

**IMPACTO DAS NOVAS
TECNOLOGIAS PARA
AUMENTO DE PRODUTIVIDADE
NO POTENCIAL DE
MITIGAÇÃO DE GEE PELA
CANA-DE-AÇÚCAR ATÉ 2042**

Sumário

RESUMO EXECUTIVO	3
1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO	8
3. METODOLOGIA	9
4. RESULTADOS	21
5. CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	37

RESUMO EXECUTIVO

O setor sucroenergético brasileiro desempenha um papel estratégico na matriz energética nacional e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A cana-de-açúcar representa uma das principais matérias-primas para a produção de bioenergia, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis. A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis impulsiona a necessidade de aprimoramento das práticas agrícolas e industriais, garantindo maior eficiência produtiva e redução das emissões de carbono ao longo da cadeia.

Este estudo avalia o impacto da intensificação produtiva da cana-de-açúcar no potencial de descarbonização do setor sucroenergético até 2042. A análise considera dois cenários: o de referência, baseado nos parâmetros de produtividade e eficiência tecnológica de 2022, e o projetado para 2042, que incorpora avanços tecnológicos. O cenário de referência apresenta uma produtividade média de 74,6 t/ha, enquanto o cenário 2042 assume um incremento anual, atingindo 149,3 t/ha, viabilizado pela adoção de novas variedades genéticas, biotecnologia, plantio com sementes e melhorias no manejo agrícola. Essa intensificação ocorre sem expansão da área cultivada, otimizando o uso das terras.

A adoção dessas tecnologias representa ganhos de eficiência agrícola e industrial, reduzindo o consumo de insumos e aumentando a conversão de biomassa em bioenergia. Na etapa agrícola, o estudo indica uma redução no uso de insumos por unidade de produto, incluindo queda de 18,2% no consumo de diesel e de 19,4% no uso de fertilizantes nitrogenados. Esses ganhos refletem avanços na mecanização, no uso racional de insumos e na adoção de práticas agrícolas mais eficientes. No âmbito industrial, a maior concentração de açúcares na cana e aprimoramentos nos processos de fermentação e destilação elevam o rendimento do etanol hidratado de 82,9 L/t para 88,1 L/t de cana (+6,3%).

Essas melhorias resultam em impactos ambientais positivos, principalmente no potencial de redução da intensidade de carbono do etanol, que cai de 22,2 gCO₂/MJ para 18,5 gCO₂/MJ (-16,7%). Além disso, o potencial de emissões evitadas cresce significativamente, passando de 77,8 milhões tCO₂/ano no cenário de referência para 178,6 milhões tCO₂/ano no ano 2042, um aumento de 129%.

Os impactos econômicos da intensificação produtiva também são identificados. A ampliação do potencial de descarbonização se traduz em um aumento na geração de créditos de descarbonização (CBios), cuja receita associada passa de R\$909/ha cultivado no cenário de referência para R\$2.082/ha cultivado em 2042 (+129,1%). No entanto, esse valor refere-se à condição em que toda a biomassa é destinada à fabricação de etanol combustível. Ao considerar um mix de produção alinhado à demanda global de açúcar e etanol, a receita potencial por hectare cultivado passa de R\$482 para R\$874 em 2042, ainda representando um aumento expressivo de 81,5% em relação ao valor observado em 2022. Os valores apresentados consideram um preço médio de R\$100,00 por CBio, sendo que eventuais oscilações no mercado de carbono podem impactar diretamente a rentabilidade do setor.

Os resultados obtidos são alcançados devido a uma combinação de fatores interligados, onde os avanços tecnológicos responsáveis pelo aumento da eficiência e redução das emissões apresentam diferentes contribuições para os ganhos observados. A adoção de sementes contribui com 29% das emissões evitadas ao possibilitar uma incorporação mais rápida de novas variedades e tecnologias, reduzindo a necessidade de equipamentos, custos operacionais e emissões associadas. Além disso, essa tecnologia otimiza o uso da terra ao eliminar áreas de viveiro, maximizando a produtividade por hectare e melhorando a sanidade dos canaviais.

As melhorias genéticas representam a maior contribuição individual, respondendo por 36% da mitigação total de emissões. O desenvolvimento de variedades de alto rendimento, adaptadas a diferentes condições de manejo e ambientes, impulsiona ganhos na produtividade da cultura, reduzindo a necessidade de insumos e aumentando a eficiência do setor.

As biotecnologias complementam essa transformação ao possibilitar cultivares com maior resistência a pragas e doenças, otimizando a absorção de nutrientes e reduzindo a dependência de defensivos químicos, contribuindo com 13% da redução total de emissões.

Embora o manejo agrícola e os ganhos incrementais de produtividade sejam relevantes, eles são, em grande parte, uma consequência da adoção dessas novas tecnologias, representando cerca de 13% do ganho total de emissões evitadas. Por fim, a eficiência industrial e a exportação de bioeletricidade representam 10% da mitigação total de emissões, devido a ampliação das eficiências de fermentação e destilação, bem como redução das perdas no processo industrial e o aumento da quantidade de energia elétrica exportada para níveis próximos das empresas mais eficientes do setor atualmente.

Assim, o estudo evidencia que a intensificação produtiva do setor sucroenergético, aliada às novas tecnologias e melhorias operacionais, tem o potencial de consolidar a posição do Brasil como líder na produção de bioenergia sustentável. Os resultados demonstram impactos ambientais positivos e uma significativa oportunidade econômica, garantindo maior competitividade no mercado global de biocombustíveis e contribuindo diretamente para as metas climáticas nacionais e internacionais. O fortalecimento da descarbonização e a ampliação da eficiência produtiva tornam o setor ainda mais relevante no contexto da transição para uma economia de baixo carbono, reforçando a sustentabilidade e a capacidade do Brasil em liderar o desenvolvimento de soluções inovadoras para o futuro da bioenergia.

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético brasileiro desempenha um papel estratégico na matriz energética do país, sendo essencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A cana-de-açúcar, como principal matéria-prima para a produção de etanol e bioeletricidade, é central nessa contribuição, consolidando-se como uma solução viável para a transição a uma economia de baixo carbono. Em 2023, os derivados de cana responderam por 16,9% da matriz energética brasileira, atestando sua relevância para o alcance das metas climáticas do Acordo de Paris (EPE, 2024).

Em meio ao esforço global para mitigar os impactos das mudanças climáticas, o Brasil revisou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) no final de novembro de 2024. Nesse contexto, o país comprometeu-se a reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa em uma faixa de 59% a 67% até 2035, em relação aos níveis registrados em 2005. Essa meta corresponde a alcançar emissões líquidas entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente (BRASIL, 2024).

Parte da estratégia para atingir esse objetivo consiste no aumento da participação de energias renováveis na matriz energética nacional, com destaque para a ampliação do uso de biocombustíveis. Nesse cenário, a Política Nacional de Biocombustíveis, conhecida como RenovaBio, foi criada para orientar essa expansão, promovendo maior eficiência energética e ambiental na produção e uso de biocombustíveis (BRASIL, 2015). Os três pilares principais dessa política são as metas de descarbonização, os créditos de descarbonização (CBios) e a certificação da produção de biocombustíveis. A meta nacional, estabelecida para um período de dez anos, é desdobrada entre os distribuidores de combustíveis, que devem cumprir suas obrigações por meio da aquisição de CBios, emitidos por produtores ou importadores com produção devidamente certificada (FGV ENERGIA, 2022).

Dentre as principais iniciativas voltadas à descarbonização do setor de combustíveis, destaca-se a certificação das unidades produtoras, realizada por meio do RenovaBio e sua ferramenta de cálculo de emissões RenovaCalc. A ferramenta quantifica a eficiência ambiental e energética dos biocombustíveis, incentivando práticas que promovam a redução das emissões de GEE em comparação aos combustíveis fósseis (ANP, 2020). Essa certificação não apenas possibilita uma mensuração objetiva do potencial de descarbonização do setor, mas também confere maior previsibilidade à inserção dos biocombustíveis no mercado internacional.

No contexto da produção sucroenergética, o aumento da produtividade da cana-de-açúcar surge como uma estratégia promissora para intensificar a descarbonização sem a necessidade de expansão da área cultivada. A adoção de inovações tecnológicas desenvolvidas pelo setor, aliada a adoção de boas práticas agrícolas, permite incrementos na eficiência de utilização dos recursos naturais, promovendo uma produção mais limpa e alinhada aos objetivos globais de sustentabilidade (EMBRAPA, 2022).

O monitoramento contínuo das emissões de GEE é essencial para compreender as especificidades regionais do setor sucroenergético. Tal prática não apenas orienta a formulação de políticas públicas mais eficientes, mas também fortalece a posição do Brasil no mercado global de créditos de carbono, com destaque para os CBios como instrumento-chave (GURGEL et al., 2023). Além disso, a medição precisa dos impactos ambientais e energéticos auxilia na implementação de soluções adaptadas às especificidades locais, permitindo maior integração entre as iniciativas regionais e nacionais.

Com base nesse panorama, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar o impacto do aumento da produtividade da cana-de-açúcar no potencial de descarbonização do setor sucroenergético, abrangendo tanto a etapa agrícola quanto a industrial. A análise busca destacar os benefícios ambientais e energéticos advindos da intensificação dos sistemas de produção e do aprimoramento tecnológico.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto do aumento da produtividade da cana-de-açúcar na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo setor sucroenergético brasileiro, abrangendo tanto a etapa agrícola quanto a industrial¹. Para isso, mensura a intensidade de carbono associada à produção de biocombustíveis, com o objetivo de quantificar os benefícios ambientais e energéticos resultantes da intensificação produtiva e da adoção das novas tecnologias.

O estudo abrange um período de 20 anos, assumindo cenários prospectivos de ganhos de produtividade entre 2022 e 2042. Esses cenários são estruturados em torno de pilares estratégicos que envolvem avanços em genética, biotecnologia, sementes e manejo, viabilizando o aumento da produtividade sem a necessidade de expansão da área cultivada. A análise também incorpora ganhos incrementais de operação e manejo na área agrícola, além de avanços na eficiência das unidades industriais, com foco na descarbonização da cadeia produtiva e no fortalecimento da sustentabilidade do setor.

