



NATÁLIA VITOI TEIXEIRA RAMALHO

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA
PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE CANA-DE-
AÇÚCAR E DE MILHO: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

LAVRAS – MG

2023

NATÁLIA VITOI TEIXEIRA RAMALHO

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE ETANOL A
PARTIR DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE MILHO: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia
Química, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

Prof. Dr. Luciano Jacob Correa
Coorientador

LAVRAS – MG

2023

RESUMO

Diante da crescente importância dos biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis, a avaliação dos impactos ambientais do processo de produção do etanol utilizando diferentes matérias-primas torna-se fundamental. Portanto, este trabalho traz uma revisão bibliográfica abrangente sobre os impactos ambientais provenientes da produção de etanol de primeira geração a partir de cana-de-açúcar e milho. A análise contempla diversas perspectivas, desde a etapa de plantio de matéria-prima até a produção industrial, como emissões equivalentes de CO_2 , uso de agrotóxicos e da água, bem como a sua contaminação, eficiência energética e impactos na biodiversidade. Com base nas informações analisadas, verificou-se que o etanol produzido a partir de milho apresenta maiores prejuízos ao meio ambiente em comparação com o de cana-de-açúcar. Tal conclusão fundamenta-se na consideração criteriosa de vários fatores ambientais, incluindo menor eficiência na absorção de CO_2 , além do maior uso de fertilizantes e defensivos agrícolas associados à poluição da água, do solo, do ar e da biodiversidade. Além disso, verifica-se uma menor eficiência energética na indústria quando comparada ao etanol produzido a partir da cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: avaliação do ciclo de vida, produção de biocombustíveis, emissão de CO_2 , sustentabilidade, matéria-prima para o etanol.

ABSTRACT

Given the growing importance of biofuels as substitutes for fossil fuels, the assessment of environmental impacts of the ethanol production process from different feedstocks becomes paramount. Therefore, this work provides a comprehensive literature review on the environmental impacts arising from the 1st generation ethanol production using sugarcane and corn. The analysis encompasses various perspectives from the feedstocks planting stage to the industrial process, such as CO_2 equivalent emissions, pesticide and water use, as well as contamination, energy efficiency, and biodiversity impacts. Upon concluding the assessment, it is highlighted that corn ethanol poses greater environmental drawbacks compared to sugarcane ethanol. This fact is grounded in the careful consideration of various environmental factors, including lower CO_2 absorption efficiency, higher use of fertilizers and pesticides leading to water, soil, air, and biodiversity pollution. Additionally, it underscores lower energy efficiency in the industry when compared to ethanol production from sugarcane.

Keywords: life cycle assessment, biofuel production, CO_2 emission, sustainability, ethanol feedstock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Matriz energética brasileira	13
Figura 2- Produção de Refinado de Petróleo nas Refinarias.....	14
Figura 3 - Fluxograma Simplificado do Processo de Produção de Etanol de Milho	19
Figura 4 - Fluxograma Simplificado do Processo de Produção de Etanol de Cana-de-açúcar.....	21
Figura 5 - Rotas para produção de etanol de milho e de cana-de-açúcar	25
Figura 6 – Exemplificação do ciclo de impacto ambiental da produção de etanol	29
Figura 7 – Exemplificação do Ciclo Neutro do Etanol	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mundial de etanol (Milhões de litros)	15
Tabela 2 – Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e do milho em diferentes etapas do processo	30
Tabela 3 – Consumo de água no ciclo de vida	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	11
2.1. Geral	11
2.1. Específicos	11
3. METODOLOGIA	12
4. RELEVÂNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA DO BIOETANOL	13
5. PRODUÇÃO DE BIOETANOL	18
5.1. Definição e características da produção de etanol a partir de milho	18
5.2. Definição e características da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar ...	21
6. USINAS FLEX	25
7. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE MILHO	29
7.1. Pegada de Carbono	30
7.2. Utilização de Água e Contaminação por Fertilizantes	34
7.3. Degradação do Solo e Biodiversidade	37
7.4. EROI – <i>Energy Return or Investment</i>	40
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

O aumento da economia mundial e do número de habitantes tem gerado uma grande necessidade de energia, particularmente de combustíveis fósseis. Conforme destacado por Liu et al. (2021), a procura por petróleo está projetada para atingir 105 milhões de barris diários até 2030, superando a capacidade de produção até 2040-2050. Os veículos de transporte se mostram como os principais consumidores de petróleo, representando 27,4% da demanda global de energia.

Os impactos já são visíveis, uma vez que em 2022, as emissões globais de CO_2 provenientes da combustão de combustíveis fósseis registraram um aumento de 2,0%, 7,9% e 1,5% em comparação com os anos de 2019, 2020 e 2021, respectivamente. O crescimento de 1,5% de 2021 a 2022 está em linha com as abordagens preditivas baseadas no consumo de combustíveis fósseis para o transporte terrestre, o qual contribui com 17,9% das emissões de CO_2 em nível global (LIU et al, 2023).

Esse crescimento na emissão de gases poluentes no ar se relaciona a uma série de problemas ambientais, como a formação de chuva ácida, que afeta a qualidade dos solos e corpos d'água, a degradação da qualidade do ar, prejudicando a saúde humana e a fauna, e principalmente o aquecimento global (IEA, 2021). Hoje, com políticas ambientais buscando a redução dessas emissões de gases de efeito estufa, grandes esforços precisam ser dedicados não apenas para superar barreiras tecnológicas, mas também para integrar fatores sociais, econômicos e ambientais, a fim de fornecer sistemas de produção de combustíveis de longo prazo, economicamente viáveis e confiáveis para a indústria.

Toda essa problemática, aliada aos avanços na melhoria das culturas, no contexto brasileiro da cana-de-açúcar, e nos processos de fermentação, fez com que a produção de bioetanol, definindo como o etanol produzido a partir de biomassa vegetal, se tornasse uma opção viável e sustentável em substituição aos combustíveis derivados de petróleo. No que diz respeito ao impacto ambiental, os biocombustíveis se destacam por serem fontes de energia renovável com baixas emissões de carbono. Em média, o uso do bioetanol como combustível gera aproximadamente de 43% menos CO_2 em comparação com à gasolina, embora esse percentual possa variar de acordo com as práticas de produção da cana, o tipo de cultivo utilizado e o processo de fabricação do etanol (UDOP, 2023).

Além disso, o bioetanol se destaca pela sua notável versatilidade, encontrando aplicações não apenas como combustível para veículos, mas também na indústria

química, na fabricação de produtos farmacêuticos e na produção de bens de consumo (PEREIRA et al, 2019). Para atender a demanda global e ao mesmo tempo mitigar os impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa, os avanços na tecnologia de biocombustíveis precisam se concentrar em otimizar a tecnologia atual de produção para maior produtividade e eficiência na conversão de biomassa. Uma abordagem para alcançar esse objetivo é diversificar as matérias-primas, a fim de garantir a previsão da produção de biocombustíveis dentro das restrições ambientais e econômicas. (LIU et al, 2021).

Em países tropicais, como Índia, Tailândia e Brasil, a cana-de-açúcar é tradicionalmente a principal matéria-prima para a produção de etanol. No entanto, ao passar dos anos, essa diversificação de matéria-prima começou a se fazer presente. O milho foi introduzido também como uma fonte para a produção desse biocombustível, sendo este já amplamente utilizado em países da América do Norte e da Europa (DONKE et al, 2016).

De acordo com Liu et al. (2023), nos Estados Unidos e no Brasil, essas duas matérias-primas (cana-de-açúcar e milho) mais populares na produção de etanol representam juntas impressionantes 84% da produção global total de bioetanol. No Brasil, a cana-de-açúcar é a matéria-prima predominante, devido às condições ambientais adequadas, entretanto o milho apresenta algumas vantagens. Fatores como otimização da produção ao longo do ano, sinergias operacionais, possibilidade de armazenamento e uma maior capacidade de gerenciamento de riscos já têm sido observados no ambiente empresarial ao se utilizar o milho como insumo para a produção de bioetanol (MILANEZ et al., 2014; NASTARI, 2018).

Entretanto, a integração do milho na produção de bioetanol não foi no contexto nacional, em sua maioria, concebida para substituir a cana-de-açúcar, mas sim como um complemento. Essa abordagem é evidenciada nas usinas *flex*, que são instalações de produção de bioetanol com a capacidade de processar tanto a cana-de-açúcar quanto o milho para a produção de biocombustível. Essas usinas têm a flexibilidade de escolher a matéria-prima com base em vários fatores, incluindo disponibilidade, preços de mercado e demanda. O sistema *flex* permite que as usinas produzam bioetanol em períodos em que não seria viável fazê-lo, como durante a entressafra da cana-de-açúcar, proporcionando uma melhor utilização da infraestrutura e dos ativos da usina (NEVES et al., 2018).

Ao considerarmos a implementação do milho como matéria-prima e considerarmos a importância do bioetanol como substituto dos combustíveis de fontes

fósseis, surge a necessidade de avaliar os impactos no ecossistema decorrentes desse produto se comparado ao bioetanol da cana. Portanto, análises comparativas a partir de dados publicados na literatura, abrangendo os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de produção do biocombustível, são de extrema importância. A partir dessas informações, é possível comparar diferentes matérias-primas para a produção do bioetanol, no estudo em questão: a cana-de-açúcar e o milho. Isso nos permite obter uma compreensão mais precisa sobre qual matéria-prima se revela mais eficiente do ponto de vista ecológico.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma. Na seção 3 é descrita a metodologia onde são delineadas as abordagens e técnicas utilizadas para coletar e analisar os dados. A seção 4, "Relevância Ambiental e Econômica do Bioetanol", contextualiza o papel do bioetanol no cenário ambiental e econômico, estabelecendo a importância do estudo e sua contribuição para questões críticas relacionadas à sustentabilidade. As seções 5 e 6 exploram a produção de bioetanol, começando pela descrição das matérias-primas e do processo produtivo em geral. A introdução do conceito de usinas *flex* é feita na seção 6. A seção 7, "Análise e Comparação do Impacto Ambiental da Produção de Bioetanol a partir de Cana-de-açúcar e de Milho", é o foco maior do trabalho, onde são examinados os impactos ambientais relacionados à pegada de carbono, utilização de água e contaminação por fertilizantes, degradação do solo e biodiversidade, e eficiência energética.

Em resumo, a estrutura deste trabalho visa fornecer uma compreensão completa e detalhada da produção de bioetanol a partir de cana-de-açúcar e de milho, considerando as implicações ambientais, contribuindo assim para o conhecimento e a tomada de decisões informadas no campo dos biocombustíveis.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar e comparar dados da literatura sobre o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do bioetanol produzido a partir de milho e de cana-de-açúcar, para determinar qual deles apresenta menor degradação ambiental.

2.1. Específicos

- Conduzir uma pesquisa abrangente com o objetivo de mapear e analisar os impactos ambientais decorrentes da produção de bioetanol, considerando as matérias-primas cana-de-açúcar e milho.
- Realizar uma comparação dos principais impactos ambientais associados à produção de bioetanol proveniente de cana-de-açúcar e milho, identificando diferenças significativas e áreas de preocupação.

3. METODOLOGIA

Para a condução desta pesquisa, a definição precisa de critérios de busca se mostrou fundamental para assegurar a imparcialidade e a confiabilidade do estudo. Inicialmente, determinaram-se aspectos cruciais, como o tipo de publicação, o ano de publicação e a área temática a serem considerados. O estudo baseou-se em uma variedade de fontes, incluindo artigos científicos, livros, teses, sites de entidades oficiais e publicações em revistas científicas. Priorizou-se, especialmente, a consulta a trabalhos recentes (a partir de 2019), especialmente ao discutir tópicos sobre comportamento e estatísticas, reconhecendo a rápida evolução do conhecimento que pode tornar informações desatualizadas em pouco tempo. No entanto, também foram incorporados materiais mais antigos para debates conceituais em que o conteúdo permanecia altamente relevante.

