito estufa, consolidando seu papel na transição para uma economia de baixo carbono.

Simultaneamente aos avanços produtivos, observa-se o fortalecimento do conceito de biorrefinaria no setor sucroenergético. Chagas et al. (2020) indicam que a integração industrial da cana-de-açúcar em sistemas de biorrefinaria permite a produção simultânea de biocombustíveis, bioquímicos e biomateriais, aumentando a eficiência econômica e ambiental do sistema produtivo. Nesse contexto, Cherubin et al. (2021) alertam que a expansão da cultura pode estar associada à degradação da saúde do solo em determinadas regiões, o que reforça a necessidade de práticas sustentáveis e de manejo adequado dos resíduos agrícolas.

A valorização energética da biomassa constitui outro eixo central da cadeia sucroenergética. Santos e Ramos (2021) evidenciam que a eletricidade gerada a partir do bagaço da cana-de-açúcar desempenha papel relevante na transição para uma matriz elétrica mais renovável no Brasil, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética. Complementarmente, a Empresa de Pesquisa Energética (2024) aponta que a biomassa canavieira continua sendo uma das principais fontes renováveis da matriz elétrica brasileira, reforçando sua importância estratégica no sistema energético nacional.

No âmbito das políticas públicas e da sustentabilidade, Freitas et al. (2020) discutem que instrumentos regulatórios e mecanismos econômicos exercem influência significativa sobre a dinâmica dos mercados de etanol e gasolina no Brasil, contribuindo para a estruturação do setor sucroenergético. Em uma perspectiva de longo prazo, Cortez e Ramos (2022) destacam que a cadeia da cana-de-açúcar passou por profundas transformações estruturais no século XXI, consolidando-se como um dos pilares da bioeconomia e da transição para uma economia de baixo carbono.



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Assim, o setor sucroenergético contemporâneo se consolida não apenas como um complexo agroindustrial voltado à produção de commodities, mas também como um agente estratégico na transição energética e na construção de modelos produtivos mais sustentáveis e integrados.

3.3 Impactos Socioambientais da Cadeia Produtiva da Cana-de-Açúcar.

No contexto agrícola, a crescente demanda por etanol tem intensificado a pressão sobre os recursos naturais, especialmente solo e água. A expansão da monocultura de cana-de-açúcar, quando associada a práticas inadequadas de manejo pode resultar em degradação do solo, redução da fertilidade e contaminação de lençóis freáticos, evidenciando a necessidade de adoção de práticas sustentáveis no setor (Food and Agriculture Organization [FAO], 2012).

A expansão da produção canvieira também está historicamente associada à transformação de ecossistemas naturais. Biomassas como a Mata Atlântica, atualmente reduzida a cerca de 12% de sua cobertura original, foram amplamente impactados pela expansão agrícola ao longo dos séculos. Embora existam avanços na legislação ambiental, desafios relacionados à fiscalização e ao uso do solo ainda persistem, contribuindo para a perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos (Dean, 1996; Fundação SOS Mata Atlântica, 2023).

A ampliação das áreas de cultivo também gera impactos indiretos sobre biomas como o Cerrado e a Amazônia. Embora o cultivo da cana-de-açúcar não seja predominante na região amazônica, a ocupação de áreas no Cerrado e em zonas de transição desloca outras atividades agropecuárias, contribuindo indiretamente para o avanço do desmatamento. Esse efeito intensifica as emissões de gases de efeito estufa e compromete a estabilidade climática global (Leite-Filho et al., 2021; WWF-Brasil, 2019).

Outro aspecto relevante refere-se às emissões associadas ao manejo da cultura, especialmente às queimadas historicamente utilizadas durante a colheita manual da cana-de-açúcar. Embora a mecanização tenha contribuído para a redução significativa dessa prática nas últimas décadas, ainda há registros de queimadas em algumas regiões produtoras, muitas vezes associadas a limitações estruturais, dificuldades de acesso à mecanização e falhas na fiscalização ambiental. A queima da palha promove a liberação de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), além de material particulado, impactando tanto o clima quanto a saúde das populações expostas ao entorno da área de cultivo (Galdos et al., 2013; Ribeiro, 2012; Rudorff et al., 2010).

As mudanças climáticas, por sua vez, afetam diretamente a produtividade agrícola, estabelecendo uma relação de retroalimentação com os impactos ambientais. Alterações nos regimes de precipitação e o aumento da temperatura comprometem o desenvolvimento da cana-de-açúcar, elevando custos de produção e riscos de perdas agrícolas (IPCC, 2023).

Além das questões ambientais, a sustentabilidade na agricultura envolve desafios sociais históricos. A indústria sucroalcooleira, desde o período colonial, está associada à concentração de terras e à exploração da mão de obra, configurando um modelo marcado por desigualdades sociais persistentes. Essas desigualdades dificultam a inclusão social e a distribuição equitativa dos benefícios gerados pelo setor (Acselrad, 2010; Rocha, 2013).

Mesmo após a abolição da escravidão, as desigualdades estruturais permaneceram presentes no setor. A ausência de políticas públicas eficazes para a inclusão social da população negra resultou na perpetuação de



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



condições precárias de trabalho, que ainda hoje se manifestam em práticas análogas à escravidão em algumas regiões (OIT, 2022).

É importante salientar que os impactos ambientais e sociais não se distribuem de maneira homogênea, pois comunidades tradicionais, como povos indígenas, quilombolas e agricultores familiares, frequentemente são as mais afetadas pela degradação ambiental e pela expansão das fronteiras agrícolas. Essa dinâmica configura um cenário de injustiça ambiental, no qual grupos historicamente marginalizados permanecem mais expostos aos riscos ambientais sem participação efetiva nos processos decisórios (Acselrad, 2010).

As questões sociais relacionadas ao setor ainda evidenciam desafios associados à concentração fundiária, à desigualdade no campo e às limitações da fiscalização trabalhista. Diante desse cenário, o fortalecimento de políticas públicas e mecanismos de controle é fundamental para reduzir desigualdades históricas e ampliar a proteção social dos trabalhadores rurais (Nogueira et al., 2019; Ribeiro, 2012).

Atualmente, apesar da modernização do setor, ainda são identificados casos de trabalho análogo à escravidão, especialmente entre trabalhadores rurais terceirizados, migrantes e temporários. Situações como jornadas exaustivas, alojamentos precários, remuneração inadequada e restrições à liberdade continuam sendo registradas, evidenciando a permanência de problemas sociais historicamente presentes no setor (Feliciano & Pasqualetto, 2020).

Os impactos dessas condições extrapolam o ambiente de trabalho e atingem diretamente a saúde pública. Trabalhadores expostos a queimadas, poeira orgânica e agrotóxicos apresentam maior incidência de doenças respiratórias e dermatológicas (Ribeiro, 2012). Além disso, a exposição contínua a defensivos agrícolas está associada a intoxicações, alterações neurológicas e distúrbios endócrinos. A subnotificação desses casos e o acesso limitado aos serviços de saúde dificultam a identificação desses problemas no contexto rural (Nogueira et al., 2019).

A degradação ambiental associada à atividade canavieira também representa um risco relevante. A contaminação de corpos hídricos e lençóis freáticos, decorrente do uso intensivo de fertilizantes e da gestão inadequada de resíduos como a vinhaça, compromete a qualidade da água e a segurança alimentar das populações locais (Macedo, 2005; Silva et al., 2007). A aplicação sem critérios técnicos pode intensificar processos de lixiviação e ampliar a vulnerabilidade sanitária em regiões já marcadas por desigualdades estruturais.

Esses fatores evidenciam que os impactos do setor sucroalcooleiro não se restringem à esfera produtiva, alcançando também dimensões sociais, ambientais e sanitárias. Nesse contexto, a engenharia de alimentos desempenha papel importante no desenvolvimento de sistemas produtivos mais seguros e sustentáveis. A incorporação de práticas voltadas à segurança sanitária e à responsabilidade ambiental torna-se fundamental para promover melhorias ao longo da cadeia produtiva.