O estudo busca oferecer subsídios técnicos e científicos para a formulação de estratégias que promovam a competitividade do setor sucroenergético no mercado global de energias renováveis e reforcem sua contribuição para as metas nacionais e internacionais de mitigação das mudanças climáticas a partir do desenvolvimento e adoção de novas tecnologias produtivas.

Em linhas gerais, a análise procura responder questões fundamentais acerca do potencial de descarbonização do setor sucroenergético, como: i) Qual o potencial de redução de emissões de GEE desta indústria por hectare cultivado com cana-de-açúcar? ii) Como as novas variedades de cana-de-açúcar podem impactar esse potencial? iii) Qual o efeito da adoção da tecnologia de sementes sobre a necessidade de expansão de área de cultivo e a produção de bioenergia por hectare no setor?

¹ O estudo baseia-se em modelagens e cenários prospectivos desenvolvidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), considerando projeções até 2042 e a incorporação de tecnologias inovadoras voltadas para o setor sucroenergético.

3. METODOLOGIA

O estudo adota a Análise de Ciclo de Vida (ACV) como base metodológica, seguindo a abordagem estabelecida pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Essa análise abrangente todas as etapas do ciclo de vida dos biocombustíveis, desde a produção agrícola da cana-de-açúcar até o consumo final, incorporando transporte, processamento industrial e distribuição dos produtos finais. A escolha da ACV é justificada por sua ampla utilização no setor sucroenergético brasileiro, garantindo consistência metodológica com parâmetros regulatórios e certificações vigentes, além de ser reconhecida mundialmente como a estratégia mais utilizada para a mensuração da pegada de carbono da bioenergia.

O uso da calculadora adotada pelo RenovaBio - conhecida como RenovaCalc - como ferramenta base para quantificar o potencial de descarbonização do setor também se justifica ao considerarmos que o estudo não possui o objetivo de promover qualquer discussão acerca das metodologias de mensuração de emissões de GEE dos biocombustíveis². A análise proposta aqui centra-se, na verdade, na mensuração do impacto das novas tecnologias sobre o potencial de descarbonização do setor e, portanto, adota uma ferramenta consolidada para identificar o resultado dos diferentes cenários a partir de um mesmo referencial robusto e fundamentado.

3.1. Premissas

O estudo abrange a produção de cana-de-açúcar no Centro-Sul do País e considera duas premissas principais para orientar a análise e os cenários 2042:

1. **Sem aumento de área:** A intensificação produtiva será alcançada sem expansão das áreas cultivadas, otimizando o uso das terras existentes por meio de novas tecnologias que permitiram maximizar a produtividade sem comprometer novos espaços agrícolas.
2. **Aumento de produtividade:** O incremento produtivo será impulsionado por inovações tecnológicas, com destaque para:
 - a. **Adoção gradual de novas variedades de cana-de-açúcar:** a implementação de novas variedades de cana-de-açúcar, com maior potencial produtivo, ocorrerá de maneira progressiva, atingindo sua plenitude até 2042.

² Para maiores detalhes sobre esse tema ver International Energy Agency. Carbon accounting for sustainable biofuels. IEA, 2024 Disponível em: www.iea.org.

- b. Plantio com sementes:** a substituição gradual do plantio convencional por mudas com o uso de sementes possibilita uma adoção mais rápida de novas variedades e tecnologias, reduzindo a necessidade de equipamentos, custos operacionais e emissões de carbono. A eliminação das áreas de viveiro permite destinar toda a terra disponível à colheita, maximizando a produtividade por hectare. Além disso, essa abordagem facilita o manejo, minimiza falhas e melhora a sanidade dos canaviais

- c. Eficiência agrícola e industrial:** a adoção de melhores práticas de manejo, uso otimizado de insumos agrícolas, mecanização avançada e controle rigoroso dos processos industriais visando aumentos de rendimento, de forma a deslocar os indicadores médios do setor para níveis mais próximos das empresas mais eficientes.

- d. Genética e Biotecnologia:** A adoção de variedades modernas de alto rendimento, adaptadas a diferentes condições de manejo e ambientes, inclui cultivares resistentes a insetos e tolerantes a herbicidas. Essas tecnologias reduzem o uso de insumos, facilitam o manejo e aumentam a competitividade do canavial.

Esses elementos se sustentam na hipótese de implementação e incorporação de novas tecnologias até 2042.

3.2. Base de Dados

O estudo considerou os registros de certificação das unidades do Centro-Sul no RenovaBio como base inicial para a análise, assumindo que tais registros refletem as condições de eficiência energética e ambiental das usinas produtoras de biocombustíveis no Brasil. Os valores médios de rendimentos agrícola e industrial foram extraídos diretamente das certificações vigentes.

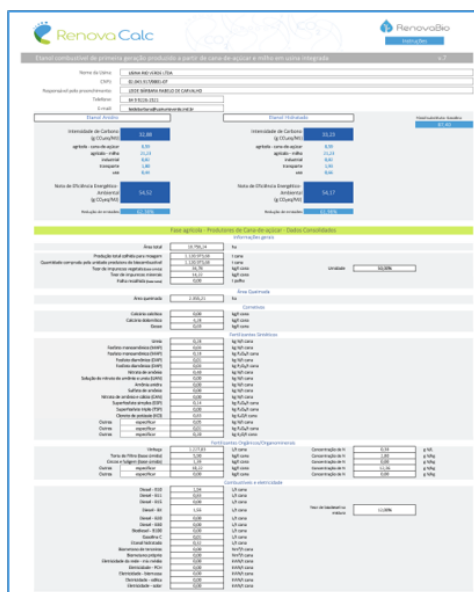
Para o **cenário 2042** (ano agrícola 2042/2043), foram adotadas premissas baseadas na incorporação de tecnologias avançadas do setor, além de ganhos incrementais de eficiência assumindo que o valor médio observado em 2042 seguirá como ponto de partida o padrão das empresas que atualmente compõem o extrato dos 20% mais eficientes do setor no Centro-Sul.

Isso posto, estruturou-se uma base de dados composta pelos registros de certificação de todas as empresas do RenovaBio entre os anos de 2020 e 2024. Os certificados emitidos no âmbito do programa atestam a eficiência energética e ambiental das usinas produtoras de biocombustíveis no Brasil, indicando a quantidade de insumos utilizados na produção e de rendimentos registrados em cada planta industrial.

A obtenção desses certificados ocorre por meio de auditorias conduzidas conforme os critérios estabelecidos na regulamentação. Esses documentos são de acesso público e podem ser consultados em sistema específico mantido pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), permitindo a transparência do processo e a rastreabilidade dos dados do setor. A partir dessa documentação, é possível compilar os dados de insumos agrícolas e industriais, rendimentos e produtividades operacionais, servindo como base para a realização das análises estatísticas e simulações conduzidas no desenvolvimento do presente projeto.

Foram consultados, coletados, organizados e analisados documentos de 662 certificações e recertificações de unidades produtoras de etanol de cana-de-açúcar. Os dados foram digitados e sistematizados em planilha eletrônica, gerando uma base estruturada com aproximadamente 75.000 registros.

A **Figura 1** a seguir apresenta, à esquerda, um documento de certificação do RenovaBio em formato PDF, e à direita, o banco de dados consolidado a partir da coleta dos dados contidos nos documentos, que fazem referência aos *inputs* utilizados pelas usinas no processo de cálculo de eficiência energética e ambiental, realizado por meio da ferramenta RenovaCalc.



consulta	dt_aprovacao	dt_validade	variavel	valor	unidade
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Área total	10,847.69	ha
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Produção total colhida para moagem	555,055.92	t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Quantidade comprada pela unidade produtora de t	555,055.92	t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Teor de impurezas vegetais (base úmida)	56.33	kg/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Umidade	50.00	%
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Teor de impurezas minerais	4.68	kg/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Palha recolhida (base seca)	0.00	t palha
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Área queimada	0.00	ha
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Calcário calcítico	0.08	kg/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Calcário dolomítico	9.54	kg/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Gesso	5.41	kg/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Ureia	1.16	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Fosfato monoamônico (MAP) - nitrogênio	0.05	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Fosfato monoamônico (MAP) - fosfato	0.23	kg P2O5/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Fosfato diamônico (DAP) - nitrogênio	0.00	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Fosfato diamônico (DAP) - fosfato	0.00	kg P2O5/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Nitrato de amônio	0.21	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN)	0.00	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Amônia anidra	0.00	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Sulfato de amônio	0.06	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Nitrato de amônio e cálcio (CAN)	0.00	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Superfosfato simples (SSP)	0.11	kg P2O5/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Superfosfato triplo (TSP)	0.00	kg P2O5/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Cloreto de potássio (KCl)	0.35	kg K2O/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Outros fertilizantes sintéticos - nitrogênio	0.03	kg N/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Outros fertilizantes sintéticos - fosfato	0.00	kg P2O5/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Outros fertilizantes sintéticos - potássio	0.00	kg K2O/t cana
357-2022	25/03/2022	24/03/2025	Vinhaça	289.43	L/t cana

Figura 1. Exemplo de RenovaCalc preenchida por empresa certificada e banco de dados estruturado a partir da digitação e organização dos parâmetros da mencionada ferramenta.

Os inputs inseridos na ferramenta RenovaCalc abrangem tanto as etapas industrial quanto agrícola do processo produtivo. No entanto, para a etapa agrícola, os valores médios apresentados na ferramenta disponibilizada no sistema de registro da ANP são contaminados pelo uso de “**dados default**” para parte da área certificada pelas empresas. Esses dados são parâmetros penalizados aplicados quando as usinas, especialmente nas áreas de produtores rurais, não dispõem de dados reais de campo, conforme definido na Resolução ANP nº 758/2018.

