

Avaliação do processo de fermentação para produção de etanol a partir do amido da mandioca: análise de viabilidade técnica e comparativa com o etanol da cana-de-açúcar e milho

RAMOS, Rute da Costa
SILVA, Fabio Cesar da
SERRA, Erlane Santos
FERNANDES, Gabriela Dias

Resumo

A crescente demanda por fontes alternativas de energia renovável impulsionou o desenvolvimento de biocombustíveis, com destaque para o etanol. Tradicionalmente produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho, já atingindo 25% do etanol produzido no país. Nesse cenário, a mandioca surge como uma alternativa promissora devido ao seu alto teor de amido, que pode ser convertido em açúcares fermentáveis após a hidrólise. A mandioca apresenta vantagens, como adaptabilidade a diferentes solos e climas, baixo custo de produção e resistência a pragas. Sua utilização pode impulsionar o desenvolvimento socioeconômico em regiões menos industrializadas, gerando emprego e renda, ao mesmo tempo, em que contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa por se tratar de um biocombustível renovável com menor impacto Ambiental. A diversificação de matérias-primas para a produção do etanol, fortalece a segurança energética, diminui a dependência de culturas tradicionais. Além disso, mitiga riscos associados a variações de mercado e condições climáticas. Dessa forma, investir em pesquisa e tecnologia voltadas à produção de etanol a partir da mandioca representa uma estratégia sustentável, capaz de integrar avanços ambientais, sociais e econômicos. Além de ampliar a matriz energética renovável do Brasil, essa alternativa reforça o compromisso com soluções que conciliam eficiência produtiva e preservação ambiental, contribuindo de forma decisiva para o futuro energético do País. Assim, o presente estudo, por meio de uma revisão bibliográfica, realiza uma comparação detalhada entre a produção de etanol a partir do amido de mandioca e do milho, considerando variáveis como produtividade agrícola, açúcares totais, conversão teórica, produtividade do etanol e preço CIF. Os dados disponíveis indicam que o milho é uma matéria-prima viável para a produção de etanol, apresentando produtividade significativa e custo unitário competitivo. A cana-de-açúcar, por sua vez, constitui uma matéria-prima tradicional e amplamente consolidada no Brasil, com elevada produtividade em etanol e balanço energético favorável.

Palavras-chave: biocombustível, etanol, mandioca, hidrólise de amido.

Abstract

The growing demand for alternative sources of renewable energy has driven the development of biofuels, especially ethanol. Traditionally produced from sugarcane and corn, it already accounts for 25% of the ethanol produced in the country. In this scenario, cassava emerges as a promising alternative due to its high starch content, which can be converted into fermentable sugars after hydrolysis. Cassava offers advantages such as adaptability to different soils and climates, low production costs, and resistance to pests. Its use can boost socioeconomic development in less

industrialized regions, generating employment and income, while contributing to the reduction of greenhouse gas emissions as it is a renewable biofuel with less environmental impact. The diversification of raw materials for ethanol production strengthens energy security, reduces dependence on traditional crops, and mitigates risks associated with market fluctuations and climatic conditions. Therefore, investing in research and technology focused on ethanol production from cassava represents a sustainable strategy capable of integrating environmental, social, and economic advancements. In addition to expanding Brazil's renewable energy matrix, this alternative reinforces the commitment to solutions that reconcile productive efficiency and environmental preservation, contributing decisively to the country's energy future. Thus, this study, through a literature review, performs a detailed comparison between ethanol production from cassava starch and corn, considering variables such as agricultural productivity, total sugars, theoretical conversion, ethanol productivity, and CIF price. The available data indicate that corn is a viable raw material for ethanol production, presenting significant productivity and a competitive unit cost. Sugarcane, in turn, constitutes a traditional and widely consolidated raw material in Brazil, with high ethanol productivity and a favorable energy balance.

Keywords: biofuel, ethanol, cassava, starch hydrolysis

Resumen

La creciente demanda de fuentes alternativas de energía renovable ha impulsado el desarrollo de biocombustibles, especialmente el etanol. Tradicionalmente producido a partir de caña de azúcar y maíz, este ya representa el 25% de la producción nacional de etanol. En este contexto, la yuca emerge como una alternativa prometedora debido a su alto contenido de almidón, que puede convertirse en azúcares fermentables tras la hidrólisis. La yuca ofrece ventajas como la adaptabilidad a diferentes suelos y climas, bajos costos de producción y resistencia a plagas. Su uso puede impulsar el desarrollo socioeconómico en regiones menos industrializadas, generando empleo e ingresos, a la vez que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que es un biocombustible renovable con menor impacto ambiental. La diversificación de materias primas para la producción de etanol fortalece la seguridad energética, reduce la dependencia de los cultivos tradicionales y mitiga los riesgos asociados a las fluctuaciones del mercado y las condiciones climáticas. Por lo tanto, invertir en investigación y tecnología centradas en la producción de etanol a partir de yuca representa una estrategia sostenible capaz de integrar avances ambientales, sociales y económicos. Además de ampliar la matriz energética renovable de Brasil, esta alternativa refuerza el compromiso con soluciones que concilien la eficiencia productiva y la preservación del medio ambiente, contribuyendo decisivamente al futuro energético del país. Por ello, este estudio, mediante una revisión bibliográfica, realiza una comparación detallada entre la producción de etanol a partir de almidón de yuca y maíz, considerando variables como la productividad agrícola, los azúcares totales, la conversión teórica, la productividad de etanol y el precio CIF. Los datos disponibles indican que el maíz es una materia prima viable para la producción de etanol, con una productividad significativa y un costo unitario competitivo. La caña de azúcar, por su parte, constituye una materia prima tradicional y ampliamente consolidada en Brasil, con una alta productividad de etanol y un balance energético favorable.

Palabras clave: biocombustible, etanol, yuca, hidrólisis del almidón.

INTRODUÇÃO

A necessidade de incrementar a participação de combustíveis renováveis na matriz energética brasileira e mundial tem alavancado o setor de processo de produção de biocombustível a base etanol. As unidades de processamento de combustíveis de origem fóssil da Petrobrás estão atuando muito próximo da capacidade máxima do processo de produção, sendo necessária a implantação de novas refinarias ou ampliação do processo de produção de biocombustíveis etanol e biodiesel.

Dentro desse contexto, investigações científicas e tecnológicas tem como objetivo desenvolver inovações no processo que permitam o uso de matérias-primas alternativas para o desenvolvimento de biocombustíveis como bioetanol e butanol. Em relação às principais matéria-prima atualmente empregadas em grandes unidades de produção do bioetanol no modelo brasileiro, se encontra a cultura de cana-de-açúcar e o milho. Sabe-se que, ao se tratar de fontes de energia limpa, a agroenergia tem sido apontada, nos âmbitos nacional e internacional, como uma relevante oportunidade de negócios para países emergentes (ANP, 2023).

Além da cana-de-açúcar e do milho, existem outros potenciais ou matérias-primas utilizadas em menor escala, como mandioca, beterraba, sorgo sacarino, trigo, cevada, batata e resíduos agrícolas.

No entanto, neste artigo, será evidenciada a importância da raiz da mandioca, devido seu elevado potencial de amido, o que pode conferir relevância contemporânea em determinadas regiões do Brasil, em comparação com a cana-de-açúcar e o milho.

Diversos estudos têm investigado a utilização de biomassa amilácea, com destaque para a raiz de mandioca, sob a perspectiva do ciclo de vida aplicado à produção de bioetanol. Essa abordagem possibilita a integração entre a produção de alimentos, a geração de biocombustíveis e o aproveitamento de coprodutos e resíduos agroindustriais, como o farelo destinado à alimentação animal, configurando-se como uma estratégia altamente relevante sob os aspectos socioeconômico, energético e ambiental. A cultura da maniva de mandioca assume papel decisivo tanto em grandes propriedades rurais quanto, especialmente, na agricultura familiar (Fagundes, 2009).

A hidrólise do amido constitui uma etapa fundamental para a conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentescíveis na produção de etanol a partir de matérias-primas amiláceas. Esse processo consiste na quebra das moléculas de amido em açúcares fermentáveis, principalmente glicose, por meio da ação de agentes químicos ou enzimáticos. A eficiência da hidrólise está diretamente relacionada ao rendimento final do etanol, sendo essencial o controle de variáveis como temperatura, pH e tempo de reação.

A hidrólise enzimática, em especial, apresenta vantagens significativas em comparação aos métodos químicos, por ocorrer em condições mais brandas e gerar menos subprodutos indesejáveis. Enzimas como a α -amilase e a glucoamilase são amplamente utilizadas para converter o amido em açúcares simples, que posteriormente são fermentados por microrganismos, geralmente leveduras do gênero *Saccharomyces*. Dessa forma, a otimização dessa etapa é determinante para aumentar a eficiência do processo e reduzir os custos de produção do bioetanol (Camporezi; Dias, 2021).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Raiz da mandioca

A mandioca consiste em uma raiz nativa do território sul-americano, explorada pelas sociedades pré-colombianas que, mesmo antes da chegada do europeu ao continente, já a cultivavam e a processavam artesanalmente. Pertence à ordem *Malpighiales*, família *Euphorbiaceae*, gênero *Manihot* e espécie *Manihot esculenta* Crantz e é a única, entre as 98 espécies conhecidas dessa família, cultivada para fins de alimentação. É uma planta arbustiva caracterizada por intensa ramificação, podendo atingir 3 m de altura. Produz de seis a oito raízes tuberosas, comprida, espessa, feculentas, com peso médio de 600 gramas por raiz, com cerca de 30 cm de comprimento por 7 cm de diâmetro. Seu ciclo pode ser de um a dois anos (Cardoso, 2005). É favoravelmente cultivada em climas tropicais e subtropicais, com uma faixa de temperaturas de 20°C a 27°C. Porém, a média ideal para a atividade gira em torno de 24°C a 25°. Esse tubérculo não tolera alagamentos nem condições de congelamento do solo, desenvolvendo-se de forma produtiva sob exposição à luz solar. Obedecidas as condições mínimas, a adaptação da planta é muito eficiente e, por isso, é considerada uma cultura rústica (SEBRAE, 2008).