Apesar dos avanços tecnológicos observados no setor sucroalcooleiro, ainda persistem desafios relacionados à degradação ambiental, à monocultura e às desigualdades sociais presentes na cadeia produtiva da cana-de-açúcar (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021; MMA, 2023).

Nesse sentido, a trajetória da cana-de-açúcar no Brasil evidencia uma dualidade: ao mesmo tempo em que o setor se destaca como referência em energia renovável e inovação tecnológica, ainda carrega marcas históricas de exploração social e impactos ambientais. A superação dessas contradições depende da integração



entre avanços tecnológicos, responsabilidade social e políticas públicas eficazes, de modo a consolidar um modelo de produção mais sustentável.

3.4 Sustentabilidade na Cadeia Sucoenergética.

Sustentabilidade é um conceito relacionado à capacidade de suprir as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras. Esse princípio busca equilibrar crescimento econômico, preservação ambiental e bem-estar social, de modo que os recursos naturais sejam utilizados de forma responsável, considerando os impactos das atividades humanas a longo prazo (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991).

O termo ganhou ampla difusão a partir do relatório da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), publicado em 1987, no qual se criticava o modelo econômico adotado pelos países desenvolvidos e se propunha um novo paradigma de desenvolvimento capaz de conciliar progresso econômico e equilíbrio ambiental em escala global. A partir desse documento, o conceito de desenvolvimento sustentável passou a ser adotado como estratégia para enfrentar a crise ecológica contemporânea (World Commission on Environment and Development, 1987).

A consolidação do desenvolvimento sustentável como diretriz internacional ocorreu a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Eco-92), realizada no Rio de Janeiro em 1992. A partir desse marco, instrumentos como a Agenda 21 passaram a incentivar a integração entre crescimento econômico, preservação ambiental e justiça social, embora sua implementação ainda enfrente desafios relacionados aos padrões globais de produção e consumo (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1992; Sachs, 2015).

O conceito de sustentabilidade representa um desafio significativo para a agricultura, especialmente no contexto da indústria sucoalcooleira. Diante disso, tem-se buscado cada vez mais o equilíbrio entre os pilares social, ambiental e econômico.

Nesse sentido, a sustentabilidade deve ser compreendida como um processo que envolve não apenas a preservação ambiental, mas também questões sociais e econômicas (Sachs, 2015). Essa perspectiva exige que o setor agrícola repense suas práticas, incorporando soluções que integrem produtividade e responsabilidade socioambiental, como observado no setor sucoalcooleiro e na produção de biocombustíveis (Macedo et al., 2005).

A diversidade de abordagens sobre o tema pode ser observada na Tabela 1, que reúne diferentes definições de sustentabilidade propostas por autores e organizações. Essa pluralidade evidencia que o conceito é dinâmico e em constante construção, refletindo distintas interpretações e aplicações, especialmente no contexto agrícola (Costa, 2010).



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Tabela 1 - Conceitos de sustentabilidade.

AUTOR	DEFINIÇÃO
WCED (1987)	Desenvolvimento sustentável significa atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades.
Allen <i>et al.</i> (1991)	Embora as definições de sustentabilidade devam incluir um conjunto de características ambientais, econômicas e sociais, a atenção deve centrar-se no ambiente, conservação de recursos, produtividade e rentabilidade ao nível da exploração e da empresa.
Camino & Müller (1993)	A população, as suas necessidades e níveis de consumo para as satisfazer, os recursos naturais, as tecnologias necessárias para transformar os recursos em produtos e serviços, os níveis de produção e de produtividade, a capacidade de carga dos ecossistemas, a produção, as instituições, as variáveis sociais adicionais e o tempo são as variáveis principais do conceito de sustentabilidade.
FAO (1993)	O conceito de sustentabilidade é complexo e para que seja estável e duradouro deve respeitar sete pilares. São eles: produtividade; resiliência; adaptabilidade; estabilidade; confiança, igualdade e autonomia.
Partidário (1997)	Na sua essência o desenvolvimento sustentável pressupõe uma alteração profunda dos valores e das valências de desenvolvimento, das prioridades de ação e intervenção e do equacionamento das relações entre comunidades e regiões com índices de desenvolvimento profundamente díspares.
Marzall (1999)	Sustentabilidade é a procura de um novo conjunto de valores para a sociedade, com uma grande ênfase sociológica, da equidade mais democrática possível, que terá como consequência imediata o respeito ao meio ambiente circundante.
Masera <i>et al.</i> (2000)	A sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável é o processo pelo qual se satisfazem, de maneira permanente, as necessidades materiais e espirituais de todos os habitantes do planeta sem degradar e melhorando as condições sócio ambientais que lhes dão sustento. É um processo de mudança dirigido, onde é importante tanto as metas traçadas como o caminho a alcançar.
CCE (2001)	O conceito de sustentabilidade é multidimensional, incluindo objetivos ambientais, sociais e econômicos. Entre estes diferentes elementos existe interdependência, podendo, até certo nível, criarem-se sinergias, mas podem também competir entre si. Neste caso, o conceito de sustentabilidade indica a necessidade de se atingir um equilíbrio entre estes três elementos



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Navarro (2002) A sustentabilidade é entendida como um conceito de natureza dinâmica, como um processo, uma tendência que persegue um equilíbrio no espaço e no tempo dos seus componentes ambiental, econômico e social, e não tanto como um estado final a alcançar ou como uma categoria absoluta do sistema.

Hâni (2007) O desenvolvimento sustentável deve permitir uma vida com dignidade no presente sem comprometer a vida com dignidade para as gerações futuras sem ameaçar o ambiente natural e não pondo em risco o ecossistema global.

Legenda: Compilado de conceitos de sustentabilidade tidas por diferentes autores de referência no assunto ao longo do desenvolvimento da história.

Fonte: (Costa, 2010).

Além desses conceitos, ainda temos as chamadas ODS, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (United Nations, 2015), constituem uma agenda global composta por 17 objetivos interdependentes voltados à integração entre crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental. Essa estrutura normativa busca orientar políticas públicas e estratégias produtivas em escala internacional, promovendo padrões de desenvolvimento sustentáveis e de longo prazo, com foco na redução das desigualdades, na proteção ambiental e no enfrentamento das mudanças climáticas.

No contexto da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, os ODS apresentam aplicação direta, especialmente nos objetivos relacionados à energia limpa e acessível, consumo e produção responsáveis, inovação industrial e ação climática. O setor sucroenergético brasileiro contribui para essas metas por meio da geração de bioenergia, produção de biocombustíveis, desenvolvimento de biorrefinarias e aproveitamento integral da biomassa, elementos que fortalecem a transição para uma economia de baixo carbono. No contexto nacional, essas diretrizes também dialogam com indicadores e metas adaptadas à realidade brasileira, reforçando o papel da sustentabilidade como eixo estruturante do desenvolvimento agroindustrial (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [IPEA], 2018).

A partir dessas diferentes perspectivas, compreende-se que a sustentabilidade constitui um conceito multidimensional, estruturado nos pilares social, ambiental e econômico. Dessa forma, a busca pelo equilíbrio entre esses componentes torna-se essencial, já que a ausência de integração entre eles pode comprometer a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991; Organização das Nações Unidas, 1992; Sachs, 2015).

3.5 Estratégias Sustentáveis na Produção de Cana-de-Açúcar.

A produção de cana-de-açúcar envolve desafios ambientais e sociais que têm aumentado a necessidade de práticas mais sustentáveis no setor sucroalcooleiro. Em atividades intensivas no uso de recursos naturais, como a agroindústria canavieira, a busca por modelos de produção mais eficientes envolve tanto a redução de impactos ambientais quanto a utilização de tecnologias capazes de otimizar o uso de recursos naturais (Sachs, 2015).



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Nos últimos anos, o setor sucroalcooleiro tem incorporado iniciativas voltadas à redução de impactos ambientais e à melhoria da eficiência produtiva. A utilização de novas tecnologias e práticas de manejo tem contribuído para mudanças graduais no setor, principalmente em relação ao aproveitamento de recursos e à redução dos impactos associados à produção canavieira (Cortez, 2010).

