

Nota Técnica



Sorgo granífero como matéria-prima para uso em rotas de etanol na RenovaCalc

Nilza Patrícia Ramos¹
Alexandre Ferreira da Silva²
Vinícius Gonçalves Maciel¹
Ciro A. de Souza Magalhães²
Arystides Resende Silva²
Priscila S. Sabaini¹
Anna Letícia M. T. Pighinelli¹
Maria Lúcia F. Simeone²
José Paulo P.D. Savioli
Marília I. da Silveira Folegatti¹

¹Embrapa Meio Ambiente, ²Embrapa Milho e Sorgo



EQUIPE

Desenvolvimento técnico científico

Nilza Patrícia Ramos¹
Alexandre Ferreira da Silva²
Vinícius Gonçalves Maciel¹
Ciro A. de Souza Magalhães²
Arystides Resende Silva²
Priscila S. Sabaini¹
Anna Letícia M. T. Pighinelli¹
Maria Lúcia F. Simeone²
José Paulo P.D. Savioli
Marília I. da Silveira Folegatti¹

¹Embrapa Meio Ambiente, ²Embrapa Milho e Sorgo

Validação e apoio técnico

Aildson P. Duarte - Instituto Agronômico de Campinas
Álvaro Vilela Resende – Embrapa Milho e Sorgo
Cícero Beserra de Menezes – Embrapa Milho e Sorgo
Daniel Shuck – Agrícola Alvorada
Flávio Dessaune Tardin – Embrapa Milho e Sorgo
Fredson Ferreira Chaves – Embrapa Milho e Sorgo
Gessi Ceccon – Embrapa Agropecuária Oeste
Isabela Volpi Furtini – Embrapa Milho e Sorgo
Jurandir Segundo – Helix Sementes e Mudas
Leonardo Melo Pereira da Rocha – Embrapa Milho e Sorgo
Matheus Azevedo Prado – COMIGO
Max Eduardo Rodrigues Pereira – Max Sementes
Nilvan Gomes – Evoterra Consultoria Agronômica
Pedro Lima – Advanta Seeds
Steben Crestani – Nuseeds
Vicente de Paulo Campos Godinho – Embrapa Rondônia



Lista de Acrônimos

- ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
AF – Agri-footprint
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BA – Bahia
BR – Brasil / Representatividade brasileira em bases de dados
CBIO – Crédito de Descarbonização
CH₄ – Metano
CO₂eq – Dióxido de Carbono equivalente
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
CV – Cavalos-vapor (contexto agrícola)
DAP – Fosfato Diamônio
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EM1G – Etanol de Milho de Primeira Geração
EUA – Estados Unidos da América
FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio
GEE – Gases de Efeito Estufa
GLO – Global Average (representatividade territorial em bases de dados)
GREET – Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation
IC – Intensidade de Carbono
ICV – Inventário do Ciclo de Vida
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO – International Organization for Standardization
K₂O – Óxido de Potássio
LCA – Life Cycle Assessment
LUC – Land Use Change / Mudança de Uso da Terra
MAP – Fosfato Monoamônico
MA/PI – Maranhão e Piauí
MG – Minas Gerais
MME – Ministério de Minas e Energia
MS – Mato Grosso do Sul
MT – Mato Grosso
N₂O – Óxido Nitroso
NEEA – Nota de Eficiência Energético-Ambiental



NPK – Mistura de Nitrogênio, Fósforo e Potássio

OGM – Organismo Geneticamente Modificado

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo

RFA – Renewable Fuels Association

RNB – RenovaBio

RoW – Rest of the World (representatividade territorial em bases de dados)

SP – São Paulo

SI – Sistema Internacional de Unidades

t – Tonelada

UF – Unidade da Federação

UR – Unidade de Referência

Sumário

1	<i>Introdução.....</i>	6
2	<i>Sorgo granífero como biomassa para etanol de 1^a geração</i>	9
2.1	Mercado aparente de etanol no Brasil.....	9
2.2	Maturidade tecnológica e organização da cadeia produtiva.....	12
2.3	Descrição do processo de produção agrícola do sorgo granífero	15
2.4	Inventário de ciclo de vida referentes à produção do sorgo granífero e do etanol derivado, disponível em bases públicas.....	17
3	<i>Estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV).</i>	20
3.1	Metodologia	21
a)	Identificação das principais áreas de produção e do sistema agrícola	21
c)	Processamento e ajustes de parâmetros para uso em ICVs.....	22
d)	Validação dos parâmetros agrícolas com especialistas	23
3.2	Determinação da intensidade de carbono (IC) regionalizada.....	24
e)	Análise comparativa entre estados.....	25
f)	Alinhamento com as premissas da política RenovaBio	25
3.2.	Resultados e Discussão	26
3.3.	Conclusão.....	34
4	<i>Alterações na RenovaCalc</i>	35
5	<i>Considerações Finais</i>	36
6	<i>Referências.....</i>	38

1 Introdução

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) foi instituída pela Lei nº 13.576/2017 (BRASIL, 2017) com o objetivo de estimular a produção e o consumo de biocombustíveis com padrões de sustentabilidade, que promovam a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e contribuam para o cumprimento dos compromissos climáticos assumidos pelo Brasil em fóruns internacionais (MME, 2018). As metas acordadas são de redução de 37% e 50% das emissões até 2025 e 2050, respectivamente, em relação aos níveis nacionais de 2005 (BRASIL, 2022), para todos os setores da economia brasileira, exigindo várias estratégias de mitigação, inclusive a ampliação da participação de fontes renováveis para até 45%, na matriz energética brasileira.

A lógica de funcionamento da Política envolve três eixos estratégicos: 1) o estabelecimento de metas de descarbonização a serem adotadas pelas distribuidoras de combustíveis, 2) a certificação da produção de biocombustíveis, quanto à sua eficiência energético-ambiental e 3) a “premiação” dos biocombustíveis eficientes, com créditos de descarbonização (CBIOs) (Figura 1). Estes créditos são comercializados em mercado financeiro e geram renda adicional aos produtores de biocombustíveis certificados (ANP, 2018).

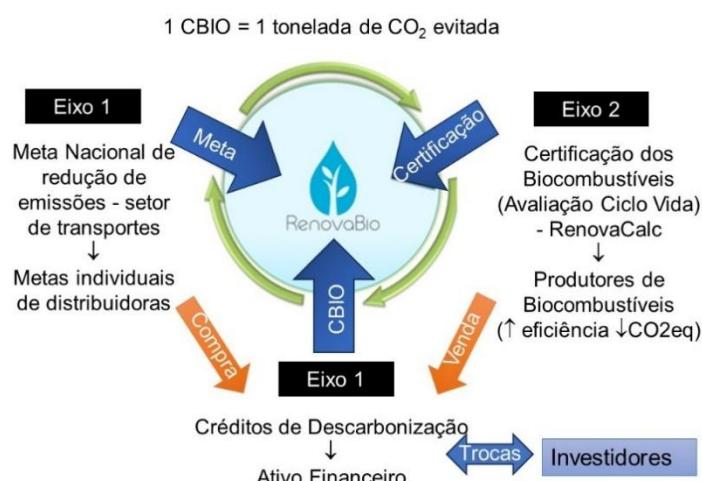


Figura 1. Lógica de funcionamento da política RenovaBio, considerando metas, certificação e comercialização de créditos de descarbonização (CBIO). Adaptado de MME (2018).

Atualmente, os biocombustíveis certificados no RenovaBio são o etanol (de primeira e segunda geração de cana-de-açúcar e milho), o biodiesel e o biometano. O bioquerosene de aviação, a partir de soja, também possui uma rota, mas ainda não

existem unidades produtoras no país. Estes combustíveis podem ser certificados ao passarem por uma primeira etapa de verificação da elegibilidade da matéria-prima energética (biomassa), para alinhamento com as leis ambientais brasileiras, especialmente com o Código Florestal e, depois, uma segunda etapa de contabilidade da nota de eficiência energético-ambiental (NEEA), realizada na ferramenta RenovaCalc (Matsuura et al., 2018; Pereira et al, 2025). A combinação entre a elegibilidade e a NEEA determina o fator para emissão de CBIOs ($t\ CO_{2eq}/MJ$) e posterior comercialização em bolsa de valores.



Figura 2. Processo de certificação na política RenovaBio, considerando a elegibilidade da matéria-prima e a intensidade de carbono do biocombustível, na lógica da Avaliação do Ciclo de Vida.

A biomassa elegível deve ser produzida em imóvel com Cadastro Ambiental Rural (CAR) ativo ou pendente e é vedada a utilização de áreas com supressão de vegetação nativa após novembro de 2018, data da publicação da Resolução ANP nº 758/2018, que regula a RenovaBio (ANP, 2018). Esse mecanismo atua como instrumento de gestão de risco, prevenindo a expansão da produção de biomassa sobre áreas de vegetação nativa e evitando emissões associadas à mudança do uso da terra (MUT). Assim, a geração de CBIOs é diretamente vinculada ao uso sustentável do solo.

A metodologia de cálculo da NEEA, na RenovaCalc, envolve a determinação da intensidade de carbono (IC) dos biocombustíveis na lógica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos, conforme as normas ISO 14040:2006 (ISO, 2006a), ISO 14044:2006(ISO, 2006b) e ISO 14067:2018 (ISO, 2018). São consideradas as intensidades de carbono (IC) dos insumos (incluindo combustíveis e eletricidade), vindos de uma base de dados robusta, associadas à contabilidade vindas das

operações de campo, indústria e distribuição, com estruturas de preenchimento específicas para cada etapa (Figura 2).

A RenovaCalc é atualizada ao longo do tempo, com modificações em bancos de dados, fatores, metodologias e mesmo com a identificação de oportunidade de inserção de novos insumos, matérias-primas e rotas de biocombustíveis. O objetivo é promover melhorias, facilitar a declaração de dados, por parte dos usuários da ferramenta, e ampliar a participação de biocombustíveis na política.

As atualizações estão respaldadas na resolução ANP 984/2025 (ANP, 2025a), que regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis, onde são indicadas possibilidade de inclusão de novas rotas e de adequação dos parâmetros de cálculo da intensidade de carbono dos biocombustíveis vigentes. Entre os vários aspectos, há indicação de envio de um estudo detalhado, com dados abertos, contendo: a) informações sobre o mercado do biocombustível envolvido, sobre a maturidade da tecnologia e o grau de organização da cadeia produtiva; b) descrição detalhada do processo produtivo do insumo, matéria-prima ou rota a ser incluída, com respectivo desempenho técnico do biocombustível; e c) informações sobre as diferenças em relação às rotas já publicadas. A documentação deve conter também o estudo completo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de acordo com os requisitos metodológicos da RenovaCalc, explicitando as fontes de informação, as premissas, as limitações, o conjunto de dados dos processos produtivos agrícola e industrial e a memória de cálculo. Também se faz necessária a entrega de uma revisão crítica, emitida por terceira parte, do estudo de que trata o inciso II, conforme a norma ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.

Nos últimos anos, estimulado pela RenovaBio, o etanol produzido a partir de milho aumentou substancialmente no Brasil com consequente impacto direto na produção agrícola deste grão (CONAB, 2025). Isto gerou interesse dos produtores deste biocombustível utilizarem outras biomassas, entre elas o sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench). Entretanto, para a certificação do biocombustível gerado a partir do sorgo granífero no RenovaBio, há necessidade da inserção do ferramental de cálculo envolvido em sua produção na RenovaCalc. Como descrito anteriormente, isto exige um estudo envolvendo os itens solicitados na resolução ANP 984/2025 (ANP, 2025a). Para isto, foi elaborado o presente trabalho, que traz informações a respeito do mercado aparente de etanol biocombustível gerado a partir de sorgo granífero, bem como uma revisão a respeito da maturidade tecnológica e o grau de organização da cadeia produtiva desta biomassa, com a descrição detalhada do processo agrícola e seu

respectivo desempenho produtivo e ambiental, sendo este último associado à intensidade de carbono de sua produção, determinada na lógica do ciclo de vida.

2 Sorgo granífero como biomassa para etanol de 1^a geração

2.1 Mercado aparente de etanol no Brasil.

O mercado global de etanol está em crescimento robusto e contínuo, com um valor bruto avaliado em US\$ 83,4 bilhões, em 2023, e projeção de atingir US\$ 114,7 bilhões até 2028. Isto representa uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de aproximadamente 6,6%, impulsionada pelo uso nas indústrias farmacêutica, cosmética e de bebidas alcoólicas, mas principalmente como biocombustível (Bioethanol Market, 2025). No Brasil, este produto tem participação significativa na matriz de transporte, tanto na forma de biocombustível hidratado (uso direto nos motores leves), como anidro (EPE, 2023), sendo este último adicionado em mistura com a gasolina, em concentrações variáveis (18-35%), autorizadas pela Lei Combustível do Futuro – no 14.993/24 (Brasil, 2024).

A produção de etanol combustível se baseia em várias biomassas, como cana-de-açúcar, beterraba, milho, sorgo, trigo, entre outras, que possibilitem o processo fermentativo (Tse et al, 2021). No Brasil, há predomínio do uso da cana-de-açúcar (Figura 3), mas com participação crescente do milho (CONAB, 2025), enquanto na Europa se usa essencialmente beterraba (USDA, 2025) e nos Estados Unidos o etanol de milho com predomina com participação tímida do sorgo granífero (RFA, 2024).