A raiz de mandioca apresenta ampla diversidade de usos, tanto correntes quanto potenciais. Além dos produtos obtidos a partir de sua matéria-prima principal, destacam-se aqueles provenientes da parte aérea da planta, constituída por folhas e hastes, os quais podem ser destinados à alimentação animal e humana, como por exemplo, na preparação de silagens e fenos ou mesmo frescas. Podem também ser peletizadas, puras ou misturadas com outros alimentos. Na alimentação humana, as folhas após a desidratação, são utilizadas, na forma de farinha ou diretamente, na preparação de alimentos típicos das regiões Norte e Nordeste do Brasil. As hastes são também fonte de material de plantio (manivas) para as novas lavouras (Castioni; Saito; do Valle, [s.d.], 2025).

A resistência dessa planta às condições climáticas é determinante na sua utilização como reserva alimentar nas regiões de grande estiagem, como é o caso do Nordeste. Devido ao seu elevado teor de carboidrato com baixos custos de processamento, tem importância social significativa em países tropicais. Estimativas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) indicam que entre 600 e 700 milhões de pessoas em nível global dependem da mandioca como principal fonte de carboidratos (Alves, 2020). Segundo a literatura (Tabela 1), a morfologia vegetal dessa planta é, em geral, bastante variável. A raiz tuberosa é eminentemente calórica, gerando cerca de 1.500 cal/Kg, a partir dos carboidratos (350 g./Kg). No que se refere à composição mineral, observam-se elevados teores de fósforo e cálcio, enquanto o ferro está presente em baixas concentrações. Entretanto, sua concentração pode aumentar significativamente nos resíduos e produtos quando são utilizados equipamentos metálicos no processamento da raiz de mandioca (Cereda, 2001).

Tabela 1: Composição nutricional da mandioca e milho

Componentes	Mandioca ¹	Milho ²
Umidade (g/100g)	60-65	9,2-15,4%
Carboidratos (g/100g)	30-3	60-78%
Proteínas (g/100g)	0,5-2,5	6-12
Lipídeos (g/100g)	0,2-0,4	4-5
Vitaminas		
A (µg/100g)	50	-
C 1 (µg/100g)	25	-
Minerais		
Cálcio (mg/100g)	50	7
Ferro (mg/100g)	0,9	14,9
Fósforo (mg/100g)	40	210

Fonte: Adaptado de Folegatti e Matsuura (ano); Viana et al. (2023).

Apesar do potencial apresentado para a produção de bioetanol, a mandioca permanece pouco inserida nos debates públicos sobre biocombustíveis, não sendo contemplada de forma significativa nos orçamentos das instituições públicas agrícolas, nas linhas de financiamento e nas prioridades da pesquisa científica.

Ao se considerar a produção de etanol a partir da polpa de mandioca, torna-se indispensável avaliar as condições edafoclimáticas destinado ao cultivo. Estudos recentes demonstram que a qualidade do solo exerce influência direta sobre o desenvolvimento da planta, a produtividade agrícola e o aproveitamento industrial da matéria-prima. Nesse contexto, estudos atuais avaliam a resposta da mandioca à inoculantes biológicos quanto aos aspectos biométricos, produtivos e seu potencial para geração de etanol.

De acordo com Queirós (2025), através da interação dos fatores como inoculantes biológicos, há efeito altamente significativo para estimativa de produção de etanol (EPE), significativo para massa total de raiz por planta (MTRP), massa de raiz comercial por planta (MRCP), teor de matéria seca na raiz (TMSR), teor de amido na raiz (TAR) e produtividade de raiz (PR). Além da melhor interação com o material genético de mandioca, o maior acúmulo de massa nas raízes, quando na presença das bactérias promotoras de crescimento, está na capacidade destes organismos em estimular o crescimento das plantas, através da fixação biológica de nitrogênio. Apesar da resposta diferenciada das cultivares de mandioca nos parâmetros biométricos no crescimento das plantas, a autora afirma ser necessário que mais experimentos sejam desenvolvidos nessa área.

2.2 Mandioca como matéria-prima para processo de produção de etanol

Devido ao elevado teor de carboidratos presente na mandioca, essa matéria-prima apresenta alto potencial para aplicação na produção de bioetanol. No Brasil, o etanol derivado da mandioca já foi produzido em períodos de instabilidade energética, especialmente entre 1932 e 1945, durante o colapso da economia mundial da década de 1930 e a Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, na década de 1970, foram implantadas usinas de álcool à base de mandioca em regiões sem tradição no cultivo dessa cultura, o que resultou em baixo desempenho produtivo. Em razão disso, a cana-de-açúcar consolidou-se como a principal matéria-prima utilizada na produção de etanol no país (Aquarone *et al.*, 2001). Para Santana (2007), a raiz de mandioca, não concorre com igualdade no processo de biocombustível etanol, devido à sua baixa produtividade, pouco mais de 13t/ha ano e necessitar de transformação dos amidos para açúcares fermentescíveis. A cana-de-açúcar tem sua superioridade em decorrência da quantidade de açúcar e biocombustível produzidos em um hectare de área cultivada por unidade de tempo e, além disso, os açúcares fermentáveis são diretamente metabolizados pela levedura alcoólica, ao contrário da raiz de mandioca que necessita de hidrólise prévia para obtenção do mosto.

Salla (2010) comenta que no Brasil, a produção de bioetanol, a partir de raiz de mandioca,

gera discussão e comparação com a planta de cana-de-açúcar que sempre foi referência de matéria-prima, concorrendo com vantagens econômicas significativas. No entanto, a raiz de mandioca destaca-se com vantagens em relação à planta de cana-de-açúcar e ao milho, quando a análise for da capacidade energética das operações de cultivo, do processamento e das repercussões no agroecossistema.

Segundo Ostrowski *et al.* (2006), a produção de bioetanol a partir da mandioca não difere significativamente da produção obtida de cereais, seguindo processo industrial semelhante. As principais etapas da produção de álcool industrial por meio da hidrólise compreendem: a mandioca é recebida e estruturada para o processamento, incluindo operações como limpeza, descascamento e moagem (Paes, 2006).

Na sequência, serão abordadas as principais etapas envolvidas no processo de produção de bioetanol.

2.2.1 Hidrólise

A hidrólise química é quebra de uma molécula de um polímero (amido, hemicelulose, celulose, sacarose, proteína, éster, entre outras) pela ação da água, geralmente com catalizador ácido, básico ou enzimático. Em particular, a ação de hidrólise específica sobre amido, cujos produtos finais da enzima são “sacarídeos” ou açúcares simples, que pode ser denominada de sacarificação. Tal processo, refere-se ao aquecimento do amido na água, que torna os grânulos suscetíveis à ação das enzimas na etapa de sacarificação, gerando uma pasta viscosa. Em processamentos industriais o cozimento é feito com vapor, sob pressão e em processo contínuo. Quanto menor quantidade de água utilizada, menor será o gasto energético para o cozimento. É necessário que todos os grânulos sejam gelatinizados, o que demanda certa quantidade de tempo de aquecimento, geralmente entre 30 minutos e 60 minutos, mantendo uma fervura leve, em pressão atmosférica. O aumento da pressão do processo de gelatinização diminui o tempo e eleva a temperatura do processamento (Paes, 2006). O subitem 2.7, Hidrólise enzimática e ácida, apresenta as reações detalhadas deste processo.

2.2.2 Sacarificação

Ocorre a hidrólise do amido, produzindo um mosto ou vinho, que é uma solução rica em açúcar. Esta etapa é realizada através da adição de ácidos ou pela ação de enzimas. Na hidrólise ácida, a adição de ácido concentrado, geralmente ácido clorídrico (HCl), promove a degradação do amido em compostos de menor massa molecular, com a elevação da temperatura que aumenta a velocidade da reação. O ácido deve ser adicionado, com concentração em torno de 50% de massa

seca, na proporção de 0,1 a 0,2% sobre o peso seco ao gel do amido, e logo após é submetido à ação do calor. Quanto à hidrólise enzimática é feita pelo emprego de preparados enzimáticos, produzidos previamente em culturas puras. As enzimas alfa-amilase e beta-amilase, quando utilizadas conjuntamente, quebram as moléculas convertendo quase 85% em maltose e dextrina. A enzima glucoamilase converte a maltose, dextrina e o amido restante em glicose, podendo chegar a 100% de rendimento. No processo de sacarificação da mandioca, a hidrólise ácida é mais utilizada que a enzimática, porém, podem ocorrer problemas como a corrosão dos equipamentos e a necessidade de neutralização da solução açucarada, o que pode provocar a destruição de moléculas de açúcar (Fonseca, 2021).

2.2.3 Fermentação

A levedura é a *Saccharomyces cerevisiae* Hansen, que é a mesma empregada na produção de álcool de cana-de-açúcar, transformam o açúcar proveniente da hidrólise do amido da mandioca em álcool, liberando gás carbônico. Para iniciar a fermentação, é necessário misturar o inóculo de leveduras à solução açucarada, mantendo as condições adequadas para o desenvolvimento dos microrganismos e produção do etanol. A temperatura, o pH, a disponibilidade de nutrientes e concentração da levedura são alguns itens que afetam o rendimento da fermentação e devem ser ajustados para que não haja desequilíbrio e pouca conversão em etanol no processo. A temperatura ideal para a etapa de fermentação se situa entre 26 °C e 32 °C. O pH deve ser baixo para inibir a ação de bactérias e deve estar entre 4,0 e 4,5. A concentração do mosto deve estar entre 12% e 14%, para não coibir a ação da própria levedura no decorrer da fermentação (Ribeiro, 2023). O subitem 2.8, Fermentação alcoólica, apresenta as reações detalhadas deste processo.