Diante desses desafios, práticas sustentáveis têm sido incorporadas como alternativas para reduzir os impactos ambientais associados à produção canavieira. A implementação de sistemas agroflorestais, por exemplo, contribui para a recuperação de áreas degradadas, aumento da biodiversidade e redução da dependência de insumos químicos (Morandi & Watanabe, 2024; Nicodemo et al., 2011).

Além disso, práticas como a agricultura de precisão têm se mostrado eficazes na redução dos impactos ambientais da monocultura. O uso de sensores e tecnologias de monitoramento permite maior controle sobre a aplicação de insumos, contribuindo para o uso mais racional de insumos, redução de desperdícios e melhoria da qualidade do solo (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [Embrapa], 2014).

A rotação de culturas é uma prática agroecológica amplamente reconhecida por seus benefícios à sustentabilidade agrícola. No contexto da produção de cana-de-açúcar, a alternância com leguminosas e culturas de cobertura contribui para a melhoria da fertilidade do solo, da estrutura física e para a interrupção de ciclos de pragas e doenças. Além disso, essa prática favorece a retenção de água no solo e reduz problemas como a compactação, comuns em sistemas de monocultura contínua (Ramos Júnior & Silva, 2021).

O manejo integrado do solo e da água constitui outra estratégia essencial para a sustentabilidade do setor. Técnicas como cultivo mínimo, adubação verde e irrigação localizada contribuem para a conservação do solo e a redução de perdas por erosão e lixiviação de nutrientes. A gestão eficiente dos recursos hídricos tem se tornado cada vez mais relevante diante da escassez em regiões produtoras. O uso de sensores de umidade e o reúso de água em processos industriais destacam-se como práticas promissoras para aumentar a eficiência hídrica na cadeia sucroalcooleira (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [Embrapa], 2014; União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia [UNICA], 2010).

A mecanização do cultivo, especialmente na etapa de colheita, tem contribuído significativamente para a redução de impactos ambientais. A substituição da colheita manual com uso de queimadas pela colheita mecanizada reduz emissões atmosféricas e melhora as condições de trabalho no campo, além de aumentar a eficiência operacional (Ramos Júnior & Silva, 2021; Ribeiro, 2012).

Além disso, a biotecnologia tem desempenhado papel relevante na modernização da produção agrícola, com o desenvolvimento de variedades mais resistentes a pragas e doenças, reduzindo a necessidade de defensivos químicos. O uso de bioinseticidas também representa uma alternativa mais sustentável em comparação às práticas convencionais, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao manejo agrícola (Dill, 2022; Mariano et al., 2021).

O controle biológico de pragas destaca-se como alternativa sustentável ao uso intensivo de agrotóxicos. Essa estratégia baseia-se na utilização de organismos vivos ou seus metabólitos para o controle de pragas e doenças da cultura da cana-de-açúcar. Entre os exemplos mais utilizados estão agentes como *Bacillus thuringiensis* e o fungo *Metarhizium anisopliae*, que apresentam eficácia comprovada em diferentes regiões produtoras (Parra, 2022). Esses métodos reduzem impactos ambientais e toxicológicos, além de serem compatíveis com sistemas de produção sustentável e certificações internacionais.



Dessa forma, o avanço de tecnologias e práticas sustentáveis no setor sucroalcooleiro torna-se importante para reduzir impactos ambientais e promover sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

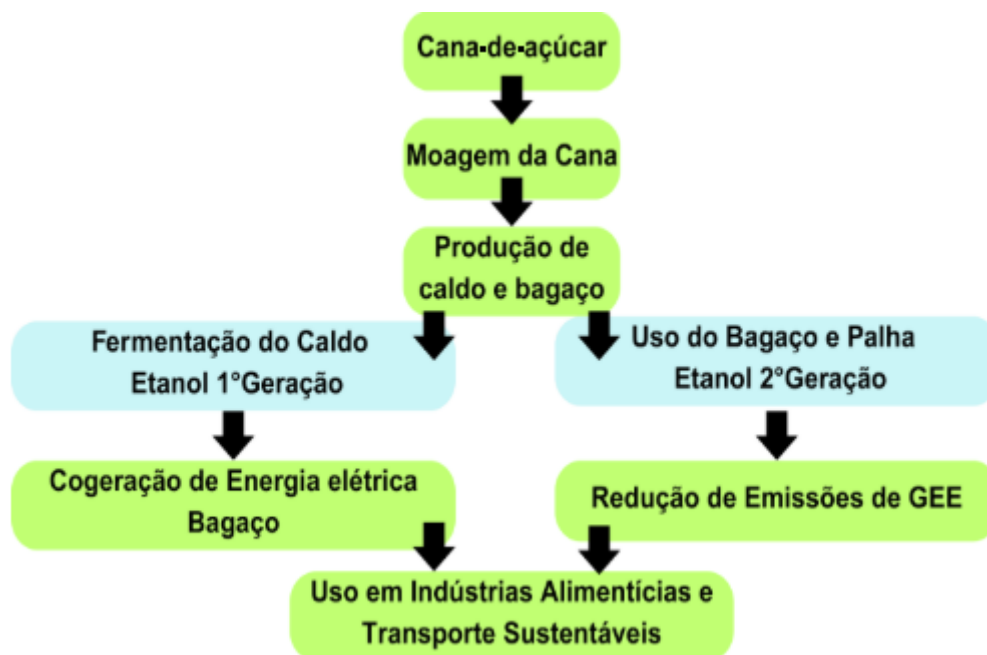
3.6 Biocombustíveis e o Aproveitamento de Subprodutos da Cana-de-Açúcar

A produção de biocombustíveis, especialmente o etanol derivado da cana-de-açúcar, ocupa posição central na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O etanol de primeira geração, obtido a partir da fermentação dos açúcares presentes no caldo da cana, já representa uma alternativa consolidada na matriz energética brasileira. No entanto, avanços recentes têm ampliado esse potencial por meio do desenvolvimento do etanol de segunda geração, produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, como bagaço e palha (Cortez, 2010; União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia [UNICA], 2022).

A produção de etanol de segunda geração (E2G) permite maior aproveitamento da biomassa disponível, aumentando a eficiência do processo sem necessidade de expansão da área cultivada. Além disso, contribui para a redução de impactos ambientais ao evitar o acúmulo e a decomposição de resíduos agrícolas, que produziriam emissões de metano. Estudos indicam que o etanol de cana pode reduzir em até 90% as emissões de dióxido de carbono quando comparado à gasolina, considerando seu ciclo de vida (Goldemberg et al., 2004; International Energy Agency, 2021).

Do ponto de vista industrial, o processo de produção de etanol envolve etapas físico-químicas e biotecnológicas bem definidas. No etanol de primeira geração, a fermentação ocorre a partir do caldo extraído da cana, enquanto no de segunda geração são necessárias etapas adicionais, como pré-tratamento da biomassa, hidrólise enzimática e fermentação dos açúcares liberados. Essa integração de processos possibilita maior rendimento global e melhor aproveitamento da matéria-prima (BNDES & CGEE, 2008). O processo pode ser observado de forma esquemática no fluxograma apresentado na Figura 3, abaixo.

Figura 3 – Fluxograma simplificado da produção de etanol de primeira e segunda geração a partir da cana-de-açúcar e seus resíduos.



Legenda: Diagrama comparativo das rotas tecnológicas de biocombustíveis.

Fonte: Elaborado pela autora.

Além da produção de etanol, o processamento industrial da cana-de-açúcar gera diferentes subprodutos com potencial de reaproveitamento econômico e ambiental. Entre os principais destacam-se o bagaço, a vinhaça, a torta de filtro, o melaço e a levedura residual da fermentação. O aproveitamento desses materiais contribui para a redução da geração de resíduos, aumento da eficiência produtiva e desenvolvimento de práticas associadas à economia circular no setor sucroenergético (EPE, 2021; Galdos et al., 2013; Macedo et al., 2005).