Devido à penalidade imposta ao uso desses valores *default*, a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) é substancialmente subestimada na base de dados das certificações do RenovaBio. Para mitigar essa limitação e aprimorar a precisão das análises, a base foi enriquecida com informações complementares provenientes das seguintes fontes de dados:

- **Sistema de benchmarking** mantido pela UNICA, contendo parâmetros de eficiência e produtividade observados para a fase agrícola da produção;
- **Levantamentos primários da EMBRAPA** conduzidos com o objetivo de ajustar os valores reportados nas certificações do RenovaBio e mitigar as limitações decorrentes da utilização de valores default para o componente agrícola. Esses levantamentos forneceram índices de eficiência 'típicos' para o cultivo da cana-de-açúcar em diferentes estados do Brasil, permitindo uma caracterização mais precisa da produção regional. Os índices foram

publicados no estudo 'Regionalização dos Perfis Típicos da Produção de Cana-de-Açúcar para Uso no RenovaBio', elaborado pela Embrapa Meio Ambiente, que consolidou dados agrícolas primários certificados, refletindo as condições específicas de cultivo nas principais regiões produtoras (RAMOS et al., 2024).

O uso de múltiplas fontes permitiu o cruzamento e a validação dos dados, garantindo maior precisão na construção dos cenários e nas análises, conforme detalhamento nos demais tópicos deste relatório.

3.3. Detalhamento Etapa Agrícola

Na fase agrícola, o estudo focou na avaliação das seguintes variáveis:

- **Consumo de insumos agrícolas**, como fertilizantes, defensivos, calcário e combustíveis;
- **Produtividade média de cana-de-açúcar por hectare**, considerando os valores reportados pelas usinas. A métrica adotada considera a produção de cana-de-açúcar e a área total cultivada por cada uma das agroindústrias (própria e de terceiros) de forma a retratar a quantidade de cana-de-açúcar extraída anualmente por hectare cultivado, diferenciando-se do indicador de produtividade agrícola comumente adotado com emprego exclusivo da produção por área colhida;
- **Eficiência no uso de recursos**, com análise da relação entre os insumos aplicados e a produtividade obtida.

As distorções identificadas nos dados originais, especialmente aquelas associadas ao uso de valores padrão (default), foram corrigidas com o suporte de bases auxiliares previamente mencionadas, garantindo maior representatividade e precisão na caracterização da produção de cana-de-açúcar.

Os valores agrícolas foram submetidos a um rigoroso processo de tratamento para identificar parâmetros representativos do setor sucroenergético. Inicialmente, a eliminação de *outliers* se fez necessária para que os dados de produtores com condições muito específicas não promovessem distorções indesejadas na análise.

Para a eliminação de *outliers* da amostra, foi adotado o método z-scores, assumindo como *outliers* os valores superiores (ou inferiores) a três desvios em relação à média. Formalmente, essa lógica é representada pela equação 1 a seguir:

$$\bar{x} + 3 * \sigma < outlier < \bar{x} - 3 * \sigma \quad (eq. 1)$$

Em que:

\bar{x} = representa o valor médio da base de dados para um determinado parâmetro;

σ = desvio padrão para um determinado parâmetro da base de dados.

O número de observações eliminadas da amostra após o tratamento de outliers foi reduzido, evidenciando a consistência da base de dados e garantindo que a eliminação proposta não promoveu distorções nas medidas avaliadas.

Após o tratamento de *outliers*, foram elaborados histogramas, estimada a distribuição de frequência empírica dos indicadores e calculadas as métricas que caracterizam essa distribuição, incluindo média, mediana e percentis.

O histograma foi utilizado como estimador inocente da densidade de probabilidade não paramétrica dos diferentes parâmetros e *inputs* da RenovaCalc. Nesse sentido, a partir de uma partição de dados em m distintos intervalos da mesma largura, com $(z_k; z_{k+1})$ determinando um dos intervalos para a amostra de dados de interesse para todo $m < n$ e $z_{k+1} - z_k = h$, tem-se o seguinte o estimador da função de densidade por meio do histograma:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n I[z_k < x_i \leq z_{k+1}] \quad \forall k \text{ tal que } z_k < x \leq z_{k+1}, \quad (eq. 2.0)$$

Em que:

$I(.)$ = é uma função indicadora igual a 1 se o seu argumento é válido ou 0 caso contrário.

Buscando contornar limitações associadas à análise gráfica do histograma, foram estimadas densidades empíricas a partir do uso do estimador Kernel para representar a densidade de probabilidade não paramétrica dos indicadores.

Nesse caso, uma função *kernel* não negativa $k(.)$, um parâmetro de suavização h e um vetor de dados $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, a densidade empírica pode ser estimada por:

$$f(x; \mathbf{x}, h, k) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right). \quad (\text{eq. 3.0})$$

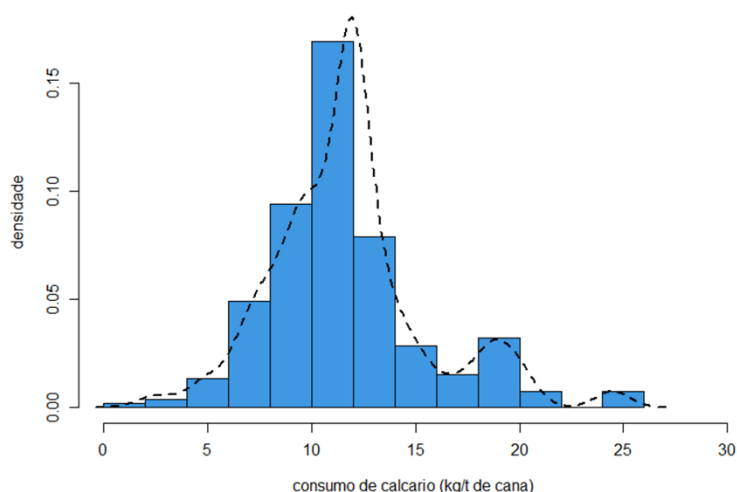
A probabilidade do lado esquerdo da função é dada pela seguinte integral:

$$F(x; \mathbf{x}, h, K) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^x k\left(\frac{t - x_i}{h}\right) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(t - x_i; h) \quad (\text{eq. 3.1})$$

Sendo \mathbf{K} a integral de \mathbf{k} dada por:

$$K(x) = \frac{1}{h} \int_{-\infty}^x k\left(\frac{t}{h}\right) dt. \quad (\text{eq. 3.2})$$

Toda a análise descrita foi implementada no *software* estatístico R (R Core Team, 2022). A **Figura 2** a seguir exemplifica a análise conduzida para cada *input utilizado* na RenovaCalc na composição do **cenário de referência**.



	Valor
Média	11,22
Mediana	11,96
Desvio padrão	3,80
1º quartil	9,52
2º quartil	11,96
3º quartil	13,00
Nº observações	266
Nº outliers	3

Figura 2. Consumo de calcário por tonelada de cana-de-açúcar: exemplo de análise utilizada na definição do valor a ser inserido na RenovaCalc para o cenário de referência (2022/2023)

No caso do consumo de nitrogênio e fósforo, os dados apurados revelam a utilização de diferentes fontes e, como consequência, níveis de emissões distintas para uma mesma quantidade de insumo utilizado. Para padronizar essas informações, as diferentes fontes de nitrogênio e fósforo foram convertidas, respectivamente, em “ureia equivalente” e “SSP equivalente” utilizando os parâmetros de emissões de GEE disponíveis na RenovaCalc.

A **Tabela 1** a seguir exemplifica a abordagem descrita e detalha os fatores de emissão utilizados para a conversão das fontes de fósforo em “SSP equivalente”.

Tabela 1. Emissão de GEE de cada uma das diferentes fontes de fósforo sintético utilizadas pelas empresas no cultivo da cana-de-açúcar

Fonte de fósforo sintético	Emissão (Kg CO ₂ eq/kg de P ₂ O ₅)
Fosfato Monoamônico (MAP)	1,662
Fosfato Diamônico (DAP)	1,447
Superfosfato Simples (SSP)	2,368
Superfosfato Triplo (TSP)	1,876
Outros	2,368

Fonte: Elaborada a partir dos parâmetros da RenovaCalc.

A partir dos parâmetros detalhados na **Tabela 1**, o consumo de fósforo em quilos por tonelada de cana-de-açúcar é dado pela eq. 6.0 a seguir:

$$SSP_{equivalente} = \sum_1^i Fert_i \times \frac{GEE_i}{GEE_{SSP}} \quad (eq. 4.0)$$

Em que:

i = enumera as diferentes fontes de fósforo utilizadas pelo produtor;

$Fert_i$ = representa a quantidade consumida do fertilizante utilizado como fonte de fósforo i ;

GEE_{SSP} = refere-se as emissões de GEE do SSP, mensuradas em kg CO₂eq/kg de P₂O₅ conforme tabela no slide anterior

GEE_i = refere-se as emissões de GEE do fertilizante i utilizado como fonte de fósforo, mensuradas em kg CO₂eq/kg de P₂O₅ conforme detalhes apresentados na Tabela 1.

A partir dos procedimentos apresentados, os indicadores de entrada da RenovaCalc utilizados para compor o **cenário de referência** (ciclo agrícola 2022/2023) foram definidos com base na média dos valores extraídos das bases de dados disponibilizadas pela Embrapa e pelo sistema de *benchmarking* da UNICA.

Para o **cenário futuro** (cenário 2042), foi adotada uma abordagem orientada pela eficiência produtiva, assumindo que ganhos incrementais de produtividade e rendimento, a introdução de novas variedades de cana-de-açúcar e a inovação tecnológica trazida pelo uso de sementes devem permitir que o valor médio observado nas empresas instaladas no Centro-Sul do País no ciclo

agrícola 2042/2043 represente aquele observado atualmente entre as empresas que estão no conjunto das 20% mais eficientes.

A abordagem utilizando o percentil 80 para definir os parâmetros de *input* da RenovaCalc em 2042 foi submetida à análise de especialistas do setor para um processo adicional de validação técnica a partir da opinião de pesquisadores da área, com ajustes pontuais adotados para representar de maneira adequada o cenário mais provável para o uso de insumos em 2042.