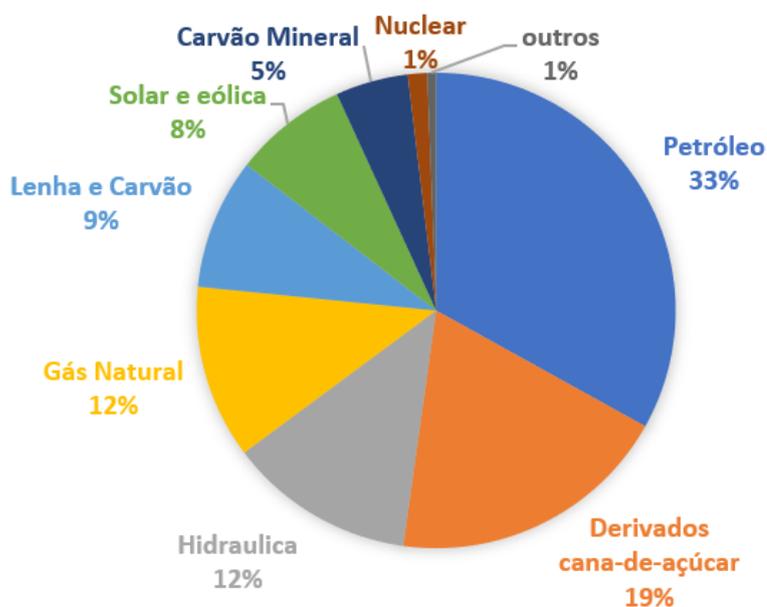
No processo de seleção das fontes, a avaliação dos meios de publicação foi primordial, levando em consideração a credibilidade e reputação para garantir a obtenção de dados autênticos e confiáveis. Os principais repositórios de trabalhos e dados científicos utilizados na pesquisa foram: ScienceDirect, Wiley Online Library, SpringerLink, SciELO, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). As buscas nas bases de dados foram feitas a partir das seguintes palavras-chave em Português e suas correspondentes em Inglês: 'Etanol', 'Produção de Biocombustíveis', 'Impactos Ambientais', 'Cana-de-Açúcar', 'Milho', 'Avaliação Ambiental', 'Ciclo de Vida', 'Sustentabilidade', 'Matéria-Prima para Etanol', 'Análise Comparativa de Impacto Ambiental', 'Biocombustíveis e Ecologia', 'Avaliação do Ciclo de Vida do Etanol', 'Etanol de Fontes Renováveis', 'Eficiência Ecológica de Biocombustíveis' e 'Agricultura Sustentável'. Com base nessas fontes, foi possível conduzir pesquisas na procura dos recursos mais relevantes. Os dados analisados de impacto ambiental, provenientes dos trabalhos consultados foram relativos aos seguintes critérios: Pegada de Carbono, Utilização de Água, Contaminação por Fertilizantes, Degradação do Solo e Biodiversidade e Eficiência Energética.

Além disso, a busca por diversidade e pluralidade de perspectivas foi fundamental, para garantir uma visão ampla e imparcial do tema, motivando a revisão de várias fontes sobre um mesmo tópico. Por fim, foi essencial verificar se a fonte estava alinhada com os objetivos e o escopo da pesquisa, contribuindo de maneira eficaz para o enriquecimento e fundamentação do estudo.

4. RELEVÂNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA DO BIOETANOL

A matriz energética global é composta por diversas fontes de energia, e, no cenário mundial de 2019, destacam-se as maiores participações dos combustíveis fósseis, liderando as três primeiras posições: petróleo com 31,1%, carvão com 27,0% e gás natural com 23,0%. Esses dados, provenientes da Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), evidenciam a predominância dessas fontes no suprimento energético global. No contexto brasileiro como descrito na Figura 1, as porcentagens variam, refletindo a diversidade das fontes utilizadas.

Figura 1- Matriz energética brasileira



Fonte: Do autor.

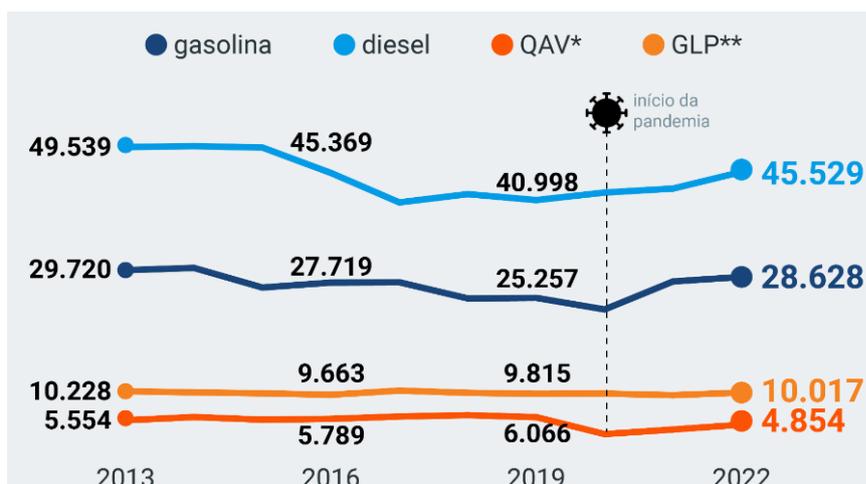
O petróleo lidera com 33,1%, seguido pelos derivados da cana-de-açúcar com 19,1%. A energia hidráulica representa 12,6%, enquanto o gás natural contribui com 11,8%. Lenha e carvão vegetal correspondem a 8,9%, enquanto a energia solar, eólica e outras renováveis alcançam 7,7%. O carvão mineral representa 4,9%, a energia nuclear 1,3%, e os demais 0,6% são provenientes de outras fontes não renováveis (BEN, 2020).

Essa diversificação na matriz energética brasileira evidencia esforços para promover fontes mais limpas e renováveis, principalmente em relação aos combustíveis,

alinhando-se a uma tendência global de transição para um futuro mais sustentável e energeticamente eficiente.

De acordo com Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023), a produção de combustíveis para veículos automotores tem demonstrado um crescimento desde o 2022, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2- Produção de Refinado de Petróleo nas Refinarias (milhões de m^3)



*Querosene de Aviação; **Gás Liquefeito de Petróleo.

Fonte: Adaptado de ANP (2023).

Após uma ligeira redução na produção de alguns combustíveis em 2020, causada pela pandemia da COVID-19, a produção da maior parte desses produtos refinados de petróleo no país voltou a aumentar. No ano de 2022, as instalações de refino do país geraram 123,5 milhões de metros cúbicos de produtos derivados do petróleo, registrando o valor mais elevado desde 2014. Dentro desse volume, 107,4 milhões de metros cúbicos foram destinados aos combustíveis, o que representa cerca de 87% do total (ANP, 2023).

Esse aumento na produção e consumo está intrinsecamente ligado ao aumento da poluição ambiental. Pois, além dos efeitos climáticos, as crescentes emissões provenientes de combustíveis fósseis usados em automóveis exercem um impacto direto e alarmante na qualidade do ar que respiramos. De acordo com Teixeira et al. (2008), tais emissões carregam uma ampla gama de substâncias tóxicas que, quando inaladas pelo sistema respiratório, podem desencadear uma série de efeitos adversos à saúde humana, representando um sério desafio ambiental e de saúde pública.

Diante dos desafios, o bioetanol desempenha um papel crucial no contexto da amenização da poluição, emergindo como uma fonte de energia alternativa de crescente

importância global. Sua relevância é notável devido à sua qualidade como fonte de energia renovável de baixas emissões de carbono, tornando-se uma alternativa ambientalmente mais responsável em comparação aos combustíveis fósseis convencionais, como a gasolina e o diesel (PEREIRA et al, 2019).

A produção global do bioetanol está predominantemente concentrada nos Estados Unidos, representando 54,9% da produção mundial e estabelecendo-se como o maior exportador do produto, como mostrado na Tabela 1. Mesmo diante dos desafios apresentados pela pandemia de Covid-19 e as barreiras comerciais, os Estados Unidos, em 2021, exportaram cerca de 4,3 bilhões de litros de etanol (VIDAL, 2022). O Brasil ocupa a posição de segundo maior produtor mundial de bioetanol, sendo sua produção predominantemente destinada ao mercado interno. Esse cenário é resultado do significativo estímulo promovido pelo governo desde os anos 70, notavelmente por meio de programas como o Proálcool, que visaram impulsionar o consumo interno de biocombustíveis.

O Programa Nacional do Álcool, mais conhecido como Proálcool, foi uma iniciativa pioneira implementada no Brasil durante a década de 1970 como resposta às crises do petróleo e à necessidade de diversificar a matriz energética do país. Lançado em 1975, o Proálcool visava à produção em larga escala de etanol a partir da cana-de-açúcar, promovendo a substituição parcial da gasolina por biocombustível. Este programa desempenhou um papel crucial na busca pela autossuficiência energética, incentivando o desenvolvimento da indústria sucroalcooleira e impulsionando avanços tecnológicos na produção de etanol. No entanto, ao longo do tempo, o programa enfrentou desafios, incluindo flutuações nos preços do petróleo, questões ambientais e debates sobre a competitividade do etanol em relação a outras fontes de energia. Mesmo assim, o Proálcool deixou um legado importante no Brasil, moldando a matriz energética do país e influenciando a abordagem global em relação aos biocombustíveis (ANFAVEA, 2023).

Atualmente o país adota uma mistura obrigatória de 27% de etanol na gasolina, e além desse mercado, destaca-se globalmente pela tecnologia dos carros *flex*, os quais têm a capacidade de utilizar qualquer proporção de gasolina e etanol hidratado (VIDAL, 2022).

Tabela 1 - Produção mundial de etanol (Milhões de litros)

Países	2017	2018	2019	2020	2021	%
EUA	60.324	60.911	59.726	52.772	56.781	54,9
Brasil	25.589	30.586	33.274	30.586	28.391	27,5
União Europeia	4.997	5.148	5.224	4.770	4.921	4,8
China	3.218	3.066	3.823	3.520	3.255	3,1

Fonte: Adaptado de Vidal (2022).

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA, 2023), desde o lançamento dos carros *flex*, que aceitam tanto a gasolina quanto o etanol como fonte combustível, até março de 2022, a utilização de etanol contribuiu para evitar a emissão de quase 630 milhões de toneladas de CO_2 na atmosfera. Para alcançar um efeito ambiental comparável, seria necessário o cultivo de 4,5 bilhões de árvores nos próximos 20 anos.

O principal destaque do bioetanol em relação às baixas emissões de CO_2 é sua capacidade de ser produzido a partir de fontes renováveis, como culturas de bioenergia e biomassa lignocelulósica, como a cana-de-açúcar, milho, beterraba, trigo, resíduos florestais, entre outros. Isso ocorre porque as emissões de dióxido de carbono (CO_2) geradas durante a queima desse biocombustível são compensadas pela absorção do mesmo durante o crescimento das culturas usadas em sua produção, de modo que a sua geração líquida de CO_2 provém, majoritariamente, dos processos industrial e de plantio para a obtenção do bioetanol. Portanto, esse biocombustível se apresenta como uma fonte de energia com reduzida pegada de carbono, uma vez que as emissões são mitigadas pelas absorções. Essa baixa emissão de carbono também é mantida quando as culturas de bioenergia são cultivadas em terras previamente não utilizadas para outros fins, ou que não eram florestas ou pastagens (QUINTERO et al, 2008).

Entre as safras 2021/22 e 2022/23, observou-se um aumento de 6,5% na produção de etanol de milho no país, alcançando a marca de 31 milhões de litros em 2022/23 (UNICADATA, 2023). Esse biocombustível pode ser comercializado para uso em veículos automotores, tanto na forma hidratada quanto anidra, misturado à gasolina. De acordo com o mais recente decreto do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), além de promover a produção e o consumo de biocombustíveis, essa mistura de 27% do bioetanol na gasolina tem o potencial de reduzir a emissão de poluentes provenientes da gasolina. Quando adicionado ao combustível fóssil, pode diminuir os níveis de compostos aromáticos e monóxido de carbono liberados na atmosfera, ao mesmo tempo que aumenta

o teor de oxigênio. Isso traz o benefício de melhorar a oxidação de hidrocarbonetos, resultando em uma combustão mais completa e, conseqüentemente, na redução das emissões de poluentes prejudiciais.

Já economicamente falando, as substituições de combustíveis fósseis por renováveis exercem mais vantagens ainda. Em 2017, na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21), foi estabelecida através da Lei nº 13.576/2017, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Ela tem como objetivo estimular a produção de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, de maneira sustentável e ambientalmente responsável (BRASIL, 2023).