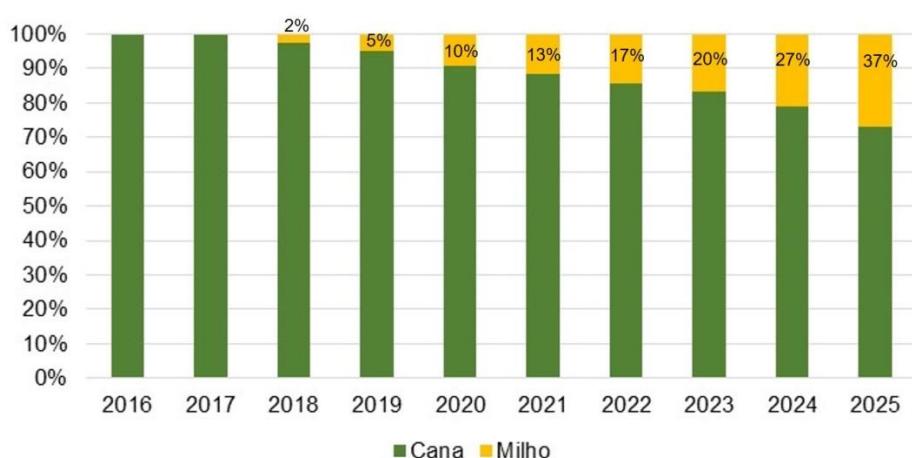


Figura 3. Evolução da participação das biomassas cana-de-açúcar e milho, na produção de etanol combustível no Brasil Adaptado de CONAB (2025).

O crescimento na produção do etanol de milho brasileiro é recente (Figura 3), impulsionado pelos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, que juntos responderam por 97% deste biocombustível, em 2024 (Figura 4). As unidades produtoras também se concentram nesta região, com 20 das 24 biorrefinarias operantes, instaladas nestes estados (Figura 5). Este cenário não deve se modificar no curto prazo, considerando que de 16 novas unidades com autorização de funcionamento junto à Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), apenas 9 estão programadas para outras regiões do país.

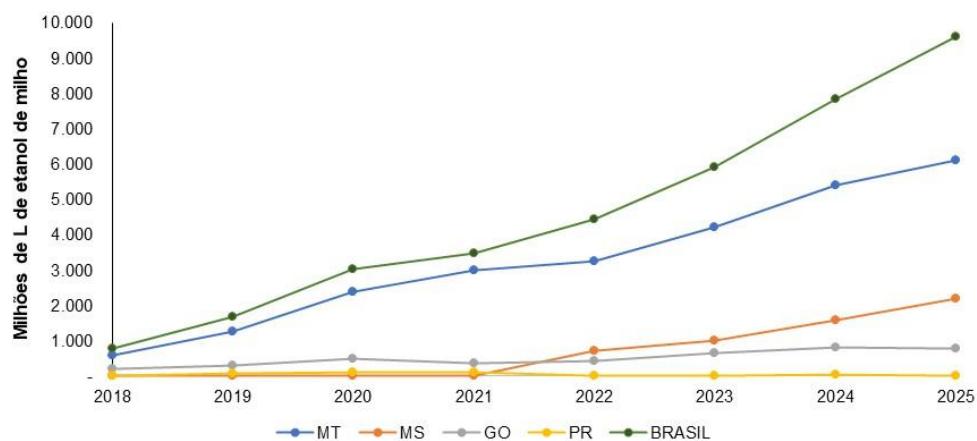


Figura 4. Produção de etanol de milho nos principais estados produtores no Brasil (Adaptado de CONAB, 2025).

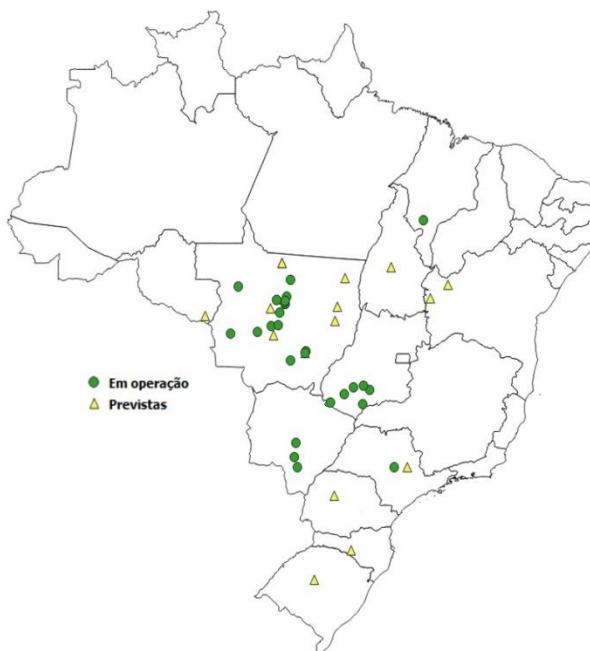


Figura 5. Localização das unidades de produção de etanol de milho em operação (andamento) e outras autorizadas para funcionamento no curto prazo no Brasil (ANP, 2025b).

A concentração das unidades produtivas de etanol de milho na região Centro-Oeste do Brasil está alinhada com a proximidade na produção deste grão; considerando que, na última década, Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul entregaram juntos 56% do total de milho gerado no país (CONAB, 2025). Esta predominância regional e com o foco em apenas uma matéria-prima (milho), ao mesmo tempo que aumenta o grau de tecnificação e organização da cadeia produtiva, acendeu o alerta para os riscos voltados à falta de biomassa por quebra de produtividade agrícola ou pelo aproveitamento do milho para outros fins, economicamente mais competitivos que o uso para biocombustível.

O exposto até o momento confirma a pujança do etanol de milho na matriz energética brasileira. Isso, combinado com o planejamento de quase dobrar o número de unidades produtoras deste biocombustível (funcionamento previsto), no curto prazo, justificam a busca por biomassas que complementem o milho no Brasil, principalmente, em regiões com condições edafoclimáticas mais desafiadoras, como o Maranhão, Tocantins e mesmo Piauí. Neste sentido, o interesse pelo sorgo granífero tem se destacado, tanto voltado para recomendações técnicas de produção em campo, como para avaliação de desempenho ambiental e uso industrial.

A similaridade da composição dos grãos e do processamento industrial para a geração de biocombustível, entre milho e sorgo granífero, (Kunze, 2009; Hung et al., 2017; Zhang et al, 2025) confirma a oportunidade mais segura de uso de misturas (blends) nas unidades produtivas de etanol, sem necessidade de linhas exclusivas para cada matéria-prima. Isto também significa que as indústrias de etanol de milho, em operação, podem utilizar imediatamente grãos de milho ou de sorgo granífero, sem ajustes tecnológicos expressivos (Barcelos et al. 2011), com rendimento final de etanol competitivos. Cabe destacar que as unidades produtoras de etanol de milho de primeira geração (EM1G) americanas já utilizam o sorgo granífero em suas rotas, sem mudanças de processamento entre os dois cereais (Sorghum Checkoff, 2025), confirmando a viabilidade desta matéria-prima.

O relato anterior permite afirmar que existe mercado potencial para a entrada do sorgo granífero como mais uma matéria-prima usada na produção de etanol no Brasil, sem competição direta com o milho ou com cana-de-açúcar. A previsão de dobrar o número de biorrefinarias, no curto prazo, exigirá maior volume de matéria-prima, inclusive em regiões com maiores restrições edafoclimáticas, onde o milho enfrenta maiores riscos de frustação de safra.

2.2 Maturidade tecnológica e organização da cadeia produtiva.

A maturidade tecnológica na produção do etanol de 1^a geração de sorgo granífero está avançada e pronta para uso comercial em escala, considerando a sua similaridade com a tecnologia utilizada para o milho. As etapas industriais (Figura 6) são praticamente as mesmas, com moagem dos grãos, a hidrólise enzimática envolvendo a liquefação e sacarificação, onde o amido é convertido em açúcares fermentáveis, seguidos das etapas de fermentação alcoólica e destilação para obtenção do etanol hidratado, depois desidratação até a opção anidro (Hung et al., 2017; Kunze, 2009).

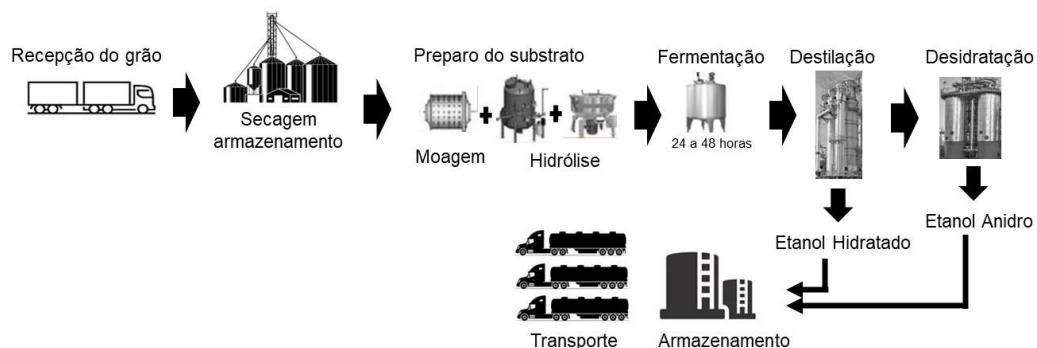


Figura 6. Esquema simplificado das etapas de processamento de matéria-prima em uma unidade produtora de etanol a partir de grãos (Adaptado de Milanez et al., 2014).

As poucas diferenças entre o uso de milho e sorgo granífero estão relacionadas ao rendimento final de biocombustível e geração de coprodutos e subprodutos, como por exemplo a não recuperação de óleo técnico quando se usa sorgo (Tabela 1). Isto não interfere no processamento industrial desta matéria-prima, uma vez que a composição média de amido do grão de sorgo varia entre 64% e 74%, em base seca (Szambelan et al., 2020), uma faixa próxima à observada no milho (65% a 75%, em base seca, segundo Kumar & Singh, 2016), permitindo o compartilhamento dos mesmos processos de moagem, liquefação, sacarificação e fermentação empregados nas usinas de etanol de milho instaladas (Hung et al., 2017; Kunze, 2009).

Quanto ao teor de óleo, a concentração encontrada no grão de sorgo oscila entre 1 e 3%, mas está localizada no pericarpo (farelo), o que dificulta sua recuperação no processo industrial, enquanto no milho os valores variam entre 3 e 5%, concentrados no gérmen, facilitando a extração na moagem a seco (Zhao et. al., 2022). Diante dessa dificuldade as usinas americanas passaram a realizar a extração do óleo de sorgo a partir do DGS (Distillers Grains with Solubles - grãos de destilaria com solúveis) e, em 2018 a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA, qualificou o óleo de sorgo como matéria-prima elegível para a produção de biocombustíveis avançados e

diesel à base de biomassa, de acordo com o padrão de combustível renovável (EPA, 2018).

Tabela 1. Rendimento médio de produtos, coprodutos e subprodutos a partir do processamento de grãos de milho e sorgo, em usina de etanol de primeira geração, sendo DDG – Dried Distiller Grains.

Matéria-prima	Amido ¹ (%)	Etanol ² (L/t grão)	DDG (kg/t grão)	Óleo técnico (L/t grão)
Milho	65-75	380 - 440 ²	212 ²	17-22 ²
Sorgo granífero	64-74	360 - 410 ³	328 ³	11 ⁴

¹ Valores obtidos a partir de Hung et al., 2017; Kunze, 2009; Kumar & Singh (2016); Szambelan et al., 2020,

² Valores obtidos de Kumar & Singh (2016) e <https://etanoldemilho.com.br/produtos/> (UNEM, 2025).

³ Valores obtidos de Kumar & Singh (2016) e <http://www.sorghumcheckoff.com/market-opportunities/renewables/>

⁴ Óleo obtido a partir do DGS de sorgo segundo Renewable Fuel Standard Program: Grain Sorghum Oil Pathway, EPA, 2018

A diferença mais favorável de rendimento de etanol para o milho, não traz prejuízos competitivos significativos para o sorgo, considerando que este último possui menor valor econômico de mercado (Agrolink, 2025). Assumiu-se que o uso de energia e o inventário químico do etanol de sorgo granífero são os mesmos que os do etanol de milho, dadas as similaridades entre os dois grãos e o fato de que ambos podem ser processados juntos (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2025). Os demais materiais, como a produção de DDG Dried Distillers Grains - grão seco de destilaria) e/ou DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles), apresentam algumas diferenças entre as culturas e ambas são aceitas e comercializadas para alimentação animal (EPA, 2018; Ronda et al., 2019; Li et al., 2022).

Com relação ao consumo médio de insumos na etapa industrial de produção de etanol de sorgo granífero, os parâmetros também não diferem dos utilizados para o processamento do milho. Na RenovaCalc os valores adotados são: ácido sulfúrico (0,91 kg/t de grãos), enzimas (0,57 kg/t de grãos), hidróxido de sódio (0,33 kg/t de grãos), levedura (0,001 kg/t de grãos), amônia (0,73 kg/t de grãos), conforme (Matsuura et al, 2018).

A sinergia tecnológica descrita acima, corrobora para a inclusão rápida do sorgo granífero no portfólio de matérias-primas a serem processadas em unidades de produção de etanol de milho. Esta inclusão se beneficia do compartilhamento de infraestrutura industrial instalada, uso de insumos, mão de obra qualificada e recomendações técnicas de processo.