Os principais subprodutos gerados durante o processamento da cana-de-açúcar e suas respectivas aplicações industriais podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2- Principais subprodutos gerados no processamento da cana-de-açúcar e suas aplicações industriais

Subproduto	Origem no Processo	Características	Aplicações
Bagaço	Moagem da cana	Material fibroso rico em celulose e lignina	Cogeração de energia e etanol de segunda geração
Vinhaça	destilação do etanol	Resíduo líquido rico em matéria orgânica e potássio	Fertirrigação e biodigestão
Melaço	fabricação do açúcar	Líquido viscoso rico em açúcares fermentescíveis	Produção de etanol, leveduras e bebidas fermentadas

Torta de Filtro	filtração do caldo	Resíduo sólido rico em matéria orgânica e nutrientes	Fertilizante agrícola
Levedura Residual	fermentação alcoólica	Biomassa microbiana rica em proteínas	Ração animal e suplementação nutricional

Legenda: Matriz descritiva dos coprodutos da atividade sucroenergética. A estrutura correlaciona o resíduo gerado à sua respectiva operação unitária de origem.

Fonte: Elaborado pela autora (2026), Adaptado de BNDES; CGEE (2020), Macedo et al. (2005).

O aspecto físico de cada subproduto listado anteriormente está disposto nas figuras de 4 a 8 para melhor compreensão da temática. Primeiramente, na Figura 4, está exposto o bagaço da Cana-de-Açúcar.

Figura 4 - Bagaço da Cana-de-Açúcar.



Legenda: Registro fotográfico em detalhe do bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar.

Fonte: Syngenta Digital (2023).

O bagaço da cana-de-açúcar corresponde à fração fibrosa resultante da moagem da matéria-prima, sendo amplamente utilizado na cogeração de energia e na produção de etanol de segunda geração devido ao seu elevado teor lignocelulósico. Já a vinhaça é um resíduo líquido gerado após a destilação do etanol, caracterizado pela elevada carga orgânica e presença de nutrientes minerais, especialmente potássio. Quando manejada adequadamente, a vinhaça pode ser utilizada na fertirrigação agrícola; entretanto, sua aplicação inadequada pode contribuir para a contaminação do solo e de recursos hídricos (Cortez, 2010).

De forma análoga, na figura 5 a imagem da Vinhaça propõe o conhecimento visual do que é esse subproduto.

Figura 5 - Vinhaça da Cana-de-Açúcar.



Legenda: Registro fotográfico do descarte e armazenamento de vinhaça em canais de escoamento industrial.

Fonte: Boschiero (2023).

A vinhaça é um resíduo líquido proveniente da destilação do etanol, possui elevada carga orgânica e concentração de nutrientes minerais, sendo frequentemente utilizada na fertirrigação agrícola. Já o melaço, rico em açúcares fermentescíveis, é amplamente empregado em processos fermentativos para produção de etanol, leveduras e bebidas alcoólicas (Cortez, 2010).

Imediatamente abaixo, novamente é introduzida uma imagem para fins didáticos, a figura 6 retrata o melaço.

Figura 6 - Melaço da Cana-de-Açúcar



Legenda: Registro visual em detalhe do melaço de cana-de-açúcar durante manuseio industrial.

Fonte: Melados Realeza (2022).

O melaço é um subproduto viscoso e de coloração escura obtido durante o processo de produção de açúcar a partir da cana-de-açúcar, resultante da concentração dos açúcares não cristalizáveis após etapas de evaporação e centrifugação. Sua composição é rica em sacarose residual, glicose, frutose, minerais e compostos orgânicos, o que o torna uma matéria-prima de alto valor industrial. Tradicionalmente, o melaço é amplamente utilizado na produção de etanol de segunda geração, fermentações industriais, alimentação animal e na indústria alimentícia, especialmente em formulações que exigem sabor e coloração característicos. Além disso, sua utilização contribui para o aproveitamento integral da biomassa da cana-de-açúcar, alinhando-se aos princípios de economia circular e redução de resíduos na cadeia sucroenergética.

Similar às demais imagens, temos a figura 7 que retrata o subproduto chamado de Torta de filtro.

Figura 7 - Torta de Filtro.



Legenda: Registro fotográfico do acúmulo e manejo da torta de filtro em campo.

Fonte: Rossetto e Santiago (2022).

A torta de filtro apresenta elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, podendo ser utilizada como fertilizante agrícola e condicionador do solo. Por sua vez, a levedura residual proveniente da fermentação alcoólica possui elevado teor proteico e pode ser reaproveitada na alimentação animal e em processos biotecnológicos. O aproveitamento desses subprodutos contribui para a redução da geração de resíduos e para o fortalecimento de práticas associadas à economia circular no setor sucroenergético (EPE, 2021; Galdos et al., 2013; Macedo et al., 2005).

Por fim, em subprodutos há a levedura residual, demonstrada visualmente pela figura 8.

Figura 8 - Levedura Residual.



Legenda: Registro fotográfico da biomassa de levedura residual recuperada em dorna industrial.

Fonte: Narciso (2021).

A levedura residual é um subproduto gerado durante o processo fermentativo da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, sendo composta principalmente por células de leveduras do gênero *Saccharomyces*, além de restos de substratos e metabólitos do processo. Após a fermentação alcoólica, parte significativa dessas leveduras é recuperada nas etapas de centrifugação e pode ser reaproveitada, apresentando elevado potencial biotecnológico e nutricional. Na cadeia sucroenergética, a levedura residual é utilizada principalmente na produção de ração animal devido ao seu alto teor de proteínas, vitaminas do complexo B e minerais, além de também ser estudada para aplicações em bioprocessos, biofertilizantes e produção de compostos de valor agregado. Seu aproveitamento contribui para o conceito de biorrefinaria, promovendo maior eficiência no uso da biomassa da cana-de-açúcar e redução de resíduos industriais.

O reaproveitamento de resíduos também desempenha papel relevante no setor sucroalcooleiro. A utilização do bagaço da cana para cogeração de energia contribui para a produção de vapor e eletricidade, tornando muitas usinas auto suficientes energeticamente. Além do aproveitamento de resíduos, essa prática reduz a dependência de fontes externas de energia e contribui para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Em 2020, cerca de 20% da eletricidade renovável do Brasil foi gerada a partir da biomassa da cana, evidenciando a importância desse sistema para o setor energético nacional (EPE, 2021; Galdos et al., 2013; Macedo et al., 2005).

O uso de energia renovável proveniente da biomassa da cana também influencia outros setores industriais, incluindo a indústria de alimentos. A substituição de fontes fósseis por biomassa e bioenergia em processos industriais tem sido apontada como uma estratégia relevante para a redução das emissões de gases de



efeito estufa e para o aumento da eficiência energética nas cadeias produtivas. No setor de alimentos e bebidas, a adoção de fontes energéticas renováveis está associada à busca por processos mais sustentáveis, redução da pegada de carbono e melhor aproveitamento de resíduos agroindustriais (Bressan Filho, 2010; Goldemberg et al., 2004; Seabra et al., 2011).

O aproveitamento de subprodutos da cana-de-açúcar também tem possibilitado o desenvolvimento de bioplásticos e materiais biodegradáveis, ampliando o papel dessa cultura para além da produção energética e alimentícia. Essa diversificação contribui para o aproveitamento integral da biomassa e para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis (Janzen et al., 2026).

Do ponto de vista ambiental, o uso do etanol combustível tem contribuído significativamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Entre 2003 e 2020, o uso de etanol no Brasil evitou a emissão de mais de 600 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, demonstrando a relevância desse biocombustível na redução dos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis (Brasil, 2022).

No cenário nacional, o Brasil se consolidou como líder global na produção de etanol, com 27,5 bilhões de litros produzidos em 2022, sendo a maior parte destinada ao consumo interno. A ampla adoção de veículos flex fuel fortalece a presença do etanol no mercado brasileiro. Além do consumo interno, a exportação do biocombustível também contribui para a inserção do país no mercado internacional de biocombustíveis (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2022; União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo [UNICA], 2022).