Os *inputs* adotados para a área agrícola no **cenário de referência** e no **cenário 2042** são apresentados no início da seção de resultados deste relatório.

3.4. Detalhamento Etapa Industrial

Os valores de entrada da RenovaCalc para a área industrial foram submetidos a mesma análise estatística descrita anteriormente para os dados da área agrícola. Nas etapas industrial e de uso, entretanto, os parâmetros da calculadora do RenovaBio não são contaminados pelo uso de valores *default*, permitindo que a base de dados levantada a partir das certificações fosse integralmente adotada na definição de **cenário de referência** e do **cenário 2042**.

Nesse caso, de maneira a retratar o potencial de descarbonização do setor no **cenário 2042**, o estudo também assumiu que a média dos valores de rendimento e produção industrial (etanol e bioeletricidade) observada em 2042 deve seguir o padrão atualmente observado entre as empresas mais eficientes do setor (percentil 80).

A incorporação dos ganhos de eficiência na indústria no **cenário 2042** é importante para expressar de maneira adequada a contribuição das novas tecnologias no campo para a descarbonização do setor. Isso porque, a conversão mais eficiente de energia solar em quantidade superior de biomassa e açúcares na lavoura é potencializada pela maior eficiência industrial, que permite a transformação dessa matéria-prima recebida do campo em energia em forma útil à sociedade (etanol e bioeletricidade, por exemplo).

3.5. Indicadores de oferta de energéticos e de descarbonização

Para mensurar o nível e o potencial de conversão energética e de descarbonização do setor sucroenergético nos dois cenários, foram criados oito indicadores de eficiência energética e

ambiental, agrupados em cinco diferentes classes de análise, conforme detalhado na **Tabela 2** a seguir.

Tabela 2. Indicadores de descarbonização e de conversão de biomassa em energia disponível para a sociedade.

INDICADOR	DESCRIÇÃO
1. DESCARBONIZAÇÃO ETANOL Intensidade de Carbono etanol (média) - gCO ₂ /MJ Nota Eficiência Energético Ambiental etanol (média) - gCO ₂ /MJ Emissão Evitada etanol (média) - kgCO ₂ /litro	<i>Retratam a intensidade de carbono (IC) do etanol produzido e as emissões de GEE evitadas por unidade de energia e por litro do biocombustível</i>
2. DESCARBONIZAÇÃO CANA-DE-AÇÚCAR Emissão Evitada cana-de-açúcar - kgCO ₂ /t de cana	<i>Retrata as emissões de GEE evitadas por tonelada de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol e de bioeletricidade</i>
3. DESCARBONIZAÇÃO POR ÁREA Emissão Evitada por hectare cultivado - tCO ₂ /hectare	<i>Retratam as emissões de GEE evitadas por hectare cultivado para a produção de biocombustíveis (etanol e bioeletricidade)</i>
4. PRODUÇÃO DE ENERGIA POR UNIDADE DE ÁREA Energia Útil ³ Gerada por hectare cultivado - mil MJ/hectare	<i>Retratam a quantidade total de energia gerada pelos biocombustíveis por hectare cultivado com cana-de-açúcar, assumindo que toda a matéria-prima foi empregada na produção de etanol e de bioeletricidade</i>
5. POTENCIAL DE EMISSÃO EVITADA POR ANO Emissão Evitada por ano - assumindo 100% etanol (milhões t CO ₂) Emissão Evitada por ano - mix de produção atual (milhões t CO ₂)	<i>Retratam a emissão total evitada anualmente com a produção e uso de etanol e bioeletricidade no Centro-Sul do País</i>

Fonte: Elaboração própria a partir de MOTTA (2024).

A título de exemplificação, as equações (5.0) e (6.0) a seguir detalham, respectivamente, o cálculo dos indicadores de emissão de GEE evitadas por hectare de cana-de-açúcar (EEha) e de bioenergia útil gerada por hectare (EGha):

$$EEha = \left(\frac{\sum_i^n EE_i * CE_i * prod_i}{area * 1000} \right) \quad (eq. 5.0)$$

Em que:

EE_i = emissão evitada pelo biocombustível i (em gCO₂eq/MJ).

CE_i = conteúdo energético do biocombustível i.

Prod_i = produção total de cada biocombustível i (litros ou kwh).

³ O termo “energia útil” é utilizado nesses estudos para designar o conteúdo energético dos produtos finais obtidos pela transformação da energia primária oferecida pela cana-de-açúcar em biocombustíveis (etanol e bioeletricidade).

area = cultivada (hectares).

i = etanol anidro, etanol hidratado e bioeletricidade

$$EGha = \left(\frac{\sum_i^n CE_i * prod_i}{area * 1000} \right) \quad (eq. 6.0)$$

Em que:

CEi = conteúdo energético do biocombustível i (em MJ/litro ou MJ/kWh).

Prodi = produção total de cada biocombustível i (em litros ou em kWh).

area = área cultivada com cana-de-açúcar (em hectares).

i = etanol anidro, etanol hidratado e bioeletricidade.

Os indicadores calculados a partir da eq. (5.0) mensuram a quantidade de emissões de GEE evitadas por hectare colhido ou cultivado com cana-de-açúcar, quantificando o potencial de descarbonização da indústria sucroenergética por unidade de área quando a matéria-prima é utilizada para a produção de biocombustíveis e estes, por sua vez, são consumidos em substituição ao combustível fóssil equivalente.

Os indicadores definidos a partir da eq. (6.0) retratam a produção total de energia na forma de biocombustível (etanol e bioeletricidade) gerada pela indústria sucroenergética por superfície agrícola. Esses indicadores refletem a eficiência com que as plantas produtivas (áreas agrícola e industrial) convertem a energia solar recebida por hectare em biocombustíveis, retratando o nível de intensificação do uso de área para a produção dos produtos da bioenergia utilizados no consumo final.

3.6. Emissões evitadas pela bioeletricidade

A alocação das emissões totais e das intensidades de emissões entre os produtos da cana-de-açúcar – etanol anidro, etanol hidratado e bioeletricidade – foi realizada com base na abordagem de alocação energética adotada na RenovaCalc. No entanto, devido à limitação da ferramenta RenovaCalc, que não contempla um módulo específico para a alocação de emissões associadas à produção de bioeletricidade, foi desenvolvido um módulo adicional para suprir essa lacuna.

A alocação foi realizada com base na média do rendimento da energia elétrica comercializada, obtida durante a fase de levantamento e tratamento de dados. Dessa forma, a produção total foi distribuída entre os quatro produtos de acordo com suas respectivas participações na alocação energética, expressa em megajoule (MJ) e suas respectivas porcentagens em relação a energia total gerada na operação. Como a RenovaCalc já realiza o cálculo da intensidade de carbono para a produção de etanol anidro e hidratado, e considerando as porcentagens de alocação energética

desses produtos, juntamente com os dados de produtividade média de açúcar nas usinas, foi possível estimar a parcela de energia atribuída à bioeletricidade.

Considerando o uso predominante de termelétricas a gás natural na matriz de geração da margem operacional brasileira (EPE, 2022), foi adotada a intensidade de carbono dessa fonte fóssil como energia substituída pela bioeletricidade. Assim, a intensidade de carbono do combustível fóssil substituído pela bioeletricidade foi de 136,11 gCO₂/MJ, conforme parâmetro estimado pela Empresa de Pesquisa Energética-EPE (2022).

3.7. Conversões entre açúcar e etanol

Nas simulações em que se considerou o uso integral da cana-de-açúcar produzida para a fabricação bioenergia, como *input* da RenovaCalc foi adicionado ao rendimento registrado de etanol aquele proveniente do deslocamento do açúcar produzido para a fabricação do biocombustível. Nesse caso, foi necessário converter os produtos concorrentes pela matéria-prima sucroenergética para uma mesma unidade de medida, mensurada em “litros de etanol hidratado equivalente”. Essa conversão foi realizada a partir dos parâmetros preconizados pelo Consecana-SP, conforme equação (7.0) a seguir:

$$Prod_{hid_eq} = Prod_{acu} * \frac{1,0495}{1,6761} + Prod_{ani} * \frac{1,7492}{1,6761} + Prod_{hid} \quad (eq. 7.0)$$

Em que:

$Prod_{hid_eq}$ = produção de etanol hidratado equivalente, em litros por tonelada de cana

$Prod_{acu}$ = produção de açúcar, em quilos por tonelada de cana

$Prod_{ani}$ = produção de etanol anidro, em litros por tonelada de cana

$Prod_{hid}$ = produção de etanol hidratado, em litros por tonelada de cana

Nos casos em que a conversão energética entre açúcar, etanol anidro e etanol hidratado foi necessária, considerando os seguintes parâmetros de conteúdo energético foram adotados: i) etanol anidro: 22,35 mega joule por litro (MJ/l); ii) etanol hidratado: 21,34 MJ/l; e, iii) açúcar: 16,19 MJ/Kg.

4. RESULTADOS

4.1. Parâmetros utilizados no cenário de referência e no cenário 2042

No **cenário de referência**, ano agrícola 2022/2023, foram considerados dados de produção da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), da UNICA e do *benchmarking* do CTC para estimar a produtividade e eficiência média do setor no Centro-Sul do País. A moagem total atingiu cerca de 550 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com produtividade média de 74,64 t/ha.

A **Tabela 3** apresenta as premissas técnicas adotadas para o **cenário de referência**, incluindo a relação entre áreas de viveiro e plantio, o consumo de mudas por hectare e a estimativa da área destinada a carregadores e canais de vinhaça.

Tabela 3. Premissas Técnicas Adotadas para o Cenário de Referência (2022)

PREMISSAS TÉCNICAS	2022/2023
Moagem de referência 2022/2023 (mil toneladas)	550.115
Produtividade da área de viveiro (t cana/ha)	63,7
Muda para plantio mecanizado (t cana/ha)	14,0
Plantio cana de ano em relação ao plantio total	45,0%
Relação média entre área de viveiro e área de plantio	4,5
Área carregadores + canais vinhaça com relação área cultivada	6,28%

Fonte: CONAB, 2024; Benchmark CTC.