Outro ponto de maturidade consolidada é da etapa de produção agrícola da matéria-prima sorgo granífero. O histórico de cultivo é confirmado por extensa literatura, que envolve recomendações técnicas de produção desde 1982 (Embrapa, 1982) até os tempos atuais (Borém, et al., 2014). Isto inclui disponibilidade de material genético

adaptado à diferentes regiões; práticas de plantio, adubação, controle fitossanitário ajustado, além de logística de processamento e escoamento bem organizada, principalmente voltadas para a alimentação animal, com seus grãos negociados em mercados estruturados.

O grão de sorgo é classificado como commodity, com área de cultivo mundial de cerca de 39,9 milhões de hectares e produção de 62,3 milhões de toneladas, em 2023, com o Brasil ocupando a 4^a posição, entregando 8% desse total de grãos, cultivados em 1,3 milhões de hectares, na mesma safra (FAOSTAT, 2025). Olhando para dentro do país, a média de produção nas últimas safras (2021/2022/2023) foi de 3,3 milhões de toneladas de grãos (IBGE, 2025), concentrada nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul (Tabela 2).

Tabela 2. Produção, produtividade e áreas plantadas com a cultura do sorgo no Brasil médias das safras 2021/2022/2023 (Fonte: Adaptado de IBGE, 2025).

Estado	Área (mil ha)	Produtividade (kg/ha)	Produção (mil ton)	% da produção
Goiás	379	3.164	1.199	36,4
Minas Gerais	264	3.254	859	26,0
São Paulo	97	3.278	318	9,6
Mato Grosso do Sul	81	3.469	281	8,5
Mato Grosso	50	2.840	142	4,3
Bahia	71	1.831	130	3,9
Tocantins	51	2.059	105	3,2
Paraná	23	3.087	71	2,2
Piauí	33	2.152	71	2,2
Pará	24	2.708	65	2,0
Distrito Federal	10	3.600	35	1,1
Maranhão	10	2.169	22	0,7
TOTAL	1093	3.361	3.298	100

Os grãos de sorgo atendem preferencialmente o mercado voltado para alimentação animal, com uso para etanol ainda muito incipiente (Diawara et al., 2024). É importante salientar, que existem outros tipos de sorgo que são explorados comercialmente de acordo com as características e em função da sua utilização são: sorgo silageiro, sorgo sacarino, sorgo biomassa, sorgo vassoura e sorgo corte pastejo (Menezes, et al., 2021).

Ao mesmo tempo que a produção de sorgo no Brasil tem crescido exponencialmente, cerca de 162% na última década (IBGE, 2025), ela está um pouco deslocada da maior concentração de usinas de etanol de milho (Figura 5), mas considerando a logística de escoamento entre estados, o transporte não seria um problema. Porém, cabe destacar que a busca por informações a respeito de seu cultivo tem sido cada vez mais demandadas em áreas de possível expansão para áreas de plantio nos estados do Maranhão, Tocantins e Bahia, que possuem autorizações de instalação de unidades produtoras de etanol de grãos.

2.3 Descrição do processo de produção agrícola do sorgo granífero

O cultivo mais comum do sorgo granífero ocorre em 2^a safra, com semeadura entre fevereiro e meados de abril, em condições de sequeiro, em sistema de plantio direto com rotação/sucessão com soja (Menezes, 2015). A sua maior tolerância ao déficit hídrico e às altas temperaturas são características que permitem a cultura uma maior janela de plantio comparativamente ao milho. É importante salientar que em muitas situações, o sorgo é tratado como um cultivo marginal e de baixo investimento, entretanto em resposta a demanda do mercado, o sorgo está migrando para sistemas de produção mais tecnificados e áreas com melhores condições edafoclimáticas, resultando em maior resposta produtiva (CONAB, 2025b). Cabe destacar que o uso de irrigação ainda é irrisório, sendo utilizada, principalmente, em mercados de alto valor agregado, por exemplo, a produção de sementes.

As operações e uso de insumos na produção agrícola do sorgo granífero se assemelham ao estabelecido para a cultura do milho semeado em 2^a safra, com etapas de dessecação pré-semeadura, adubação de base e semeadura, eventual adubação de cobertura, pulverizações para controle fitossanitário e colheita, com ciclo médio de 110 dias (Figura 7).

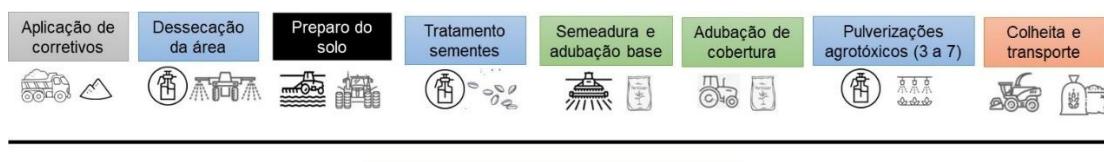


Figura 7. Representação esquemática da sequência de operações mais comuns para a produção de sorgo granífero no Brasil (elaborado pelos autores).

O cultivo do sorgo envolve o uso de sementes melhoradas, facilmente encontradas no mercado. O sorgo granífero possui uma exigência nutricional significativa, comparável aos padrões observados no milho segunda safra, o que refuta a percepção de que a rusticidade da cultura implica em baixos requerimentos (Resende, 2009). O requisito nutricional varia diretamente com o potencial produtivo esperado, sendo o nitrogênio (N) e o potássio (K) os elementos exigidos em maiores quantidades, seguidos por cálcio, magnésio e fósforo (Resende et al., 2022). Para cultivares de sorgo granífero, a maior parte da absorção de nutrientes ocorre de forma concentrada, majoritariamente durante a fase vegetativa. Em termos de exportação, o potencial de esgotamento de nutrientes do solo pelo sorgo é evidenciado pela remoção significativa na colheita. O fósforo (P) e o nitrogênio (N) são translocados para os grãos em maior proporção (83%

e 71% do total acumulado na parte aérea, respectivamente), enquanto o potássio (K) é extraído em grande quantidade, mas a maior parte permanece na palhada, sendo exportado apenas 14% (Resende et al., 2022). A Tabela 3 apresenta as taxas médias de extração total e exportação de nutrientes para cada tonelada de grãos de sorgo produzida, considerando produtividade médias entre 7,3 a 9,2 t ha⁻¹.

Tabela 3. Taxas médias de extração total e exportação (remoção) de nutrientes para a produção de uma tonelada de grãos de sorgo granífero.

Nutriente	Unidade	Extração Total	Exportação
Macronutrientes			
Nitrogênio (N)	kg/t de grãos	20.3	14.5
Fósforo (P_2O_5)	kg/t de grãos	6.0	5.0
Potássio (K_2O)	kg/t de grãos	23.9	3.5
Magnésio (Mg)	kg/t de grãos	2.9	1.1
Enxofre (S)	kg/t de grãos	0.8	0.5
Micronutrientes			
Boro (B)	g/t de grãos	7	2
Cobre (Cu)	g/t de grãos	6	2
Ferro (Fe)	g/t de grãos	203	25
Manganês (Mn)	g/t de grãos	17	9
Zinco (Zn)	g/t de grãos	27	11

¹Fonte: Adaptado de Resende et al. (2022)

Com relação ao controle fitossanitário (pragas, doenças e plantas daninhas), o sorgo é considerada uma cultura de suporte fitossanitário insuficiente (*minor crop*), ou seja, possui poucos ingredientes ativos registrados para uso na cultura (MAPA, 2025), mas que não tem prejudicado seu cultivo. A não suscetibilidade do sorgo ao complexo do enfezamento tem impulsionado a sua adoção em regiões produtoras de milho. Isso se deve à alta vulnerabilidade do milho aos enfezamentos e à necessidade de inúmeras pulverizações para controlar a cigarrinha-do-milho (*Dalbulus maidis*). Este fato tem ocasionando grandes perdas de produtividade e elevado significativamente os custos de produção do milho, estimulando os produtores a migrarem para a cultura do sorgo. A lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), e o pulgão do-sorgo (*Melanaphis sorghi*) são as duas principais pragas da cultura (Avelar et al., 2018; Oliveira et al., 2018). Entretanto, o manejo destas pragas se dá por controle químico ou pelo uso de cultivares tolerantes para o manejo do pulgão (Mendes et al, 2014).

A respeito de doenças, a atenção principal dos produtores de sorgo granífero está voltada para a antracnose, causada pelo fungo *Colletotrichum sublineolum* (ou *C. graminicola*), que pode levar a perdas de até 72% da produção (Cota et al., 2017). O controle de gramíneas constitui um dos principais desafios no manejo de plantas daninhas na cultura do sorgo, devido à escassez de herbicidas seletivos a cultura e efetivos para o controle destas plantas daninhas. Não obstante, a introdução de novas

tecnologias, como o uso de *safener* e o registro de cultivares tolerantes a herbicidas inibidores da ALS, tem auxiliado os produtores nesse manejo (Silva et al., 2014).

Uma vantagem comercial do sorgo granífero é ser OGM-free (livre de Organismos Geneticamente Modificados). Isto é, em parte, uma consequência da cautela regulatória e científica devido à ampla presença de parentes silvestres do sorgo nas regiões de cultivo, e ao risco de fluxo gênico dos traços de OGMs da cultura para o sorgo-selvagem, o que poderia levar ao surgimento de superervas daninhas resistentes e de difícil controle. A estabilidade de produção do sorgo granífero em relação ao milho está diretamente associada à sua maior resiliência às condições climáticas adversas e capacidade de adaptação (Menezes et al., 2015; Reddy, 2019; Weltzien et al., 2006). Cabe ainda destacar o menor custo de produção, em relação ao milho, atribuído principalmente ao valor das sementes e manejo mais simplificado (Miranda et al., 2015; Landau & Martins Neto, 2015).

Com base no exposto, identifica-se a oportunidade concreta de ampliação da produtividade de grãos do sorgo, na 2^a safra brasileira, mas com uma mudança de posicionamento estratégico dos produtores para o uso da janela de plantio mais adequada (não a que resta) e à adoção de práticas sustentáveis de manejo. A seleção de cultivares adaptadas, o manejo adequado do solo e da fertilidade, e o controle de pragas, doenças e plantas daninhas são componentes essenciais para garantir o sucesso e a expansão da produção de grãos no país.

2.4 Inventário de ciclo de vida referentes à produção do sorgo granífero e do etanol derivado, disponível em bases públicas.

A busca por inventários de ciclo de vida - ICV (*datasets*) disponíveis em bases de dados públicas nacionais e internacionais não se fez necessária para a etapa industrial de produção do etanol de 1^a geração de sorgo granífero. Isto porque, a revisão anterior mostrou que o ICV deste biocombustível seria o mesmo do etanol 1^a geração de milho, devido ao compartilhamento da estrutura industrial já instalada (e operando). Assim, a recomendação é de uso dos mesmos parâmetros industriais usados na rota EM1G, na RenovaCalc (<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>).

Com relação à etapa agrícola, que envolve a produção do sorgo granífero em campo, a literatura mostra diferenças na produção de milho e sorgo granífero. Com isto, foi conduzida uma revisão mostrando ser restrita a disponibilidade de conjunto de dados de ciclo de vida referentes aos processos de produção de sorgo granífero, em bases públicas internacionais e nacionais. Foram localizados oito *datasets* de sorgo (Tabela 4), sendo três na base ecoinvent® versão 3.11 (<https://ecoinvent.org>), quatro no modelo

e ferramenta GREET (<https://www.energy.gov/eere/greet>), e dois na base Agri-footprint versão 6.0. - (PRÉ SUSTAINABILITY, 2022). Cabe destacar que estas são as principais bases mundialmente reconhecidas em estudos de ACV.

Tabela 4. Inventários de ciclo de vida de produção de sorgo disponíveis em bases de dados e ferramentas de cálculo de emissões de gases de efeito estufa

Base	dataset	Escala	Sorgo	Dados	Limitações
Ecoinvent 3.11	<i>Sorghum cultivation {CN}</i>	China	Sacarino	<i>Unit process /System</i>	Restrito à China
Ecoinvent 3.11	<i>Sorghum cultivation {GLO}</i>	Global	Sacarino	<i>Unit process /System</i>	Genérico
Ecoinvent 3.11	<i>Sorghum cultivation {RoW}</i>	Resto do mundo	Sacarino	<i>Unit process /System</i>	Genérico
Agri-footprint 6.0	<i>Sorghum grain at farm {BR}</i>	Brasil	Granífero	System	Dado <i>unit process</i> fechado
	<i>Sorghum grain, at farm {BR} Economic, U</i>	Brasil	Grão	<i>Unit process /System</i>	Limitações de representatividade regional, temporal e tecnológica
Greet FD-CICI® 2023	<i>Grain sorghum farming</i>	USA	Grão	<i>Unit process /System</i>	Restrito aos Estados Unidos
Greet model® 2024	<i>Forage sorghum farming</i>	USA	Forrageiro	<i>Unit process /System</i>	Restrito aos Estados Unidos
	<i>Sweet sorghum farming</i>		Sacarino	<i>Unit process /System</i>	
	<i>Grain sorghum farming</i>		Grão	<i>Unit process /System</i>	

Os datasets da base ecoinvent 3.11 apresentam representatividade para a China (CN), na escala global (GLO - *Global average*) e na escala resto do mundo (RoW – Rest of the World), compilando informações médias para países não explicitamente representados em outras regiões. Estes conjuntos fornecem valores de referência para China e para a escala global, sem capturar as especificidades da realidade brasileira, além de representarem a produção do sorgo sacarino¹.