Dessa forma, o aproveitamento da cana-de-açúcar para a produção de biocombustíveis, geração de energia e obtenção de subprodutos evidencia a importância dessa cultura para os setores energético e industrial. No contexto da engenharia de alimentos, o aproveitamento integral da matéria-prima e a otimização dos processos produtivos contribuem para sistemas mais eficientes e com menor geração de resíduos.

3.7 Inovações Tecnológicas e Aplicações na Indústria Alimentícia.

As inovações tecnológicas desempenham papel fundamental na transição para um modelo mais sustentável na indústria sucroalcooleira. Entre essas inovações, destaca-se o etanol de segunda geração (E2G), produzido a partir de resíduos lignocelulósicos da cana-de-açúcar, como bagaço e palha. Essa tecnologia amplia o aproveitamento da biomassa e contribui para a redução de impactos ambientais associados à expansão agrícola (Cortez, 2010; Macedo, 2005).

Apesar do potencial sustentável do etanol de segunda geração, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta limitações técnicas e econômicas. O pré-tratamento da biomassa lignocelulósica demanda elevado consumo energético e uso de enzimas de alto custo, o que pode comprometer a viabilidade econômica do processo. Além disso, a integração entre as etapas de hidrólise e fermentação ainda representa um desafio operacional para muitas usinas, especialmente em regiões com menor acesso a tecnologias avançadas e investimentos industriais (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social [BNDES] & Centro de Gestão e Estudos Estratégicos [CGEE], 2008; Dias et al., 2012).

A biotecnologia e o melhoramento genético têm se destacado como ferramentas estratégicas para a sustentabilidade do setor sucroenergético. O desenvolvimento de cultivares mais produtivas e resistentes a pragas, doenças e variações climáticas contribui para a redução do uso de defensivos agrícolas e fertilizantes,



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



além de aumentar a estabilidade produtiva. O uso de variedades geneticamente modificadas, como aquelas resistentes à broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*), evidencia o potencial dessas tecnologias para reduzir perdas e aumentar a eficiência da produção (Bastos et al., 2014; Dinardo-Miranda et al., 2021; Mariano et al., 2021).

No âmbito industrial, a adoção de processos mais limpos e eficientes tem sido intensificada. A cogeração de energia a partir do bagaço da cana, associada a sistemas de recirculação de água, controle de emissões e redução de resíduos, contribui para a diminuição da pegada ambiental das usinas. Essas práticas também promovem ganhos econômicos e atendem às exigências de mercados internacionais quanto à sustentabilidade dos processos produtivos (Galdos et al., 2013).

A modernização dos processos industriais impacta diretamente a indústria de alimentos, que utiliza derivados da cana como insumos. O aprimoramento no controle de qualidade do açúcar, incluindo parâmetros como pureza, umidade e cor, contribui para maior estabilidade dos produtos alimentícios. Além disso, a rastreabilidade e a conformidade com padrões internacionais fortalecem a competitividade do setor no mercado global (Brasil, 2021).

A engenharia de alimentos também possui papel relevante nesse contexto, especialmente na aplicação de tecnologias relacionadas ao controle de qualidade, microbiologia industrial, engenharia térmica e automação. Essas ferramentas contribuem para maior precisão, rastreabilidade e padronização dos produtos finais. No refino do açúcar, por exemplo, o uso de filtros de carvão ativado, troca iônica e cristalizadores a vácuo contribui para a obtenção de produtos com maior pureza e estabilidade para uso em alimentos e bebidas industrializadas (Paye et al., 2020; Silva, 2011).

O aproveitamento biotecnológico dos subprodutos da cana-de-açúcar também representa uma importante estratégia de inovação no setor sucroenergético. Subprodutos como melaço e leveduras residuais podem ser utilizados em processos fermentativos para produção de etanol, bebidas alcoólicas, biomassa microbiana e alimentos fermentados (Basso et al., 2023; Oliveira et al., 2022). Na indústria sucroalcooleira, as leveduras desempenham papel central na fermentação alcoólica, contribuindo para a conversão dos açúcares em etanol e outros compostos de interesse industrial (Amorim & Zeidan, 2001, 2020; Walker, 2011).

Paralelamente às aplicações em larga escala, o reaproveitamento desses subprodutos também pode beneficiar pequenos produtores e processos artesanais. O melaço, por exemplo, pode ser utilizado na produção de cachaça, fermentados e panificação, agregando valor econômico aos resíduos da cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Sob essa perspectiva, a engenharia bioquímica e a engenharia de alimentos contribuem para o desenvolvimento de processos fermentativos mais eficientes, seguros e sustentáveis, tanto em sistemas industriais quanto em produções de menor escala (Amorim & Zeidan, 2001, 2020; Walker, 2011).

A vinhaça, embora rica em nutrientes, possui elevada carga orgânica, podendo representar risco ambiental quando manejada de forma inadequada, especialmente em relação à contaminação de solos e recursos hídricos (Christofolletti et al., 2013; Rossetto & Santiago, 2022). Apesar do potencial de reaproveitamento da vinhaça e de outros resíduos agroindustriais, ainda são necessários estudos e tecnologias que permitam maior eficiência nos processos e redução dos impactos ambientais.

Além disso, a tecnologia de alimentos tem possibilitado a diversificação da produção dentro das usinas, permitindo a obtenção simultânea de produtos como etanol hidratado, etanol anidro, açúcar, melaço alimentício, leveduras e biofertilizantes. Esse modelo de biorrefinaria favorece o aproveitamento integral da biomassa da



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



cana-de-açúcar e reduz o desperdício de recursos (Friedrichsen & Bruni, 2022). O uso de sensores, inteligência artificial e biotecnologia também tem contribuído para maior controle dos processos produtivos e redução de perdas industriais (Friedrichsen & Bruni, 2022; Ramos Júnior & Silva, 2021).

Por fim, a redução do uso de insumos químicos ao longo da cadeia produtiva contribui diretamente para a segurança alimentar. A obtenção de matérias-primas com menor carga de resíduos químicos favorece a produção de alimentos mais seguros e com melhor controle de qualidade. Nesse contexto, a engenharia de alimentos possui papel importante no desenvolvimento de processos mais seguros e sustentáveis (Morandi & Watanabe, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a ampliação dessas alternativas ainda depende de investimentos em pesquisa, incentivo à inovação e fiscalização adequada. A integração entre biotecnologia, sustentabilidade e aproveitamento integral da biomassa representa um caminho importante para o fortalecimento de um setor sucroenergético mais eficiente, competitivo e ambientalmente responsável.

3.8 Embalagens Biodegradáveis e Aplicações na Indústria de Alimentos

O desenvolvimento de bioplásticos derivados da cana-de-açúcar tem ganhado destaque na indústria de embalagens, especialmente devido à busca por materiais de origem renovável. Entre os principais exemplos está o polietileno verde, produzido a partir do etanol da cana-de-açúcar, que apresenta propriedades semelhantes às do plástico convencional, porém com menor impacto ambiental associado à emissão de dióxido de carbono (Braskem, 2022).

Além das questões ambientais, é fundamental compreender a função tecnológica das embalagens na indústria de alimentos. As embalagens atuam como barreiras físicas e químicas, protegendo o alimento contra fatores externos como oxigênio, umidade, luz e contaminação microbológica. A barreira ao oxigênio é essencial para evitar reações de oxidação lipídica e perda de qualidade sensorial, enquanto o controle da permeabilidade ao vapor de água contribui para a manutenção da textura, crocância e estabilidade físico-química dos produtos (Fellows, 2017; Robertson, 2012).

Além da função de proteção, a embalagem exerce papel importante na extensão da vida de prateleira (*shelf life*), ao retardar processos de deterioração química, enzimática e microbológica, contribuindo para a segurança e qualidade dos alimentos durante o armazenamento e distribuição. Nesse sentido, a embalagem deve ser compreendida como parte integrante do sistema produto, sendo desenvolvida de acordo com as características do alimento e das condições de armazenamento (Yildirim et al., 2018).