O RenovaBio funciona por meio de um sistema de certificação que atribui notas às unidades produtoras de biocombustíveis com base em critérios de eficiência energética e ambiental. Essas reduções ou remoções são normalmente alcançadas por meio de projetos que visam mitigar as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) ou absorver carbono, contribuindo assim para a redução do impacto das mudanças climáticas. As unidades produtoras que obtêm notas mais altas recebem mais créditos de descarbonização. Esses créditos são certificados que representam uma redução verificada nas emissões de gases de efeito estufa ou uma remoção de carbono da atmosfera.

Cada crédito geralmente representa a redução de uma tonelada de dióxido de carbono (CO_2) equivalente. Esses créditos podem ser comprados e vendidos em mercados de carbono. Empresas que têm dificuldade em atender às metas de redução de emissões podem comprar créditos de carbono de outras que tenham excedido suas metas. Assim é possível obter um retorno financeiro adicional pela produção do biocombustível. A receita gerada pela venda muitas vezes é reinvestida em projetos adicionais de mitigação de GEE (B3, 2023).

Em síntese, o uso de etanol derivado de culturas de bioenergia possui o potencial de se apresentar como uma alternativa mais sustentável em comparação com a gasolina, além de ser economicamente atrativa. Entretanto é necessário que o mesmo seja produzido de maneira responsável e eficiente. É essencial equilibrar os benefícios da redução de emissões e da neutralidade de carbono com os possíveis impactos negativos nos ecossistemas e no uso da terra.

5. PRODUÇÃO DE BIOETANOL

Na produção do bioetanol, as matérias-primas mais comumente utilizadas podem ser classificadas em três grandes grupos, conforme sua composição molecular. São elas as matérias-primas sacarinas, matérias-primas amiláceas e tubérculos, e matérias-primas celulósicas. Essas matérias-primas passam por processamento para obtenção de açúcares que serão direcionados ao processo de fermentação alcoólica. Como o nome sugere, as matérias-primas sacarinas possuem açúcares em sua composição e a cana-de-açúcar se enquadra nesse grupo (ECKERT, 2016)

As matérias-primas amiláceas são ricas em amido, presente em alta concentração em grãos de cereais, como o milho, e em raízes e tubérculos, como a beterraba, que é frequentemente empregada na produção de bioetanol em países europeus (VASCONSELOS, 2010). Por fim, as matérias-primas celulósicas representam o grupo mais desafiador e ainda de maior custo. O bioetanol celulósico, também conhecido como de segunda geração, é produzido através das etapas de pré-tratamento da biomassa, da hidrólise enzimática e da fermentação de açúcares provenientes da quebra da celulose por enzimas específicas. Esses processos encarecem a fabricação do bioetanol, prejudicando a sua competitividade econômica (FONSECA et al, 2020).

Tanto no Brasil quanto em nível global, são conduzidas várias pesquisas para explorar novas matérias-primas na produção de biocombustíveis. Contudo, os processos de produção de bioetanol a partir de cana-de-açúcar e de milho são atualmente os mais predominantes e consolidados no país. A cana-de-açúcar se destaca como a principal fonte de produção de bioetanol em regiões tropicais e subtropicais, devido à sua alta concentração natural de sacarose. Enquanto o milho é amplamente cultivado em várias partes do Brasil e do mundo, consolidando-se como uma opção já bem estabelecida, em especial no Estados Unidos (BORTOLETTO et al., 2015).

5.1. Definição e características da produção de etanol a partir de milho

O milho é uma planta de grãos da família *Poaceae* (família das gramíneas) e do gênero *Zea*, sua composição média em base seca é 78% de amido, 12% proteínas, 4% fibra (a maioria resíduo detergente neutro) e 6% de óleo (PAES, 2022). Originado no México, mas disseminado por todos os continentes (BUKLER et al, 2005). Segundo a

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), as plantações de milho ocupam atualmente uma extensão de cerca de 196 milhões de hectares em todo o mundo, sendo os Estados Unidos o maior produtor mundial. Somente no Brasil, a produção de milho atinge aproximadamente 57 milhões de toneladas, em uma área que abrange quase 15 milhões de hectares.

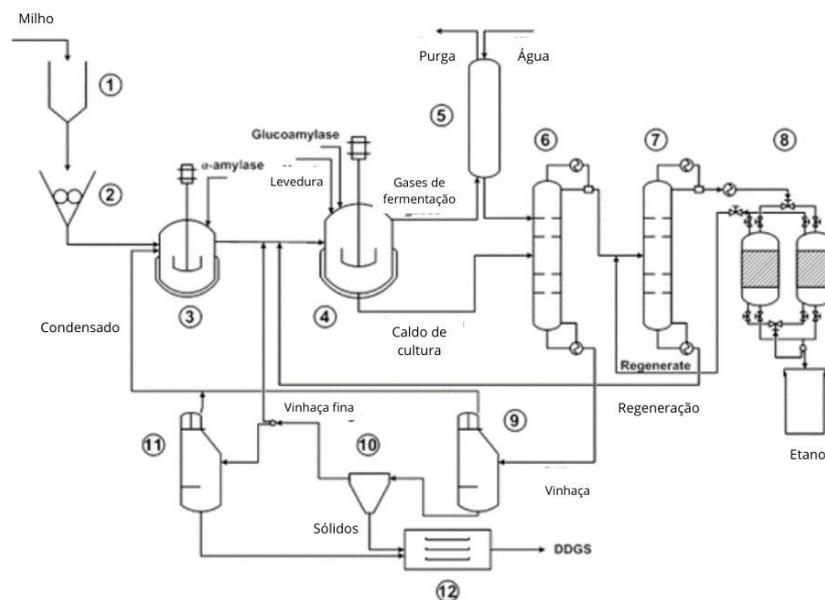
O grão é altamente versátil, pois além de ser matéria-prima para a produção de biocombustíveis, tem ampla aplicação tanto na alimentação humana quanto na animal, devido às suas propriedades nutricionais. Seu ciclo de crescimento varia entre quatro a cinco meses, sendo sensível à disponibilidade de água, temperatura e radiação solar. Condições de seca, temperaturas extremas (abaixo de 10 °C e acima de 30 °C) e baixa intensidade de luz impactam negativamente a produtividade do milho.

O processo de colheita é realizado mecanicamente, onde a espiga de milho é separada do colmo para que os grãos sejam extraídos, enquanto a espiga com a palha é deixada nos campos para melhorar a fertilidade do solo como fonte de potássio. Os grãos então são transportados para os moinhos de milho por meio de caminhões ou trens e podem ser armazenados em silos antes do processamento. Para a produção de etanol, a maioria dos tanques de armazenamento das usinas é dimensionado para permitir a estocagem de 7 a 12 dias de capacidade de produção (KWIATKOWSKI JR, 2006).

Após a chegada da matéria-prima à planta industrial, a produção do biocombustível passa por um processo em cinco etapas distintas: pré-tratamento da matéria-prima, hidrólise, fermentação, separação e desidratação, e tratamento de águas residuais. A produção de bioetanol a partir de amido envolve a desintegração desse polissacarídeo para obter uma concentração adequada de açúcares fermentáveis. Esses açúcares são, então, convertidos em etanol por meio da ação de leveduras.

O fluxograma simplificado para a produção de etanol a partir de milho é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma Simplificado do Processo de Produção de Etanol de Milho.



1. Tanque de lavagem, 2. Moinho, 3. Reator de liquefação, 4. Reator SSF, 5. Absorvedor de etanol, 6. Coluna de concentração, 7. Coluna de retificação, 8. Peneiras moleculares, 9. Primeiro conjunto de evaporadores, 10. Centrífuga, 11. Segundo conjunto de evaporadores, 12. Secador.

Fonte: Adaptado Lopes et al. (2016).

Após a lavagem, trituração e moagem dos grãos de milho, o material amiláceo é gelatinizado para dissolver a amilose e a amilopectina. Na forma dissolvida, o amido está acessível para o ataque enzimático na etapa de liquefação subsequente descrito na Figura 3, etapa 3. Essa etapa é considerada como um processo de pré-tratamento devido à hidrólise parcial. Cerca de 10% das cadeias de amido são hidrolisadas usando a enzima α -amilase bacteriana termoestável. O hidrolisado obtido tem viscosidade reduzida e contém oligômeros de amido chamados dextrinas.

Em seguida, o amido liquefeito entra no processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) onde é hidrolisado pela glucoamilase microbiana para produzir glicose. Este açúcar é imediatamente assimilado pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* no mesmo reator e convertido em etanol. A fermentação é mais lenta que no processo a partir da cana-de-açúcar, pois no processo a partir do milho as células não são recicladas devido a contaminação por químicos adicionados ao milho durante o cultivo, resultando numa baixa concentração de células no fermentador. (LOPES et al., 2016)

Os gases de fermentação, principalmente CO_2 , são lavados em uma coluna de absorção para recuperar mais de 98% do etanol volatilizado do reator SSF e enviados para a primeira coluna de destilação. O caldo de cultura contendo 8-11% (m/m) de etanol é recuperado em uma etapa de separação consistindo de duas colunas de destilação. Na primeira coluna (de concentração), soluções aquosas de etanol são concentradas até 63%. Na segunda coluna (de retificação), a concentração da corrente rica em etanol atinge uma composição próxima do azeótropo (95,6%). A desidratação desta corrente para a produção de bioetanol anidro é realizada através da adsorção em fase vapor com peneiras moleculares. A corrente obtida durante a regeneração das peneiras moleculares contendo 70% de etanol é reciclada para a coluna de retificação.

A vinhaça da coluna de concentração é evaporada e os sólidos obtidos são separados por centrifugação. Esses sólidos são secos para produzir DDGS - sigla comumente utilizada para grãos secos de destilaria com solúveis (*dried distillers grains with solubles*), um coproduto usado na alimentação animal, dada a sua alta concentração de proteínas e vitaminas. A vinhaça restante ou vinhaça fina é evaporada em um evaporador de efeito duplo. O xarope obtido é combinado com o DDGS e seco. A água condensada dos evaporadores é reciclada para a etapa de liquefação, enquanto os resíduos da coluna de retificação e uma fração da vinhaça fina são reciclados para o SSF (QUINTERO et al, 2006).

5.2. Definição e características da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta semi-perene pertencente à família *Poaceae* (família das gramíneas) e ao gênero *Saccharum* (LAM et al, 2015). É uma matéria-prima baseada em sacarose para a produção de etanol, sendo a sacarose concentrada nos colmos, enquanto a palha da cana-de-açúcar compõe as pontas e as folhas. A estrutura da sacarose é composta pelos açúcares glicose e frutose unidos por ligações glicosídicas, constituindo o dissacarídeo. Sua composição média em base seca é 70% sacarose, 20% fibra, 4% minerais, 4% proteínas, 1% ácidos orgânicos e 1% lipídios. Diferentemente da biomassa de amido, a produção de bioetanol a partir de matérias-primas baseadas em sacarose não requer a etapa de sacarificação, pois os açúcares já estão prontamente disponíveis, o que torna o processo de produção mais simples.

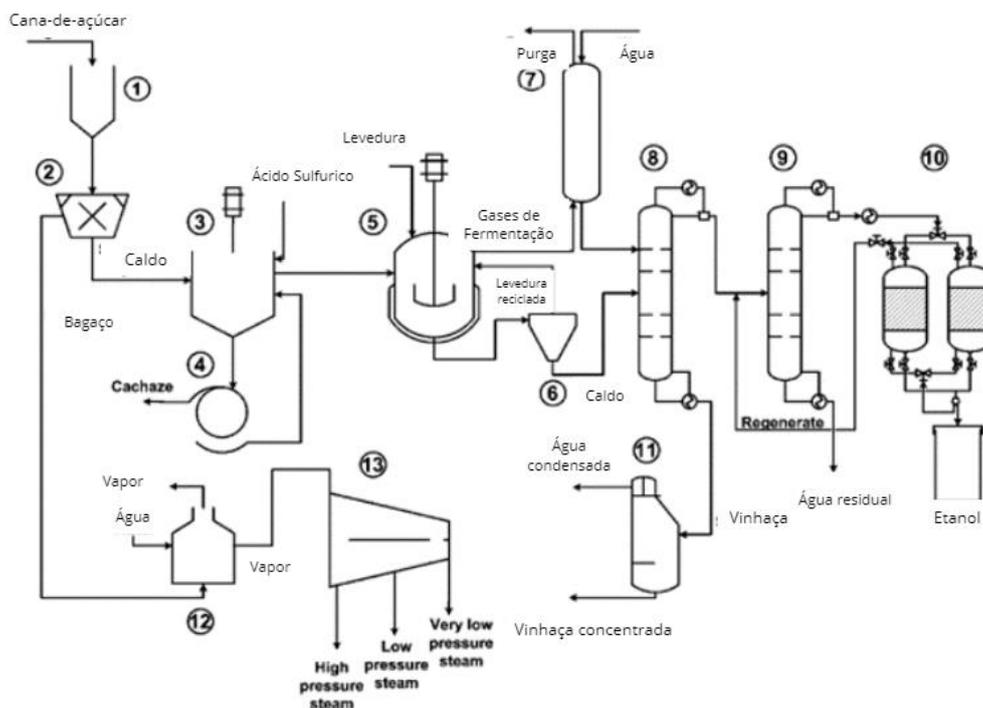
Em condições ideais, o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar pode variar de aproximadamente 12 a 24 meses. Sua colheita era tradicionalmente feita manualmente,

com a queima anterior das plantações para facilitar o corte. Mas, ao longo dos anos, a necessidade de melhorar a produção e as restrições ambientais relacionadas ao processo de queima impulsionaram a introdução do sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar crua picada. O Brasil é o maior produtor mundial de etanol de cana-de-açúcar e a colheita mecanizada sem queima se iniciou na década de 1970, sendo mais intensificada com a implementação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975.