No caso da base Agri-footprint, os dois datasets brasileiros, denominados *Sorghum grain at farm {BR}* possuem limitações. Um deles está disponível apenas na opção fechada *system*, que inviabiliza a análise em nível de processo unitário, que permitiria interpretações mais assertivas e o outro estaria aberto na escala Brasil (Tabela 5), que não permite a representatividade temporal e regional da produção do sorgo. Neste estudo, o rendimento agrícola se baseou em dados FAO entre 2014–2018 (não refletindo as práticas agrícolas recentes) e está agregado para a escala Brasil como um todo, sem distinções entre biomassas, regimes de precipitação ou práticas de irrigação. Tal generalização limita sua aplicação em análises regionais ou comparativas, principalmente quando há heterogeneidade produtiva entre regiões. Adicionalmente, o

¹ sorgo sacarino (*sweet sorghum*) possui como produto de interesse o colmo, onde armazena açúcares simples, assemelhando à cana-de-açúcar para o uso na extração de etanol e com aproveitamento do bagaço como fonte de energia térmica ou elétrica (Oliveira et al., 2021), e possui diferenças fenológicas e agronômicas em relação ao sorgo granífero (Kanbar et al., 2021).

consumo energético foi calculado por um modelo genérico de cultivo agrícola global (*Energy model for crop cultivation*), sem calibração específica para as práticas agrícolas típicas brasileiras. Portanto, para aplicações em rotas de biocombustíveis ou estudos específicos de etanol de sorgo, recomenda-se complementação com dados primários nacionais de rendimento, manejo e consumo energético, ou calibração de inventários com base em estudos de campo.

Tabela 5. Parâmetro médios dos insumos agrícolas adotados no cultivo de sorgo granífero em inventários disponíveis para Brasil (base Agri-footprint 6.0) e para Estados Unidos (GREET – publicado em Liu et al., 2023).

Parâmetro	Unidades	AF 6.0	GREET 2023
Calcário Calcítico ou Dolomítico	kg/t de grãos	148	-
Sementes	kg/t grãos	7,00 ¹	1,64
Fertilizantes orgânico (esterco)	kg/t grãos	426	-
Fertilizantes* Sintéticos Nitrogenados (Total)	kg N/t grãos	15,90	18,33
Amônia anidra	kg N/t grãos	-	5,68
Ureia	kg N/t grãos	9,30	4,22
Nitrato de amônio	kg N/t grãos	1,80	0,37
Sulfato de amônio	kg N/t grãos	1,70	0,37
Nitrato de amônio e cálcio (CAN)	kg N/t grãos	0,50	-
Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN)	kg N/t grãos	-	5,87
Fosfato Monoamônico (MAP)	kg N/t grãos	-	0,73
Fosfato diamônico (DAP)	kg N/t grãos	2,20	1,10
NPK geral	kg N/t grãos	0,40	-
Fertilizantes* Sintéticos Fosfatados (Total)	kg P2O5/t grãos	10,80	4,04
Superfosfato simples	kg P2O5/t grãos	2,40	-
Superfosfato triplo	kg P2O5/t grãos	2,00	-
Fosfato Monoamônico (MAP)	kg P2O5/t grãos	-	2,02
Fosfato diamônico (DAP)	kg P2O5/t grãos	5,80	2,02
NPK geral	kg P2O5/t grãos	0,40	-
Rocha fosfática	kg P2O5/t grãos	0,10	-
Fertilizantes* Sintéticos Potássicos (Total)	kg K2O/t grãos	9,80	1,04
Diesel	L/t grãos	35,60	9,12
GLP	L/t grãos	-	-
Eletricidade	kWh/t grãos	0,001	0,44
Gasolina	L/t grãos	-	0,73
Natural Gas	m3/t grãos	-	0,01
Herbicida	kg/t grãos	0,20	0,81
Fungicida	kg/t grãos	0,10	-
Inseticida	kg/t grãos	0,50	-

¹ A média brasileira foi usada como estimativa para este parâmetro, uma vez que não foi apresentado como parâmetro de entrada no Greet;

* Valores de consumo de fertilizantes foram convertidos em N, P2O5 e K2O equivalentes a partir do teor de macronutrientes informado na documentação do dataset disponível pela Agri-footprint 6.0.

A respeito dos *datasets* da ferramenta GREET — *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies Model* (Modelo de Gases de Efeito Estufa, Emissões Reguladas e Uso de Energia em Tecnologias) — desenvolvida pelo Argonne National Laboratory (EUA), foi identificado um inventário no módulo FD-CIC 2023 — *Feedstock-Derived Carbon Intensity Calculator* (Calculadora de Intensidade de Carbono Derivada da Matéria-Prima) — disponível na versão excel, com perfil completo de uso dos insumos agrícolas mais comuns para o cultivo de sorgo nos Estados Unidos (Tabela 5), que foram os mesmos utilizados como base para a proposição do perfil penalizado do sorgo importado na RenovaCalc. Outros três *datasets* também foram identificados na versão em software, mas não se mostraram adequados para o presente estudo.

A ausência de *datasets* de produção agrícola de sorgo granífero, que representem o perfil mais comum de produção deste grão no Brasil, com representatividade regional, temporal e tecnológica, justifica a condução do estudo de ACV, descrito a seguir. Isto porque, para a inclusão de uma estrutura de cálculo que permita a declaração de dados primário da produção agrícola da matéria-prima, bem como de dados penalizados regionalizados, conforme descrito na Figura 2, há necessidade de se determinar perfis de referência que possam receber a penalização.

3 Estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV).

O estudo de ACV da produção agrícola de sorgo granífero foi realizado no âmbito do projeto *Pegada de carbono do sorgo produzido em sistema típico nas principais regiões produtoras do Brasil* (Projeto Embrapa – código 10.24.00.218.00.00), conduzido pelas equipes da Embrapa Meio Ambiente e Embrapa Milho e Sorgo, com apoio do setor produtivo. O objetivo central foi levantar o perfil de produção do sorgo granífero nos principais estado produtores brasileiros, com sua respectiva intensidade de carbono, usando a lógica da ACV.

A pesquisa usou as normas ISO 14040 (Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura); 14044 (Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações) e ISO 14067:2018 (Gases de Efeito Estufa - Pegada de Carbono de Produtos) como base. Na ACV, a categoria de impacto analisada restringiu-se à mudança climática, que determina emissões de GEE, por ser interesse da política RenovaBio.

3.1 Metodologia

A abordagem utilizada foi do tipo *cradle-to-gate*, ou seja, desde as extrações das matérias-primas utilizadas como insumos para a produção do sorgo granífero até o portão da fazenda (Figura 8), sem o transporte até a indústria de processamento. A unidade de referência (UR) adotada foi de 1 kg de grãos de sorgo colhido com 13% de umidade.

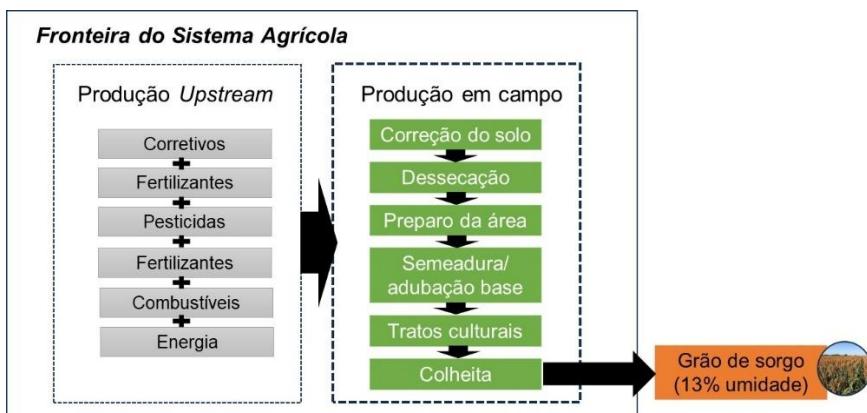


Figura 8. Representação das fronteiras do sistema do estudo da ACV do sorgo granífero.

As etapas seguidas durante o estudo foram: a) identificação das principais áreas de produção e do sistema agrícola, b) levantamento de dados agrícolas primários, c) processamento e ajustes de parâmetros para uso em ICVs, d) validação dos parâmetros agrícolas com especialistas, e) determinação de índices de eficiência no uso de insumos, f) determinação da intensidade de carbono regionalizada, g) análise de incertezas e h) alinhamento com a política RenovaBio.

a) Identificação das principais áreas de produção e do sistema agrícola

As áreas com maior representatividade de produção do sorgo granífero foram confirmadas a partir de levantamentos baseados na produção agrícola municipal (PAM) determinada pelo IBGE, para os anos 2021, 2022 e 2023. Como premissa optou-se pela amostragem de modais de produção nos estados com produção de grãos igual ou superior a 5% do total produzido no Brasil (Tabela 2), e regiões com potencial para crescimento da cultura, seguindo metodologia de trabalho de regionalização de soja e milho para RenovaBio, adotada por Ramos et al. (2023 e 2024a).

b) Levantamento de dados agrícolas primários

Os estados amostrados foram: Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Bahia, Maranhão e Piauí. Mato Grosso por ser o estado com maior número de unidades produtoras de etanol de milho do Brasil (ANP, 2025b), enquanto Bahia, Maranhão e Piauí apresentam demanda de cultivo de sorgo granífero crescente, por conta de suas condições edafoclimáticas mais restritivas a outros cultivos (BRASIL, 2025).

Inicialmente, foram contactados 63 consultores e assistentes técnicos de produtores e cooperativas, e empresas sementeiras com conhecimento extenso sobre o sistema de produção de sorgo e com acesso à uma rede de produtores, que representassem a forma mais comum de produção deste grão, em cada um dos estados selecionados. Feito isto, alguns produtores foram sensibilizados quanto à relevância do estudo; sendo entrevistados para coleta de dados primários os (3-4) mais representativos e com informações organizadas.

Os produtores receberam, individualmente, um questionário estruturado com campos de preenchimento envolvendo a sequência de cultivos da propriedade, em ao menos 3 safras, as operações realizadas, com os respetivos respectivos dados médios de insumos aplicados, além do rendimento final de grãos. As dúvidas de preenchimento também foram sanadas individualmente.

c) Processamento e ajustes de parâmetros para uso em ICVs

Os dados amostrados foram processados seguindo as categorias de insumos do tipo corretivos, fertilizantes, pesticidas e combustíveis/energia, sendo ajustados quanto à sua unidade, necessidade de alocação, busca por ingredientes ativos, etc. Os consumos foram organizados em forma de inventários de produção, com as entradas da natureza e da tecnosfera.

Nas entradas da natureza, não foram considerados os fluxos relacionados ao uso da terra (ocupação e transformação). Isto porque, a política RenovaBio utiliza a gestão de risco, prevenindo a expansão da produção de biomassa sobre áreas de vegetação nativa e evitando emissões associadas à mudança do uso da terra – MUT (ANP, 2018).

Quanto às entradas da tecnosfera, os corretivos foram alocados entre cultivos, considerando duas culturas comerciais ao ano e respeitando a frequência de aplicação declarada pelos produtores (variações entre 1 e 4 anos). Os fertilizantes declarados por cultura foram inventariados em sua dose total para a respectiva cultura (sem alocações), sendo caracterizados quanto às porcentagens de nutrientes das suas formulações e

susas fontes. Uma exceção foi o fertilizante fosfatado, que quando aplicado em sistema que atendia mais de uma cultura foi alocado entre as duas culturas do sistema, em doses equivalentes.

Os pesticidas foram caracterizados quanto às concentrações dos princípios ativos presentes nos produtos comerciais, por meio de consulta ao banco de dados sobre agroquímicos e afins, registrados no Ministério da Agricultura (Agrofit - https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons) (MAPA, 2025). Conforme metodologia já adotada na RenovaCalc, foram contabilizados em separado os herbicidas glifosato e 2,4 D, enquanto todos os demais princípios ativos foram somados numa categoria denominada “pesticidas inespecíficos”.

O consumo de diesel foi contabilizado considerando-se a fração de biodiesel em mistura de 12% (o valor adotado para as safras amostradas), sendo a dose determinada pelo valor total declarado pelo produtor (L/ha). Nos casos de ausência deste valor, o total foi estimado pelo uso de máquinas e implementos agrícolas nas diferentes operações de campo. Segundo Mialhe (1974), o consumo de diesel (L/ha) pode ser calculado a partir da potência nominal do equipamento (CV) multiplicada pelo fator de consumo médio de $0,15 \text{ L CV}^{-1} \text{ h}^{-1}$, sendo o produto dividido pelo rendimento operacional do maquinário (h/ha). Essa metodologia é amplamente utilizada em inventários agrícolas e em estudos de ACV para o setor agroindustrial.