A engenharia de alimentos também tem contribuído para o desenvolvimento de embalagens inovadoras na indústria de alimentos. Além das embalagens biodegradáveis, destacam-se as embalagens ativas e inteligentes, capazes de interagir com o alimento ou com o ambiente interno por meio da incorporação de compostos antimicrobianos, antioxidantes e sensores indicadores de qualidade. Nesse cenário, os biopolímeros de origem renovável, como os derivados da cana-de-açúcar, apresentam potencial para aplicação em embalagens sustentáveis (Yildirim et al., 2018).

A aplicação desses materiais já é uma realidade na indústria de alimentos. Empresas como Danone, Nestlé e Tetra Pak têm incorporado bioplásticos em suas embalagens, promovendo reduções significativas nas emissões de CO₂ e ampliando o uso de matérias-primas renováveis em seus processos produtivos (Danone,



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



2012; Nestlé, 2022; Tetra Pak, 2019a). Além disso, certificações como o selo *Im Green*TM e padrões de gestão ambiental baseados na norma ISO 14001 reforçam a credibilidade dessas iniciativas perante o mercado consumidor (Braskem, 2022). Essas ações corporativas alinham-se, simultaneamente, às obrigações setoriais de logística reversa e responsabilidade compartilhada instituídas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010)

Do ponto de vista ambiental, os bioplásticos apresentam vantagens significativas em relação aos polímeros derivados de fontes fósseis. Segundo dados divulgados pela Braskem indicam que o polietileno verde pode reduzir em até 70% as emissões de CO₂, além de permitir reciclagem em sistemas já existentes, favorecendo a economia circular (Braskem, 2022). Alternativas como o ácido polilático (PLA) e outros polímeros biodegradáveis também contribuem para a redução do tempo de degradação e da geração de microplásticos (Jones, 2020).

No contexto econômico, o Brasil ocupa posição estratégica no mercado global de bioplásticos, com destaque para a produção de polietileno verde em escala industrial. Essa inserção fortalece a competitividade do setor sucroalcooleiro e amplia as possibilidades de aplicação desses materiais na indústria de alimentos (Braskem, 2022).

Apesar dos avanços, os bioplásticos derivados da cana-de-açúcar ainda apresentam limitações técnicas e operacionais quando comparados aos polímeros convencionais (Jones, 2020). Muitos desses materiais possuem menor resistência térmica e mecânica, o que pode restringir sua aplicação em processos que envolvem temperaturas elevadas ou exigências estruturais mais rigorosas (Robertson, 2012). Além disso, alguns biopolímeros apresentam maior permeabilidade a gases e vapor de água quando comparados aos polímeros petroquímicos convencionais, comprometendo sua eficiência como barreira e podendo impactar negativamente a vida de prateleira dos alimentos (Amorim & Zeidan, 2020; Fellows, 2017).

Além disso, o custo de produção ainda é superior ao dos plásticos de origem fóssil, dificultando sua adoção em larga escala. Há também limitações relacionadas à biodegradabilidade, uma vez que muitos desses materiais requerem condições controladas de compostagem industrial para sua degradação adequada. Assim, embora apresentem vantagens ambientais, os bioplásticos ainda demandam avanços tecnológicos para alcançar desempenho equivalente aos materiais tradicionais (Amorim & Zeidan, 2020; Jones, 2020).

Dessa forma, as embalagens biodegradáveis representam uma alternativa aos plásticos convencionais, com potencial para reduzir impactos ambientais e ampliar o uso de matérias-primas renováveis. Na indústria de alimentos, esses materiais também contribuem para a conservação dos produtos e para o desenvolvimento de sistemas de embalagem mais sustentáveis.

3.9 Políticas Públicas e Perspectivas para Sustentabilidade no Setor Sucroalcooleiro.

Os avanços científicos e tecnológicos têm ampliado significativamente as possibilidades de sustentabilidade no setor sucroalcooleiro, especialmente por meio da valorização de subprodutos da cana-de-açúcar e do desenvolvimento de materiais de base renovável. O aproveitamento de resíduos agroindustriais, como melaço, leveduras e vinhaça, reforça a transição para modelos produtivos mais eficientes, nos quais a biomassa é utilizada de forma integral, reduzindo desperdícios e ampliando o valor agregado da cadeia produtiva (Morandi & Watanabe, 2024).



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



Essa lógica de aproveitamento integral está diretamente associada ao conceito de biorrefinaria e à consolidação da economia circular no setor, permitindo a produção de biocombustíveis avançados, fertilizantes, substratos fermentativos e outros insumos industriais. Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a gestão integrada de resíduos, incluindo metas de redução da geração, reutilização e destinação ambientalmente adequada ao longo da cadeia produtiva, fortalecendo a organização de sistemas mais sustentáveis no setor agroindustrial brasileiro (Brasil, 2010).

Paralelamente, as políticas públicas voltadas à transição energética desempenham papel central na consolidação dos biocombustíveis como alternativa estratégica na matriz energética nacional. O Programa RenovaBio (Lei nº 13.576/2017) destaca-se como principal instrumento regulatório do setor ao estabelecer metas de descarbonização baseadas na eficiência energética e na emissão de Créditos de Descarbonização (CBIOS), contribuindo para o alinhamento do Brasil aos compromissos internacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa (Brasil, 2017; UNFCCC, 2015).

No mesmo contexto regulatório, mecanismos de certificação socioambiental e normas internacionais, como a ISO 14001, têm sido amplamente adotados como instrumentos de governança ambiental, rastreabilidade e melhoria contínua dos processos produtivos. Embora essas ferramentas contribuam para o aprimoramento dos padrões de sustentabilidade, sua efetividade ainda depende da fiscalização, da adesão de diferentes perfis de produtores e da integração entre políticas públicas e práticas empresariais ao longo da cadeia produtiva (WWF-Brasil, 2019).

Apesar dos avanços tecnológicos e institucionais, persistem desafios estruturais relacionados à inclusão produtiva, à efetiva implementação das políticas ambientais e à redução das desigualdades entre grandes e pequenos produtores. Nesse cenário, a consolidação de um modelo sustentável no setor sucroalcooleiro depende da articulação entre inovação tecnológica, governança ambiental, incentivos econômicos e políticas públicas consistentes.

Nesse contexto mais amplo, os compromissos estabelecidos no Acordo de Paris reforçam a necessidade global de transição para economias de baixo carbono, orientando estratégias de mitigação das mudanças climáticas e redução de emissões de gases de efeito estufa. Para o setor sucroenergético brasileiro, esse cenário representa não apenas um desafio regulatório, mas também uma oportunidade estratégica de consolidação como referência internacional em bioenergia sustentável, economia circular e produção baseada em recursos renováveis.

Conclusão

A produção de cana-de-açúcar no Brasil possui elevada relevância econômica e energética, mas também apresenta impactos ambientais e sociais associados ao processo histórico de expansão do setor sucroenergético. A revisão da literatura evidenciou que a modernização da cadeia produtiva, impulsionada por tecnologias como agricultura de precisão, mecanização e melhoramento industrial, tem contribuído para o aumento da eficiência produtiva e para a mitigação parcial desses impactos.

Observa-se ainda a consolidação de estratégias baseadas na economia circular e no conceito de biorrefinaria, com o aproveitamento integral da biomassa da cana-de-açúcar para a geração de bioenergia,



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



biocombustíveis e insumos industriais. Esses avanços fortalecem o papel do setor na transição para uma matriz energética mais sustentável e alinhada a compromissos climáticos globais.

Além disso, a inserção da cana-de-açúcar na indústria de alimentos, especialmente no desenvolvimento de materiais e embalagens sustentáveis, reforça sua contribuição para a substituição de insumos de origem fóssil e para a promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis.