2.2.4 Destilação

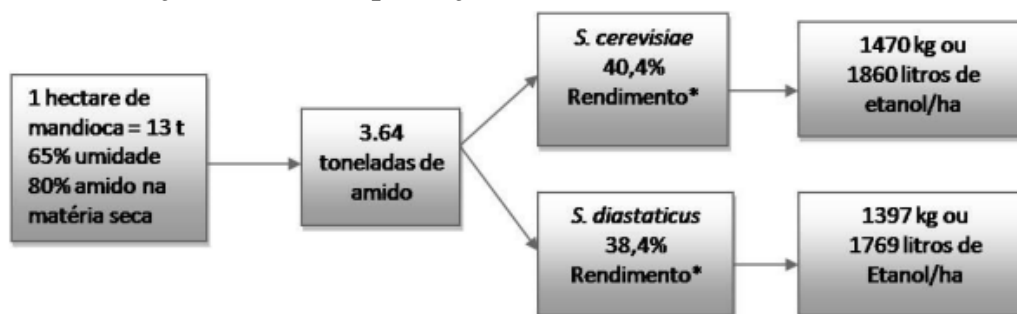
Consiste na separação dos componentes presentes no mosto fermentado, como água, substâncias não fermentadas e resíduos, por meio da ebulição da mistura. Os vapores gerados nas respectivas temperaturas de ebulição são posteriormente resfriados até sua condensação. O etanol apresenta temperatura de ebulição de 78,4 °C, enquanto a água entra em ebulição a 100 °C ao nível do mar. Quanto mais próxima a temperatura de ebulição da mistura fermentada estiver da temperatura de ebulição do etanol, maior será o grau de pureza do álcool obtido (Ostrowski *et al.*, 2006).

2.2.5 Purificação

Ao final do processo, o álcool obtido ainda contém pequena quantidade de água, sendo denominado álcool hidratado. Esse álcool pode ser submetido à etapa de desidratação, visando à obtenção de etanol anidro (Santana, 2007).

Em seu estudo, foi realizado o balanço de massa do processo de produção de álcool a partir da mandioca baseado na produtividade média brasileira de 13 t/ha, nos dados de composição da raiz de mandioca e nos rendimentos médios de etanol obtidos para as leveduras *Saccharomyces Cerevisiae* (40,4%) e *Saccharomyces diastaticus* (38,4%), permitindo o estabelecimento do balanço de massa.

Figura 1: Balanço de massa da produção de álcool de mandioca



Fonte: Adaptado de Santana, 2007, p. 94.

2.3 Diferenças da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, do milho e da mandioca

A mandioca apresenta algumas vantagens para a produção do etanol em comparação com o milho: maior teor de amido, maior quantidade de biomassa por hectare cultivado e custos de produção menor. Sua produtividade depende da variedade e das condições climáticas (Dias, 2012). Outra vantagem refere-se à tolerância à seca, característica que confere à mandioca maior adaptação a regiões com escassez hídrica. Quanto à hidrólise, o processo pode apresentar maior ou menor facilidade em comparação ao milho (COPERSUCAR, 2017; Delgado *et al.*, 2019).

Segundo Santana (2007), a mandioca apresenta maior rendimento de bioetanol por tonelada processada quando comparada à cana-de-açúcar. Conforme os dados apresentados na Figura 1, estima-se a obtenção de aproximadamente 143 litros de bioetanol por tonelada de matéria-prima e 511 litros por tonelada de amido. A raiz de mandioca apresenta um teor médio de umidade de 60%, o bagaço de cana-de-açúcar de 5% e o milho de 13%. Os rendimentos seriam bem mais próximos, se os valores fossem expressos em base seca, caracterizando uma maior concorrência tecnológica da raiz de mandioca em relação às demais fontes referidas

A necessidade de transformação do amido da mandioca em açúcar eleva os custos da produção, principalmente os gastos com insumos utilizados no processo. Muitos estudos têm sido aperfeiçoados visando desenvolver métodos para reduzir o consumo de enzimas amilolíticas necessárias no processo, otimizando melhor custo-benefício para a processo de produção de álcool (Santana, 2007).

Outro ponto importante a ser considerado é a análise das energias consumidas durante o processo de produção e de processamento industrial da mandioca, da cana-de-açúcar e do milho, bem como as energias obtidas na forma de etanol. Os resultados de viabilidade das investigações apresentadas por Salla & Cabello (2010), mostraram que a cultura da mandioca consome menos energia no processo de obtenção de etanol. Os dados relativos ao consumo energético das operações industriais dispendido durante o processamento das raízes de mandioca foram obtidos através das especificações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos (motores elétricos, bombas, cevadeiras etc.), O dispêndio energético nas etapas industriais foi relativo ao consumo dos motores elétricos e do vapor fornecido pelas caldeiras. Os valores encontrados foram convertidos em megajoule e são proporcionais ao processamento de uma tonelada de mandioca e a obtenção de 187,8 litros de etanol; uma tonelada de cana-de-açúcar e a obtenção de 84,7 litros de etanol; e uma tonelada de grãos de milho e a obtenção de 330 litros de etano.

2.4 Biocombustíveis de segunda geração

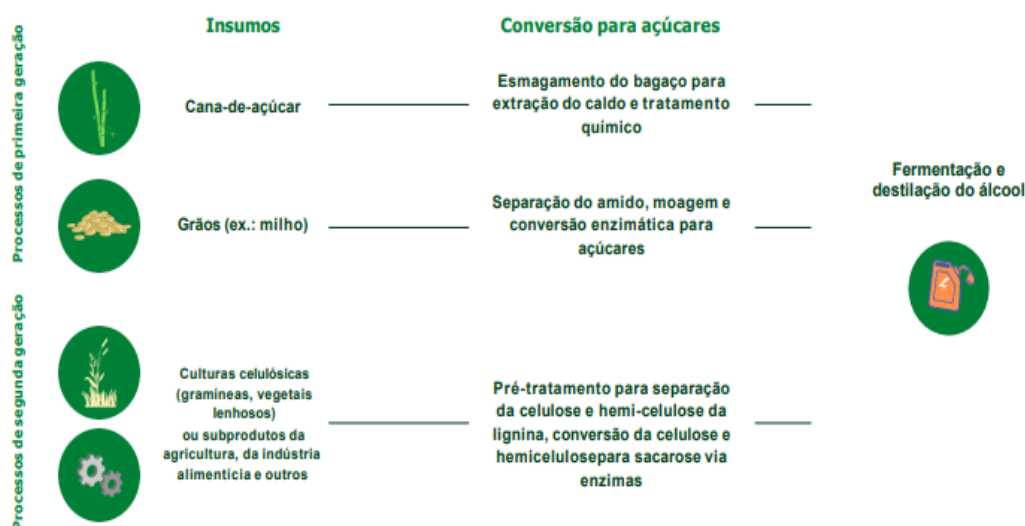
As razões para o interesse pelos biocombustíveis são muitas variando de um país para outro ao longo do tempo, tendo como principais fatores: diminuir a dependência externa de petróleo, por razões de segurança e suprimento ou impacto na balança de pagamentos, minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local, principalmente nas grandes cidades e controlar a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (Leite; Leal, 2007).

Diferentes tipos de biocombustíveis podem ser produzidos a partir das biomassas alternativas citadas neste documento, tais como bioetanol, diesel verde, hidrogênio e metano (CONAB, 2024).

Segundo o mesmo autor, todo o processo de produção mundial de biocombustíveis se baseia nas chamadas tecnologias de primeira geração, a partir de açúcares ou amidos (cana, beterraba, milho, trigo, raiz de mandioca). Estão em desenvolvimento várias tecnologias que utilizam os materiais lignocelulósicos como matérias-primas (resíduos agroflorestais, madeira de florestas plantadas, culturas energéticas de curto ciclo, lixo urbano), que são mais baratos mais abundantes e podem ser produzidos nas mais variadas condições de solo e clima.

A principal vantagem do processo de bioetanol de segunda geração em relação aos de primeira é o uso de matérias-primas não comestíveis, não concorrendo com o setor alimentício. Esse processo pode ser criado especificamente para fins energéticos, permitindo maior produção por área cultivada, além de uma quantidade significativa de material vegetal que poderá ser convertida para produzir biocombustíveis, contribuindo para o aumento da eficiência do uso da terra em comparação com os biocombustíveis de primeira geração (Nigam; Singh, 2011).

Figura 2: Processos de primeira e segunda geração: etanol combustível



Fonte: adaptado de EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2026.