As premissas adotadas para o **cenário 2042**, por sua vez, assumem um aumento significativo na produtividade do setor sucroenergético, que deverá dobrar em relação ao valor registrado na safra 2022/2023. Essa ampliação decorre da premissa de redução no número de cortes do canavial, associada à introdução do uso de sementes, e da ampliação na produtividade por estágio de corte em função do emprego de variedades mais produtiva, de novas tecnologias agrícola e de técnicas de manejo adaptadas às diferentes regiões produtoras.

A **Tabela 4** apresenta os valores de produtividade adotadas por estágio de corte do canavial em 2022/2023 e 2042/2043.

Tabela 4. Detalhamento das premissas de produção no cenário de referência e no cenário 2042

Parâmetros Avaliados	2022	2042	var(%)
Produção de cana-de-açúcar (milhões t)	550,1	1.059,2	93%
Área cultivada (milhões ha)	8,58	8,58	
Produtividade (t de cana/hectare)	74,64	149,29	100%
18 meses	112,3	202,5	80%
12 meses	95,5	172,3	80%
2º corte	89,7	161,7	80%
3º corte	73,3	132,2	80%
4º corte	63,4	114,3	80%
5º corte	59,8	-	-
6º corte	63,4	-	-
Tecnologias			
Rendimento etanol hidratado eq. (l/t)	82.90	88.10	6%

Apesar da produtividade dobrar até 2042, a produção total apresenta um aumento de 92,54% devido as alterações na dinâmica produtiva, que passa a adotar 4 cortes ao invés de 6 cortes, ampliando a área de plantio no Centro-Sul. Além disso, considera-se uma adoção progressiva e linear da tecnologia de cana-de-açúcar geneticamente modificada (OGM) até o ano de 2042.

Apesar da área colhida apresentar uma redução de 7,37 milhões de hectares para 7,09 milhões de hectares, a produção total de cana aumenta de **550,1 milhões t** para **1.059,2 milhões t**. Isso evidencia que os ganhos estão vinculados à intensificação da produção sem expansão de área, reforçando a sustentabilidade do modelo simulado.

A premissa adotada assume que a tecnologia de sementes permitirá redução significativa nos custos de formação do canavial, permitindo, com isso, alteração no ponto ótimo de renovação da lavoura. Essa condição reduz a idade de renovação da lavoura e, como consequência, amplia produtividade média da área de colheita. Adicionalmente, a maior taxa de renovação do canavial garante a introdução de novas variedades mais produtivas de maneira acelerada, além de oferecer ganhos advindos da melhor sanidade das mudas no plantio.

4.2. Inputs Agrícolas e Industriais

Os inputs agrícolas e industriais projetados para 2042 apresentam ganhos significativos na eficiência do uso de insumos e no desempenho produtivo devido à adoção das tecnologias que impulsionam e protegem a produtividade, com redução nos consumos agrícolas e avanços nos rendimentos e eficiências industriais. A **Tabela 5** a seguir detalha os valores calculados para ambos os cenários, conforme metodologia descrita na seção anterior.

Tabela 5. Consumo de insumos agrícolas e rendimentos industriais no cenário de referência e no cenário 2042

Descrição	2022/2023	2042/2043
AGRÍCOLA		
Uso de corretivo		
Calcário (kg/t cana)	11.22	9.80
Gesso (kg/t cana)	4.91	4.62
Fertilizantes sintéticos		
Nitrogênio (kg N/t cana)	1.03	0.83
Fósforo (kg P2O5/t cana)	0.85	0.77
Potássio (kg K2O/t cana)	0.82	0.73
Uso de diesel		
Diesel (L/t cana)	4.06	3.32
INDÚSTRIA		
Etanol hidratado equivalente (L/t cana)	82.90	88.10
Energia elétrica exportada (Kwh/t cana)	38.71	64.00

Na etapa agrícola, se destacam as reduções de 12,7% no consumo de calcário, 19,4% no uso de nitrogênio (N) e 18,2% no consumo de diesel por tonelada de cana. Os parâmetros agrícolas adotados para o **cenário 2042** foram baseados em dados mais eficientes obtidos das bases atuais e referências científicas da Embrapa, conforme descrição anteriormente apresentada.

O **Box 1** apresenta as principais considerações relacionadas à adoção desses parâmetros no cenário futuro, abrangendo aspectos relacionados ao consumo de insumos agrícolas e o impacto na etapa de produção agrícola da cana-de-açúcar.

Box 1. Considerações sobre a Adoção de Parâmetros Otimizados para Modelagem de Emissões

- **Calcário:** A aplicação mais intensiva na correção inicial e na soqueira tende a melhorar a fertilidade do solo ao longo do tempo, permitindo uma redução gradual nas doses nas aplicações futuras.
- **Gesso:** O uso de doses maiores na correção inicial e na aplicação na soqueira contribui para a melhoria dos níveis de cálcio, magnésio e enxofre na subsuperfície do solo, promovendo uma menor necessidade de aplicação ao longo do tempo.
- **Nitrogênio:** A incorporação de plantas de cobertura, compostos orgânicos associados a ativadores biológicos contribui para o aumento do uso de fontes orgânicas de nitrogênio, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais.
- **Fósforo:** A modelagem prevê uma redução no uso de fontes minerais, impulsionada pelo aumento da aplicação de compostos orgânicos e bioestimulantes.
- **Potássio:** A maior aplicação de vinhaça localizada ou concentrada, o uso de compostos orgânicos, além da reciclagem de potássio por restos culturais e plantas de cobertura, contribui para a redução do uso de fertilizantes químicos.
- **Diesel:** A adoção de práticas de mínimo revolvimento do solo e o sistema de plantio com sementes de cana aumentam a eficiência operacional, resultando na redução do consumo de diesel nas operações agrícolas.

Na etapa **industrial**, o rendimento do etanol hidratado equivalente adotado prevê um aumento de 6,3%, além de uma ampliação substancial na exportação de energia elétrica. Em relação a esse último item, cabe destacar que o estudo não contemplou nenhuma análise econômico-financeira do mercado de energia elétrica. A ampliação na quantidade de energia elétrica adotada baseia-se na premissa de manter para 2042 os coeficientes industriais das empresas atualmente mais eficientes. Essa lógica garante uma indicação adequada do potencial de descarbonização, mas a consecução desse potencial obviamente dependerá das condições observadas nos mercados de etanol, de açúcar e de energia elétrica nos próximos anos.

4.3. Potencial de emissões evitadas em 2042

A partir dos parâmetros e premissas descritas anteriormente, os resultados do modelo indicam um potencial de aumento na eficiência produtiva e nas emissões evitadas do setor sucroenergético no

cenário 2042. Destacam-se o aumento de 129% no potencial de emissões evitadas por hectare cultivado e os avanços na produção de energia por unidade de área, conforme apresentado na **Tabela 6**.

A intensidade média de carbono do etanol para o setor como um todo apresenta um potencial de redução de 16,5%, passando de 22,2 gCO₂/MJ em 2022 para 18,5 gCO₂/MJ em 2042. Esta queda é atribuída, especialmente, às melhorias na eficiência do uso de diesel, fertilizantes e corretivos, combinadas ao aumento da produtividade, que dilui as emissões totais ao longo de uma maior produção de energia na área cultivada.

Na perspectiva de emissões evitadas anuais, os ganhos são expressivos. Considerando o cenário assumindo 100% da cana-de-açúcar destinada à fabricação de etanol e de bioeletricidade, as emissões evitadas aumentam de 77,96 milhões t CO₂ por ano para 178,5 milhões t CO₂, mais que dobrando em comparação com o período base.

Outro ponto de destaque é o aumento na energia útil gerada por hectare cultivado, que cresce 112,3%, alcançando 281,2 mil MJ/ha em 2042. Esse resultado é um reflexo direto da maior produção de biomassa e da melhoria no rendimento industrial, com ampliação da produção de etanol e de bioeletricidade por tonelada de cana.

Tabela 6. Comparativo entre os cenários 2022 e 2042

Descrição	2022/2023	2042/2043	var (abs)	Var (%)
DESCARBONIZAÇÃO ETANOL				
Intensidade de Carbono etanol (média) - gCO ₂ /MJ	22,2	18,5	-3,7	-16.5%
Nota Eficiência Energético Ambiental etanol (média) - gCO ₂ /MJ	65,2	68,9	3,7	5.6%
Emissão Evitada etanol (média) - kgCO ₂ /litro	1,42	1,5	0,1	5.7%
DESCARBONIZAÇÃO CANA-DE-AÇÚCAR				
Emissão Evitada cana-de-açúcar - kgCO ₂ /t de cana	141,72	168,6	26,9	19.0%
DESCARBONIZAÇÃO POR ÁREA				
Emissão Evitada por hectare cultivado - tCO ₂ /hectare	9,09	20,82	11,7	129.1%
PRODUÇÃO DE ENERGIA POR UNIDADE DE ÁREA				
Energia Útil Gerada por hectare cultivado - mil MJ/hectare	132,46	281,21	148,7	112.3%
POTENCIAL DE EMISSÃO EVITADA POR ANO				
Emissão Evitada por ano - assumindo 100% etanol (milhões t CO ₂)	77,96	178,58	100,6	129.1%
Emissão Evitada por ano - mix de produção atual (milhões t CO ₂)	46,06	109,6	63,5	137.9%

4.4. Receita com a descarbonização

O potencial de emissões evitadas no setor sucroenergético também deve se refletir no aumento da receita gerada por CBios. A **Tabela 7** apresenta os resultados da receita potencial para cada hectare direcionado exclusivamente à fabricação de etanol combustível, considerando o valor de R\$100,00 por título comercializado.