Conclui-se que a cadeia produtiva da cana-de-açúcar se caracteriza como um sistema integrado e multifuncional, no qual os aspectos históricos, sociais, ambientais, tecnológicos e industriais se interligam. Nesse contexto, a compreensão dessas múltiplas dimensões evidencia que os desafios e as oportunidades do setor dependem da articulação entre inovação tecnológica e sustentabilidade, condição essencial para o desenvolvimento do setor agroindustrial brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acsegrad, H. (2004). Justiça ambiental: Ação coletiva e estratégias argumentativas. In H. Acsegrad, S. Herculano, & J. A. Pádua (Orgs.), *Justiça ambiental e cidadania* (pp. 23–40). Relume Dumará.
- Amorim, H. V., & Lopes, M. L. (2020). *Fermentação alcoólica: Ciência e tecnologia*. Fermentec.
- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. (2022). *Anuário da indústria automobilística brasileira 2022: Séries históricas de produção, frota e licenciamento de veículos flex*. <https://anfavea.com.br>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, & Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2008). *Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável*. BNDES. <https://www.bndes.gov.br>
- Bastos, G. E., Daros, E., & Zeni-Neto, H. (2014). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 44(9), 1521–1526.
- Bonsucro. (2022). *Bonsucro Production Standard: Version 5.1*. <https://bonsucro.com>
- Boschiero, B. N. (2023, 1 de agosto). Vinhaça: De resíduo a recurso – Utilização e perspectivas futuras. *Agroadvance*. <https://agroadvance.com.br/blog-vinhaca-de-residuo-a-recurso/>
- Brasil. (2010, 2 de agosto). *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União. <https://www.planalto.gov.br>
- Brasil. (2012, 25 de maio). *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa*. Diário Oficial da União. <https://www.planalto.gov.br>
- Braskem. (2022). *Biopolímero polietileno verde: Inovação transformando plástico*. <https://www.braskem.com.br/imgreen/home-pt>
- Bressan Filho, Â. (2010). O uso da biomassa como nova fonte energética mundial. In F. A. F. Lins, A. C. S. Castro, & F. E. de Lapouge (Orgs.), *Agrominerais para o Brasil* (pp. 189–200). Centro de Tecnologia Mineral; CETEM/MCT. <https://www.gov.br/cetem/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/projetos-financiados-por-agencias-e-ou-recursos-publicos/encerrado/s/agrominerais-para-biocombustiveis-2009-2010/agrominerais-para-o-brasil/novolivro/cap10.pdf>
- Canepelle, F. L., Godinho, E. Z., Gasparotto, H. V., Daltin, R. S., & Zuin, L. F. S. (2020). Cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras almejando sustentabilidade. *Expressa Extensão*, 25(3), 45–58. <https://doi.org/10.15210/ee.v25i3.18256>
- Chagas, M. F., Cavalett, O., Bonomi, A., & Kunst, C. (2020). Techno-economic and environmental assessment of integrated sugarcane biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(4), 785–802.
- Cheavegatti-Gianotto, A., Abreu, H. M. C., Arruda, P., Besspalhok Filho, J. C., Burnquist, W. L., Creste, S., et al. (2011). Sugarcane (*Saccharum × officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. *Tropical Plant Biology*, 4(1), 62–89.
- Cherubin, M. R., Ribeiro, R. H., & Cerri, C. E. P. (2021). Soil health degradation in sugarcane expansion areas in Brazil. *Scientia Agricola*, 78(2), e20190112.
- Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Chemosphere*, 92(11), 1455–1465.
- Coelho, S. T. (2004). Biomass power generation in Brazil. *AIP Conference Proceedings*, 742(1), 33–44.



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



- Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. (1991). *Nosso futuro comum* (2ª ed.). Fundação Getúlio Vargas.
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2023). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Terceiro levantamento, safra 2023/24*. <https://www.gov.br/conab>
- Cortez, L. A. B. (Org.). (2010). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. Blucher.
- Costa, A. A. V. M. R. (2010). Agricultura sustentável I: Conceitos. *Revista de Ciências Agrárias*, 33(2), 61–74. <https://rcaap.pt>
- Cunha, M. S. (2019). Crise do setor sucroenergético no Brasil e a vulnerabilidade territorial dos municípios canavieiros. *Revista de Política Agrícola*, 28(4), 43–57.
- Dean, W. (1996). *A ferro e fogo: A história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. Companhia das Letras.
- Dias, M. O. S., Cavalett, O., Junqueira, T. L., Jesus, C. D. F., Watanabe, M. D. B., Rossell, C. E. V., & Bonomi, A. (2012). Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*, 103(1), 152–161.
- Dill, R. E. (2022). *Bioinsumos na agricultura brasileira: Alternativa biológica para uma agricultura ambientalmente sustentável* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.
- Dinardo-Miranda, L. L., Anjos, I. A., Costa, V. P., & Fracasso, J. V. (2021). Impacto do ataque da broca *Diatraea saccharalis* e de podridões em cana-de-açúcar sobre os parâmetros tecnológicos da cultura. *Bragantia*, 80, e1221.
- Duarte, C. G., & Malheiros, T. F. (2015). Sustentabilidade e políticas públicas para o setor sucroenergético: Uma análise dos temas abordados. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 4(3), 123–138.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2014). *Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos*. Embrapa.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2021). *Balanço energético nacional 2021: Ano de referência 2020*. <https://www.epe.gov.br>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2024). *Balanço energético nacional 2024: Relatório síntese – ano base 2023*. EPE.
- Feliciano, G. G., & Pasqualetto, O. Q. F. (2020). O “Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista” e a mecanização do corte da cana-de-açúcar: (des)caminhos da soft law. *Revista de Direito do Trabalho e Seguridade Social*, 46(212), 201–216.
- Fellows, P. J. (2017). *Food processing technology: Principles and practice* (4th ed.). Woodhead Publishing.
- Ferraz Junior, A. D. N., Etchebehere, C., Perecin, D., Coelho, S. T., & Woods, J. (2022). Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>
- Food and Agriculture Organization. (2012). *FAO statistical yearbook 2012: World food and agriculture*. <https://www.fao.org/4/i2490e/i2490e00.htm>
- Freitas, C. A., Shikida, P. F. A., & Bauermann, B. F. C. (2020). CIDE and elasticity oscillation on the ethanol and gasoline market: Brazilian taxation policy under discussion. *Italian Review of Agricultural Economics*, 75(1), 3–17.
- Friedrichsen, J. S. A., & Bruni, A. R. S. (2022). O uso adequado dos resíduos da agroindústria sucroalcooleira para o desenvolvimento de subprodutos: Uma revisão. *Research, Society and Development*, 11(13), e597111336082.
- Fundação SOS Mata Atlântica. (2023). *Relatório anual de desmatamento da Mata Atlântica*. <https://sosma.org.br>
- Furtado, C. (2007). *Formação econômica do Brasil* (34ª ed.). Companhia das Letras.
- Galdos, M. V., Cavalett, O., Seabra, J. E. A., Nogueira, L. A. H., & Bonomi, A. (2013). Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions. *Applied Energy*, 104, 576–582.
- Goldemberg, J., Coelho, S. T., Nastari, P. M., & Lucon, O. (2004). Ethanol learning curve—The Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, 26(3), 301–304.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2021). BDQueimadas: Monitoramento de queimadas e incêndios florestais. inpe.br
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2018). *ODS – Metas e indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Organization for Standardization. (2015). *Environmental management systems: Requirements with guidance for use* (ISO 14001:2015). <https://www.iso.org>