As vantagens desse método de colheita são diversas, incluindo menor risco de acidentes para os trabalhadores, maior produtividade (por exemplo, uma colhedora pode produzir o equivalente ao trabalho de 80 homens por dia, operando continuamente por 24 horas), redução do desperdício na colheita e mitigação dos impactos ambientais resultantes da queima. O transporte da cana-de-açúcar da plantação para a unidade de processamento geralmente é feito por caminhões, via terrestre. É essencial que ocorra o mais rapidamente possível após o corte da cana, para evitar perdas de sacarose (BNDES, 2008).

O processo industrial de produção de etanol de cana começa com a chegada da matéria-prima à unidade de processamento, descrito na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma Simplificado do Processo de Produção de Etanol de Cana-de-açúcar.



1. Esteira de lavagem, 2. Moenda, 3. Clarificador, 4. Tambor rotativo, 5. Dorna de fermentação, 6. Centrifuga, 7. Absvedor de etanol, 8. Coluna de concentração, 9. Coluna de retificação, 10. Peneiras moleculares, 11. Evaporadores, 12. Caldeira, 12. Turbogenerador.

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2016).

A cana-de-açúcar é colocada em esteiras, lavada para a remoção de sujeira e impurezas, e então preparada para a extração dos açúcares. Esse processo é realizado em moinhos, nos quais normalmente é adotado o processo de embebição do bagaço com água entre as moagens para recuperar a máxima quantidade de sacarose da matéria-prima. O tratamento subsequente do caldo de cana extraído envolve as seguintes etapas: peneiramento, calagem, aquecimento, decantação, concentração e resfriamento. O processo de peneiramento elimina partículas insolúveis leves e pesadas remanescentes, evitando sobrecarga nas etapas seguintes.

A adição de água de cal é realizada durante a calagem para corrigir o pH e promover a coagulação da matéria coloidal e a precipitação de impurezas. O pH ideal é de 5,6 a 5,8, pois a redução de nutrientes no caldo é mínima e a ação corrosiva no equipamento é reduzida. A redução da quantidade de microrganismos contaminantes também é favorecida, mas isso é efetivamente alcançado por meio de um posterior aquecimento de 103 °C a 105 °C. O caldo de cana é então decantado em tanques (por cerca de 3 ou 4 horas) visando separar impurezas com perda mínima de nutrientes.

Antes da fermentação ocorre o resfriamento, onde a temperatura do caldo é reduzida para cerca de 30°C por trocadores de calor. O xarope é então direcionado para alimentar os tanques de fermentação, nos quais a concentração é ajustada para 16–23°Brix (caldo) e a levedura (geralmente fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisiae*) é adicionada. A fermentação ocorre por cerca de 6–11 horas, quando o caldo é transformado em vinho fermentado contendo de 8% a 12% de álcool (FURTADO et al, 2010).

O vinho produzido passa para colunas de destilação, onde o etanol é separado do vinho com base nos diferentes pontos de ebulição dos componentes dessa mistura. O vinho é decomposto em dois fluxos: flegma (vapores com 40–50°GL) e vinhaça, que é submetida a um processo de evaporação, resultando em um subproduto comercializável utilizado como fertilizante nas plantações de cana.

Dessa forma, o impacto ambiental de todo o processo é minimizado, transformando o efluente líquido em um produto de valor. A água condensada dos evaporadores e os resíduos da coluna de retificação são coletados e encaminhados para o processo de tratamento, podendo parte dessa água ser reutilizada como alimentação para o sistema de cogeração (QUINTERO et al, 2006).

O bagaço obtido no processo pode ser utilizado em usinas de açúcar e destilarias de cana para a geração combinada de vapor e energia necessários ao processo. Para isso, unidades de cogeração precisam ser instaladas. Essas unidades basicamente incluem um queimador (combustor) para a queima do bagaço sólido, uma caldeira onde a água de alimentação é convertida em vapor, e um turbogerador (turbina a vapor), onde o vapor exaurido do processo é obtido junto com a energia. O excedente de eletricidade não consumido pela planta pode ser comercializado para a rede de energia (AMEZCUA-ALLIERI et al, 2019).

6. USINAS FLEX

As usinas *flex* são unidades produtivas capazes de processar tanto cana-de-açúcar quanto milho para a produção de etanol e podem ser classificadas como integradas-compartilhadas e integradas-dedicadas. No primeiro caso, a produção de etanol de milho ocorre apenas na entressafra da cana-de-açúcar, de modo que se possa utilizar, em momentos distintos, as mesmas estruturas de fermentação, destilação e utilidades. Já as integradas-dedicadas são capazes de produzir etanol de ambas as matérias-primas simultaneamente, mas as estruturas de fermentação e destilação utilizadas no período de safra são separadas, compartilhando-se apenas as utilidades. Na entressafra, contudo, as estruturas anteriormente destinadas à produção de etanol de cana-de-açúcar podem se destinar ao etanol de milho (MUNOZ et al, 2014).

A safra de produção de cana-de-açúcar é o período em que ocorre a colheita e processamento intensivo dessa planta para a obtenção de seus subprodutos, como açúcar, etanol e outros derivados. Esse período está intrinsecamente ligado às condições climáticas favoráveis que propiciam um melhor crescimento e teor de açúcar na cana. Geralmente, a safra de cana-de-açúcar ocorre durante a estação mais quente e chuvosa do ano, proporcionando um ambiente propício para o desenvolvimento da cultura (LIU et al, 2021).

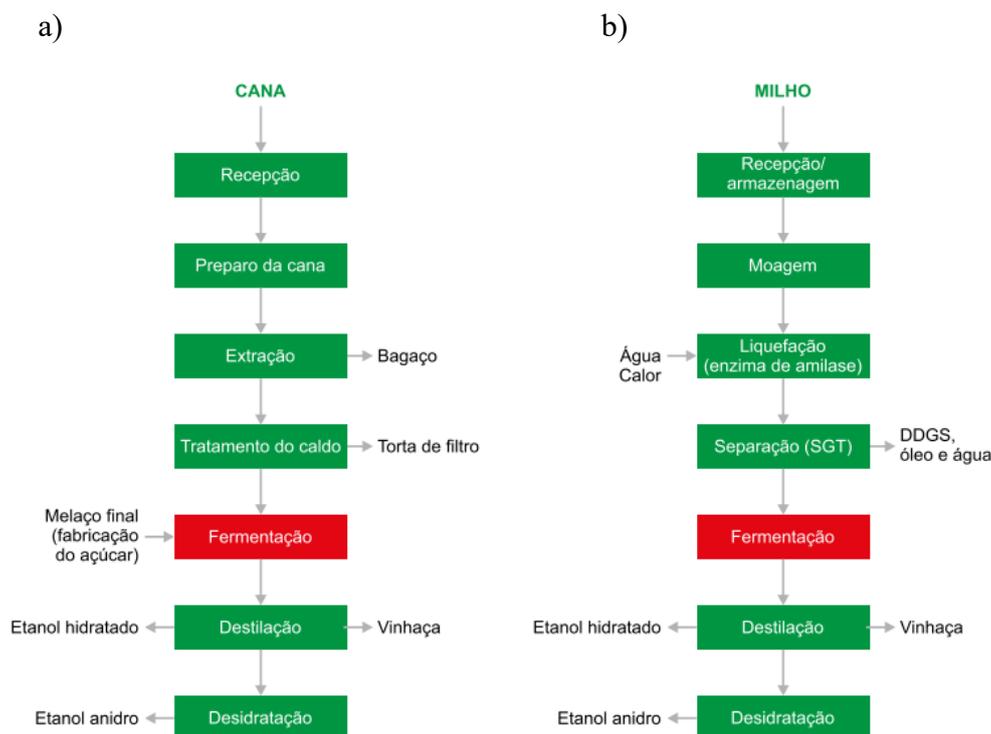
Durante os períodos mais chuvosos do ano, geralmente de novembro a janeiro, a colheita da cana-de-açúcar é interrompida devido ao impacto das máquinas agrícolas no solo úmido, causando compactação além do risco de aumento da degradação da cana em contato direto com a água. Essa condição adversa afeta diretamente a produção nas usinas, uma vez que a cana-de-açúcar não pode ser armazenada. Durante esse período, as usinas são forçadas a interromper suas atividades.

Além disso, o setor sucroalcooleiro a partir da cana-de-açúcar sofre diretamente com a sazonalidade da produção de matéria-prima, sendo necessário formar estoques do etanol produzido no período de colheita para regularizar a oferta no período da entressafra. Nesse contexto, o milho surge como uma alternativa viável, de uma matéria-prima complementar para ser aplicada o ano todo ou durante a entressafra da produção canavieira. Isso devido à facilidade de ser armazenado por um período mais longo, possibilitando sua posterior conversão em etanol. A partir desse conceito, foi sendo desenvolvidas novas abordagens para a produção de etanol, o que deu origem às usinas *flex* (DONKE et al, 2016).

No Brasil, conforme os dados da Unem (2023), o ano de 2022 registrou a operação de 17 usinas de etanol de milho, distribuídas em 10 em Mato Grosso, 5 em Goiás, 1 no Paraná e 1 em São Paulo. Entre essas unidades, 10 adotam o modelo *flex*, enquanto 7 operam somente com o grão. Adicionalmente, conforme revelado por um estudo da EPE (2023), a produção de etanol de milho no Brasil está prevista para dobrar ao longo dos próximos dez anos. Em 2031, estima-se que o país contará com nove unidades *flex* e 24 full adicionais. Esse considerável aumento na capacidade produtiva projeta a produção de etanol de milho para atingir 8,1 bilhões de litros em 2031. Esses dados destacam a crescente relevância das usinas flexíveis, evidenciando a sua importância no cenário atual e futuro da produção de etanol no país.

A Figura 4 mostra de que maneira as linhas de processamento de cana-de-açúcar e de milho compartilham etapas em uma usina do tipo *flex*. Deve-se ressaltar, contudo, que, mesmo em usinas *flex*, as especificidades técnicas de cada uma das matérias-primas tendem a se refletir em suas estruturas de custos e, portanto, devem ser analisadas.

Figura 5 - Rotas para produção de etanol de milho (b) e de cana-de-açúcar (a).



Fonte: Silva et al. (2020)

Com base no esquema apresentado na Figura 5, é evidente que os processos de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e milho compartilham semelhanças notáveis, especialmente a partir da etapa de fermentação. Isso abre caminho para novos

estudos e implementação de uma infraestrutura capaz de processar ambas as matérias-primas, como destacado por Silva (2020). A sinergia entre os processos pode se manifestar de diversas maneiras, de acordo com cada tipo de usina, integradas-compartilhadas ou integradas-dedicadas. O modelo integradas-compartilhadas envolve o aproveitamento do bagaço ou da palha remanescente da produção de cana-de-açúcar para atender às necessidades energéticas do processo de milho, ou por meio de uma integração energética e estrutural de equipamentos. Além disso, essa conexão pode reutilizar equipamentos da usina de cana-de-açúcar, como dornas de fermentação e colunas de destilação, entretanto, fica restrito ao funcionamento apenas na entressafra.