Após os ajustes supracitados, foi realizada a média entre os dados dos 3-4 produtores, considerando parâmetro a parâmetro levantado, de forma a compor o perfil típico de produção do estado.

d) Validação dos parâmetros agrícolas com especialistas

A validação dos parâmetros que compuseram os perfis típicos de produção de sorgo granífero de cada estado amostrado foi realizada por meio de: i) análise comparativa com a literatura, consultando artigos e documentos técnicos; ii) consulta a 16 especialistas de várias instituições de pesquisa como Instituto Agronômico de Campinas (IAC), pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo; Embrapa Agropecuária Oeste, Embrapa Cocais, Embrapa Rondônia, Embrapa Meio Ambiente, além de empresas sementeiras com abrangência nacional, cooperativas que atuam nos Estados de Mato Grosso do Sul, Paraná, Goiás e consultores iii) apresentação dos dados em oficina de trabalho on-line, com participação de representantes do setor produtivo; e iv) apresentação dos dados em documento técnico, disponibilizado para o setor produtivo para análise e retorno com sugestões devidamente justificadas, com embasamento técnico-científico.

Os índices de eficiência no uso de insumos para a produção do sorgo granífero, que é o dado solicitado na RenovaCalc (Ramos et al, 2023), foram calculados para cada parâmetro técnico usado na área de produção (corretivos específicos, gesso, nitrogênio por fonte, fósforo por fonte, potássio por fonte, diesel e outros combustíveis). Os parâmetros foram divididos pela produção de grãos desta área, sendo:

Eq. (1)

$$IEfic = \frac{Ins_ciclo}{Produtividade}$$

Onde:

IEfic: índices de eficiência no uso de insumos para a produção de sorgo

Ins_ciclo: consumo de insumo no ciclo de produção do sorgo (kg/ha)

Produtividade: produtividade de grãos de sorgo com 13% de umidade (t sorgo/ha)

e) Determinação da intensidade de carbono (IC) regionalizada

As emissões de GEE, representadas pela IC, foram calculadas diretamente na ferramenta RenovaCalc (Figura 2). A RenovaCalc utiliza a IC, calculada na lógica da ACV, tanto para as biomassas como do biocombustível final, que depois embasa a NEEA (Matsuura et al, 2018). Como o estudo se restringiu à produção agrícola do sorgo granífero, optou-se pelo uso da aba de dados primários do milho, presente na própria RenovaCalc, adaptadas para sorgo. A ferramenta contabiliza as emissões dos gases: dióxido de carbono fóssil (CO₂), metano fóssil e biogênico (CH₄) e monóxido de nitrogênio (N₂O), para cada índice de eficiência agrícola, considerando a produção (*upstream*) e o respectivo uso em campo.

No *upstream* a RenovaCalc usa essencialmente a base ecoinvent v3.11 e para as emissões diretas e indiretas de campo, sendo: (i) emissões de CO₂ da aplicação de ureia e calcário no campo, e emissões diretas e indiretas de N₂O do uso de fertilizantes e resíduos orgânicos, adotando as diretrizes do IPCC (2019) e (ii) emissões de GEE da combustão de combustíveis em caldeiras, caminhões e máquinas agrícolas, utilizando dados obtidos das diretrizes do IPCC (IPCC, 2019) Os fatores de caracterização usados para converter CH₄ e N₂O em CO₂e (equivalente de dióxido de carbono) (em kg GEE/kg CO₂e) foram baseados no Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC (CH₄ fóssil = 29,8, CH₄ biogênico = 27,2 e N₂O = 273,0) (IPCC, 2021).

A contabilidade das emissões na RenovaCalc considerou uma área de produção de 100 ha, a produtividade de grãos de sorgo granífero levantada para cada estado amostrado, com seus respectivos índices de eficiência no uso de insumos. Cabe destacar que o consumo de pesticidas de cada estado foi modificado na estrutura de

cálculo que fica fixa na ferramenta. Também foram modificados os fatores usados na estimativa de restos culturais, seguindo tabela IPCC (2019), sendo considerado o índice de colheita de 1,4, o teor de nitrogênio na parte aérea de 0,007 (\pm 75%), o teor de nitrogênio nas raízes de 0,006 (\pm 75%) e a fração de massa seca de 0,89.

Os impactos relacionados à intensidade de carbono foram verificados e validados com base nos resultados obtidos para a categoria “Mudanças Climáticas”, utilizando o método Environmental Footprint 3.1 (adapted), versão 1.03 (Andreassi Bassi et al., 2023), disponível no software de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) SimaPro, versão 10.2.0.3 (Pre Sustainability, 2025). Para essa análise, empregou-se a base de dados ecoinvent®, versão 3.11, em conjunto com inventários de emissões obtidos na plataforma ICVCalc (Folegatti et al., 2025). O objetivo foi assegurar a consistência e o alinhamento dos resultados com outras ferramentas de cálculo internacionais.

f) Análise comparativa entre estados

A confirmação da pertinência da regionalização dos perfis típicos da produção de sorgo granífero foi realizada, por meio de uma simulação pelo método Monte Carlo, de forma a gerar 10.000 amostras de IC para cada estado. As diferenças destas amostras foram avaliadas entre estados, dois a dois (contraste A e B), sendo calculada a porcentagem de vezes em que um estado (A) tem maior ou menor IC que outro estado (B) (número de vezes que A>B ou que A<B). Para os valores desta porcentagem, convencionou-se um valor limite de 70% ou maior, para se considerar haver uma tendência clara de a IC de um estado ser diferente da IC de outro (Goedkoop et al., 2016).

g) Alinhamento com as premissas da política RenovaBio

O sorgo granífero, assim como os demais estudos de proposição de perfis de referência de biomassas regionais para a RenovaCalc respeitam as duas premissas básicas do RenovaBio:

- i) Estímulo ao uso do dado “primário” na RenovaCalc. Como o dado primário é o que melhor representa a tecnologia adotada pelos produtores, tanto para produção da biomassa como do biocombustível, a política estimula que seja este o dado utilizado em todas as etapas do ciclo de vida do biocombustível (etanol/biodiesel). Com isto, a escala de regionalização selecionada para o sorgo granífero foi a estadual, considerando as especificidades de produção de cada região, visando não desestimular o interesse pela oferta e uso do dado “primário”.

ii) Transparência na metodologia e nos parâmetros usados na RenovaCalc. O desenvolvimento e aprimoramento da política RenovaBio sempre foi baseado em consultas públicas com a participação efetiva do setor produtivo, incluindo o acesso irrestrito a todas as informações e cálculos usados na RenovaCalc.

3.2. Resultados e Discussão

O perfil de produção agrícola do sorgo granífero para os estados com maior representatividade de produção (Tabela 2) encontra-se descrito na Tabela 6. O sistema mais comum é o plantio direto após soja, como cultivo de 2^a safra e com produtividades variando entre 5.180 a 3.490 kg/ha (86 a 58 sacas/ha). Estes valores estão alinhados com dados estatísticos oficiais que apontam médias entre 4.097 e 2.465 kg/ha (CONAB, 2025b).

O estado com melhor desempenho produtivo é GO, muito em função do histórico consolidado na produção deste grão, associado à proximidade de mercados compradores voltados para a produção de ração. Por outro lado, BA, MA e PI encontram-se com as menores produtividades, devido às condições edafoclimáticas e por serem áreas de abertura de produção de sorgo mais recente, com produtores se adaptando às práticas de manejo e à janela de plantio (IBGE, 2025).

Tabela 6. Insumos e doses “típicas” de insumos adotadas no cultivo do sorgo granífero em diferentes estados brasileiros.

Insumos agrícolas	GO	MG	SP	MS	MT	BA	MA/PI
Culturas de 1 ^a safra	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
Produtividade (kg/ha)	5.181	4.356	4.356	3.780	4.260	3.488	3.795
Corretivos (kg/ha.ano ⁻¹)							
Calcário dolomítico	583,3	650,0	333,3	541,7	541,7	562,5	677,1
Gesso	25,0	270,0	133,3	108,5	-	197,9	228,1
Material propagativo (kg/ha)							
Sementes	7,0	6,4	7,0	7,4	6,8	6,3	6,5
Fertilizantes (kg/ha)							
Ureia	98,0	40,0	57,8	16,7	36,8	87,5	118,6
MAP	-	24,0	69,0 ¹	-	-	25,0	-
DAP	-	-	-	30,0	-	-	-
Sulfato de amônio	75,0	98,0	-	93,0	241,7	-	-
Super fosfato simples	-	-	-	36,1	-	-	-
Super fosfato Triplo	30,5	48,8	13,0	18,3	20,3	-	-
Cloreto de Potássio	125,0	68,0	26,0	28,0	99,4	75,0	80,0
Combustíveis (L/ha)							
Diesel B12	31,6	33,6	31,6	33,8	24,0	28,7	33,8
Pesticidas (kg i.a./ha)							
2,4-D	-	0,1	-	0,4	-	-	-
Glifosato	2,0	2,3	0,9	2,3	1,5	2,3	2,6
Pesticidas gerais	4,9	2,8	3,0	3,2	3,4	3,9	3,8

¹ – Fração do MAP considerada para o sorgo foi apenas a relacionada ao P₂O₅, considerando uma aplicação que ocorreu em sistema de produção, com a dose cheia aplicada na cultura anterior; i.a.: ingrediente ativo.

O uso de corretivos apresentou forte heterogeneidade. As doses de calcário dolomítico já anualizadas e divididas entre as culturas do sistema oscilaram entre 333

kg/ha.ano⁻¹ em SP e 677 kg/ha.ano⁻¹ no MA/PI, refletindo as diferenças na necessidade de correção da acidez dos solos entre as regiões do Brasil (BRASIL, 2025). A frequência de aplicação declarada pelos produtores variou entre 1 e 4 anos. Com relação ao gesso, verifica-se o uso de menores doses em relação ao calcário, inclusive com menor adesão de uso observada nos estados de GO e MT. Isto pode ser reflexo da ausência de resultados expressivos no uso deste insumo para sistemas mais consolidados como soja/milho (Neis et al., 2010). As maiores doses de gesso foram identificadas em produções de MG (270 kg/ha.ano⁻¹) e MA/PI (228 kg/ha.ano⁻¹), sendo MA/PI uma região de cultivos agrícolas relativamente recente.

O consumo de sementes apresentou pouca variação, situando-se entre 6,3 kg/ha na BA e 7,4 kg/ha no MS, indicando um padrão relativamente uniforme de implantação da cultura, apoiando plantios em espaçamento que variam entre 45 – 50 cm (Albuquerque et al., 2011). O material genético de sorgo, assim como milho, está concentrado em híbridos de alta performance, comercializados por grandes empresas, que garantem bons padrões de vigor e germinação (Resende et al., 2009). As variações de peso e tamanho de sementes podem ocorrer em função do híbrido, e do ano de produção, a depender das condições climáticas, inclusive exigindo atenção especial do produtor na regulagem de semeadoras (Menezes et al. 2015)

A respeito dos fertilizantes, verificou-se o predomínio no uso de ureia, seguida pelo sulfato de amônio como fontes de nitrogênio, enquanto para fósforo a fonte mais utilizada é de superfosfato triplo (Tabela 6). Como esperado o uso de potássio provém essencialmente do cloreto de potássio.

As quantidades de fertilizantes utilizadas variaram entre os estados produtores, destacando-se o uso do nitrogênio no MT, vindo tanto de sulfato de (242 kg/ha) como da ureia (37), que correspondem à maior entrada de N em campo (65 kg de N/ha). Por outro lado, SP foi o estado com menor uso deste nutriente (26,0 kg N/ha), vindos de MAP e ureia, possivelmente pelo plantio ocorrer em períodos de maior risco de perdas por condições climáticas que reduzem os investimentos dos produtores na lavoura.

Outro ponto que deve ser mencionado no sistema adotado em SP é a adoção da adubação de culturas em sistema, onde doses mais elevadas de alguns nutrientes são aplicadas na cultura de verão ou 1ª safra, mas com benefícios às culturas subsequentes, desta forma o total de fósforo aplicado, neste estado, foi o maior (46,0 kg/ha) em relação aos demais estados, vindo das fontes MAP e superfosfato triplo (Tabela 6). Não houve relatos de uso de fósforo aplicado diretamente na cultura do sorgo nos cultivos de MA/PI.

O uso de defensivos foi relativamente baixo em termos absolutos. A aplicação de 2,4-D ocorreu apenas em MS (0,4 kg i.a./ha) e MG (0,1 kg i.a./ha), estando ausente nos

demais estados. O glifosato foi utilizado em todas as regiões, com valores entre 0,9 kg i.a./ha em SP e 2,6 kg/ha em MA/PI. No total geral, GO apresenta o sistema com maior uso de pesticidas, seguido de MA/PI e BA. Assim como relatado para fertilizantes, as condições edafoclimáticas regionais podem favorecer ou não as ocorrências fitossanitárias.

Em uma análise mais global dos pesticidas, a soma de todos os ingredientes ativos aplicados nos cultivos variou entre 4,9 kg i.a. total/ha para MT e 6,9 kg i.a. total/ha para GO. Cabe destacar que os valores declarados estão abaixo da média Brasil de uso em todas as culturas, que é de 12,6 kg i.a. total/ha, porém acima do valor observado para os Estados Unidos (2,8 kg i.a. total/ha) e da média mundial que é de 2,4 kg i.a. total/ha (FAOSTAT, 2025). Entretanto, as comparações devem ser realizadas com cautela, pois a metodologia de contabilidade de cada país não é muito clara quanto aos produtos declarados, entre outros.

O consumo de diesel, considerado como a mistura B12, manteve-se relativamente homogêneo entre os sistemas amostrados, oscilando entre 24,0 L/ha em MS e 33,8 L/ha em MA/PI. Isto reflete uma base tecnológica de mecanização semelhante entre os estados, com pequenas variações relacionadas à intensidade das operações agrícolas.