Tabela 7. Potencial receita com serviço de descarbonização assumindo uso integral da matéria-prima para a produção de etanol e bioeletricidade

Descrição	2022	2042	var(abs)	var(%)
Receita por hectare cultivado (R\$)	909	2.082	1.173	129,1%
Receita por hectare colhido (R\$)	1.058	2.517	1.459	137,9%

No **cenário 2042**, a receita por hectare cultivado tem o potencial de aumentar para R\$2.082, representando um crescimento de 129,1%. Vale mencionar que esses resultados estão sujeitos a variações de mercado, como alterações no preço de comercialização dos CBios, influenciadas por políticas públicas e pela demanda no mercado de carbono. Ademais, para efeito de comparação, o valor se refere a uma área em que a cana-de-açúcar é integralmente destinada à fabricação de etanol combustível.

Assim, é importante mencionar que o valor efetivamente recebido pelos produtores depende da proporção de biomassa elegível no programa RenovaBio e da quantidade de cana-de-açúcar utilizada para a produção de etanol combustível (a matéria-prima utilizada para a fabricação de etanol exportado, etanol destinado a outras finalidade e açúcar não gera créditos de descarbonização). Caso, por exemplo, apenas 50% da matéria-prima seja destinada à fabricação de etanol combustível, a receita em ambos os cenários deve ser reduzida na mesma proporção.

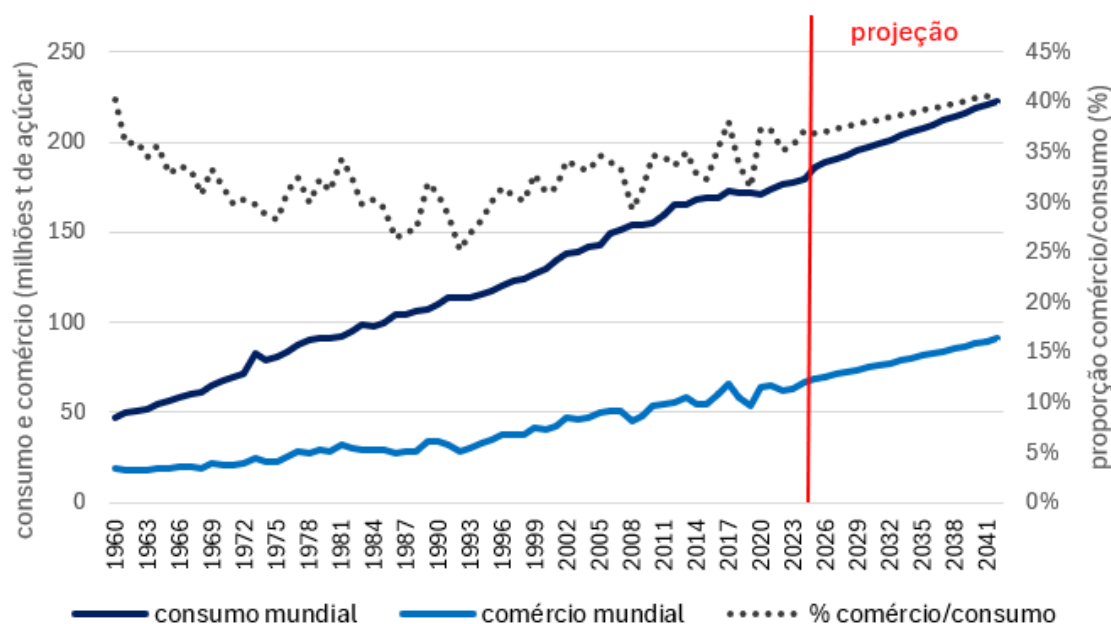
Isso posto, para permitir uma interpretação ampla e irrestrita dos resultados, os valores obtidos para a “receita de descarbonização por hectare” e para a “descarbonização total” promovida pelo setor no período 2022 a 2042 – tratado nos próximos tópicos desta próxima seção - foi construído uma simulação alternativa que não assume o uso integral da cana-de-açúcar para a produção de etanol combustível e eletricidade.

Nessa simulação, a proporção de cana-de-açúcar utilizada para a fabricação de açúcar (“mix de produção para açúcar”) foi calculada a partir dos dados da CONAB (2025) e UNICA (2025) no

cenário 2022. Para o **cenário 2042**, o mix de produção de açúcar foi definido considerando as seguintes premissas: i) Manutenção do consumo interno de açúcar; ii) Manutenção da tendência registrada nas últimas três décadas para o consumo e comércio mundial de açúcar; e, iii) consolidação do *market share* brasileiro no mercado internacional de açúcar, congelando a participação do País observada nas últimas 5 safras (cerca de 49%).

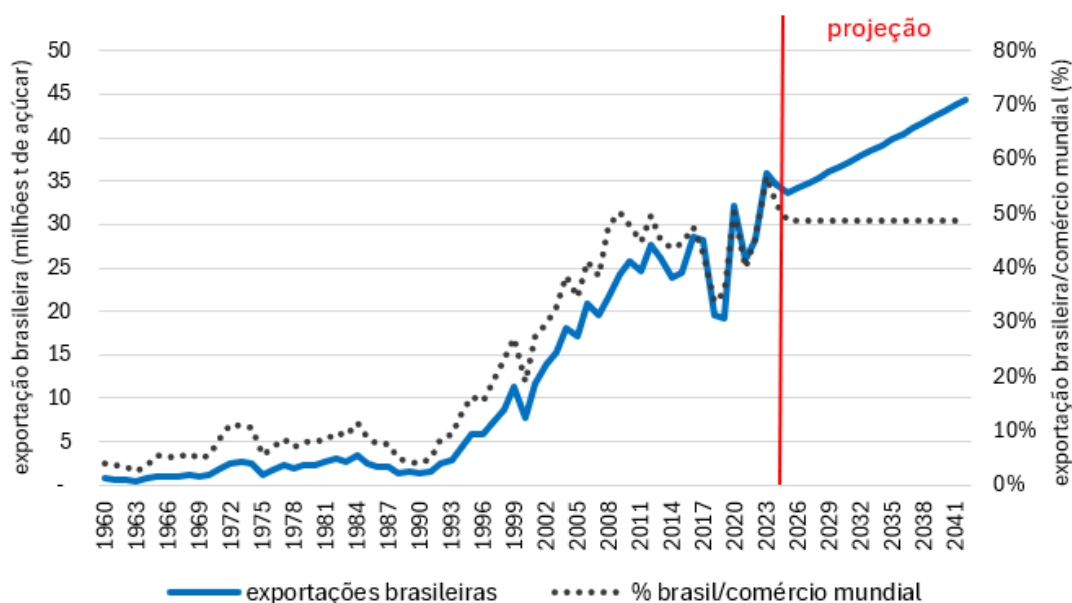
Os **Gráficos 1 e 2** a seguir retratam os valores obtidos para a produção estimada de açúcar em 2042 a partir das premissas anteriormente mencionadas.

Gráfico 1. Valores registrados e projeção para o consumo e comércio mundial de açúcar



Fonte: USDA Foreign Agricultural Service (2025) para valores registrados de 1960 a 2024. Projeção mantendo tendência observada a partir da década de 90 para valores a partir de 2025.

Gráfico 2. Valores registrados e projeção as exportações brasileiras de açúcar



Fonte: Elaborado a partir de dados da SECEX (2025) e USDA Foreign Agricultural Service (2025).

Nessa nova condição, a receita potencial para cada hectare cultivado R\$ 482 em 2022, saltando para 1.057 em 2042 (**Tabela 8**).

Tabela 8. Potencial receita com serviço de descarbonização considerando o mix de produção observado em 2022 e projetado para 2042

Descrição	2022 (mix observado)	2042 (mix projetado)*	var(abs)	var(%)
Receita por hectare cultivado (R\$)	482	874	393	81,5%
Receita por hectare colhido (R\$)	561	1.057	496	88,5%

Nota: * mix de produção projetado considera produção de açúcar necessária para manter a participação brasileira no mercado mundial

4.5. Potencial de descarbonização por tecnologia

Ao isolar as diferentes intervenções nos parâmetros do **cenário 2042**, é possível compreender a participação de cada tecnologia considerada no potencial de descarbonização analisado. A **Tabela 9** apresenta os ganhos incrementais de emissões evitadas associados a diferentes práticas e inovações tecnológicas no setor sucroenergético, estimados e projetados para o cenário de 2042. Neste cenário, o potencial total de emissões evitadas alcança **178,6 milhões t CO₂/ano**, mais que o dobro do valor estimado para a condição observada em 2022 (78 milhões t CO₂/ano).

O avanço se deve à combinação de ganhos de eficiência incremental e à adoção de tecnologias inovadoras. As principais contribuições incluem:

- **Eficiência industrial e exportação de energia elétrica:** a ampliação das eficiências de fermentação e destilação, bem como redução das perdas no processo industrial e o aumento da quantidade de energia elétrica exportada para níveis próximos das empresas mais eficientes do setor atualmente, correspondem a cerca de **10%** do ganho total de emissões evitadas, com um incremento de **9,8 milhões t CO₂/ano**.
- **Produtividade incremental e manejo:** o aumento do rendimento agrícola médio do setor para o patamar observado nas empresas mais eficientes da indústria atualmente viriam a partir do aperfeiçoamento do manejo da lavoura e os ganhos incrementais de produtividade, representando cerca de **13%** do ganho total de emissões evitadas, com um incremento de **12,6 milhões t CO₂/ano**.
- **Tecnologia de sementes:** contribui com ganhos adicionais de **29%**, somando **29,1 milhões tCO₂/ano**. O impacto está relacionado tanto à otimização da área cultivada quanto ao aumento da produtividade.
- **Melhorias genéticas:** apresentam a maior contribuição individual, respondendo por **36%** das emissões evitadas (**36,0 milhões t CO₂/ano**). Esse avanço está associado ao aumento do rendimento da cana-de-açúcar, impulsionado pelo uso de organismos geneticamente modificados (OGM) e pela adoção de tecnologias de melhoramento avançado, que permitem ganhos expressivos de produtividade em relação às variedades comerciais atualmente disponíveis no mercado.
- **Bioteχνologias (biotech):** representam **13%** do total, com um ganho de **12,9 milhões t CO₂/ano**. Essas tecnologias **reduzem perdas produtivas, aumentam a eficiência operacional e otimizam o uso de defensivos químicos**, contribuindo para maior estabilidade e previsibilidade na produção.