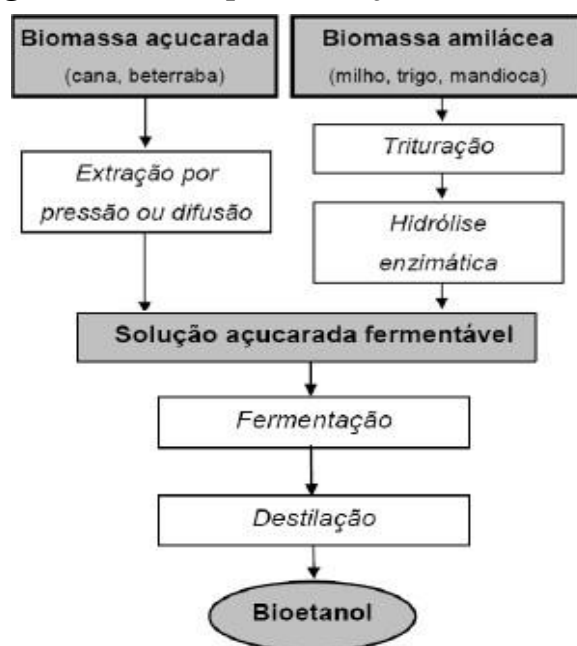
2.5 Biocombustível: etanol

Biocombustível etanol é incolor, volátil, inflamável e totalmente solúvel em água quando produzido por meio da fermentação da sacarose. Comercialmente, é conhecido como álcool etílico e sua fórmula molecular é C_2H_5OH ou C_2H_6O . No contexto atual, esse produto é amplamente utilizado em diferentes aplicações no mercado, largamente utilizado como combustível automotivo na forma hidratada ou misturado à gasolina, empregado na composição de perfumes, desodorantes, medicamentos, produtos de limpeza doméstica e bebidas alcoólicas. Merece destaque como uma das principais fontes energéticas do Brasil, além de ser renovável e pouco poluente (Ordóñez; Cabello, 2009).

O processo de obtenção de biocombustível etanol de segunda geração, também conhecido como biocombustível etanol celulósico, advém da utilização do material lignocelulósico encontrado nas plantas e antes não aproveitado para este fim. Este material pode ser dividido em dois grandes

componentes: polímeros de carboidratos, como a celulose e a hemicelulose, e a lignina, proveniente da parede celular das plantas. Simplificadamente o processo consiste em “quebrar” o material celulósico da planta (que pode ser feito de forma química ou enzimática) obtendo-se a celulose. No processo obtém-se a sacarose que tem como um dos destinos o processo de produção de biocombustível etanol (Souza, 2013). Segundo Camili (2010), esse processo é efetuado em bases comerciais por duas rotas tecnológicas, utilizando matérias-primas doces, diretamente fermentáveis, como a planta de cana-de-açúcar e a beterraba açucareira, ou matérias-primas amiláceas, como o milho, o trigo e a raiz de mandioca, cujo amido deve ser convertido em açúcares (sacarificado) antes da fermentação, como esquematizado na figura 03.

Figura 3: Fluxograma das rotas para obtenção de etanol



Fonte: Adaptado de Camili, 2010.

2.6 Diferenças estruturais e aplicações dos açúcares em processos industriais

Para Gonçalves *et al.* (2007), devido ao fato de a raiz da mandioca apresentar elevada produção de açúcares fermentescíveis em razão do seu alto teor de amido, o processo de produção de álcool carburante apresenta potencial para viabilizar o retorno do investimento realizado sendo possível substituir a cana-de-açúcar.

Dentre as matérias açucaradas costuma-se distinguir as diretamente fermentescíveis das não diretamente fermentescíveis. As primeiras são as que contêm monossacarídeos e se limitam aos

sucos de frutas. Sua importância reside na produção do álcool em bebidas como o vinho e cidra. As não diretamente, são as que contém dissacarídeos, que fermentam após uma hidrólise, a qual se dá o nome de inversão, e que se realiza naturalmente por ação da invertase, enzima produzida pela agente da fermentação. A sacarose é a representante mais importante dos componentes da cana de açúcar e os melaços (Aquarone *et al*, 2001).

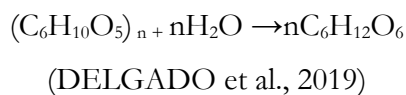
O farelo de raiz de mandioca é um resíduo sólido da extração de amido e que ainda contém alto teor desse composto (60 a 70% em peso seco). Em média uma agroindústria de processo de produção de fécula gera cerca de 930 kg de farelo com aproximadamente 88 a 90% de umidade para cada 1000 kg de raiz processada apresentando uma concentração de amido residual que pode variar de 55,8 a 78,1. A recuperação do amido residual por tratamento físico ou biológico é o que tem sido objeto de estudo científico visando à melhoria dos processos, com o objetivo de agregar valor à matéria prima consumida kg (Saito *et al.*, 2006).

2.7 Hidrólise por vias enzimática e ácida

Os amidos podem ser hidrolisados por vias físico-químicas (ácidos) ou enzimáticas (Camili, 2010; Delgado *et al.*, 2019).

As enzimas são biomoléculas de elevada complexidade estrutural, o que dificulta seu processo de cristalização. Com algumas exceções, são solúveis em água e em álcool diluído, e quando em soluções são precipitados pela adição de sulfato de amônio, álcoois ou ácido tricloroacético. São inativas pelo calor e esta, talvez, seja a característica mais importante destes compostos em relação a tecnologia de alimentos. A hidrólise enzimática consiste em uma reação química mediada por enzimas, em meio aquoso, para a quebra de uma molécula em frações menores. No caso do amido, a hidrólise enzimática é empregada para a processo de produção de xarope de glucose, maltose e outros açúcares de pesos moleculares variados (Almeida, 2009).

A equação geral para a sacarificação do amido pode ser representada da seguinte forma:



Já a hidrólise ácida apresenta algumas desvantagens, tais como elevado consumo de energia, baixo rendimento e seletividade e pouca flexibilidade operacional. Em função disso, os processos enzimáticos assumiram maior importância, pois, conseguiram eliminar quase que totalmente essas desvantagens (Ruiz *et al.*, 2011). A hidrólise se dá pelo desdobramento total das moléculas de

amilose e amilopectina, que ao se romperem se transformam em dextrinas cada vez mais simples e finalmente em glicose. O amido não tem sabor, mas os produtos de uma hidrólise intensa possuem sabores adocicados (Camili, 2010). A enzima glucoamilase hidrolisa o amido cru de milho e de mandioca, com alta eficiência de conversão para etanol (Qiu *et al.*, 2016).

Conforme relatado na literatura Wang *et al.*, (2022); Rabelo (2010), para a conversão do material lignocelulósico em outros produtos há a necessidade de realização de quatro etapas (Sun *et al.*, 2022): Inicia-se com a processo de produção (e posteriormente utilização no processo de hidrólise enzimática) de enzimas a partir de microrganismos como fungos e bactérias, representando cerca de 50% do custo global do processo de obtenção de açúcares. Para um resultado satisfatório na conversão em biocombustível etanol, há a necessidade de pré-tratamento (quebra do material lignocelulósico) onde ocorre a deslignificação e a despolimerização de modo a aumentar a exposição das fibras de celulose, facilitando a ação de agentes hidrolíticos enzimáticos ou ácidos. Este processo converte a celulose e a hemicelulose em açúcares menos complexos passíveis de fermentação, geralmente catalisado através de enzimas celulósicas. Finaliza-se com um processo de fermentação da mistura de açúcares.

O processo da fermentação da glicose já é estabelecido pela indústria com a utilização do fungo *Saccharomyces cerevisiae*, que através da sua utilização intensiva em fermentação industrial, passou por um processo de seleção natural, apresentando melhores desempenhos em conversão de glicose a biocombustível etanol, produtividade e tolerância alcoólica. A fermentação das pentoses e hexoses não está estabelecida como o procedimento anterior.

As enzimas amilolíticas são catalisadoras da hidrólise de ligações dos tipos α -1,4 e α -1,6, encontradas nos polissacarídeos, recebendo a denominação de amilases. Estas enzimas oriundas de plantas, bactérias, fungos e animais e recebem classificação como α -amilases, β -amilases, amiloglicosidases e isoenzimas. Cada uma dessas enzimas possui um mecanismo diferenciado de catálise, o que resulta em produtos diferentes a partir da hidrólise enzimática do amido. As α -amilases, por exemplo, são endo-glicosidases que atuam em regiões internas do polissacarídeo afastadas da extremidade redutora, produzindo inúmeros tipos de oligossacarídeos (Camili, 2010). A otimização do processo e o aproveitamento da casca da mandioca, apresentando eficiências de hidrólise de 96,7 g/L em meio ácido e enzimático com *A. niger* de 98,9 g/L de açúcares redutores. Atingindo um rendimento de até 54,8% de rendimento em etanol por polpa tratada (Efeovbokhan *et al.*, 2019).

2.8 Fermentação alcoólica

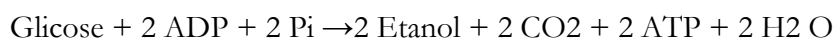
A fermentação alcoólica ocorre no interior de microrganismos capazes de converter açúcares assimiláveis (substrato oxidado) em biocombustível etanol (substrato reduzido), por meio de uma série de reações bioquímicas, reguladas enzimaticamente. A oxidação parcial do substrato, gerando um composto orgânico reduzido, garante um mínimo de processo de produção de energia para manutenção celular e o equilíbrio oxidativo (Cinelli, 2012).

O processo de produção mundial de biocombustível etanol está em torno de 75 milhões de litros por ano, e a maior parte deste total (cerca de 95%) é produzida pela fermentação de determinados açúcares (Basso, 2011).

A espécie mais importante de levedura alcoólica é *Saccharomyces cerevisiae*, que possui um largo espectro de utilização (Gonçalves *et al.*, 2023). É empregada na produção de pães, bebidas, biocombustível etanol, etc. Sua biomassa pode ser recuperada como subproduto de fermentação e transformada em levedura seca, que se constitui em matéria-prima para fabricação de ração animal ou suplemente vitamínico (Venturini Filho e Mendes, 2003). As leveduras e outros microrganismos fermentam a glicose em biocombustível etanol e CO₂ e não em lactato. A glicose é convertida em piruvato pela glicólise que é convertido em biocombustível etanol e CO₂ em um processo de dois passos.