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



- Janzen, R., Wunderlich, J., & Finkbeiner, M. (2026). Transition to bio-based plastic packaging reveals complex climate–biodiversity trade-offs. *Nature Communications*, *17*, 69016.
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, *187*, 108397.
- Leite-Filho, A. T., Soares-Filho, B. S., Davis, J. L., Abrahão, G. M., & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, *12*, 2591.
- Lima, U. A., Basso, L. C., & Amorim, H. V. (2001). Produção de etanol. In U. A. Lima (Ed.), *Biotechnologia industrial: Processos fermentativos e enzimáticos* (Vol. 3, pp. 1–43). Blucher.
- Macedo, I. C. (Org.). (2005). *A energia da cana-de-açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. Berlendis & Vertecchia; UNICA.
- Maiá, S. M. F., Borges, S. T. F., & Medeiros, A. D. S. (2024). Sugarcane harvesting systems in Brazil: Effects on soil carbon stocks and ethanol payback time. *European Journal of Soil Science*, *75*(5), e13580. <https://doi.org/10.1111/ejss.13580>
- Mariano, L. B., Cavalett, O., & Bonomi, A. (2021). Economic and environmental assessment of genetically modified sugarcane in Brazil. *Biotechnology for Biofuels*, *14*(1), 94.
- Marin, F. R., Thorburn, P. J., Costa, L. G., & Hilton, B. R. (2022). Climate change impacts on sugarcane production in Brazil and adaptation strategies. *Agricultural Systems*, *198*, 103387.
- Martinelli, L. A., & Filoso, S. (2008). Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and social challenges. *Ecological Applications*, *18*(4), 885–898.
- Melados Realeza. (2022, 10 de maio). Descubra a diferença do melaço e o melado. <https://www.melacos.com.br>
- Mendes, S. F., de Souza, R. T. G., Junqueira, T. L., Chagas, M. F., Bonomi, A., & Cavalett, O. (2021). Sugarcane biorefineries in Brazil: Socio-economic and environmental impacts of first and second-generation ethanol production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *15*(4), 1145–1158. <https://doi.org/10.1002/bbb.2219>
- Ministério do Meio Ambiente. (2023). *Relatório de gestão 2022*. <https://www.gov.br/mma>
- Misra, V., Mall, A. K., Ansari, M. I., & Solomon, S. (2022). Post-harvest biology and recent advances of storage technologies in sugarcane. *Biotechnology Reports*, *33*, e00705. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00705>
- Moonsamy, S., Cronjé, L., & Basso, T. O. (2023). Development and validation of a chemically defined synthetic sugarcane molasses for *Saccharomyces cerevisiae* fermentation. *Biotechnology Progress*, *39*(5), e3362.
- Morandi, M. A. B., & Watanabe, E. (Orgs.). (2024). *Agricultura e meio ambiente: Desafios e perspectivas para a sustentabilidade e segurança alimentar*. Embrapa.
- Narciso, H. (2021, 7 de janeiro). Leveduras: As operárias do engenho. <https://blog.famigerada.com.br/leveduras/>
- Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: Applications and trends*. William Andrew.
- Nicodemo, G. Q., Ramos, M. L. G., Porfírio-da-Silva, V., & Bell, M. J. V. (2011). Balanço de nitrogênio e fósforo em solo sob sistemas agroflorestais e silvipastoris. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *46*(10), 1123–1132.
- Nogueira, F. A. M., Szwarcwald, C. L., & Damacena, G. N. (2019). Exposição a agrotóxicos e agravos à saúde em trabalhadores agrícolas: O que revela a literatura? *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, *44*, e12.
- Oliveira, J. S., & Silva, R. M. (2022). Aproveitamento biotecnológico e nutricional da biomassa de levedura residual da agroindústria sucroenergética. *Revista Brasileira de Biotecnologia*, *10*(2), 88–101.
- Organização Internacional do Trabalho. (2024). *Lucros e pobreza: A dimensão econômica do trabalho forçado*. <https://www.ilo.org>
- Parra, J. R. P. (2023). Biological Control in Brazil: State of art and perspectives. *Scientia Agricola*, *80*, e20220140.
- Paye, F. A., Silva, R. M., & Santos, T. L. (2020). Modelagem e simulação do processo de cristalização de açúcar em usinas sucroenergéticas. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, *12*(4), 102–115.
- Prado Júnior, C. (2000). *Formação do Brasil contemporâneo: Colônia* (22ª ed.). Brasiliense.
- Ramos Júnior, D. V., & Silva, H. (2021). Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: O que nos revelam os especialistas do setor sobre as motivações e impeditivos da sua adoção na realidade canavieira de Alagoas? *Estudos Sociedade e Agricultura*, *29*(1), 175–204. revistaesa.com
- Ribeiro, H. (2012). O trabalho no corte de cana-de-açúcar, riscos e efeitos na saúde: Revisão da literatura. *Revista de Saúde Pública*, *46*(5), 904–919.



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição
Curso Engenharia de Alimentos



- Robertson, G. L. (2012). *Food packaging: Principles and practice* (3rd ed.). CRC Press.
- Rocha, G., & Brandão, A. (2013). Trabalho escravo contemporâneo no Brasil na perspectiva da atuação dos movimentos sociais. *Revista Katálysis*, 16(2), 196–204. <https://doi.org/10.1590/S1414-49802013000200005>.
- Rossetto, R., & Santiago, A. D. (2022). Adubação – resíduos alternativos. Embrapa. <https://www.embrapa.br>
- Rudorff, B. F. T., Aguiar, D. A., Silva, W. F., Sugawara, L. M., Adami, M., & Moreira, M. A. (2010). Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. *Remote Sensing*, 2(4), 1057–1076.
- 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, Bioproducts and Biorefining*, 5(5), 519–532.
- Sachs, I. (2015). *Caminhos para o desenvolvimento sustentável* (P. Y. Stroh, Org.; 4ª ed.). Garamond.
- Sanches, G. M., Paula, M. T. N., Magalhães, P. S. G., Duft, D. G., Vitti, A. C., Kolln, O. T., Borges, B. M. M. N., & Franco, H. C. J. (2019). Precision production environments for sugarcane fields. *Scientia Agricola*, 76(1), 10–17.
- Santos, L. M., & Ramos, M. A. (2021). A contribuição da bioeletricidade da cana-de-açúcar na transição para uma matriz elétrica renovável no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, 27(3), 45–62.
- Schwartz, S. B. (1988). *Segredos internos: engenhos e escravos na sociedade colonial, 1550-1835* (L. T. Motta, Trad.). Companhia das Letras.
- Shikida, P. F. A., & Bacha, C. J. C. (1999). Evolução da agroindústria canavieira brasileira de 1975 a 1995. *Revista Brasileira de Economia*, 53(1), 69–90. <https://periodicos.fgv.br/rbe/article/view/746>
- Silva, M. A. P. (2011). *Tecnologia do açúcar: Purificação, descoloração por resinas de troca iônica e carvão ativado*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- Silva, M. A. S., Griebeler, N. P., & Borges, L. C. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(1), 108–114.
- Stolf, R., & Oliveira, A. P. R. (2020). The success of the Brazilian alcohol program (Proálcool) - a decade-by-decade brief history of ethanol in Brazil. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 243–248.
- Syngenta Digital. (2017, 1 de junho). Bagaço de cana: Saiba como reaproveitar a palha. <https://blog.syngentadigital.ag>
- Tang, X., Zhang, Y., Jiang, J., Meng, X., Huang, Z., Wu, H., He, L., Xiong, F., Liu, J., Zhong, R., Han, Z., & Tang, R. (2021). Sugarcane/peanut intercropping system improves the soil quality and increases the abundance of beneficial microbes. *PeerJ*, 9, e10880. <https://doi.org/10.7717/peerj.10880>
- Teixeira, L. L. L., Murari, T. B., Brito, F. C., Marques, S. C. de A., Cardoso, H. S. P., & Nascimento Filho, A. S. (2024). Scenarios and opportunities in the sugar and ethanol industry – challenges and opportunities towards a low carbon economy in Brazil. *Revista de Gestão e Secretariado*, 15(1), 276–290. <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i1.2996>
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. (2010). *Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética*. FIESP; UNICA.
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. (2022). *UNICAdata: Dados consolidados de produção, mercado e bioenergia do setor sucroenergético*. <https://unicadata.com.br>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- Universidade Federal de Minas Gerais. (2023). *Desenvolvimento de biofilmes activos e biodegradáveis a partir de resíduos agroindustriais* (Patente BR 10202301452-4). Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
- Walker, G. M. (2011). Fuel alcohol production: Optimization of yeast cell physiology and fermentation performance. *Journal of the Institute of Brewing*, 117(1), 3–22.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- WWF-Brasil. (2019). *Análise sobre a implementação do Código Florestal no Brasil*. <https://www.wwf.org.br>
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., & Coma, V. (2018). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165–199.

Trabalho elaborado de acordo com as normas da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e formatado com base nas diretrizes da revista Research, Society and Development, visando futura submissão para publicação científica.