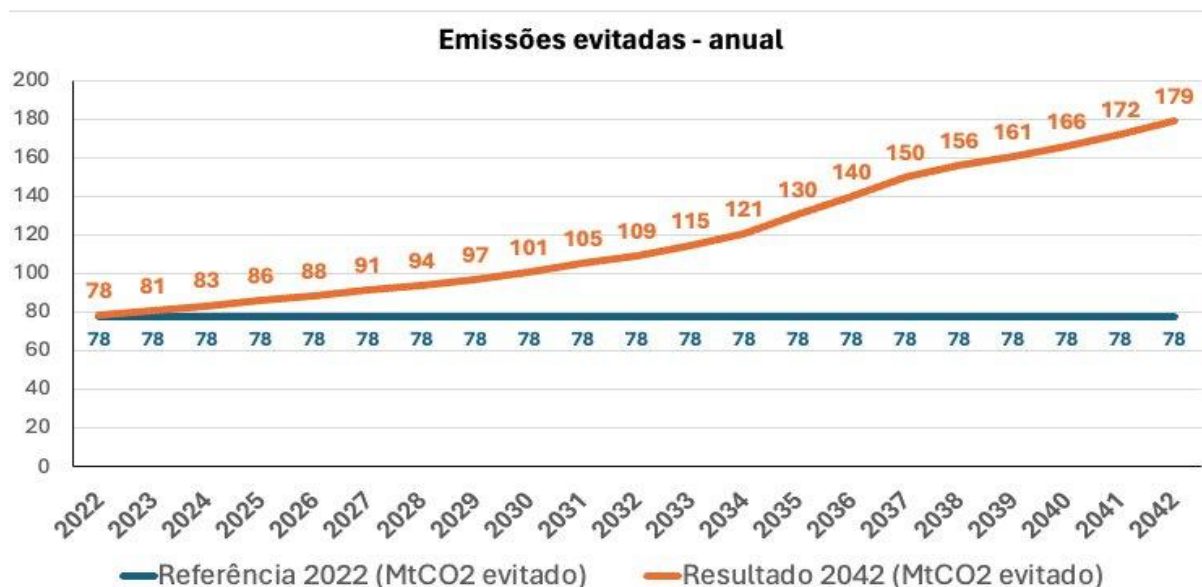
Tabela 9. Potencial de descarbonização por ano - detalhamento do efeito das tecnologias

Descrição	Emissão potencial evitada por ano (milhões tCO ₂)	Ganho de emissão evitada pela tecnologia (milhões tCO ₂ /ano)	Ganho de emissão evitada pela tecnologia (% sobre o total)
Potencial em 2022 - assumindo 100% etanol (milhões tCO₂)	78,0		
+ ganho de eficiência industrial + exportação de energia	87,9	9,9	9,8%
+ ganho de produtividade incremental + manejo na lavoura	100,5	12,6	12,6%
+ semente	129,6	29,1	28,9%
+ genética	165,6	36,0	35,8%
+ biotech	178,6	13,0	12,9%
Potencial em 2042 - assumindo 100% etanol (milhões t CO₂)	178,6		

4.6. *Potencial de emissões evitadas ao longo do período*

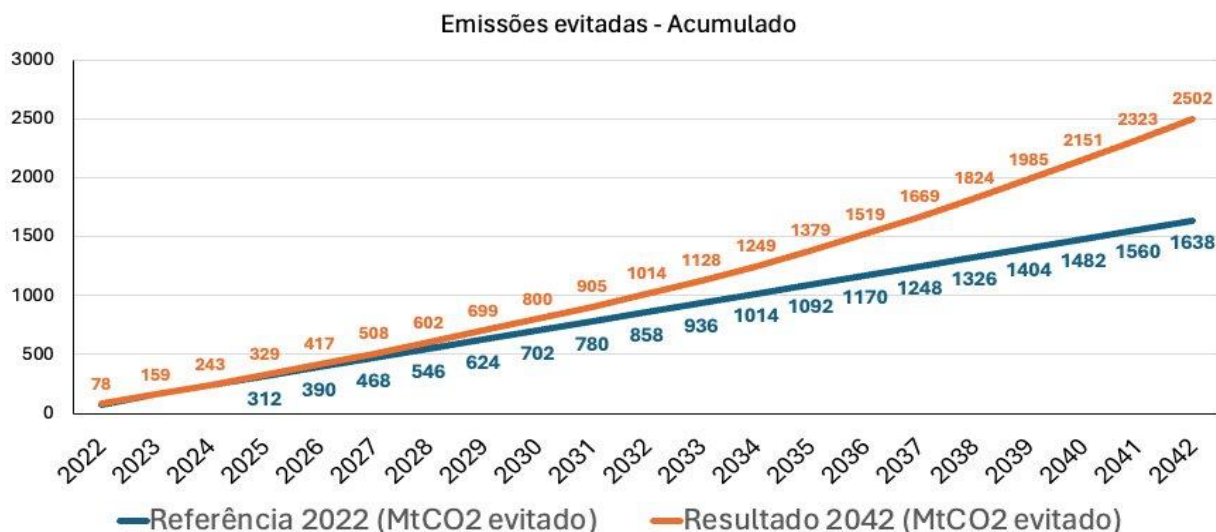
Ao avaliar o valor acumulado do potencial de descarbonização no setor sucroenergético do Centro-Sul, o **Gráfico 3** evidencia o crescimento progressivo de emissões evitadas ao longo do período entre 2022 e 2042, assumindo 100% da matéria prima destinada à produção de etanol combustível. O potencial de 78 milhões t CO₂/ano no ano de 2022 aumenta para 179 milhões t CO₂/ano em 2042, refletindo os avanços tecnológicos e as melhorias na eficiência produtiva assumidas para o **cenário 2042**.

Gráfico 3. Potencial de emissões evitadas anuais no período 2022-2042, assumindo 100% da matéria-prima destinada à produção de etanol combustível



O **Gráfico 4** apresenta a evolução acumulada das emissões evitadas no setor sucroenergético no período de 2022 e 2042, considerando cenário de referência e o cenário 2042. Observa-se que, no **cenário 2042**, há uma emissão evitada acumulada de 863,8 milhões de toneladas de CO₂ equivalente em comparação com o cenário de referência de 2022. Esse montante representa um impacto ambiental significativo, superando as emissões totais dos setores de Agropecuária, Resíduos e Processos Industriais no Brasil em 2023. Esses resultados destacam o potencial de papel estratégico do setor sucroenergético na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Gráfico 4. Potencial de emissões evitadas acumuladas no período 2022-2042, assumindo 100% da matéria-prima destinada à produção de etanol combustível



Por fim, o **Gráfico 5** detalha o crescimento progressivo de emissões evitadas até 2042, assumindo o mix de produção projetado para etanol combustível. Nesse caso, o potencial de 37 milhões t CO₂/ano no ano de 2022 aumenta para 104 milhões t CO₂/ano em 2042, refletindo os avanços tecnológicos para o **cenário 2042**.

O **Gráfico 6**, por sua vez, apresenta a evolução acumulada das emissões evitadas no setor sucroenergético no período de 2022 e 2042, considerando o mix de produção projeto para o final do período. Observa-se que, no **cenário 2042**, há uma emissão evitada acumulada de 678 milhões de toneladas de CO₂ equivalente em comparação com o **cenário de referência** de 2022.

Gráfico 5. Potencial de emissões evitadas anuais no período 2022-2042, considerando o mix de produção observado em 2022 e projetado para 2042

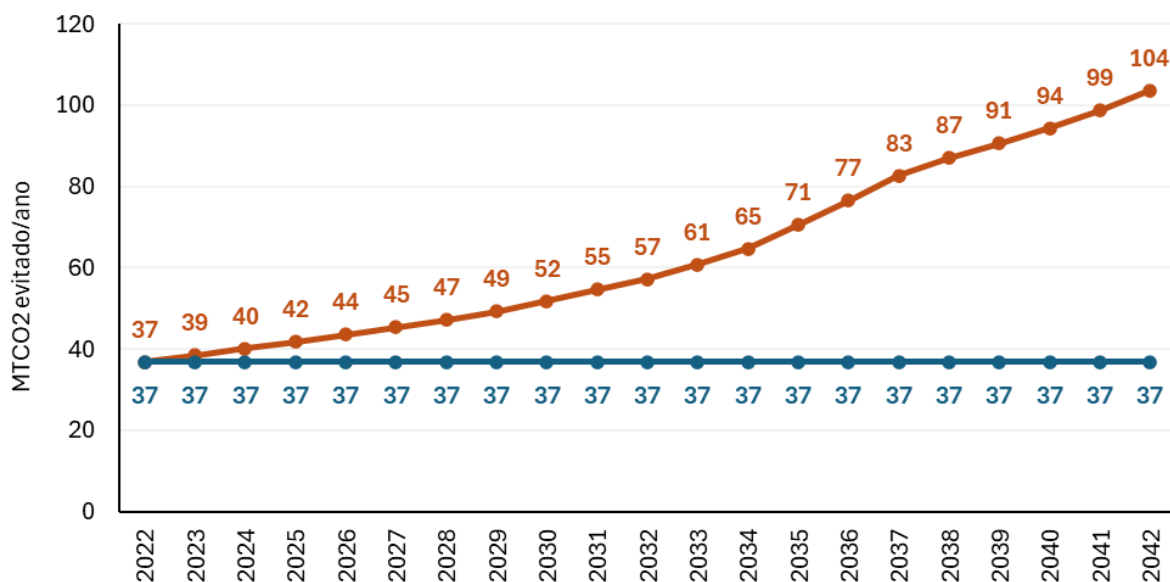
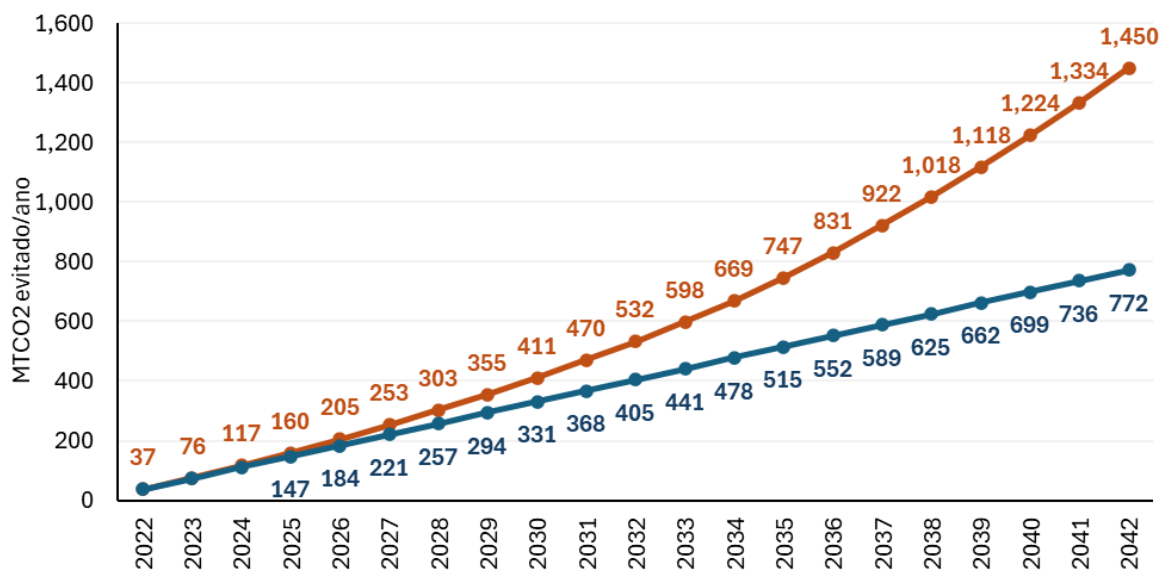