No cenário em que a integração se restringe somente ao aspecto energético, tem-se o reaproveitamento exclusivo das caldeiras e turbinas, sendo necessária a aquisição de novos equipamentos para as etapas de processamento e hidrólise do milho, fermentação dos açúcares e destilação do vinho. Nesses casos, a produção de etanol de milho não fica restrita ao período de entressafra da cana-de-açúcar, se tornando integradas-dedicadas. Em ambas as situações, um inconveniente do processo integrado é que, ao utilizar a energia proveniente do bagaço de cana para atender às necessidades energéticas do processo de milho, há uma diminuição na quantidade de bagaço ou palha que poderia ser reservada exclusivamente para a geração de excedentes de bioeletricidade (NEVES, 2018).

As usinas *flex* integradas-dedicadas, que funcionam com integração energética, apresentam a particularidade de processar milho durante todo o ano. Uma questão especial desse modelo, referente à integração de equipamentos, vem sendo estudada há um tempo no setor. As pesquisas se referem ao coprocessamento das matérias-primas e à fermentação dos açúcares provenientes de cada uma delas. Esse coprocessamento pode se dar de forma paralela, com moendas e dornas designadas para cada matéria-prima como exemplificado na Figura 4, ou de maneira simultânea, com dornas compartilhadas para a fermentação dos açúcares provenientes de ambas as matérias-primas (LONGATI, 2018).

No cenário de fermentação simultânea utilizando as mesmas dornas, haveria uma redução na eficiência da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, devido ao aumento dos tempos de fermentação necessários devido à alta concentração de sólidos provenientes do milho. Essa elevada concentração de sólidos não permite a recuperação e reciclagem das células de levedura, o que, por sua vez, poderia resultar em custos significativos de compra e cultivo de novas leveduras para um volume maior de

fermentação. Para evitar esses custos adicionais, uma concentração menor de levedura é adicionada às dornas, o que resulta em aumentos nos tempos de fermentação, como já é mencionado (LOPES et al., 2016).

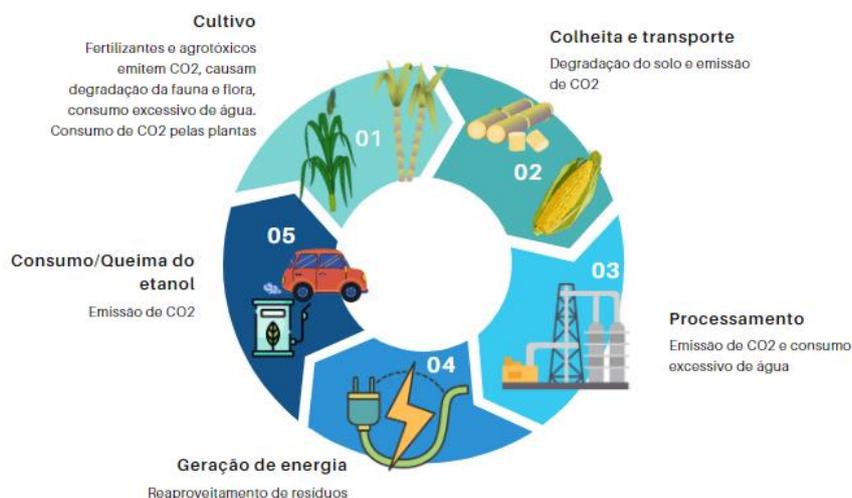
Uma abordagem mais eficaz mencionada por Milanez et al. (2014) e Alcantara et al. (2019), para a fermentação simultânea dos açúcares presentes em ambas as biomassas, envolve a separação dos sólidos em suspensão provenientes do milho antes do processo de fermentação. Essa tecnologia separa as fibras do milho antes da fermentação, possibilitando que a fermentação dos açúcares do milho ocorra simultaneamente à fermentação do mosto de cana. Esses estudos demonstram a viabilidade de uma integração eficaz e eficiente de matérias-primas, estabelecendo-se como uma alternativa em crescimento ao longo dos anos no país.

7. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE MILHO

Esta seção da pesquisa concentra-se na análise e comparação do impacto ambiental associado à produção de bioetanol a partir de duas fontes primárias distintas: cana-de-açúcar e milho. Uma das ferramentas de avaliação utilizada para embasar este estudo foi a Análise do Ciclo de Vida (ACV), essencial para proporcionar uma compreensão holística e sistemática dos diversos estágios envolvidos na produção, desde a obtenção da matéria-prima até o consumo final. A ACV vai além das emissões diretas de CO_2 , abrangendo também outros impactos ambientais, oferecendo assim uma visão abrangente da pegada ecológica associada a cada processo. A sustentabilidade emerge como um componente-chave dessa análise, enfatizando a necessidade de fontes renováveis e práticas agrícolas responsáveis na produção de biocombustíveis.

Para avaliar as matérias-primas, foram conduzidas pesquisas detalhadas que descrevem o comportamento de cada insumo em relação à pegada de carbono, uso de água, contaminação por fertilizantes, degradação do solo, impacto na biodiversidade e eficiência energética. Na figura 6 temos uma exemplificação desses impactos ambientais durante todo o ciclo de vida do etanol. Este estudo visa contribuir para a tomada de decisões informadas no desenvolvimento de políticas e práticas que promovam uma transição mais sustentável no setor de biocombustíveis, reconhecendo a importância crítica da escolha da matéria-prima na mitigação dos impactos ambientais.

Figura 6 – Exemplificação do ciclo de impacto ambiental da produção de etanol.



Fonte: Do autor (2023).

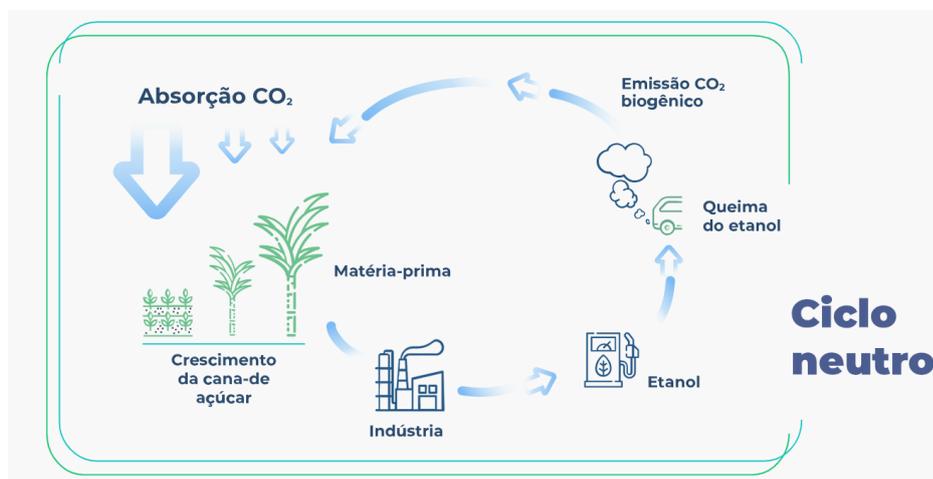
7.1. Pegada de Carbono

O bioetanol se tornou uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis finitos e, conseqüentemente, às emissões excessivas de gases de efeito estufa (GEE). A sustentabilidade dessa alternativa pressupõe que parte do CO_2 liberado durante a produção e processamento da biomassa seja reciclado por meio do processo de fotossíntese, responsável pelo crescimento da biomassa. Portanto, o CO_2 emitido durante a produção de etanol é considerado biogênico, uma vez que ele provém de biomassa, uma energia renovável (TEIXEIRA et al., 2008).

A Figura 7 ilustra como ocorre esse processo ideal de ciclo neutro onde, a emissão de gases poluentes durante a queima do biocombustível é compensada pelo seu consumo na cultura das plantas.

O conceito de "ciclo neutro" pode ser considerado impreciso, uma vez que não há garantia de que todo carbono emitido será completamente absorvido. No entanto, optaremos por utilizar esse termo, uma vez que alguns autores referenciados nesta pesquisa adotam essa terminologia.

Figura 7 – Exemplificação do Ciclo Neutro do Etanol



Fonte: UNICA (2023).

Quando avaliamos o saldo total de emissões ao longo de todo o ciclo energético, torna-se evidente que um veículo movido a álcool apresenta vantagens significativas em comparação ao movido a gasolina. O saldo final revela que, na comparação entre os dois combustíveis, o uso do álcool resultou na redução da emissão de 34,85 kg de CO_2eq no percurso, equivalendo a uma média de 144 gramas de CO_2eq por quilômetro rodado. Esses números indicam que o álcool reduz mais de 60% da pegada de carbono quando

comparado à gasolina. Além disso, ao considerarmos a proporção de etanol anidro adicionado à gasolina, as emissões evitadas líquidas podem atingir até 1,9 toneladas de CO_2eq por metro cúbico de etanol. Esses resultados ressaltam a eficácia do bioetanol como uma alternativa mais sustentável, contribuindo de forma expressiva para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte (UDOP, 2023).

Ao avaliarmos os impactos ambientais gerados pelo biocombustível, é fundamental percorrer todo o processo de produção e analisar as emissões de gases poluentes liberados em cada etapa para a atmosfera. Na Tabela 2, podemos visualizar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes de todo o ciclo de produção de etanol a partir de milho e cana-de-açúcar, representadas em termos de equivalentes de dióxido de carbono (CO_2eq), ou seja, considerando todos os gases de efeito estufa com base em seus potenciais de aquecimento global.

Tabela 2 – Emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e do milho em diferentes etapas do processo.

Etapas	Média de Emissões ($g CO_2 MJ^{-1}$)	
	Cana-de-açúcar	Milho
Fase agrícola	18,35	28,3
Cultivo	2,79	10,3
Maquinário agrícola	0,26	n.e
Queima da matéria prima	3,72	n.a
Emissões do solo	6,36	14,1
Transporte operacional agrícola	5,22	3,90
Fase industrial	1,14	28,8
Químicos e Lubrificantes	0,84	19,7
Planta e equipamentos	0,30	9,10
Distribuição final dos produtos	2,28	2,28
Créditos de coprodutos	-9,41	-16,5
Emissões líquidas do ciclo de vida	19,49	57,1
Total	10,08	40,6

*n.e.- (não encontrado); n.a. (não se aplica).

Fonte: Adaptado Manochio et al. (2017).

Já mesmo no cultivo, as emissões são geradas pela liberação de N_2O resultantes da nitrificação e desnitrificação de fertilizantes nitrogenados. Para ambas as matérias primas, a produção de fertilizantes e o uso de combustíveis fósseis em veículos e no maquinário empregados nas plantações são os principais pontos de emissão equivalente de CO_2 . Além disso, é possível observar que, na produção de milho os valores de emissão são intensificados devido à necessidade de utilização de uma quantidade superior de defensivos agrícolas no cultivo do grão.

No caso da cana-de-açúcar, o processo de queima da matéria-prima antes da colheita, já citado anteriormente, foi apontado como um fator significativo de emissões de gases poluentes. No entanto, é importante notar que essa prática está em desuso. Outro aspecto relevante na emissão de gases poluentes são os subprodutos das usinas de açúcar, como a vinhaça e a torta de filtro, que são usados para adubação de solo, os quais também liberam N_2O à medida que parte do nitrogênio presente neles se decompõe (MANOCHIO et al., 2017).

Na etapa industrial, a produção de bioetanol a partir da cana-de-açúcar se beneficia significativamente do aproveitamento da energia obtida pela queima do bagaço, resultando em uma redução específica das emissões. Por outro lado, o bioetanol de milho, que normalmente depende do gás natural, mostra-se menos sustentável devido à sua forte dependência de combustíveis fósseis em comparação com o bioetanol de cana-de-açúcar. Essa é uma das razões pelas quais o processo industrial de produção de bioetanol a partir de milho apresenta emissões mais significativas quando comparado à produção a partir da cana-de-açúcar (QUINTERO et al, 2008). No entanto, é importante lembrar que as usinas *flex* representam uma alternativa promissora, uma vez que a energia gerada a partir da queima do bagaço excedente também poderia ser direcionada para alimentar a produção do biocombustível de milho.