Num panorama geral, pode-se indicar o destaque de GO tanto na produtividade, como no uso equilibrado de fertilizantes e pesticidas; que historicamente é o maior produtor de sorgo granífero do país. Os estados de MG e SP também possuem produtividades competitivas e se caracterizam pelo maior uso de fósforo. MT e MA/PI utilizam maiores aportes de nitrogênio, enquanto BA registra os menores rendimentos, mesmo com aportes consideráveis de insumos.

O desdobramento dos parâmetros de produção (Tabela 6) em índices de eficiência de típicos pode ser observado na Tabela 7. Os consumos e produtos utilizados são apresentados de forma normalizada para 1 tonelada de sorgo colhido. A normalização permite comparar diretamente a intensidade de uso de insumos e a eficiência produtiva entre regiões, destacando diferenças que refletem práticas agrícolas, características edafoclimáticas e disponibilidade de insumos.

A eficiência no uso de corretivos para a produção de sorgo granífero varia, substancialmente, entre os estados brasileiros (Tabela 7). As maiores exigências de uso de calcário dolomítico estão concentradas nos estados do MA/PI e BA, cuja produção encontra-se em áreas com solos onde a fertilidade está em construção (Embrapa, 2025). Seguindo o mesmo raciocínio, o estado com melhor aproveitamento dos benefícios de cada unidade de calcário aplicada é SP, com índice de eficiência 57% melhor que o observado no MA/PI. A respeito do gesso, a variação de uso foi bastante

expressiva, com estados que declararam não aplicar este insumo, como MT, possivelmente pela inserção do sorgo granífero em sistemas de produção já consolidados.

Tabela 7. Índices de eficiência típicos para o cultivo do sorgo granífero em diferentes estados brasileiros.

Insumos agrícolas	GO	MG	SP	MS	MT	BA	MA/PI
Corretivos (kg/t de grãos de sorgo)							
Calcário dolomítico	112,6	149,2	76,5	143,3	127,2	161,3	178,4
Gesso	4,9	62,0	30,6	28,7	-	56,8	60,1
Material propagativo (kg/t de grãos de sorgo)							
Sementes	1,4	1,5	1,6	2,0	1,6	1,8	1,7
Nutrientes (kg/t de grãos de sorgo)							
N - Ureia	8,5	4,1	6,0	2,0	3,9	11,3	14,1
N - MAP	-	0,5	-	-	-	0,7	-
N - DAP	-	-	-	1,4	-	-	-
N - Sulfato amônio	2,9	4,5	-	5,0	11,4	-	-
Total de N	11,4	9,1	6,0	8,4	15,3	12,0	14,1
P ₂ O ₅ - MAP	-	2,6	-	-	-	3,4	-
P ₂ O ₅ - DAP	-	-	-	3,6	-	-	-
P ₂ O ₅ SSP	-	-	-	1,7	-	-	-
P ₂ O ₅ STP	2,4	4,6	3,0	2,0	2,0	-	-
Total de P₂O₅	2,4	7,2	3,0	7,3	2,0	3,4	-
K ₂ O - KCL	12,1	7,8	3,0	3,7	11,7	10,8	10,5
Total de K₂O	12,1	7,8	3,0	3,7	11,7	10,8	10,5
Combustíveis (L/t de grãos de sorgo)							
Diesel B12	6,1	7,7	7,3	8,9	5,6	8,2	8,9
Pesticidas (kg i.a./ t de grãos de sorgo)							
2,4-D	-	0,02	-	0,10	-	-	-
Glifosato	0,38	0,53	0,21	0,62	0,35	0,66	0,69
Pesticidas gerais	1,32	1,20	0,88	1,57	1,14	1,78	1,70

O uso de sementes oscilou entre 1,4 e 2,0 kg/t de grãos de sorgo, que pode estar associada ao material genético adotado, com diferenças de peneiras e peso, e não necessariamente às falhas de semeadura ou na escolha da população adequada de plantas. Desta forma, não podem ser coerentes atribuir maior ou menor eficiência de uso entre os estados produtores.

No aproveitamento do fertilizante nitrogenado, pode-se afirmar que os produtores têm utilizado menor aporte deste nutriente que a recomendação técnica, considerando-se que a exportação pelos grãos (Tabela 3) é da ordem de 15 kg de N/t de grãos de sorgo (Cunha et al., 2023). Desta forma, apenas MT realiza uma adubação nitrogenada (15,3 kg de N/t de grãos de sorgo) que sustenta a exportação média dos grãos, mas que ainda seria insuficiente para toda a extração da planta. Este comportamento de menor uso de nitrogênio, reduz a IC do sorgo granífero para os demais estados produtores, porém pode não ser sustentável no tempo.

A respeito da eficiência no uso dos fertilizantes fosfatados, as doses empregadas pelos produtores dos diferentes estados não suprem as exigências de exportação deste nutriente que fica próxima de 6 kg de P₂O₅/t de grãos de sorgo (Tabela 3). Entretanto,

há relatos que as extrações variam a depender do material genético, com médias de 5 kg de P₂O₅/t de grãos de sorgo (Resende et al., 2022), indicando que a quantidade adubada pode ser insuficiente para a sustentabilidade do sistema. De qualquer forma, ao contrário do discutido para o nitrogênio, a adubação com P₂O₅ nos sistemas de grãos é mais elevada no cultivo de verão (cultura de 1^a safra), com fósforo ficando no solo também para a cultura de 2^a safra, sem perdas por lixiviação comuns ao nitrogênio e potássio.

A adubação potássica variou entre os estados, com eficiência de uso entre 3 e 12 kg de K₂O/t de grãos de sorgo (Tabela 8). Considerando que a literatura indica que as exportações são da ordem de 4 kg de K₂O/t de grãos de sorgo (Kansas University, 1998; Cunha et al, 2023; Resende et al., 2022), pode se afirmar que a grande maioria dos produtores realiza a adubação potássica atendendo a exportação da cultura, com exceção de SP e MS. Porém os valores estão abaixo do extraído pela biomassa total de planta que varia entre 24 kg de K₂O/t de grãos de sorgo (Tabela 3), mas podendo ser de apenas 13 kg de K₂O/t de grãos de sorgo (Coelho, 2023). Como o potássio sai rapidamente dos restos culturais, pode se inferir que uma fração extraída pela planta pode ter origem na decomposição da biomassa da cultura anterior.

Os pesticidas não apresentam grandes impactos sobre a categoria relativa às mudanças climáticas, mas podem afetar questões ligadas a saúde humana e de outros animais. No presente estudo, verificou-se um consumo proporcionalmente maior de glifosato em relação aos demais ingredientes ativos. Isto pode ser atribuído ao fato deste herbicida ser utilizado na dessecação pré-plantio e na dessecação em pré-colheita por muitos produtores. A variação entre estados era esperada, pois as condições edafoclimáticas específicas interferem na incidência de pragas, doenças e plantas daninhas, o que afeta o consumo de pesticidas. Cabe destacar que na RenovaCalc o valor de pesticidas é apresentado na unidade kg i.a./ ha.

A eficiência no uso de combustível fóssil, no caso o diesel B12, variou entre 5,6 e 8,9 L/ t de grãos de sorgo; sendo o melhor desempenho observado para o MT, seguido de GO. Isto já era esperado considerando a mecanização intensiva e profissional dos produtores que atuam nestes estados.

Numa análise geral, a produção de sorgo granífero nos estados de MA/PI, BA e MT utiliza maior apporte de insumos por tonelada de grãos produzido, mas este comportamento não indica uma falta de eficiência produtiva em si, considerando que a literatura indica consumos mais elevados que os observados, principalmente no quesito fertilizantes. Em contraste, SP apresenta o menor consumo, que pode ser reflexo das

condições edafoclimáticas, mas também pelo menor investimento destinado a este cultivo, o que pode ser um risco no longo prazo.

As ICs resultantes dos perfis de produção identificados neste estudo encontram-se na Figura 9, com valores variando de 221,27 a 362,88 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo. Primeiramente, cabe destacar que os valores são bem próximos dos observados nas análises de desempenho ambiental determinadas na ferramenta Simapro, com variação inferior à 9% (dados enviados para publicação).

Os valores obtidos para SP, GO e MG encontram-se abaixo do valor simulado na RenovaCalc para o perfil de produção de sorgo granífero usado para etanol internacional (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2025), que foi de 301,46 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo. Isto indica um perfil de produção mais descarbonizado para estes estados em relação à produção americana.

A menor IC do sorgo granífero foi observada para SP, com um valor 23% menor que o segundo estado com emissão mais baixa, que foi MS, com 287,60 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo. Por outro lado, os sistemas que levam aos maiores valores de IC são os observados no MA/PI, o que já era esperado, considerando consumos elevados de insumos na região e produtividades ainda se consolidando (Tabela 6 e 7).

As maiores contribuições de emissões da IC foram trazidas pelos processos diretos em campo, envolvendo as emissões de N₂O pelo uso dos fertilizantes nitrogenados e pela permanência dos resíduos culturais, além do CO₂ decorrente do uso de calcário, de ureia e do uso de combustível fóssil para execução das operações mecanizadas. As emissões de *upstream* (processos relativos à fabricação dos insumos e combustíveis) foram próximas entre os estados, com menores valores observados apenas para SP (62,1 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo), enquanto MT apresentou os valores mais elevados, sugerindo dependência de insumos com maior pegada de carbono na cadeia de suprimentos, como o sulfato de amônio (\uparrow IC por kg de N) quando comparado à outras fontes de N (Tabela 7).

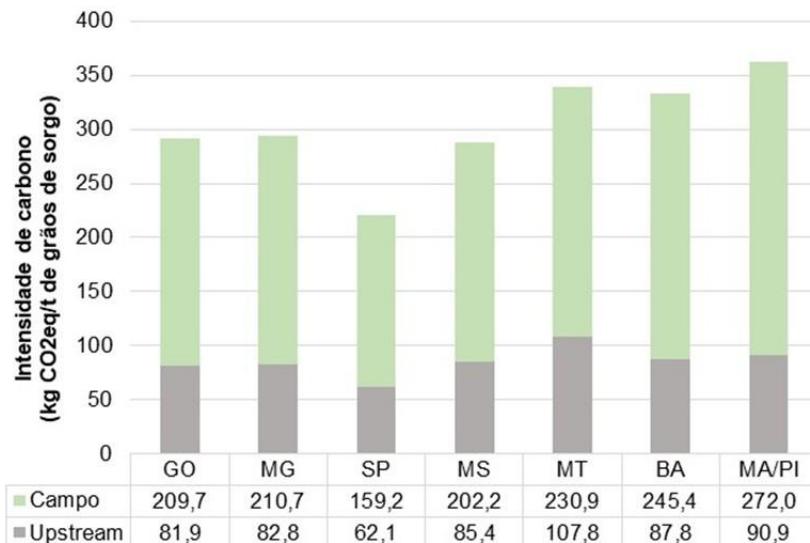


Figura 9. Intensidades de carbono do sorgo granífero produzido em sistema “típico” em diferentes estados brasileiros, calculadas na RenovaCalc v.9.0.

Nos estudos de regionalização de soja (Ramos et al, 2023), milho (Ramos et al, 2024a) e cana-de-açúcar (Ramos et al., 2024b) foi adotada a premissa de uso da IC mais conservadora para representar os estados com produções pouco expressivas. Desta forma, o valor indicado neste estudo seria a IC observada para MA/PI (362,88 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo), valor 17% superior à IC simulada para o sorgo internacional (301,46 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo).

A respeito da diferença entre as ICs, e sua incerteza, a Figura 10 mostra a porcentagem de vezes que um estado apresenta maior ou menor IC que outro, quando comparados dois a dois. De forma geral foram identificados dois grupos que diferem sistematicamente entre si, sendo o grupo com maiores emissões representado por MA/PI, MT e BA e o grupo com menores emissões, representado por SP, MG e GO. No caso do MS, além de diferir da IC de MA/PI, MT e BA, também houve diferença em relação à SP, com este último estado apresentando menor emissão.

As diferenças de comportamento de IC entre os estados justificam a regionalização dos perfis de produção para uso na RenovaCalc, a fim de representar melhor a produção do sorgo granífero brasileiro, na política RenovaBio. Como os perfis representam a produção de cada estado, todo o potencial edafoclimático e a disponibilidade de insumos desta região estão considerados, mas podem ser propostas várias melhorias de manejo, que permitam incrementos de eficiência produtiva, no curto prazo.