Gráfico 6. Potencial de emissões evitadas acumuladas no período 2022-2042, considerando o mix de produção observado em 2022 e projetado para 2042



4.7. *Potencial de remoção de carbono pelo solo - Considerações*

O aumento da produtividade da cana-de-açúcar resulta em uma maior quantidade de palhada depositada sobre o solo, o que influencia diretamente o ciclo do carbono no sistema de produção. A decomposição dessa biomassa aumenta as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, uma vez que os microrganismos do solo metabolizam a matéria orgânica, liberando carbono durante o processo. No entanto, esse aumento na palhada também desempenha um papel fundamental no aumento dos estoques de carbono do solo, além da proteção contra a erosão e na melhoria de sua estrutura física, contribuindo para a retenção de umidade e a redução da temperatura superficial.

O maior acúmulo de carbono orgânico no solo ao longo do tempo, resulta em uma maior taxa de sequestro de carbono. Esse efeito pode compensar as emissões iniciais geradas pela decomposição da biomassa, criando um balanço positivo para a sustentabilidade ambiental da cultura. Além disso, práticas adequadas de manejo podem minimizar as emissões, propiciando uma maior fixação de carbono e a manutenção da fertilidade do solo.

Diversos estudos têm evidenciado que o aumento do estoque de carbono no solo pode ocorrer devido a adição de palhada e ao incremento da produtividade dos canaviais. No entanto, esses estudos são conduzidos em ambientes produtivos distintos, caracterizados por diferentes tipos de solo, condições climáticas e práticas de manejo. Essa variabilidade impõe desafios significativos à definição de um monitoramento preciso e universal que permita quantificar, com exatidão, o aumento do carbono no solo resultante da intensificação produtiva da cana-de-açúcar. A falta de uniformidade nas condições de cultivo torna difícil a extrapolação dos resultados, exigindo abordagens regionais específicas e metodologias padronizadas para garantir a confiabilidade das estimativas de sequestro de carbono.

Portanto, o aumento da produtividade da cana-de-açúcar também representa uma oportunidade para melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade da produção por meio do sequestro de carbono a longo prazo. Recomenda-se que sejam realizados estudos e monitoramentos contínuos voltados ao estabelecimento de padrões e coeficientes de remoção de carbono no solo. Esse avanço é essencial para conferir maior robustez e confiabilidade às quantificações dos impactos do aumento de produtividade sobre o acúmulo de carbono no solo, permitindo uma mensuração mais precisa e embasada, além de contribuir para a formulação de políticas e estratégias sustentáveis para o setor.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo mensurou o impacto da intensificação produtiva do setor sucroenergético e da adoção das novas tecnologias em desenvolvimento pelo Centro de Tecnologia Canavieira na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e na otimização do uso de recursos naturais até 2042. A combinação de ganhos de produtividade agrícola, eficiência industrial e adoção de tecnologias atesta o potencial do setor em contribuir de maneira substancial para as metas climáticas nacionais e globais.

O estudo parte da premissa adotada pelo cliente de ampliar a produtividade média da cana-de-açúcar no Centro-Sul brasileiro de **74,6 t/ha** em 2022/2023 para **149,3 t/ha** em 2042/2043. Esse aumento é viabilizado pela implementação de tecnologias de manejo aprimorado, adoção do plantio por sementes, melhoramento genético e inovações biotecnológicas, sem necessidade de expansão da área cultivada. Nesse contexto, a produção total de cana-de-açúcar atingiria **1,059 bilhão de toneladas** em 2042, consolidando o papel estratégico do setor na oferta de energia renovável e sustentável.

A análise dos **inputs agrícolas** buscou compreender os impactos do aumento da produtividade frente ao consumo, com destaque para a redução no uso de diesel (**18,2%**) e fertilizantes sintéticos como nitrogênio (**19,4%**). Esses ganhos não apenas reduzem os custos de produção, mas também minimizam as emissões associadas às práticas agrícolas, reforçando a sustentabilidade ambiental do modelo projetado.

No âmbito industrial, o rendimento de etanol hidratado apresentou incremento de **6,3%**, passando de **82,9 L/t cana** para **88,1 L/t cana**, considerando que, até o ano de 2042 será observado um aumento tecnológico da operação, assim, valores baseados em usinas de alta eficiência (quartil 20%).

O impacto na descarbonização é um dos resultados mais relevantes deste estudo. O potencial de emissões evitadas foi ampliado em **129%**, alcançando **178,6 milhões t CO₂/ano** em 2042. Esse ganho é atribuído, principalmente, à ampliação das eficiências industriais (**10%**), ao manejo mais eficiente e à manutenção dos ganhos incrementais de produtividade (**13%**), ao uso de sementes (**29%**) e às tecnologias genéticas e biotecnológicas, que, juntas, representam **49%** do ganho total. A redução na **intensidade média de carbono** do etanol no Centro-Sul, de **22,2 gCO₂/MJ** para **18,5**

gCO₂/MJ, reforça a posição do setor como uma das alternativas mais eficazes para a transição energética e a mitigação das mudanças climáticas.

Além dos benefícios ambientais, o estudo evidenciou o valor econômico da descarbonização, com a receita proveniente do serviço de descarbonização (CBios) apresentando um crescimento superior a **100%** por hectare. Esse resultado destaca o potencial do setor sucroenergético para atrair investimentos e fortalecer sua competitividade no mercado global de créditos de carbono.

Em síntese, este estudo evidencia que o setor sucroenergético brasileiro, ao adotar tecnologias avançadas e práticas agrícolas sustentáveis, possui um papel central na transição para uma economia de baixo carbono. A intensificação produtiva, aliada à redução de emissões e ao aumento da eficiência energética, reforça a capacidade do setor em contribuir para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris, promovendo ao mesmo tempo ganhos econômicos, ambientais e sociais. Este cenário projeta um futuro no qual a cana-de-açúcar continuará sendo um vetor essencial para a sustentabilidade e inovação no Brasil e no mundo.

Por fim, cabe mencionar que o impacto econômico, energético e ambiental estimado neste estudo pode ser ampliado nos próximos anos com a ampliação da produção de biogás e biometano, o uso de sistemas de captura de armazenamento de carbono e a comercialização de novos títulos para valorização do atributo ambiental da bioenergia – caso dos certificados de garantia de origem de biometano (CJOB) e do mercado regulado de carbono em implementação no País. O aperfeiçoamento e compreensão plena da dinâmica de armazenamento de carbono no solo em decorrência do aumento da palhada de cana-de-açúcar deixada no campo também apresenta potencial para ampliar os impactos estimados na presente análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Relatório Anual RenovaBio. Brasília: ANP, 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2024.

BRASIL. Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2024.

EMBRAPA. Sustentabilidade na produção sucroenergética: avanços e desafios. Brasília: EMBRAPA, 2022. Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acesso em: 15 dez. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2024 – Ano base 2023: Síntese do Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 12 jan. 2025.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV ENERGIA). Eficiência Energética e Sustentabilidade no RenovaBio. São Paulo: FGV Energia, 2022.

GURGEL, A.; VALENTE, F.; MATOS, S. Eficiência Energética e Ambiental no Setor Sucroenergético Brasileiro. São Paulo: FGV Energia, 2023.

RAMOS, Nilza Patrícia; MENDES, Natalia Crespo; FOLEGATTI, Marília I. da Silveira; BAYMA, Gustavo; NOVAES, Renan M. L.; MORANDI, Marcelo A. Boechat; PIGHINELLI, Anna Letícia M. T.; SAVIOLI, José Paulo P. das Dores; BUFFON, Vinícius Bofe. Regionalização dos perfis “típicos” da produção de cana-de-açúcar para uso no RenovaBio. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2024.

MOTTA, Beatriz Bignardi Vieira da. Emissões e eficiência energética na indústria de etanol. 2024. 63 f. Dissertação (Mestrado) – FGV. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/20670960-b42c-4626-a10f-c966a132567e>.