Adicionalmente, o milho possui um teor de açúcar inferior, 10% a menos, quando comparado à cana-de-açúcar, o que demanda uma maior quantidade de energia, seja na forma de eletricidade ou calor, para realizar o processo de cozimento do amido de milho e sua subsequente fermentação, exemplificado na Figura 3 nos processos 3 e 4. Isso implica que são necessárias mais etapas de processamento e maior consumo energético para transformar o amido de milho em bioetanol, o que, por sua vez, resulta em maiores emissões de CO_2 relacionadas a essas etapas adicionais. Em certos casos, a produção de bioetanol a partir de grãos de milho pode envolver a utilização de produtos (bio)químicos, como enzimas, para auxiliar na conversão do amido em etanol. O processo de produção

e a utilização desses produtos químicos podem contribuir para a geração de emissões suplementares desses gases poluentes.

Os produtos e coprodutos da produção de bioetanol substituem uma parte das fontes convencionais de carbono que emitem, gerando assim os créditos a partir dessa alocação. No caso do biocombustível de cana-de-açúcar e de milho, a substituição de parte da gasolina representa os créditos de descarbonização (CBIO). Na produção de bioetanol de milho, o uso de coprodutos para substituir parte da dieta convencional do gado alimentado com milho é responsável por uma parte substancial dos créditos. De acordo com Liska et al. (2009), os créditos de GEE atribuídos aos coprodutos podem variar de 19% a 38% das emissões totais ao longo do ciclo de vida na produção de bioetanol, quando se considera a substituição da ração convencional do gado por DDGS. No entanto, as fontes tradicionais de ração animal também são geradas como coprodutos de outros processos de produção (por exemplo, farelo de colza, farelo de soja) e, conseqüentemente, a alocação por substituição não fornece créditos substanciais, uma vez que essencialmente ocorre uma transferência de processos de coprodutos (MORTIMER, 2004).

A logística de transporte do bioetanol, tanto do deslocamento das usinas para os portos brasileiros, quanto do transporte do etanol em navios-tanque dos portos brasileiros para diversos países, também desempenha um papel fundamental nas emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do etanol. Essas emissões estão presentes em ambos os processos e devem ser consideradas na avaliação (BRAGA et al., 2012).

Diante da análise abrangente do ciclo de vida do bioetanol de cana-de-açúcar e milho, torna-se evidente que o biocombustível derivado da cana-de-açúcar exerce um papel significativo na redução das emissões de CO_2eq quando comparado ao bioetanol de milho. O processo de produção de bioetanol a partir da cana-de-açúcar, consolidado com sucesso no Brasil, apresenta uma série de vantagens ambientais. A utilização eficiente do bagaço para geração de energia na fase industrial contribui para uma redução significativa das emissões de carbono, destacando a sustentabilidade do processo. Em contrapartida, o bioetanol de milho demonstra uma dependência mais pronunciada de combustíveis fósseis, resultando em emissões mais expressivas na etapa industrial. A menor eficiência energética no cultivo do milho, a necessidade de mais etapas no processamento e o uso intensivo de fertilizantes são importantes para suas emissões superiores. Nesse contexto, ao considerar a pegada de carbono, o etanol de cana-de-açúcar se destaca como uma opção ambientalmente mais favorável.

7.2. Utilização de Água e Contaminação por Fertilizantes.

Os impactos da produção de bioetanol na qualidade da água podem ser classificados em duas categorias principais. A primeira está diretamente relacionada à prática da agricultura intensiva, envolvendo o consumo de água durante o cultivo e o uso de fertilizantes, pesticidas e outros produtos químicos tóxicos, como metais pesados, que podem ser transferidos para ecossistemas aquáticos por meio do escoamento superficial ou lixiviação (HESS, 2014). E a segunda categoria está associada à utilização da água e aos resíduos líquidos gerados durante o processo de produção de bioetanol nas usinas (CHAVEZ-RODRIGUEZ, 2013).

A mensuração de todas as fontes de consumo e poluição juntamente com suas intensidades torna-se desafiadora, uma vez que varia conforme as características intrínsecas e únicas de cada região. Portanto, a análise dos efeitos da produção de bioetanol a partir de cana-de-açúcar e milho no consumo e na qualidade da água focará em fontes de específicas, devido à restrição de disponibilidade de dados da pesquisa. Entretanto, é importante reconhecer que outros focos de degradação e utilização também podem exercer um papel significativo.

Quanto ao consumo excessivo de água no cultivo de ambas as matérias-primas, embora algumas regiões sejam inteiramente dependentes da chuva, muitas outras áreas dependem da irrigação no cultivo. Isso levanta crescentes preocupações devido aos volumes significativos utilizados, resultando em comprometimento excessivo e degradação dos sistemas fluviais. A Tabela 3 traz os volumes de consumo de água no ciclo de vida total de cada um dos combustíveis, mas vale ressaltar novamente, que nesta comparação, foram consultadas fontes diversas de pesquisa, indicando que o sistema utilizado para obter os valores pode ser distinto, portanto essas informações têm o propósito de proporcionar uma análise geral.

Tabela 3 – Consumo de água no ciclo de vida

	Cultivo (L/L de combustível)	Indústria (L/L de combustível)	Consumo Total (L/L de combustível)
Etanol de milho	97	3	100
Etanol de cana-de-açúcar	10,2	10,8	21
Gasolina	n.a.	n.e	5

*n.e.- (não encontrado); n.a. (não se aplica).

Fonte: Adaptado Hoelkman et al. (2017); Nova Cana (2023).

Para o milho, os requisitos hídricos do ciclo de vida do etanol são altamente variáveis, dependendo da quantidade de irrigação usada. De forma geral, a intensidade hídrica ultrapassa os 100 litros de água por litro de etanol, para a cana-de-açúcar o consumo chega a 21 litros por litro de etanol. Isso é significativamente maior do que a pegada hídrica do ciclo de vida da gasolina, que é de aproximadamente 5 litros/litro (HOELKMAN et al., 2018).

Conforme observado por Carmo (2008), no caso da cana-de-açúcar, as usinas também demonstram uma ineficiência notável no consumo de água, refletido pelo seguinte balanço hídrico em uma usina média do setor: para cada tonelada de cana processada, entram inicialmente 700 litros de água na usina, acrescidos de 1830 litros captados para o processamento da referida tonelada. A água deixa a usina na forma de perdas, totalizando 1919 litros por tonelada de cana, considerando evaporação, presença no bagaço, nas purgas resultantes da lavagem da cana, entre outros fatores. Adicionalmente, há o consumo de água nos produtos e subprodutos, como o bioetanol, que consome 0,26 litros por tonelada.

Quando falamos de fertilizantes, cursos de água e habitats aquáticos podem ser poluídos por agroquímicos e sedimentos provenientes do cultivo de cana-de-açúcar e de milho. As águas subterrâneas podem ser afetadas pela lixiviação de nutrientes provenientes dos fertilizantes aplicados no cultivo. Entretanto, a cana-de-açúcar destaca-se pela vinhaça, um resíduo líquido usado como fertilizante e gerado em volumes significativos durante a produção de etanol. No Brasil, é gerado em média de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido. A vinhaça contém uma quantidade substancial de carbono orgânico prontamente degradável, resultando em uma elevada demanda biológica de oxigênio. Além disso, possui concentrações significativas de nutrientes essenciais, como potássio (K) e nitrogênio (N), que têm o potencial de estimular a produção primária em ecossistemas aquáticos e induzir a eutrofização (SILVA et al, 2019).

Portanto, devido a problemas bem documentados de falta de oxigênio em corpos d'água que recebem altas cargas de vinhaça nas regiões canavieiras, a indústria do etanol no Brasil regulamentou o descarte de vinhaça há mais de 30 anos para ser reciclada de volta em campos de cana-de-açúcar. No entanto, o acúmulo de altas concentrações de K nos solos e lixiviação para as águas subterrâneas, devido à aplicação repetida de vinhaça, podem afetar potencialmente os ecossistemas aquáticos quando a água do solo e as águas subterrâneas se movem para as águas superficiais. Atualmente, uma das alternativas

exploradas para o manejo da vinhaça é a redução do seu teor de água para diminuir o volume e facilitar o transporte. As formas concentradas de vinhaça também têm a vantagem de reduzir as taxas de processamento de N em relação à vinhaça convencional, o que potencialmente diminui as emissões de N_2O (RESENDE et al, 2016).

Da perspectiva industrial, quantidades consideráveis de água são consumidas em uma planta de produção de bioetanol de milho, incluindo a água usada nos próprios processos bioquímicos (pré-tratamento, hidrólise e fermentação), bem como na destilação, secagem e utilidades gerais da planta. Conforme mostrado na Tabela 3 uma estimativa razoável do uso de água pela maioria das refinarias de bioetanol de milho é de 2,5 a 3,0 litros por litro de etanol (HOELKMAN, 2018). Já para a cana-de-açúcar, a usina utiliza uma grande quantidade de água nos processos, principalmente para resfriamento de equipamentos e sistemas, média aproximada de 21 mil litros por tonelada de cana. Nos valores médios de eficiência industrial atuais, em que cerca de 85 litros de bioetanol são produzidos por tonelada de cana processada em uma destilaria, o consumo corresponderia a 10,8 litros de água por litro de etanol (NOVA CANA, 2023). Com isso, verifica-se que o processo produtivo industrial a partir de milho apresenta menor utilização de água.

É relevante destacar que, nesta comparação, foram consultadas fontes diversas de pesquisa, indicando que o sistema utilizado para obter os valores pode variar. No entanto, dado o escopo desta revisão bibliográfica, cujo propósito é proporcionar uma análise abrangente, a intenção é abordar o processo de maneira geral, visando facilitar a compreensão.

Diante das análises realizadas sobre os impactos da produção de bioetanol proveniente de cana-de-açúcar e milho na qualidade e consumo de água, fica evidente que o cultivo de milho apresenta um maior impacto ambiental. Tanto em relação ao consumo excessivo de água no cultivo quanto ao uso de agrotóxicos, o milho se destaca como uma cultura que demanda mais recursos hídricos ao longo do seu ciclo de vida e utiliza uma quantidade significativa de produtos químicos. Vale ressaltar que, embora a cana-de-açúcar também tenha seus desafios ambientais, como o manejo da vinhaça e um maior consumo de água durante a produção, a indústria brasileira tem regulamentações que visam minimizar esses impactos, trazendo uma abordagem mais sustentável em comparação com o cultivo de milho para produção de etanol. Nesse contexto, a escolha entre os materiais primários para a produção de etanol deve considerar não apenas a eficiência energética, mas também os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de cada cultura

7.3. Degradação do Solo e Biodiversidade

Historicamente, vastas extensões de terras foram desmatadas para o início do cultivo de milho e cana-de-açúcar, resultando na perda de *habitats* naturais. A remoção da vegetação não acarreta apenas a perda direta de espécies e habitats, mas também desencadeia uma série de impactos mais amplos na funcionalidade dos ecossistemas, incluindo modificações na hidrologia e aumento da erosão do solo (MILANEZ et al, 2014). A manipulação do solo na agricultura no Brasil é resultado tanto da transferência física quanto da erosão, contribuindo para a perda gradual de indicadores cruciais da qualidade do solo, como o conteúdo de nutrientes e o estoque de carbono (PIRES et al, 2018).

Comparar os impactos nos habitats e solos decorrentes do cultivo de cana-de-açúcar e milho é uma tarefa desafiadora, dada a semelhança das degradações envolvidas. Nesta seção, abordaremos de maneira abrangente os desafios enfrentados por ambas as matérias-primas, entretanto, destacando alguns pontos que uma cultura se sobressai a outra.

Os solos destinados ao cultivo de cana-de-açúcar e milho no Brasil sofrem grandes transformações em suas características físicas. Tipicamente, essas alterações têm início com a compactação e desagregação do solo, associada ao uso de maquinaria pesada durante o preparo e a colheita, evoluindo para processos erosivos. A compactação do solo, resultante do emprego de maquinário robusto, persiste como uma preocupação agrícola no Brasil ao longo de vários anos. Além disso, a construção indiscriminada de pequenas estradas destinadas ao acesso de caminhões e tratores pesados, utilizadas no transporte da matéria-prima para as usinas, acentua esse problema (MILANEZ et al, 2014).

A compactação do solo reduz a capacidade de permeabilidade, resultando no aumento do escoamento superficial durante eventos de chuva. Isso contribui, ao longo do tempo, para a erosão do solo, resultando na perda de camadas superficiais ricas em nutrientes e carbono. Embora essa seja uma preocupação comum em várias práticas agrícolas intensivas no Brasil, a cultura de cana-de-açúcar assume proporções mais críticas, especialmente devido aos extensos períodos de exposição do solo nu durante as restrições para o plantio no início da estação chuvosa (DONKE, 2016).