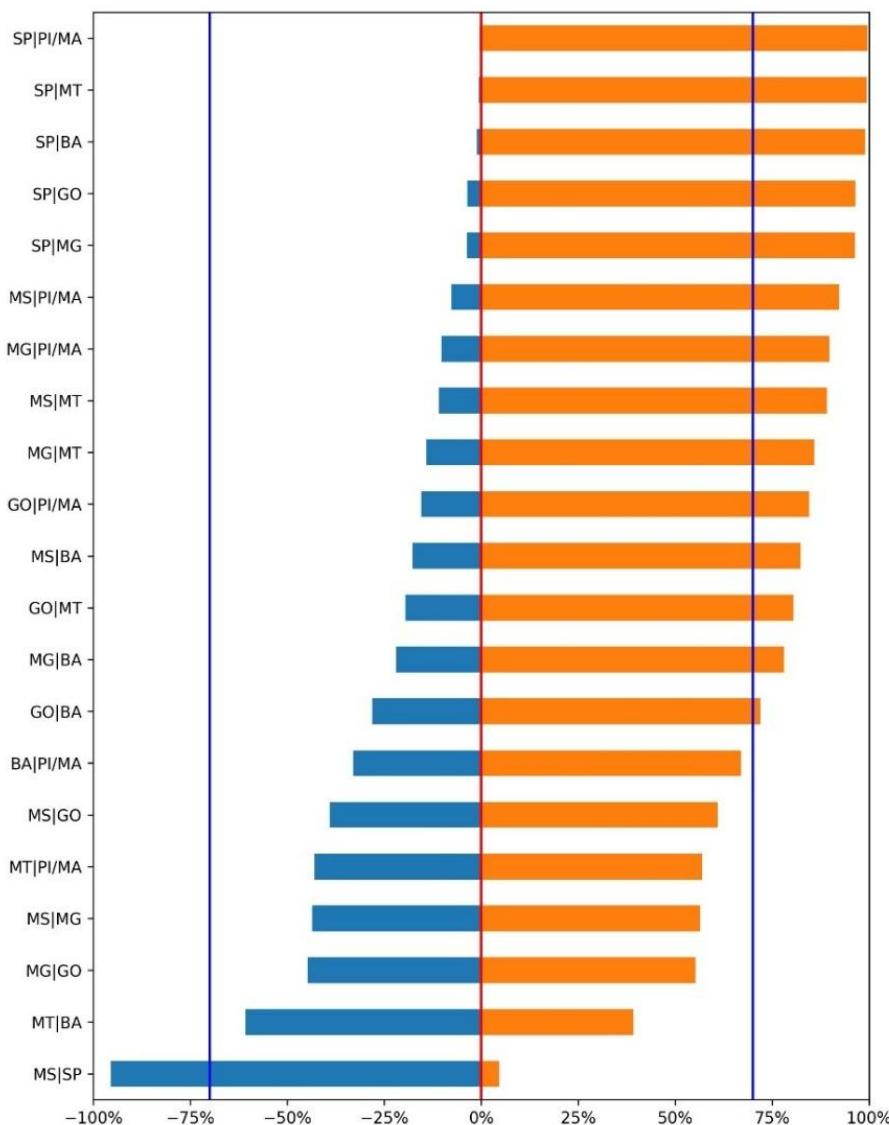


Figura 10. Porcentagem de vezes que um estado apresenta maior ou menor emissão que outro, quando comparados dois a dois. Intensidade de carbono calculada na versão 9.0 da RenovaCalc.

A respeito do alinhamento com a política RenovaBio, como o estudo respeitou a escala de estado, pode se afirmar que a premissa de “*Estímulo ao uso do dado primário* na RenovaCalc” está preservada. Outra premissa respeitada foi a de ter “*Transparência na metodologia e nos parâmetros usados na RenovaCalc*”, pois o presente estudo levantou as informações diretamente com o setor produtivo, validou com especialistas e disponibilizou os dados para que fossem sugeridas alterações, por parte de representantes da indústria do etanol.

A respeito da penalização das ICs, a fim de compor o dado penalizado (Figura 2), recomenda-se a adoção do mesmo valor utilizado para o milho, considerando-se que ambas as biomassas atenderão a mesma rota de etanol biocombustível. Isto traz

isonomia de tratamento entre biomassas para mesma destinação e processamento industrial semelhante.

Uma consideração final do estudo diz respeito ao potencial estratégico que o uso do sorgo pode trazer para a geração de maior volume de etanol nacional, principalmente considerando regiões com condições edafoclimáticas mais restritivas para a produção de milho, como as áreas de expansão para o Maranhão, Piauí e Bahia. A produção nacional deste grão vem crescendo exponencialmente (35%) entre 2023-2024 e 2024-2025, atingindo 6 milhões de toneladas (CONAB, 2025b). Numa hipótese de uso de 50% desta biomassa para etanol, poderia ser estimada a geração extra de 1,2 bilhões de litros (até 10% do total gerado com milho); sendo uma parcela deste volume potencialmente certificável na política RenovaBio.

Um alerta que não deve ser ignorado diz respeito ao uso de biomassa energética para geração de calor, que pode ser um gargalo em algumas regiões do país, exigindo planejamento e investimento adicional por parte das unidades industriais. Tonini et al. (2022) afirmam que para produzir 400 L de etanol são necessários 464 kg de cavaco de madeira, e que no MT, a demanda atual de floresta plantada de eucalipto para etanol de milho já ultrapassa 300 mil ha. Como a competitividade ambiental do etanol de milho e sorgo brasileiro é trazida em grande parte pelo uso de fonte energética limpa (Milanez et al, 2014), caso se utilize fonte energética fóssil, este benefício pode se perder.

3.3. Conclusão

- Há diferenças no perfil de produção de sorgo granífero entre os principais estados produtores brasileiros, que se refletem em intensidades de carbono que variam entre 221,3 e 362,9 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo.
- A intensidade de carbono mais conservadora foi observada para os estados do Maranhão e Piauí (362,9 kg CO₂eq/t de grãos de sorgo), sendo este o perfil de produção recomendado para uso nos demais estados brasileiros, que não possuem perfil específico.
- A penalização do perfil típico de produção de sorgo granífero, para compor o perfil penalizado na RenovaCalc, deve seguir a mesma decisão adotada para o milho, uma vez que esta matéria-prima atenderá a mesma rota de produção de etanol de 1^a geração.

4. Alterações na RenovaCalc

A inserção do sorgo granífero na RenovaCalc implica na disponibilização de duas novas abas de preenchimento para a etapa agrícola de produção desta matéria-prima (Figura 11), sendo uma para dados primários (A) e outra para dados penalizados (B).

Figura 11. Imagem parcial das abas de dados primários (A) e penalizados (B) para o preenchimento de informações a respeito da produção de sorgo granífero, na RenovaCalc.

Cabe destacar que os campos para o preenchimento de dados primários da etapa agrícola permaneceram idênticos para o sorgo granífero e para o milho, sendo modificados apenas valores relativos ao uso de pesticidas e ao fator de determinação de restos culturais (volume e teor de nitrogênio), que ficaram específicos para cada cultura e cada estado. No caso da opção para dados penalizados, o valor da IC do perfil típico de produção do sorgo granífero, obtido para cada estado, foi multiplicado pelo mesmo fator de penalidade atribuído ao milho, considerando que ambas as matérias-primas atendem à mesma rota de biocombustível.

A respeito da aba que declara a NEEA do etanol, cabe destacar que a etapa industrial foi compartilhada entre o milho e o sorgo granífero, com campo de preenchimento distintos a respeito das entradas de matérias-primas, porém com campos únicos para rendimentos de etanol e seus coprodutos e subprodutos, bem como uso de insumos

industriais e consumo energético (Figura 12). Desta forma, a IC do biocombustível, representa o mix de produção e não o biocombustível específico por matéria-prima.

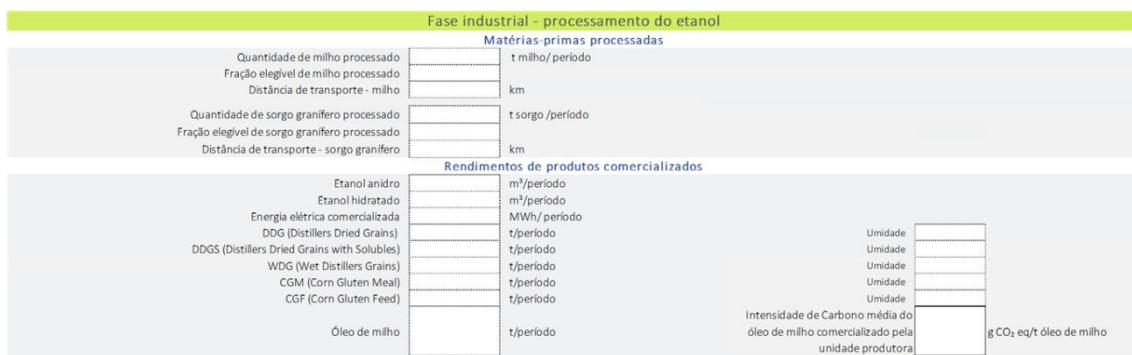


Figura 12. Imagem da aba com os locais de entradas e rendimento da fase industrial para o processamento do milho e sorgo granífero.

5. Considerações Finais

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciam que o sorgo granífero apresenta desempenho técnico, agronômico e ambiental plenamente compatível com os requisitos estabelecidos para a inclusão de novas matérias-primas na RenovaCalc. As intensidades de carbono calculadas, variando entre 221,3 e 362,9 kg CO₂eq por tonelada de grãos, posicionam-se dentro da faixa observada para culturas já certificadas e refletem, de maneira consistente, as diferenças regionais em práticas de manejo, uso de insumos, produtividade e características edafoclimáticas. Esse comportamento reforça a importância de perfis regionais representativos e demonstra que o sorgo responde, adequadamente, à lógica metodológica de avaliação da intensidade de carbono preconizada pelo RenovaBio.

A elaboração dos inventários agrícolas com base em dados primários, obtidos diretamente em unidades produtivas e instituições de pesquisa, conferiu robustez e rastreabilidade ao processo de modelagem. A aplicação rigorosa das normas ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14067 assegurou a consistência metodológica do estudo, especialmente no que se refere à definição do escopo, critérios de qualidade de dados, representatividade temporal e geográfica, e condução das análises de incerteza. A compatibilidade tecnológica entre o etanol de sorgo granífero e o etanol de milho permitiu, adicionalmente, a utilização integral dos parâmetros industriais da rota EM1G, evitando redundâncias metodológicas e garantindo harmonia com a infraestrutura industrial já consolidada no país.

O perfil mais conservador identificado para estados com sistemas produtivos menos consolidados pode ser utilizado como base de penalização, de forma análoga ao procedimento já empregado para o milho, respeitando o princípio de prudência adotado na RenovaCalc. Esse aspecto assegura que a ferramenta permaneça alinhada às melhores práticas de transparência e de proteção contra subestimativas na declaração de dados primários.

Em termos estratégicos, a inclusão do sorgo na RenovaCalc contribui para a diversificação das matérias-primas disponíveis às usinas, reduz a vulnerabilidade decorrente da dependência concentrada no milho e amplia a resiliência das cadeias produtivas frente às variações edafoclimáticas típicas de regiões produtoras. Além disso, sua adoção reforça a segurança de abastecimento para rotas de etanol de primeira geração e fortalece a capacidade de expansão sustentável do setor, em alinhamento com os objetivos e compromissos de redução de emissões previstos na política RenovaBio.

Dessa forma, conclui-se que o sorgo granífero reúne condições técnicas, ambientais e operacionais que justificam sua inclusão como matéria-prima elegível na RenovaCalc, consolidando-se como alternativa estratégica e ambientalmente competitiva para a produção de etanol no Brasil.

6. Referências.

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. *Resolução ANP nº 984, de 16 de junho de 2025*. Diário Oficial da União, Edição 113, Seção 1, p. 126, 17 jun. 2025. 2025a
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Painel Dinâmico de Produtores de Etanol. Brasília, DF: ANP, 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-etanol>. Acesso em: 24 out. 2025. 2025b
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Resolução no 758, de 23 de novembro de 2018. Diário Oficial da União, publicado em: 27/11/2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/legislacao-do-renovabio>
- AGROLINK. Cotações de Grãos: Sorgo. [S.I.]: [S.d.]. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/cotacoes/graos/sorgo>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- ALBUQUERQUE, C.J.B.; VON PINHO, R.G.; RODRIGUES, J.A.S.; BRANT, R.S.; MENDES, M.C. Espaçamento e densidade de semeadura para cultivares de sorgo granífero no semiárido. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 2, p.278-285, 2011.
- ANDREASI BASSI, S.; BIGANZOLI, F.; FERRARA, N.; AMADEI, A.; VALENTE, A.; SALA, S.; ARDENTE, F. **Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. DOI: 10.2760/798894. JRC130796.
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **GREET Model: Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies**. Argonne, IL: Systems Assessment Center, 2023. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/> Acesso em: 22 set. 2025.
- AVELLAR, G. S. et al. Resistance of sorghum hybrids to sorghum aphid. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e264139, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.264139>. Acesso em: 14 nov. 2025
- BARCELOS, C. A.; MAEDA, R. N.; BETANCUR, G. J. V.; PEREIRA JR., N. Ethanol production from sorghum grains [Sorghum bicolor (L.) Moench]: evaluation of the enzymatic hydrolysis and the hydrolysate fermentability. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 4, p. 597-604, out./dez. 2011.
- BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. A. D. C. **Sorgo do plantio à colheita**. 1. ed. Viçosa: [Editora: UFV], 2014. 275 p.
- BRASIL. Paris Agreement, NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC). Brasília, 21 March 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20FINAL%20-%20PDF.pdf>
- BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2017.
- BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a Lei Combustível do Futuro e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, edição 196. Brasília, DF, 08 out. 2024.
- BRASIL. Portaria SPA/MAPA nº 119, de 08 de maio de 2025. Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático – ZARC para a cultura do sorgo granífero no estado da Bahia, ano-safra 2025/2026. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-vigente/bahia/PORTN119SORGORANIFEROBA.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- COELHO, AM. Extração, exportação e ciclagem de nutrientes por híbridos de sorgo granífero. Comunicado Técnico Embrapa Milho e Sorgo, 258. Sete Lagoas, 18p. 2023
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Série histórica cana-de-açúcar: Indústria. 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/cana-de-acucar/industria>. Acesso em: 18 nov. 2025a.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Série histórica das safras: sorgo. 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/series-historicas/graos/sorgo/sorgoseriehist.xls/view>. Acesso em: 18 nov. 2025b.
- COTA, L. V.; SOUZA, A. G. C.; COSTA, R. V.; SILVA, D. D.; LANZA, F. E.; AGUIAR, F. M.; FIGUEIREDO, J. E. F. Quantification of yield losses caused by leaf anthracnose on sorghum in Brazil. **Journal of Phytopathology**, [S.I.], v. 165, p. 479-485 , 2017. DOI: 10.1111/jph.12582.