No primeiro, o piruvato sofre a descarboxilação em uma reação irreversível catalisada pela enzima piruvato descarboxilação simples não envolvendo oxidação do piruvato. No segundo passo, através da ação álcool desidrogenase, o acetaldeído é reduzido a biocombustível etanol, com a NADH, fornecendo poder redutor. Em síntese, enzimas chaves no processo fermentativo seriam: Gliceraldeído – 3-P, desidrogenase, piruvato quinase e descarboxilase e o álcool desidrogenase (Martins *et al.*, 2025).

A equação geral da fermentação alcoólica é:



As leveduras são consideradas anaeróbios facultativos, ou seja, são capazes de crescer na presença ou ausência de oxigênio, que podem ser associados como variação em biofilme (Cinelli, 2012; Martins *et al.*, 2025; Borovikova *et al.*, 2023).

2.9 Comparativo etanol de mandioca / cana de açúcar / milho

2.9.1 Vantagens da Mandioca:

- Flexibilidade de Cultivo: pode ser cultivada em diferentes tipos de solo e clima.

- Pode ser armazenada no solo por longos períodos, permitindo a colheita durante todo o ano, não havendo entressafras.
- O custo de produção é relativamente baixo, especialmente em comparação com a cana-de-açúcar.
- Menor impacto ambiental: pode ser produzida de forma mais sustentável, com menor uso de agrotóxicos e fertilizantes. (UDOP, 2024).
- O investimento necessário para implementar uma usina de etanol a partir da mandioca é menor do que o necessário para uma usina de cana-de-açúcar. (SENAR, 2016).
- A raiz de mandioca apresenta possibilidade de os resíduos industriais serem utilizados como defensivos agrícolas, adubo, ração animal e no processo de produção de compostos químicos como o ácido cítrico (Venturini Filho e Mendes, 2003).
- Possibilidade de ser processadas em usinas de pequeno porte, cultivadas em comunidades afastadas, por mini, pequenos, médios e grandes produtores, o que a torna ideal para atender a demandas locais reduzindo custo (Cabello, 2005; Gonçalves, 2023).

2.9.2 Desvantagens:

- Menor produtividade: pode afetar a eficiência da produção de etanol.
- Custo de Processamento: para produzir etanol é mais complexo e caro do que o da cana-de-açúcar, devido à necessidade de hidrólise.

Segundo Venturini filho e Mendes (2003), há a supremacia da cana-de-açúcar como matéria-prima para a processo de produção de biocombustível etanol, pois a quantidade de açúcar e, conseqüentemente, de álcool, produzidos pela planta de cana-de-açúcar a partir de uma unidade de área cultivada (ha) por unidade de tempo (ano) é bastante superior aos produzidos pela raiz de mandioca. A tabela 02 apresenta a comparação entre o álcool de raiz de mandioca e planta de cana-de-açúcar em diferentes aspectos.

No entanto, de acordo com Cabello (2005), a baixa produtividade agrícola da raiz de mandioca, deve-se à falta de investimento em estudo científicos de variedades voltadas à industrialização. Segundo o mesmo autor, há muito espaço a ser conquistado em termos de produtividade agrônômica nessa cultura, enquanto que para planta de cana-de-açúcar, que há anos vem desenvolvendo o seu potencial agrônômico, os incrementos em produtividade são menores e a maiores custos.

Somam-se ainda às vantagens já discutidas, segundo Fadel (2006), o investimento necessário para implementar uma usina de álcool a partir da mandioca quando comparado ao processo de biocombustível etanol a partir de planta de cana-de-açúcar com capacidade de moagem anual de 1 milhão de toneladas de cana é de R\$ 130 milhões a R\$ 140 milhões, incluindo o parque industrial e o investimento agrícola.

A moagem ocorre em um período de seis a sete meses por ano, com processo de produção estimada de 85 milhões de litros de álcool, sendo necessária a área agrícola de cerca de 13 mil hectares de terra, considerando-se produtividade, média, de 77 toneladas por hectare. Enquanto o custo de usina de álcool de mandioca com capacidade de moagem anual de 300 mil toneladas de raiz de mandioca é de R\$ 25 milhões, incluindo-se neste valor o parque industrial, de, aproximadamente, R\$ 20 milhões, e mais R\$ 5 milhões do plantio, no sistema de parceria com contrato, plantando-se variedades adequadas para serem colhidas em épocas diferentes do ano (Fadel, 2006). A tabela a seguir, apresenta esses dados como estimativa de viabilidade, cenário teórico e potencial produtivo.

Tabela 2: Comparação técnico-econômica entre cana-de-açúcar e mandioca

Parâmetro	Cana-de-açúcar	Mandioca
Investimento (R\$ milhões)	130–140	25
Produção de etanol (milhões L/ano)	85	300
Área agrícola necessária	13.000 há	Menor escala (dependente de modelo produtivo)
Período de moagem	6–7 meses/ano	Flexível ao longo do ano

Fonte: Adaptado de FADEL (2006).

Com o valor do investimento de uma usina para moagem de um milhão de toneladas de cana por ano é possível se montar cinco usinas de raiz de mandioca, beneficiando mais de 1.100 produtores de raiz de mandioca e gerando benefícios para mais de 13 mil pessoas, com processo de produção de 300 milhões de litros de álcool (Fadel, 2006).

Como visto anteriormente, ao contrário da planta de cana-de-açúcar, que possui açúcares fermentescíveis, a raiz de mandioca acumula seus carboidratos na forma de grânulos insolúveis de amido, o que requer um pré-tratamento para disponibilizá-los para a fermentação por leveduras alcoólicas, sendo este à primeira vista, uma desvantagem no processo de produção de álcool apresentando elevados custos. No entanto, segundo Cabello (2005), como o amido apresenta

maiores concentrações de açúcares por unidade de matéria-prima vegetal, há a diminuição significativa de volumes mássicos com implicações diretas em investimentos, custeio do sistema, custos de logística, energia, mão de obra e remoção de resíduos. Outra vantagem é o fato de a exemplo dos cereais, essa raiz produzir um álcool com melhor qualidade, o que proporcionaria uma vantagem na sua entrada no mercado do álcool fino.

Segundo um estudo realizado por Bringham, L (2004), onde foi produzido álcool a partir de hidrolisados de resíduos amiláceos de farinha, aditivados com mel residuário da fabricação da cana de açúcar, foi observada a ausência de álcoois superiores, biocombustível etanol, glicerol, e ácidos orgânicos, além da ausência de aldeído fórmico nas baixas concentrações de aldeídos totais. Segundo a autora, estas especificações atendem aos rigorosos critérios de qualidade das indústrias alimentícia e farmacêutica. Em relação ao custo de processo de produção, o álcool da cana-de-açúcar é mais vantajoso. O preço do biocombustível etanol de raiz de mandioca é R\$ 0,437/L, enquanto o de planta de cana-de-açúcar, é R\$ 0,391/L. Além disso, outro fator que contribui fortemente para esse menor custo unitário do álcool é a geração de energia através da combustão do bagaço nas usinas que possuem esta matéria-prima como matriz.

2.10 Milho

O Brasil possui 359 usinas adequadas para produção e comercialização de etanol, sendo em maior número usinas de cana de açúcar, com capacidade produtiva total de 387.428 m³/dia. Porém o etanol detém de algumas vantagens sobre a cana de açúcar, especialmente pelo fato de que o milho pode ser armazenado e estocado, mesmo após longos períodos de colheita, e principalmente por poder ser produzido nas entressafras da cana de açúcar (Nova C., 2022). Conforme pode ser observado na tabela 3.

Outra vantagem se dá pelo processo industrial do etanol de milho, que é considerado mais fácil de ser produzido e exige menos demanda comparado com o processo de cana de açúcar. Não depende de mão de obra qualificada e pode ser produzido por processos automatizados. Diferentemente da cana de açúcar que exige especialização e exige uma quantidade maior de funcionários durante o processo produtivo. Mediante a isso tudo é previsto que a maior parte das usinas de cana de açúcar se adaptem, principalmente nas regiões aonde o milho é matéria prima de grande fartura e com preços acessíveis (NOVA CANA, 2022).

Tabela 3: Comparativo etanol de mandioca / cana de açúcar / milho

Componente	Cana de açúcar	Mandioca	Milho
Produtividade agrícola (t/ha. Ano)	80,0	30,0	12
Açúcares totais (%)	14,5	35,0	72
Produtividade em açúcar (t/ha.ano)	11,6	10,5	6,0
Conversão teórica (m ³ /t açúcares)	0,681	0,718	0,58
Produtividade do etanol (m ³ /ha.ano)	7,90	7,54	370
Preço CIF matéria-prima (R\$/t)	38,70	110,00	15
Custo unitário etanol (R\$/m ³)	391,90	437,66	1.049,80

Fonte: adaptado de Conab (2023).

A eficiência da hidrólise do amido de milho pode alcançar conversões próximas a 100%. O custo de produção do grão varia conforme a região e o produtor. Em 2014, a saca de milho de 60 kg custava cerca de R\$ 15,00, o que corresponde a aproximadamente R\$ 250,00 por tonelada. (Soares *et al.*, 2006). No final de maio de 2026 e no ano passado, uma saca de milho (60kg), variou de R\$ 42 a 54, na região Centro-Oeste.