No contexto agrícola, apesar da diversidade de invertebrados nas plantações e no solo, assim como a variedade de microrganismos, muitas vezes esses elementos são

ignorados ou até mesmo indesejados. Em resposta a esta situação, são aplicados pesticidas.

No cultivo de milho, os agrotóxicos são frequentemente usados para controle indireto, como lagartas, besouros e percevejos, além de doenças que podem comprometer a produção. A aplicação desses produtos é influenciada por fatores como o estágio de desenvolvimento da planta e as condições climáticas. Já na cana-de-açúcar, o manejo fitossanitário envolve estratégias diferenciadas. Além disso, a cana-de-açúcar é suscetível a doenças como a ferrugem e a podridão vermelha, o que pode exigir a utilização de fungicidas (BRAGA et al, 2012).

Embora tenham o propósito de controlar as determinações especificadas, os agrotóxicos podem ter impactos adversos na biodiversidade. Esses impactos não se restringem apenas à eliminação de organismos não alvo; também podem provocar efeitos indiretos ou contraproducentes. Por exemplo, a eliminação de espécies que desempenham papéis cruciais como fontes de alimento ou provedores de abrigo para outros organismos, além de, ironicamente, contribuir para o aumento da presença de insetos no habitat (DÍAZ DÍAZ, 2011).

Esse aumento de insetos no habitat durante o cultivo de cana-de-açúcar e milho pode ser influenciado por diversos fatores relacionados às práticas agrícolas e às características específicas dessas plantações. Dentre elas se destaca a monocultura que podem criar condições específicas para o aumento populacional de determinadas espécies de insetos, que encontram ambientes e recursos específicos para se desenvolver. O uso intensivo de agrotóxicos nessas culturas também pode ter efeitos diretos e indiretos sobre a fauna de insetos. Alguns inseticidas podem afetar não apenas as pragas-alvo, mas também organismos não alvo, incluindo insetos benéficos que desempenham papéis importantes nos ecossistemas. Além disso, o processo de conversão de áreas naturais em campos de cultivo pode resultar na perda de habitats naturais para insetos e outros organismos. Essa transformação impacta a diversidade biológica local (MUNOZ, 2014).

O uso prolongado e estendido de inseticidas pode levar ao desenvolvimento de resistência em trânsito de insetos, tornando o controle mais desafiador e, em alguns casos, contribuindo para aumentos populacionais. Em sistemas agrícolas mais sustentáveis, a prática de rotação de culturas pode ser empregada para ajudar no controle de diretrizes específicas, ajustada a pressão sobre precisão de seleção de sementes, além do controle ambiental de pragas. Por fim, o aumento de insetos no habitat durante o cultivo dessas culturas destaca a complexidade das interações entre práticas agrícolas e ecológicas,

exigindo abordagens sustentáveis e equilibradas para mitigar impactos negativos sobre a biodiversidade (DÍAZ DÍAZ, 2011).

Um desafio adicional diz respeito à biodiversidade em regiões cultivadas com cana-de-açúcar e milho. Durante as fases de preparo do solo e plantio, espécies nativas que compõem originalmente o solo são removidas, sendo substituídas pelas culturas destinadas à produção de bioetanol. Para lidar com essa questão, o Brasil possui uma legislação ambiental conhecida como Código Florestal (CF) que estabelece diretrizes para a preservação da cobertura vegetal natural em propriedades rurais privadas. Em 2012, o CF passou por uma revisão abrangente, resultando no Novo Código Florestal (NCF), lei nº 12.651/2012 promulgado em 25 de maio de 2012, que classifica certas áreas, como margens de rios e cumes de morros, como 'áreas de proteção permanente' (EMBRAPA, 2023).

A proteção ambiental ao longo das margens dos cursos d'água é determinada pela largura do corpo hídrico, enquanto as "reservas legais" ou áreas de proteção florestal dependem do tamanho da propriedade e do bioma correspondente. Por exemplo, na região amazônica, é exigido que 80% da floresta nativa em propriedades privadas seja preservada, enquanto no Cerrado, uma área protegida é exigida em 35% da propriedade. Nos outros biomas brasileiros, a percentagem obrigatória é de 25% da propriedade.

O Código Florestal (CF) desempenha um papel crucial na conservação das paisagens naturais brasileiras, especialmente porque aproximadamente 50% da vegetação natural do país está localizada em terras privadas rurais. No entanto, o cumprimento das regulamentações ambientais no Brasil historicamente tem sido baixo, mesmo diante das persistentes pressões sobre as paisagens naturais. O desafio na restauração de florestas em áreas de conservação em fazendas de cana-de-açúcar e milho reside no fato de que muitas vezes essas áreas contêm apenas pequenos fragmentos de floresta dispersos entre terras agrícolas, pastagens e florestas secundárias (SILVA, 2012).

Desta forma, ainda não está claro se as florestas restauradas podem se desenvolver plenamente nas áreas protegidas pelo CF, especialmente se não possuírem a capacidade de regenerar e manter a biodiversidade característica das florestas antigas, principalmente nas fases iniciais da sucessão ecológica.

Em resumo, ao analisar os impactos ambientais no solo e na biodiversidade decorrentes do cultivo de milho e cana-de-açúcar para a produção de etanol, observam-se notáveis semelhanças. Historicamente, ambas as culturas têm contribuído para a perda extensiva de habitats naturais, resultando em modificações nas características físicas do

solo, como compactação e erosão. A aplicação extensiva de agrotóxicos, embora destinada ao controle de pragas específicas, também desencadeia efeitos adversos na biodiversidade, propiciando o aumento de insetos no ambiente.

Adicionalmente, destaca-se que a produtividade de etanol a partir de cana-de-açúcar é superior à obtida a partir de milho, se um hectare de milho rende 3,5 mil litros de etanol, a mesma área equivale a 7,5 mil litros no caso da cana (BORTOLETTO, 2015). Essa observação sugere que, em termos de eficiência na produção de biocombustível, a cana-de-açúcar pode ser menos prejudicial, uma vez que os impactos por hectare de plantação são semelhantes. Contudo, é crucial considerar não apenas a produtividade, mas também os impactos específicos de cada cultura no ecossistema para uma avaliação completa e precisam dos aspectos ambientais envolvidos na produção de etanol.

A complexidade dessas interações entre práticas agrícolas e ecológicas destaca a necessidade urgente de abordagens sustentáveis. Além disso, o desafio relacionado à biodiversidade em áreas cultivadas ressalta a importância da aplicação eficaz do Código Florestal (CF) revisado em 2012. No entanto, persiste uma incerteza quanto à capacidade das florestas restauradas em áreas protegidas pelo CF de regenerar completamente e manter a rica biodiversidade característica das florestas originais, especialmente nas fases iniciais da sucessão ecológica. Assim, a busca por estratégias equilibradas e sustentáveis se apresenta como imperativa para mitigar os impactos negativos sobre o meio ambiente, promovendo práticas agrícolas que harmonizem a produção de biocombustíveis com a conservação dos recursos naturais.

7.4. EROI – *Energy Return or Investment*

A análise e comparação da eficiência energética na produção de etanol a partir de milho e cana-de-açúcar em termos ambientais são cruciais para a avaliação da sustentabilidade desses biocombustíveis. Embora ambos os materiais sejam utilizados na produção de bioetanol, as disparidades nos processos de conversão têm implicações significativas na eficiência energética e nos impactos ambientais (LIU et al, 2023).

A cana-de-açúcar se destaca como uma fonte excepcional de matéria-prima para a produção de bioetanol, devido ao elevado teor de açúcar presente em seu caldo. Seu processo de produção é geralmente mais eficiente em termos energéticos, uma vez que requer menos energia para converter os açúcares em biocombustível. Conforme mencionado anteriormente, a capacidade de aproveitar os subprodutos, como o bagaço,

para a geração de energia, torna todo o processo substancialmente mais sustentável e eficiente quando comparado à produção de etanol a partir do milho (DONKE et al, 2016).

Por outro lado, o milho é uma matéria-prima que apresenta um alto teor de amido em vez de açúcares, o que exige um processo de conversão mais complexo para transformar o amido em etanol. Esse processo consome uma quantidade consideravelmente maior de energia. Em comparação com a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, a produção de etanol de milho tende a ser menos eficiente em termos energéticos, devido à necessidade de etapas adicionais de processamento.

Um método de comprovação desse fato foi descrito pelo trabalho de Chum et al. (2014) mostra que a produção de etanol de cana apresenta uma razão entre energia disponibilizada pelo biocombustível e energia fóssil gasta para produzi-lo (EROI – *Energy Return on Investment*) superior que a produção de etanol de milho. Os cenários considerados incluem impactos advindos desde o plantio das matérias-primas, até a utilização do produto (etanol) e coprodutos.

Para os cenários representativos dos processos industriais atuais de produção de etanol de milho (DDGS como único coproduto e sem produção de etanol de segunda geração) e cana (com geração de eletricidade a partir do bagaço e da palha e produção de açúcar), os valores de EROI foram de 1,7 e 7,0 MJ bioenergia/MJ fóssil, respectivamente. O processo otimizado a partir da cana, que considera apenas eletricidade como coproduto e captura do CO₂ produzido na fermentação, apresenta EROI ainda superior de 9,5 MJ bioenergia/MJ fóssil (CHUM et al., 2014).

Uma estratégia viável para a obtenção de energia a partir da palha de milho é a combustão direta. A palha de milho apresenta valores caloríficos que oscilam entre 17,65 e 18,6 MJ/kg de matéria seca. Esses índices indicam um potencial calorífico significativo, conferindo excelente qualidade para a geração de energia térmica mediante a queima direta, como no caso de utilização de palha enfardada, especialmente em setores industriais.

Embora a combustão direta da palha de milho demonstre ser uma opção tecnicamente viável e energeticamente eficiente, é importante ressaltar que, atualmente, essa prática não é amplamente adotada. Desafios logísticos e econômicos associados ao manuseio, transporte e armazenamento da palha podem explicar em parte a baixa adoção dessa abordagem. Neste cenário, a geração de energia a partir da palha de milho ainda não atingiu o mesmo patamar de aceitação e aplicabilidade quando comparada à energia derivada do bagaço da cana-de-açúcar (SANTOS, 2022).

Diante da análise comparativa da eficiência energética na produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e milho, fica evidente que o bioetanol derivado da cana-de-açúcar apresenta uma vantagem significativa em termos de impacto ambiental. A cana-de-açúcar, com seu elevado teor de açúcar, permite um processo de produção mais eficiente, exigindo menos energia para a conversão dos açúcares em biocombustível. Além disso, a capacidade de aproveitar subprodutos como o bagaço para geração de energia contribui para a sustentabilidade geral do processo. Em contrapartida, o milho, rico em amido, requer um processo mais intensivo para a transformação em etanol, resultando em um consumo consideravelmente maior de energia. Diversos estudos, incluindo o trabalho de Chum et al. (2014), destaca a superioridade da cana-de-açúcar em termos de retorno de energia, demonstrando que a produção de etanol de milho tende a ser menos eficiente. Assim, a eficiência energética da cana-de-açúcar surge como um fator determinante na redução do impacto ambiental na produção de etanol, consolidando-se como uma opção mais sustentável.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou comparar a produção de bioetanol a partir das suas duas principais matérias-primas, a cana-de-açúcar e milho, em termos de impactos ambientais ao longo de todo o processo de cultivo e da produção do biocombustível. Diante da análise abrangente dos impactos ambientais associados é possível afirmar que o bioetanol derivado da cana-de-açúcar apresenta vantagens significativas em diversos critérios. A começar pela eficiência energética, a cana-de-açúcar, com seu elevado teor de açúcar e a capacidade de aproveitamento de subprodutos para geração de energia, demonstra ser uma matéria-prima mais eficiente em termos de conversão em biocombustível, resultando em menor consumo de energia ao longo do processo.

Além disso, a produção de milho apresenta emissões significativamente superior, cerca de 75% a mais de gases de efeito estufa em comparação com a cana-de-açúcar, desempenhando um papel mais impactante no aumento global de emissões. Este padrão se manifesta novamente ao analisarmos o consumo de água, revelando um aumento significativo de aproximadamente 79% no volume utilizado para a produção de 1 litro de etanol de milho. No entanto, embora as práticas agrícolas associadas à cana-de-açúcar enfrentem desafios próprios, é importante notar que se assemelham ao milho em relação aos aspectos vinculados ao solo e à biodiversidade. Não que diz respeito à utilização intensa de agrotóxicos, o cultivo de milho continua a se destacar, mantendo-se como uma preocupação com ênfase nesse contexto.