CUNHA, J., FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I.; CASARIM. V. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 2017 a 2020. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, (19), 5-19, 2023.

DIAWARA, B.; DIALLOS, S.; TRAORE, B.; STA-GGENBORD, S.; PRASAD, V. Effect of planting date on yield and yield components of grain sorghum hybrids. *American Journal of Plant Sciences*, v.15, n.5, p.387-402, 2024. DOI: [10.4236/ajps.2024.155028](https://doi.org/10.4236/ajps.2024.155028)

ECOINVENT ASSOCIATION. ecoinvent database v3.11. Zurich: Ecoinvent, 2024. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>. Acesso em: 22 set. 2025.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Recomendações para o cultivo do sorgo. 2ed. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais, 62p. 1982.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Cultivo do Sorgo. Sistema de Produção. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais, 2015. <https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/cultivos>. Acesso em: 11 de agosto de 2025.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sorgo granífero: características agronômicas, usos e potencial produtivo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Análise de conjuntura dos biocombustíveis – ano 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. 102 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 40 CFR Part 80 [EPA-HQ-OAR-2017-0655;FRL-9981-57-OAR] RIN 2060-AT82 Renewable Fuel Standard Program: Grain Sorghum Oil Pathway, 2018. <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard/final-rulemaking-grain-sorghum-oil-pathways#rule-summary> [Accessed 07 November 2025].

FAOSTAT Database FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. Roma, 2025. Disponível em <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 07 de novembro de 2025.

FOLEGATTI, et al. ICVCalc Web version: inventários de emissões – Folegatti et al., 2025. Plataforma ICVCalc, 2025. Disponível em <https://www.cnpma.embrapa.br/forms/icvcalc.php>.

GOEDKOOP, M., OLE, M., VIEIRA, M., LEIJTING, J., PONSIOEN, T., & MEIJER, E. (2016). SimaPro tutorial. PRé Consultants BV, The Netherlands.

HUNG, Y.-C. et al. Comparison of sorghum and corn starch properties for ethanol fermentation. *Bioresource Technology*, v. 223, p. 91–98, 2017. DOI: [10.1016/j.biortech.2016.10.069](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.069).

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal. 2025. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2021. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Special Report on 1.5 Global Warming.** Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Genebra: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)*. Geneva: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. Geneva: ISO, 2006b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification (ISO 14067:2018)*. Geneva: ISO, 2018.

KANBAR, ADNAN., SHAKERI, E., ALHAJTURKI, D., RIEMANN, M., BUNZEL, M., MORGANO, M. T., STAPF, D., NICK, P., Sweet versus grain sorghum: Differential sugar transport and accumulation are linked with vascular bundle architecture. *Industrial Crops and Products*, v. 167, art. n. 113550, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113550>

KLEINSCHMIT, D. H.; SCHINGOETHE, D.J.; KASLCHEUR, K.F.; HIPPEN, A.R. Evaluation of various sources of corn dried distillers grains plus solubles for lactating dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, v. 89, n. 12, p. 4784 – 4794, 2006. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72528-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72528-0)

KUMAR, D.; SINGH, V. Dry-grind processing using amylase corn and superior yeast to reduce the exogenous enzyme requirements in bioethanol production. *Biotechnol Biofuels* 9, 228 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0648-1>

KUNZE, J. *Corn and sorghum starches*. In: WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N.; PASCHALL, E. F. (Ed.). *Starch: Chemistry and Technology*. 3. ed. New York: Academic Press, 2009. p. 183–192. DOI: 10.1016/B978-012746275-2.00009-4.

Li, H.; DUAN, Y.; YIN, F.; ZHU, Q.; HU, C.; WU, L.; Xie P, Li F, Cheng R, Kong X. Dietary addition of fermented sorghum distiller's dried grains with soluble improves carcass traits and meat quality in growing-finishing pigs. *Tropical Animal Health and Production*. 2022; 54(2): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03089-8>

LIU, X.; CAI, H.; KWON, H.; WANG, M.. **Feedstock Carbon Intensity Calculator (FD-CIC)**. Argonne: Argonne National Laboratory, Systems Assessment Center, 2023. Disponível em: https://greet.anl.gov/tool_fd_cic. Acesso em: 14 jul. 2025.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. de; SOUZA, K. R. D. de. Biologia e fisiologia do sorgo. In: MENEZES, C. B. de (ed.). Melhoramento genético de sorgo. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 81-114.

MARKETSANDMARKETS. *Bioethanol Market*, 2025. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/bioethanol-market-131222570.html>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MATSUURA, M.I.S.F.; SCACCHETTI, M.T.; CHAGAS, M.F.; SEABRA, J.E.A.; MOREIRA, M.M.R.; BONOMI, A.M.; BAYMA, G.; ÍCOLI, J.F.; MORANDI, M.A.B.; RAMOS, N.P.; CAVALETTO, O.; NOVAES, R.M.L. **RenovaCalc: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio**. Nota Técnica, março 2018, 58p. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf

MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; VIANA, P. A. Manejo de pragas. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. (Ed.). Sorgo: do plantio à colheita. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 208 p. 2014.

MENEZES, C. B. DE; FERNANDES, E. A.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S. Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil. In: de Menezes, C. B. Melhoramento genético de sorgo. Brasília: Embrapa, 2021. Cap.1, p.13-58.

MENEZES, C.B. Sorgo granífero: estenda sua safrinha com segurança. Documento Técnico Embrapa, 176. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 65p.

MIALHE, L. G. *Máquinas agrícolas: ensaio & certificação*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1974. 347 p.

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; VALENTE, M. S.; XAVIER, C. E. O.; KULAY, L. A.; DONKE, A. C. G.; MATSUURA, M. I. S. F.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; BONOMI, A. M. F. L. J.; CAPITANI, D. H. D.; CHAGAS, M. F.; CAVALETTO, O.; GOUVÉIA, V. L. R. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política**. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n. 41, p. 147-207, jun. 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Agrofit. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acessem em 11 ago 2025.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA – MME. RenovaBio. Eixos estratégicos. 2018. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/web/quest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>.

MIRANDA, R.A.; CONTIJO, M.M.; GARCIA, J.C. Análise comparativa da lucratividade dos plantios de milho e sorgo na segunda safra em Rio Verde – GO. IN: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, Maringá, 13., 2015.

NEIS, L.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PINTO, F.A. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região Sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.409-416, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200014>

OLIVEIRA, I. R. et al. Associação dos Controles Biológico e Químico para Manejo da Lagarta-do-cartucho na Cultura do Sorgo Forrageiro. Sete Lagoas, MG: Embrapa, 2018. 16 p. (Comunicado Técnico, 234).

OLIVEIRA, J. et al. A cultura do sorgo sacarino: revisão. Research, Society and Development, v. 10, n. 3, e16410312755, 2021. Disponível em: <https://www.rsdjournal.org/rsd/article/download/12755/11163/164302>. Acesso em: 27 nov. 2025.

PEREIRA, L. G.; RAMOS, N. P.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; NOVAES, R. M. L.; SEABRA, J. E. A.; DEBIASI, H.; HIRAKURI, M. H.; FOLEGATTI, M. I. da S. **State-level inventories and life cycle GHG emissions of corn, soybean, and sugarcane produced in Brazil**. Sustainability, v. 17, n. 18, article 8482, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17188482>

PRÉ SUSTAINABILITY. Agri-footprint 6.0: Life Cycle Inventory Database for Agricultural Products. Amersfoort: PRé Sustainability, 2022. Disponível em: <https://www.pre-sustainability.com/solutions/agri-footprint/> Acesso em: 22 set. 2025.

RAMOS, N.P.; FOLEGATTI M.I.S.; BAYMA, G.; NOVAES, R.M.L.; MORANDI, M.A.B.; PIGHINELLI, A.L.M.T.; MENDES, N.C.; SAVIOLI, J.P.P.D.; DEBISI, H.; BALBINOTI JR, A.A. **Regionalização dos perfis típicos de produção de soja para uso no RenovaBio**. 38p. 2023. Acesso em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/ark/regionalizacaosojarenovabio.pdf>

RAMOS, N.P.; MENDES, N.C.; FOLEGATTI, M.I.S.; BAYMA, G.; NOVAES, R.M.L.; MORANDI, M.A.B.; PIGHINELLI, A.L.M.T.; SAVIOLI, J.P.P.D.; BUFFON, V.B. **Regionalização dos perfis típicos de produção de cana-de-açúcar para uso no RenovaBio**. 32p. 2024b. Acesso em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/ark/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatoriofinalcanadeacucar.pdf>

RAMOS, N.P.; MENDES, N.C.; FOLEGATTI, M.I.S.; BAYMA, G.; NOVAES, R.M.L.; PIGHINELLI, A.L.M.T.; MORANDI, M.A.B.; SAVIOLI, J.P.P.D.; MIRANDA, R.A.; SILVA, A.F. **Regionalização dos perfis típicos de produção de milho para uso no RenovaBio**. 41p. 2024a. Acesso em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/ark/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatorio-final-regionalizacao-perfis-tipicos-producao-milho.pdf>

REDDY, P.S. Breeding for abiotic stress resistance in sorghum – Chapter 20. IN: ARUNA, C.; VISARADA, K.B.R.S.; BHAT, B.V.; TONAPI, V.A. Editor. Breeding Sorghum for Diverse end uses. Woodhead Publishing. pp. 325-340, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00020-6>

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA). Ethanol industry outlook. Washington, D.C.: Renewable Fuels Association, 2024. 36 p.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. *Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC): Update 2022*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

RESENDE, A. V. de et al. Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 8 p. (Circular Técnica, 119).

RESENDE, A. V. de et al. Nutrient removal by off-season grain sorghum as affected by intercropping with ruzigrass and fertilization levels in the Brazilian Cerrado. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, v. 21, e1282, 2022.

RONDA, V.; ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V. Chapter 14 - Sorghum for Animal Feed. In: ARUNA, C. et al. (Org.). Breeding Sorghum for Diverse End Uses. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 2019, p. 229-2

SILVA, A. F.; D'ANTONINO, L.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R. Manejo de plantas daninhas. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. (Ed.). Sorgo: do plantio à colheita. Viçosa, MG: UFV, 2014a. p. 188-206.

SZAMBELAN, K.; NOWAKE, J.; SZWENGIEL, A.; JELEN, H. *Comparison of sorghum and maize raw distillates: Factors affecting ethanol efficiency and volatile by-product profile*. Journal of Cereal Science, v. 91, art. 102863, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102863>. Acesso em: 13 out. 2025.

Sorghum Checkoff Program. The United Sorghum checkoff. 2016. <http://www.sorghumcheckoff.com/market-opportunities/renewables/> [Accessed 07 November 2025].

TONINI, H.; MORALES, M. M.; TAKIZAWA, F. H.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; BEHLING, M.; MATOS, E. S.; ABREU, D. C. Diretrizes de pesquisa para o desenvolvimento do setor de florestas plantadas em Mato Grosso. Brasília, DF: Documentos Embrapa, 2022. 22p.

TSE, T.J.; WIENS, D.J.; REANET, M.J.T. Production of Bioethanol—A Review of Factors Affecting Ethanol Yield. *Fermentation* **2021**, 7, 268. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040268>.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE ETANOL DE MILHO – UNEM <https://etanoldemilho.com.br/produtos/> [Accessed 07 November 2025].

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Oilseeds: World Markets and Trade Report. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/>>. Acesso 06 de agosto 2024.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Production - sorghum**. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0459200>. Acesso em: 13 ago. 2025.

WELTZIEN, E.; RATTUNDE, H.; CLERGET, B.; SIART, S.; TOURE, A.; SAGNARD, F. **Sorghum diversity and adaptation to drought in West Africa**. In: J. DEVRA, I. MAR and L. SEARS, eds. Enhancing the use of crop genetic diversity to manage abiotic stress in agricultural production systems: proceedings of a workshop [online]. Rome: IPGRI, pp. 31-38. 2006. Available from: <https://agritrop.cirad.fr/539488>

ZHANG, K.; KE, F.; ZHOU, H.; WANG, J.; MA, Z.; ZHANG, F.; WANG, Y.; ZHANG, Z.; LU, F.; DUAN, Y.; WU, H.; YANG, L.; YAHNG, Z.; ZHU, K.; ZOU, J. The correlation of starch composition, physicochemical and structural properties of different sorghum grains. *Frontiers in Plant Science*, 16:1515022, 2025. DOI=10.3389/fpls.2025.1515022

ZHAO, J.; WEISS, T.; DU, Z., D.; HONG, S.; BEAN, S.R.; LI, Y.; DWANG, D. Comparative evaluation of physicochemical and fermentative responses of three sorghum varieties from dryland and irrigated land and the properties of proteins from distillers' grains. *Journal of Cereal Science*, 104, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103432>