O milho possui cerca de 72% de amido na matéria seca, que pode ser convertido em etanol. Em termos de rendimento, uma tonelada de milho pode produzir entre 370 e 460 litros de etanol hidratado. Considerando um valor médio de 400 L/ton e uma produtividade agrícola de 5 t/há, valor considerado baixo para o Brasil obtém-se cerca de 2.000 L/ha, ou seja, 2 m³/ha. Com duas safras por ano, essa produtividade chega a aproximadamente 4 m³/ha/ano. No caso da cana-de-açúcar, uma tonelada é capaz de produzir entre 70 e 85 litros de etanol hidratado. Considerando uma média de 80 L/ton e produtividade agrícola de 70 t/ha, o resultado é de cerca de 5.600 L/ha ou 5,6 m³/ha/ano, considerando uma safra anual com duração de 10 a 12 meses. Em relação aos custos, o preço CIF da matéria-prima em 2014 para o milho era de aproximadamente R\$ 250,00/ton. O custo de produção do etanol de milho também variava conforme o produtor e a escala de operação, sendo estimado em cerca de R\$ 1.049,80/m³ nesse período (NOVACANA, 2022).

O custo de produção do grão varia conforme a região e o produtor. Em 2014, a saca de milho de 60 kg custava cerca de R\$ 15,00, correspondente à R\$ 250,00 por tonelada. (Soares *et al.*, 2006).

O milho possui cerca de 72% de amido na matéria seca, que pode ser convertido em etanol. Em termos de rendimento, uma tonelada de milho pode produzir entre 370 e 460 litros de etanol

hidratado. Considerando um valor médio de 400 L/ton e uma produtividade agrícola de 5 t/há, valor considerado baixo para o Brasil obtém-se cerca de 2.000 L/ha, ou seja, 2 m³/ha. Com duas safras por ano, essa produtividade chega a aproximadamente 4 m³/ha/ano. No caso da cana-de-açúcar, uma tonelada é capaz de produzir entre 70 e 85 litros de etanol hidratado. Considerando uma média de 80 L/ton e produtividade agrícola de 70 t/ha, o resultado é de cerca de 5.600 L/ha ou 5,6 m³/ha/ano, considerando uma safra anual com duração de 10 a 12 meses. Em relação aos custos, o preço CIF da matéria-prima em 2014 para o milho era de aproximadamente R\$ 250,00/ton. O custo de produção do etanol de milho também variava conforme o produtor e a escala de operação, sendo estimado em cerca de R\$ 1.049,80/m³ nesse período. A tabela 4 apresenta valores estimados médios e variáveis por região (Soares *et al.*, 2006).

Quanto ao balanço energético, tanto o etanol de milho quanto o de cana apresentam resultado positivo. Entretanto, o etanol de cana-de-açúcar tende a ser mais vantajoso, pois a própria usina pode gerar energia através da queima do bagaço, reduzindo gastos e emissão de carbono.

Tabela 4: Comparação entre milho e cana-de-açúcar para produção de etanol

Parâmetro	Milho	Cana-de-açúcar
Teor de amido / açúcar	72% de amido (base seca)	Alta concentração de sacarose
Rendimento de etanol (por tonelada)	370–460 L (média: 400 L)	70–85 L (média: 80 L)
Produtividade agrícola	5 t/ha	70 t/ha
Produção por hectare	2.000 L/ha (2 m ³ /ha)	5.600 L/ha (5,6 m ³ /ha)
Produção anual (2 safras vs 1 safra)	4 m ³ /ha/ano	5,6 m ³ /ha/ano
Custo da matéria-prima (2014)	R\$ 250,00/ton	Variável (não informado no texto)
Custo de produção do etanol	R\$ 1.049,80/m ³	Menor que milho (dependente de escala)

Fonte: adaptado de Soares *et al.* (2006).

Segundo Nastari (2021), a crescente produção do etanol de milho tem sido significativa e nos últimos cinco anos, entre as safras 2015/16 e 2020/21, a produção de etanol de milho cresceu de 141,30 milhões para 2,75 bilhões de litros. Projetos de novas plantas de etanol de milho em construção e em planejamento devem levar essa produção a 8,00 bilhões de litros até a safra 2027/28.

Essa previsão acerca do crescimento da produção de etanol à base de milho mostrou-se correta, conforme indicam os dados mais recentes divulgados pela CONAB (2026), apresentados a seguir:

A temporada 2025/26 foi finalizada no mês de março de 2026 e, com seu encerramento, confirmou-se leve incremento na produção nacional de etanol em comparação com a safra 2024/25. A produção de etanol, derivado do milho, apresentou expressivo crescimento e ajudou na performance final do biocombustível em âmbito nacional, mesmo em um ano de baixa na produção de cana-de-açúcar, que é disparadamente a maior matéria-prima utilizada na indústria sucroenergética. Ao todo, foram produzidos no país 37,5 bilhões de litros de etanol na atual safra, representando um acréscimo de 0,8% em relação ao volume total obtido em 2024/25 (CONAB, 2026).

2.11 Potencial importância social do álcool de raiz de mandioca

Na década de 80, alguns autores defenderam a processo de produção de biocombustível etanol de raiz de mandioca em regiões onde as condições de solo são impróprias para o cultivo da planta de cana-de-açúcar e apropriadas para essa raiz, que é pouco exigente em fertilidade, e em regiões de baixa densidade demográfica e de baixa renda per capita como forma de melhorar a distribuição de renda no Brasil (Venturini Filho e Mendes, 2003).

Enquanto a planta de cana-de-açúcar desenvolveu-se como um sistema de processo de produção de grande escala centralizada e concentradora de renda, a raiz de mandioca para a processo de produção de biocombustível etanol pode basear-se em um modelo de grande escala descentralizada e distribuidora de renda. Esse modelo estaria fundamentado em milhões de pequenas propriedades agrícolas extremamente eficientes e distribuidoras de novas oportunidades de trabalho pelas regiões interioranas de municípios de pequenas cidades do Brasil (Cardoso, Denis e Alves, 2008).

O aumento do cultivo da mandioca, objetivando a obtenção de biocombustível etanol, geraria centenas de empregos diretos e indiretos tanto na região agrícola quanto na área industrial. Além disso, as usinas propiciariam aumento na arrecadação de impostos de municípios que possuem vocação agrícola para o cultivo de raiz de mandioca. Além do benefício social, a produção de álcool de raiz da mandioca reduziria o preço deste combustível em regiões distantes dos centros produtores de biocombustível etanol como, por exemplo, a região Amazônica onde o álcool é comercializado por um valor muito superior ao praticado no Sudeste do país. Outro ponto extremamente positivo é possibilitar a geração de energia elétrica, utilizando o álcool hidratado para acionar motores geradores, em comunidades isoladas (Corradini, Elisângela *et al.* 2005; Delgado *et al.*, 2019).

3 METODOLOGIA

O presente estudo possui caráter exploratório de natureza bibliográfica e seu objetivo foi reunir, analisar e interpretar informações provenientes de fontes secundárias, tais como artigos científicos, livros e periódicos especializados. Conforme, relacionados ao potencial da raiz de mandioca e milho como matéria-prima para a processo de produção de biocombustível etanol em comparação ao etanol oriundo da cana de açúcar e sua relevância como matéria prima alternativa.

A metodologia utilizada para a revisão da literatura foi baseada no método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) Marcondes; Silva, 2020; Page *et al.*, 2020), o qual possibilita a realização de buscas sistemáticas de forma transparente, reproduzível e com redução de vieses. A revisão foi conduzida conforme as diretrizes do PRISMA, 2020. O protocolo foi registrado no OSF em 09/05/2026. A busca cobriu *Scopus*, *WoS*, *Scielo*, *PubMed* e CAPES de 2020-2025, usando termos combinados para mandioca, milho, etanol e hidrólise enzimática. Dois revisores independentes triaram 412 registros no Rayyan, com concordância Kappa 0,87. Incluíram-se 28 estudos com dados quantitativos de rendimento, custo ou emissão. A qualidade foi avaliada pelo JBI e os dados foram sintetizados de forma narrativa devido à heterogeneidade metodológica. Tal metodologia permitiu: transparência, reprodutibilidade, controle de viés.

Conforme Gil (2008), a pesquisa bibliográfica permite a construção de um referencial teórico consistente, fundamentado em conhecimentos já consolidados pela comunidade científica. A seleção dos materiais utilizados nesta pesquisa fundamentou-se na relevância, atualidade e pertinência dos conteúdos relacionados ao tema proposto. fontes consultadas foram obtidas, prioritariamente, em bases de dados acadêmicas, como *Scielo*, *Google Acadêmico* e Periódicos Capes, contemplando publicações entre os anos de 2001 e 2026, com ênfase aos dos últimos 6 anos. A análise do material coletado foi realizada por meio de leitura interpretativa e crítica, com o objetivo de identificar os principais pontos de convergência e divergência entre os autores no que diz respeito ao tema estudado.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A análise comparativa entre as matérias-primas estudadas — mandioca, milho e cana-de-açúcar — evidencia diferenças significativas quanto ao teor de amido, produtividade agrícola, custo de produção e rendimento em etanol. A mandioca, embora apresente menor produtividade por hectare em relação à cana-de-açúcar, destaca-se por possuir alto teor de amido (aproximadamente 30 a 35% em base úmida), o que favorece a conversão em açúcares fermentescíveis após a etapa

de hidrólise. Esse fator confere à raiz de mandioca um potencial competitivo na geração de bioetanol, especialmente em regiões onde o cultivo da cana e do milho é limitado por condições edafoclimáticas.

De acordo com Santana (2007), o rendimento médio obtido a partir da mandioca alcança cerca de 143 L de etanol por tonelada de raiz fresca e até 511 L por tonelada de amido, valores expressivos quando comparados aos obtidos com o milho, cuja produtividade gira em torno de 400 L por tonelada de grão, e com a cana-de-açúcar, que produz aproximadamente 85 L por tonelada de colmo. Entretanto, quando a análise é feita em base de área cultivada, a cana-de-açúcar mantém vantagem, devido à sua elevada produtividade agrícola anual (70 a 90 t/ha), contra cerca de 13–25 t/ha da mandioca.