Em resumo, as análises ambientais convergem para concluir que o etanol derivado da cana-de-açúcar emerge como uma opção mais sustentável, alinhada com a busca por alternativas renováveis e de baixo impacto ambiental na matriz energética. Estratégias destinadas a mitigar os impactos ambientais ganham maior eficácia quando integradas a um sistema abrangente, holístico e pragmático de gestão sustentável.

A adoção de boas práticas agrícolas, comumente conhecidas, pode ser um meio eficaz de limitar muitos dos impactos ambientais associados à produção de cana-de-açúcar e milho, proporcionando benefícios econômicos às produções. De maneira semelhante, no processo de produção de bioetanol, a implementação de práticas alinhadas com padrões de boas práticas pode reduzir impactos ambientais, ao mesmo tempo em que oferece oportunidades para economia de custos, seja por meio da otimização do consumo de água e energia ou da maximização do aproveitamento de resíduos como subprodutos. Contudo, é crucial ressaltar que a responsabilidade pela preservação do meio ambiente

não recai apenas sobre produtores e usinas, mas abrange toda a comunidade, incluindo usuários e beneficiários dos recursos naturais. O engajamento coletivo é essencial para garantir a proteção ambiental de maneira eficaz.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, G. U.; Nogueira, L. C.; Stringaci, L. A.; Moya, S. M.; Costa, G. H. G. (2019). Brazilian “Flex Mills”: Ethanol from Sugarcane Molasses and Corn Mash. *Bioenergy Research*. DOI: 10.1007/s12155-019-10052-3.

AMEZCUA-ALLIERI, M. A., Martínez-Hernández, E., Anaya-Reza, O., Magdaleno-Molina, M., Melgarejo-Flores, L. A., Palmerín-Ruiz, M. E., Zermeño Eguía-Lis, J. A., Rosas-Molina, A., Enríquez-Poy, M., & Aburto, J. (2019). Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 41-52.

ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em: < <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool/> >. Acesso em: 25 set. 2023.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br> >. Acesso em: 23 set. 2023.

B3. Bolsa de Valores. Disponível em: https://www.b3.com.br/pt_br/b3/sustentabilidade/produtos-e-servicos-esg/credito-de-descarbonizacao-cbio/. Acesso em: 20 out. 2023.

BEN. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico596/BEN2021.pdf>. Acesso em dez. 2023

BNDES, GCEE. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Editora Senac Rio; 2008.

Bonomi A, Mariano AP, Jesus CDF de, Franco HCJ, Cunha MP, Dias MO de S. et al. The virtual sugarcane biorefinery (VSB); 2011

BORTOLETTO, Aline Marques; ALCARDE, André Ricardo. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. *Visão Agrícola*, v. 13, p. 135-137, 2015.

BRAGA, J. et al. (2012). Emissões de gases de efeito estufa no campo provenientes de solos de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos da aplicação de fertilizantes sintéticos e orgânicos e acúmulo de resíduos da cultura. *GCB Bioenergy* (no prelo). DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x.

Brasil. Congresso Nacional. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). *Diário Oficial da União*, Brasília, 27 dez. 2017. Seção 1, p. 1. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm. Acesso em: 20 nov. 2023

BUCKLER ES, Stevens NM. Maize origins, domestication, and selection. In: Motley TJ, Zerega N, Cross H, editors. *Darwin's harvest—origins, evolution, and conservation of crops*. New York: Columbia University Press; 2005.

CARMO, V.B. Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar – fase industrial. Em: Workshop “Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar”-Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas . Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas. 2008.

CHAVEZ-RODRIGUEZ MF, Mosqueira-Salazar KJ, Ensinas AV, Nebra SA. Water use and recycling according to stream qualities in sugar-ethanol plants. Energy Sustain Dev 2013; 17:546–54.

CHUM, H. L.; Warner, E.; Seabra, J. E. A.; Macedo, I. C. (2014). A Comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn. Biofuels, Bioproducts & Biorefining, 8, pp. 205-223. DOI: 10.1002/bbb.1448.

CNPQ. Conselho Nacional de Política Energética. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.940-de-13-de-janeiro-de-2022-373851996>> . Acesso em: 18 out. 2023.

CORTEZ LAB. Sugarcane bioethanol: R & D for productivity and sustainability, 1st ed.. São Paulo: Edgard Blücher Ltda; 2010.

DÍAZ DÍAZ, Marco Antonio. Análise do Ciclo de Vida do Etanol Brasileiro Visando à Certificação Ambiental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

DONKE, A. C. G., MATSUURA, M. I. S. F., KULAY, L., & MATAI, P. H. L. S. Avaliação do desempenho ambiental do etanol de milho para o Brasil. IV Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida, 2014.

DONKE, A. C. G., Vifias, R., Folegatti Matsuura, M. I. S., Matai, P. H. S., & Kulay, L. A. Usina Flex: Comparação dos desempenhos ambiental e energético de etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo. V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida - Fortaleza, CE, 2016.

ECKERT, C.T. Avaliação da produção de etanol a partir de distintos híbridos de milho na região oeste do Paraná. 2016. 61p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao>> . Acesso em 30 set. 2023

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/entenda-o-codigo-florestal>> . Acesso em 28 out. 2023

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em 21 nov. 2023

FONSECA, G. C.; Costa, C. B. B.; Cruz, A. J. G. Economic analysis of a second-generation ethanol and electricity biorefinery using superstructural optimization. *Energy*, v. 204, 2020, p. 117988. ISSN 0360-5442.

FURTADO AT, Leal RLV. Technological roadmapping for sugarcane ethanol. *Sugarcane bioethanol R & D Product. Sustain*, 1st ed.. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.; 2010. p. 993.

HESS T, Aldaya M, Fawell J, Franceschini H, Ober E, Schaub R, et al. Understanding the impact of crop and food production on the water environment – using sugar as a model. *J Sci Food Agric* 2014; 94:2–8.

HOELKMAN, SK, Broch, A., e Liu, X. (Vivian). (2018). Implicações ambientais da maior produção e uso de etanol nos EUA: uma revisão da literatura. Parte I – Impactos na qualidade da água, do solo e do ar. *Avaliações de Energia Renovável e Sustentável*, 81, 3140–3158. doi:10.1016/j.rser.2017.05.050

IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA, 2019. Countries and regions. Disponível em: <https://www.iea.org/countries>. Acesso em: dez. 2023.

KWIATKOWSKI JR, McAloon AJ, Taylor F, Johnston DB. Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. *Ind Crops Prod* 2006.

LAM E, Carrer H, Silva JA, Kole C. *Compendium of bioenergy plants*. CRC Press; 2015.

LEITE RC de C, Leal MRL V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos–CEBRAP*; 2007, p. 15–21. (<http://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>)

LISKA AJ, Yang HS, Bremer VR, Klopfenstein TJ, Walters DT, Erickson GE, et al. Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *J Ind Ecol* 2009;13:58–74.

LIU, Y., Cruz-Morales, P., Zargar, A., Belcher, M. S., Pang, B., Englund, E., Keasling, J. D. Biofuels for a sustainable future. *Cell*, 184(4), 855-874, 2021.

LIU, Z., Deng, Z., Davis, S. et al. Monitoring global carbon emissions in 2022. *Nat Rev Earth Environ* 4, 205–206 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00406-z>

LONGATI. A. A. (2018). Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP

LOPES, M. L.; Paulillo, S. C. L.; Godoy, A.; Cherubin, R. A.; Lorenzi, M. S.; Giometti, F. H. C.; Bernardino, C. D.; Amorim Neto, H. B.; Amorim, H. V. (2016). Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 47, pp. 64-76. DOI: 10.1016/j.bjm.2016.10.003

MACEDO IC, Seabra JEA, JEAR Silva. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenergy* 2008;32:582–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>

MANOCHIO, C., Andrade, B. R., Rodriguez, R. P., & Moraes, B. S. (2017). Ethanol from biomass: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 743-755.

MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; VALENTE, M.S.; XAVIER, C.E.O.; KULAY, L.A.; DONKE, C.G.; MATSUURA, M.I. da S.F.; RAMOS, N.P.; MORANDI, M.A.B.; BONOMI, A.; CAPITANI, D.H.D.; CHAGAS, M.F.; CAVALETT, O.; GOUVÊIA, V.L.R. de. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. *Revista do BNDES*, n.41, p.147-208, 2014.

MORTIMER ND, Elsayed MA, Horne RE. Energy and greenhouse gas emissions for bioethanol production from wheat grain and sugar beet. Sheffield 2004

MUNOZ, I. et al. (2014) Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.19, n.1, p. 109-119

NASTARI, P.M. Etanol de milho tem futuro no Brasil. *AgroANALYSIS*, v.38, p.26-27, 2018.

NEVES, Marcos A. et al. State of the art and future trends of bioethanol production. *Dyn Biochem Process Biotechnol Mol Biol*, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2018.

NOVA CANA. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/uso-agua-producao-cana-etanol>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

PAES, M. C. D. (2022). Manipulação da composição química do milho: impacto na indústria e na saúde humana. *Nutrição Humana e Ciência dos Alimentos, Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Milho*. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/50216/1/Manipulacao-composicao.pdf>> Acesso em dez. 2023.

PEREIRA, L. G., CAVALETTA, O., BONOMI, A., ZHANG, Y., WARNER, E., & CHUM, H. L. Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110. 1-12/Elsevier, 2019.

PIRES, W. M., Teixeira, M. B., Soares, F. A. L., Ribeiro, W. A., & Lopes Filho, L. C. (2018). CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES NÍVEIS DE REPOSIÇÃO HÍDRICA, COM E SEM ADIÇÃO DE NITROGÊNIO. *Cientific@ - Multidisciplinary Journal*, 5(3).

QUINTERO, J. A., Montoya, M. I., Sánchez, O. J., Giraldo, O. H., & Cardona, C. A. Produção de etanol combustível a partir de cana-de-açúcar e milho: Análise comparativa para um caso colombiano. Department of Chemical Engineering, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Cra. 27 No. 64-60, Manizales, Colombia, 2008.

RESENDE AS, Xavier RP, Oliveira OC de, Urquiaga S, Alves BJR, Boddey RM. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. *Plant Soil* 2016; 281:339–51.

SANTOS, V. C. Uso dos Resíduos da Produção de Milho como Alternativa ao Cavaco de Eucalipto na Indústria de Etanol de Milho. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário de Sinop, 2022.

SILVA WP, Almeida CDGC de, Rolim MM, Silva EFF, Pedrosa EMR, Silva VGF. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. *Rev Bras Eng Agrícola Ambient* 2019; 18:394–40.

SILVA, H. J. T., Santos, P. F. A., Nogueira Junior, E. C., & Vian, C. E. F. (2020). Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. *Revista Agropecuária Técnica*, Ano XXIX – No 142 4 – Out./Nov./Dez. 2020.

SILVA, José Antônio Aleixo da Coordenador et al. O Código Florestal e a Ciência: contribuições para o diálogo. SBPC, 2012.

TEIXEIRA, E. C; FELTES, S; SANTANA, E. R. R. Estudo Das Emissões De Fontes Móveis Na Região Metropolitana De Porto Alegre, Rio Grande Do Sul. *Química Nova*, Vol. 31, pag 244, 2008.

TSARSAROS JH, Brodie JE, Bohnet IC, Valentine P. Water quality degradation of coastal water ways in the wet tropics, Australia. *Water Air Soil Pollution* 2013; 224:1443.

UDOP. União Nacional da Bioenergia. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2023/04/03/comparativo-de-emissoes-de-co2-confirma-vantagens-do-etanol-para-uma-mobilidade-mais-sustentavel.html>>. Acesso em: 21 set. 2023

UNEM. União Nacional do Etanol de Milho. Disponível em: <<https://etanoldemilho.com.br/>> Acesso em: 20 nov. 2023

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>>. Acesso em: 23 set. 2023

UNICADATA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4>>. Acesso em: 20 nov. 2023

VASCONCELOS, J.N. de. Fermentação etanólica. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologias e perspectivas. Viçosa: UFV, 2010. p.401-437.

VIDAL, F. M. (2022). Caderno Setorial ETENE, Agroindústria - Etanol. Banco do Nordeste. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1409/3/2022_CDS_237.pdf> Acesso em: 18 nov. 2023