Em relação à eficiência energética, a mandioca apresenta menor consumo energético para o processo de produção, menor consumo de insumos agrícolas e maior resistência ao estresse hídrico, reduzindo custos indiretos de cultivo e tornando-se uma alternativa viável para áreas semiáridas ou de baixa fertilidade. Essa adaptabilidade contribui para o desenvolvimento regional e a geração de renda, especialmente na agricultura familiar, onde a cultura da mandioca desempenha papel relevante. O custo das enzimas e o controle rigoroso das condições de processo (pH, temperatura e tempo de reação) ainda representam desafios econômicos. A introdução de tecnologias mais eficientes de sacarificação e o reaproveitamento de enzimas por imobilização podem reduzir significativamente esses custos (Camporezi; Dias, 2021),

A fermentação alcoólica, conduzida geralmente por leveduras do gênero *Saccharomyces*, apresenta desempenho semelhante para os mostos de milho e mandioca, com rendimentos próximos de 90% do teórico, desde que as condições operacionais sejam controladas. No entanto, o mosto proveniente da mandioca, por conter menor teor de proteínas e lipídios, tende a gerar menores quantidades de subprodutos indesejáveis, favorecendo a purificação posterior do etanol.

Sob a ótica econômica, os custos de implantação de uma unidade de produção de etanol a partir da mandioca são inferiores aos de uma usina de cana-de-açúcar, devido à menor necessidade de área e à flexibilidade de operação em menor escala (SENAR, 2016). Contudo, o custo unitário do etanol de mandioca ainda é ligeiramente superior, em função do gasto energético na etapa de cozimento e sacarificação. Mesmo assim, o balanço energético e ambiental é favorável, visto que o processo gera subprodutos reaproveitáveis, como o farelo e o bagaço, utilizados na alimentação

Do ponto de vista ambiental, o etanol derivado da mandioca apresenta vantagens consideráveis, por se tratar de um biocombustível renovável, com ciclo de carbono fechado e menor emissão de gases de efeito estufa. Estudos de balanço energético mostram que, para cada

unidade de energia fóssil consumida na produção, são geradas de 8 a 10 unidades de energia renovável sob a forma de etanol, reafirmando a viabilidade ambiental da rota amilácea (UDOP, 2024).

Em síntese, os resultados demonstram que na crescente alta por produção de bioetanol, embora a mandioca apresente limitações quanto à produtividade agrícola e ao custo de processamento, seu potencial técnico e ambiental é expressivo. A diversificação das matérias-primas utilizadas na produção de etanol, incluindo a mandioca, representa uma estratégia sustentável e necessária para ampliar a segurança energética, promover o desenvolvimento regional e reduzir os impactos ambientais da matriz energética brasileira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada evidencia que a Mandioca representa uma alternativa viável e estratégica como matéria-prima para a processo de produção de Etanol, especialmente em um cenário de crescente demanda por fontes renováveis e sustentáveis de energia. Embora a Cana-de-açúcar ainda se mantenha como principal referência na matriz energética brasileira, a raiz de mandioca apresenta vantagens que merecem destaque, como a adaptabilidade a diferentes condições climáticas e de solo, a possibilidade de colheita ao longo de todo o ano e a viabilidade de cultivo em pequenas propriedades, favorecendo a agricultura familiar.

Apesar de sua menor produtividade agrícola em comparação à planta de cana-de-açúcar, a raiz de mandioca demonstra maior rendimento de biocombustível etanol por tonelada de matéria-prima e potencial para geração de empregos e desenvolvimento socioeconômico em regiões menos industrializadas, sobretudo no Norte e Nordeste do país. A descentralização do processo de produção, associada a menores custos de implantação de usinas e à possibilidade de utilização dos resíduos industriais, reforça sua relevância estratégica no fortalecimento da matriz energética nacional.

Contudo, para que essa alternativa se torne competitiva, são necessários investimentos consistentes em estudo científico e desenvolvimento tecnológico, voltados à redução dos custos de processo de produção, especialmente no processo de hidrólise enzimática, e à melhoria das variedades cultivadas para fins industriais. A incorporação de inovações tecnológicas, o incentivo governamental e a inclusão da raiz de mandioca nas políticas públicas de biocombustíveis são passos essenciais para viabilizar sua inserção no mercado de biocombustível etanol.

Portanto, a diversificação das fontes de matéria-prima para processo de produção de biocombustível etanol, com destaque para a raiz de mandioca, constitui uma estratégia sustentável, capaz de contribuir para a segurança energética, reduzir impactos ambientais e promover o desenvolvimento regional, reforçando o compromisso do Brasil com uma matriz energética cada vez mais limpa e renovável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. R. DE. *Estudo do Bagaço de Mandioca, nativo e tratado com alfa amilase e amiloglucosidase, por meio de técnicas termoanalíticas*. 2009.

ALVES, A.M.M.R.; MARTINS, F.B.; REBOITA, M.S. Balanço Hídrico Climatológico para Itajubá- MG: Cenário atual e projeções climáticas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.26, p.712-732, 2020.

ANP - Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. *Etanol*, nov. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/search?SearchableText=etanol>. Acesso em 29 set. 2025.

AQUARONE, E. *et al. Biotecnologia: alimentos e bebidas produzidos por fermentação*. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

BASSO, T. O. *et al. Estratégias e perspectivas do uso de leveduras para a produção de etanol combustível*. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 2011.

BRINGHENTI, L. *Qualidade do Alcool Produzido a partir de Resíduos amiláceos da Agroindustrialização da Mandioca*. 2004.

CABELLO, C. Produção de álcool a partir da mandioca: viabilidade técnica e econômica. *Revista Brasileira de Agroindústria*, 2005.

CAMILI, J. *Produção de bioetanol: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

CAMPOREZI, J. D; DIAS, S. R. *Produção de etanol de milho via sacarificação e fermentação simultânea*. (Trabalho de conclusão de curso) 2021. Instituto Federal do Espírito Santo.

CARDOSO, Denis; ALVES, Vânia. Nova matriz energética mundial. *Gazeta Mercantil*. 2008. Disponível em: <http://www.gazetamercantil.com.br>. Acesso em: 24 de out. de 2025.

CARDOSO, Éria. *Uso de manipueira como biofertilizante no cultivo do milho: avaliação do efeito no solo, nas águas subterrâneas e na produtividade do milho*. Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2005. 49 páginas. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Criciúma, 2005.

Bioenergia em revista: diálogos. Ano/vol. 16, n. 1, jan./jun. 2026. p. 57-86.

Avaliação do processo de fermentação para produção de etanol a partir do amido da mandioca: análise de viabilidade técnica e comparativa com o etanol da cana-de-açúcar e milho

RAMOS, Rute da Costa; SILVA, Fabio Cesar da; SERRA, Erlane Santos; FERNANDES, Gabriela Dias

CASTIONI, Remi; SAITO, Élvio, DO VALLE, Carlos Alberto Santos. *O arranjo produtivo nacional da mandioca: Desafios e propostas de intervenção*. [s.d.]. Disponível em: <http://www.fe.unb.br>. Acesso em: 15 de out. de 2025.

CEREDA, Marney Pascoli. Caracterização dos resíduos da industrialização da mandioca. In: CEREDA, Marney Pascoli. *Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas Latino Americanas*. São Paulo, Fundação Cargill, v. 4, cap. 1, p. 13-37, 2001a.

CINELLI, B. A. *Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial*. p. 183, 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Com nova redução, estimativa para safra de grãos 2023/24 é de 306,4 milhões de toneladas, 03 nov. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5354-com-nova-reducao-estimativa-parasafra-de-graos-2023-24-e-de-306-4-milhoes-de-toneladas>. Acesso em 02 nov. 2025.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA 4º LEVANTAMENTO, pág. 42 | v. 13 – safra 2025/26, n. 4 – Quarto levantamento | abril 2026. Acesso em 28 maio de 2025.

COPERSUCAR – Cooperativa de Cana de Açúcar, Açúcar e Etanol. *Proálcool: o momento em que o Brasil começou a valorizar energias renováveis*, dez. 2017. Disponível em: <https://www.copersucar.com.br/noticias/proalcool-o-momento-em-que-o-brasil-comecouvalorizar-energias-renovaveis>. Acesso em 06 ago. 2025.

CORRADINI, Elisângela *et al.* *Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados da cana-de-açúcar e do milho*. Faculdade de Ciências Agrônômicas/ UNESP, Botucatu-SP, 168 p (tese de doutorado). 2008.

DELGADO, A. A; CESAR, A. A. M; A SILVA, F. C. da. *Elementos de Tecnologia e Engenharia da Produção do Açúcar Etanol e Energia*. Piracicaba-SP: FEALQ, p. 836, 2019.

DIAS, J. M. C. de Souza. Artigo: O uso do etanol como combustível no Brasil vai completar um século! *Agroenergia em Revista*, n. 05, dez. 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/80569/1/Agroenergia-em-revista-n.5Cabral.pdf>. Acesso 20 set. 2025. Disponível em: <http://www.scielo.br>. Acesso em: 16 de Set. de 2025.

EFEVBOKHAN, Vincent E. *et al.* *Production of Bioethanol from Hybrid Cassava Pulp and Peel using Microbial and Acid Hydrolysis* (2019). PEER-REVIEW%20ARTICLE.pdf. Bioresources.com.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Cultivo da mandioca*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca>. Acesso em 25 de out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). ETANOL LIGNOCELULÓSICO OU DE SEGUNDA GERAÇÃO – E2G. 2026.

FADEL, S. *Custos de implantação de usinas de etanol de mandioca*. Agroenergia, 2006.

Bioenergia em revista: diálogos. Ano/vol. 16, n. 1, jan./jun. 2026. p. 57-86.

Avaliação do processo de fermentação para produção de etanol a partir do amido da mandioca: análise de viabilidade técnica e comparativa com o etanol da cana-de-açúcar e milho

RAMOS, Rute da Costa; SILVA, Fabio Cesar da; SERRA, Erlane Santos; FERNANDES, Gabriela Dias

FAGUNDES, J. L. A mandioca como fonte de energia renovável. *Revista Energia*, 2009.

FOLEGATI, Marília I. S.; MATSURRA, Fernanda C. A. U. *Mandioca e derivados*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura.

FONSECA, M. J. de O. – *Secagem e armazenamento*. Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, dez. 2021 Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-deinformacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/secagem-earmacenamento#:~:text=A%20secagem%20com%20ar%20aquecido,processo%2C%20a%20uma%20temperatura%20elevada>. Acesso em 02 set. 2025.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). *Variedades de mandioca açucarada*. 2008.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2008.

GONÇALVES, F. de O. *et al.* Strategies to ensure fuel security in brazil considering a forecast of ethanol production. *Biomass, Barking*, v. 3, p. 1-17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomass3010001>.

GONÇALVES, R. S. *et al.* Produção de etanol a partir da hidrólise ácida do amido da mandioca. *Simpósio Estadual de Agroenergia 1a Reunião Técnica Anual de Pesquisa de Agroenergia*, p. 4, 2007.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível e sua inserção na matriz energética. *Revista USP*, 2007.

MARCONDES, R.; SILVA, S. L. R. da. O protocolo PRISMA 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. *Revista Brasileira de Pós-graduação*, Brasília, v. 18, n. 39, p. 1-19, jul./dez., 2022. DOI: <https://doi.org/10.21713/rbpg.v18i39.1894>. Milho com diferentes teores de amilose. *Polímeros*, São Carlos, v. 15, n. 4, Nov, 2005.

NASTARI, Plínio M. Etanol de cana e de milho: uma complementaridade virtuosa. *Agroanalysis*, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, p. 22–23, mar. 2021.

NIGAM, P.S.; SINGH, A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011.

NOVACANA. *Produção de etanol de milho avança 34% em meio à quebra histórica da cana*, abr. 2022. Disponível em <https://www.novacana.com/noticias/producao-etanol-milho-avanca34-quebra-historica-cana-260422>. Acesso em 23 out. 2025.

ORDONEZ, I. A. C.; CABELLO, C. Utilização dos resíduos do processamento de mandioca para produção de bio-etanol na alimentação de aves. *Congresso Brasileiro de Mandioca*, p. 969–975, 2009.

OSTROWSKI, P. *et al.* Processo industrial de produção de álcool de mandioca. *Revista de Engenharia Química*, 2006.

Bioenergia em revista: diálogos. Ano/vol. 16, n. 1, jan./jun. 2026. p. 57-86.

Avaliação do processo de fermentação para produção de etanol a partir do amido da mandioca: análise de viabilidade técnica e comparativa com o etanol da cana-de-açúcar e milho

RAMOS, Rute da Costa; SILVA, Fabio Cesar da; SERRA, Erlane Santos; FERNANDES, Gabriela Dias

PAES, M. C. D. – Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho. Circular Técnica, 75 *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*, dez. 2006. Sete Lagoas, MG.

PAGE, M. J. *et al.* A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, Washington, DC, v. 46, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>.

QIU H, *et al.* (2016) Genome-wide cooperation by HAT Gcn5, remodeler SWI/SNF, and chaperone Ydj1 in promoter nucleosome eviction and transcriptional activation. *Genome Res* 26(2):211-25.

QUEIROZ, Liliana Santos Silva de. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* - RAMADOI:10.17765/2176-9168.2025v18e11763e-ISSN 2176-9168AgronegócioRev Agro Amb, v. 18, e11763, 2025 - e-ISSN 2176-9168. Plant biometric aspects and ethanol production in cassava cultivars withbiological inoculants. (2025).

RABELO, S.C. *Produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2010.

RIBEIRO, L. M. L. *Etanol De Milho: Processo Produtivo E Contexto Atual Do Mesmo No Brasil*. (Trabalho de conclusão de curso). 2023. Universidade Federal de Uberlândia.

RUIZ A, *et al.* (2011) Roles of two protein phosphatases, Reg1-Glc7 and Sit4, and glycogen synthesis in regulation of SNF1 protein kinase. *Proc Natl Acad Sci U S A* 108(16):6349-54.

SAITO, I. *et al.* Produção de etanol a partir de hidrolisado obtido por tratamento hidrotérmico de farelo de mandioca. *Revista Energia na Agricultura*, v. 21, p. 34–44, 2006.

SALLA, D.A. Análises energética de sistemas de produção de etanol a partir da mandioca, (*Manihot esculenta* Crantz). <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400015>. *Energia na Agricultura • Rev. bras. eng. agric. ambient.* 14 (4) • Abr 2010.

SANTANA, A. *Comparação da produção de etanol a partir de mandioca e cana-de-açúcar*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2007.

SEBRAE. *A mandioca e seu potencial agroindustrial*. 2008.

SENAR - CNA Brasil. *Milho é uma das principais fontes de alimento do brasileiro, com importância estratégica nas exportações do agronegócio*, mai. 2016. Disponível em: <https://cnabrazil.org.br/noticias/milho-%C3%A9-uma-das-principais-fontes-de-alimento-dobrasileiro-com-import%C3%A2ncia-estrat%C3%A9gica-nas-exporta%C3%A7%C3%B5esdo-agroneg%C3%B3cio>. Acesso em 20 nov. 2025.

SOARES, Soares Thelma Shirlen; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira; GONÇALVES, Elzimar de Oliveira; DE LELLES, José Gabriel. Uso da Biomassa Florestal na geração de energia. *Revista científica eletrônica de engenharia*. Ano iv, n. 08, agosto, 2006. Disponível em: <http://www.revista.inf.br>. Acesso em: 10 de out de 2025.

Bioenergia em revista: diálogos. Ano/vol. 16, n. 1, jan./jun. 2026. p. 57-86.

Avaliação do processo de fermentação para produção de etanol a partir do amido da mandioca: análise de viabilidade técnica e comparativa com o etanol da cana-de-açúcar e milho

RAMOS, Rute da Costa; SILVA, Fabio Cesar da; SERRA, Erlane Santos; FERNANDES, Gabriela Dias

SOUZA, G.M. *et al.* Produção de etanol celulósico no Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 2013.

SUN, W.; LI, X.; ZHAO, J.; QIN, Y. Pretreatment strategies to enhance enzymatic hydrolysis and cellulosic ethanol production for biorefinery of corn stover. *International Journal of Molecular Sciences*, Basel, v. 23, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232113163>.

UDOP - União Nacional de Bioenergia. *Produção de etanol pode ultrapassar 34 bilhões de litro no Brasil*, abr. 2024. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/04/15/producao-de-etanol-pode-ultrapassar-34-bilhoes-de-litros-no-brasil.html>. Acesso em 01 set. 2025.

VENTURINI FILHO, W.G.; MENDES, F.B.L. Produção de etanol no Brasil: desafios e perspectivas. *Revista Ciência & Tecnologia*, 2003.

VENTURINI FILHO, Waldemar G.; MENDES, Beatriz do Prado. Fermentação alcoólica de raízes tropicais. In: CEREDA, Marney Pascoli. *Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas Latino Americanas*. São Paulo, Fundação Cargill, v.3, cap.19, p.531-576, 2003.

VIANA, E. de S.; REIS, R. C.; MATSUURA, F. C. A. U.; MATSUURA, M. I. da S. F. *Valor nutricional e processamento do fruto*. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/985235/valor-nutricional-e-processamento-do-fruto>. Acesso em 28 out. 2025.

WWF Brasil - Fundo Mundial para a Natureza. *Impactos ambientais do petróleo pressionam o setor para a energia limpa*, dez. 2022. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?84444/impactos-ambientais-do-petroleo-pressionam-o-setor-para-a-energia-limpa>. Acesso em 02 out. 2025.

1 RUTE DA COSTA RAMOS, nascida em 03/03/1977, natural de Rio Claro – SP, residente em Piracicaba. Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária com extensão em química. Possui CREA-SP e CRQ superior. No âmbito ambiental: possui experiência em tratamento de água e efluentes industriais de termoeletrica/mineradora/frigorífico, entre outros, gestão de equipe, gestão de laboratório, análises físico-químicas e biológicas, controle financeiro, comercial, projetos sustentáveis específicos, habilidades analíticas de segurança do trabalho, metodologia ágeis em contratos e relatórios, atuação híbrida (administrativo/campo), concepção de documentos oficiais mediante normas e legislação, submissão e formalização de estudos e documentos técnicos. Experiências complementares: assessoria política, assistência social, industrial, produção. análises físico-químicas e biológicas. Experiências acadêmicas: <http://lattes.cnpq.br/9674861827127194>

2 SILVA, Fabio Cesar da. Possui graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade de São Paulo, graduação em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo, mestrado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo e doutorado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo. Pós-doutorado em Modelagem Agroclimatológica da Ecofisiologia de cultura (ESALQ-USP) e Modelagem de sistema agrícolas (Universidad Politécnica de Madrid - UPM - ETSIA, Madrid - Espanha). Atualmente é professor pleno 1 (equivalente: adjunto) da FACULDADE DE TECNOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO e pesquisador doutor da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Nutrição Mineral na Agricultura e Fertilidade do Solo, atuando principalmente nos seguintes temas: cana-de-açúcar, soja, fertilização, calagem, metais pesados, balanços de nutrientes e de carbono na agricultura, agroindústria sucroalcooleira (processos, controle e modelagem matemática).

3 SERRA, Erlane Santos. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” – CEETEPS.

4 FERNANDES, Gabriela Dias. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” – CEETEPS.