



BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL:

ALINHANDO TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E USO DA TERRA PARA UM PAÍS CARBONO NEGATIVO

OUTUBRO DE 2025



Considerações para a ampliação da produção de
bioenergia em sinergia com a conservação de áreas
naturais e a recuperação de áreas degradadas

BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL: ALINHANDO TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

E USO DA TERRA PARA UM PAÍS CARBONO NEGATIVO

Considerações para a ampliação da produção de bioenergia em sinergia com a conservação de áreas naturais e a recuperação de áreas degradadas

Outubro de 2025

Autores

David Shiling Tsai
Felipe Barcellos e Silva
Felipe Betim
Helen Sousa
Ingrid Graces

Revisão técnica

André Luis Ferreira (IEEMA)
Mirela Coelho (Observatório do Clima)
Ricardo Junqueira Fujii (WWF Brasil)
Suely Araújo (Observatório do Clima)

Projeto gráfico

Mario Kanno

Concepção e organização

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEEMA)

energiaeambiente.org.br

energiaeambiente@energiaeambiente.org.br

Por meio de oficinas colaborativas, o processo de elaboração deste trabalho contou com a importante contribuição de membros das equipes do SEEG e do GT Clima e Energia do OC: Anton Schwyter (IEEMA) | André Ferreira (IEEMA) | Bárbara Zimbres (Ipam) | Cláuber Leite (E+) | Décio Rodrigues (ClimaInfo) | Eduardo Ávila (Revolusolar) | Erian Aurélio Nascimento (Engajamento) | Fábio Ishisaki (OC) | Fernanda Tenório (Idec) | Gabriel Quintana (Imaflora) | Hirdan Costa (Arayara) | Isabelle Flávia Dias (Engajamento) | Isis Rosa (IEEMA) | Joice Oliveira (ICLEI) | Kyem Santos (Pólis) | Lourenço Moretto (Idec) | Marta Salomon (Talanoa) | Meiriele Cumplido (IEEMA) | Mirela Coelho (OC) | Mônica Banegas (Pólis) | Nicole Dejarmes (IEEMA) | Pedro Guedes (E+) | Priscila Alves (Imaflora) | Priscila Pacheco (OC) | Raissa Gomes (IEEMA) | Renato Cunha (Gambá) | Ricardo Baitelo (IEEMA) | Ricardo Fujii (WWF Brasil) | Samara Santos (WWF Brasil) | Shigeho Watanabe (ClimaInfo) | Sofia Lasmar (Imaflora) | Suely Araújo (OC) | Társia Medeiros (Comida do Amanhã) | Vinícius Oliveira (IEEMA) | Wedja Clementino (E+)

Concepção e
organização:

Coorganização:

Apoio:





BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL: ALINHANDO TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E USO DA TERRA PARA UM PAÍS CARBONO NEGATIVO

Resumo executivo

A estratégia do Brasil para descarbonizar sua economia pode ter os biocombustíveis como aliados, dada a experiência de décadas do país nesse setor e no cultivo de matérias-primas necessárias, como a cana-de-açúcar, o milho e a soja. Existe a perspectiva de que o Brasil utilize ainda mais esses combustíveis — em conjunto com um leque de outras fontes renováveis — para suprir sua demanda interna por energia, que aumenta em decorrência do crescimento econômico, e para conter e reduzir suas emissões.

Porém, na perspectiva socioambiental, o incremento do uso de biocombustíveis deve ser avaliado com cautela, já que a produção em larga escala de matérias-primas pode depender de extensas áreas de monocultura. Uma das principais questões que emergem dessa avaliação, no contexto brasileiro, é a necessidade de se garantir que a expansão da produção de bioenergia ocorra sem abrir novas áreas de plantio sobre territórios naturais, preservando a cobertura vegetal do país e possibilitando alcançar desmatamento zero. Isso seria possível por meio da conversão de pastos já degradados para novas áreas de agricultura.

Nesse contexto, este estudo demonstra que o Brasil pode **mais do que dobrar a produção de biocombustíveis até 2050**, para atender um cenário ambicioso de transição energética justa com crescimento econômico, salvaguardas socioambientais e recuperação de áreas naturais, como propõe o Observatório do Clima (OC), **sem que isso resulte em pressão sobre a agricultura de alimentos ou em novos desmatamentos de áreas naturais e territórios protegidos**.

Isso significaria aumentar a produção de matérias-primas para biocombustíveis somente em parte dos **56 milhões de hectares (Mha) de pastos degradados disponíveis para a expansão da agricultura brasileira**, desde que haja uma aposta em cultivos de maior produtividade, como a macaúba, e o investimento em novas tecnologias, como o etanol de 2^a geração.

Para chegar a essa conclusão, esse estudo conduziu uma análise de sensibilidade em que comparou, para um dado **cenário de expansão da produção de biocombustíveis até 2050**, seis opções de combinações de matérias-primas e tecnologias a serem empregadas para alcançá-lo. As estimadas áreas adicionais necessárias até 2050, nessas seis possibilidades analisados, se somariam aos cerca de **31 milhões de hectares utilizados em 2024 para produção de bioenergia**.



Premissas consideradas

Esta análise comparativa considerou as seguintes premissas:

- desmatamento zero em todos os biomas até 2030, com exceção de uma taxa residual de perda de área natural de, no máximo, 100 mil hectares (1000 km^2) anuais, conforme indicou o OC em sua proposta para a segunda NDC do Brasil no âmbito do Acordo de Paris;
- uma área existente de cerca de **100 Mha de pastos degradados**, segundo dados do MapBiomas (2024);
- a destinação de **21 Mha** de pasto degradado para **a recuperação de vegetação nativa**, de **22,5 Mha** para **a formação de pasto de alto vigor para a pecuária**, e de **56 Mha** para **a agricultura** (o que também contempla cultivos energéticos), conforme diretrizes propostas pelo OC para a segunda NDC do Brasil;
- expansão de culturas energéticas apenas sobre áreas hoje classificadas como pasto degradado (de baixo e médio vigor);
- todas as terras públicas não destinadas devem receber classificação de áreas protegidas, terras indígenas, territórios quilombolas ou assentamentos de reforma agrária, como também defendido pelo OC em sua proposta de NDC;
- nenhuma área dentro de unidades de conservação, territórios indígenas ou quilombos é considerada disponível para culturas energéticas;
- uma meta de redução das emissões em todos os setores de 92% até 2035 em relação a 2005 – valor bastante mais ambicioso do que os oficialmente apresentados até o momento pelo governo federal;
- o cenário de mitigação de emissões do uso e produção de energia em paralelo a um crescimento médio do PIB de 2,1% ao ano até 2050, publicado no estudo *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil*;
- as diretrizes e salvaguardas ambientais propostas no mesmo relatório;
- emprego de cultivos agrícolas e rotas tecnológicas selecionados como mais prováveis para a produção de biocombustíveis no Brasil, segundo a dinâmica atual do setor de bioenergia ou a literatura sobre expectativas para essa atividade;
- projeções de demanda energética apenas para o mercado doméstico;
- o consumo de biocombustíveis no país deverá passar de **102 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep)** em **2024** para **221 Mtep** em **2050**.

Área disponível para expansão da bioenergia

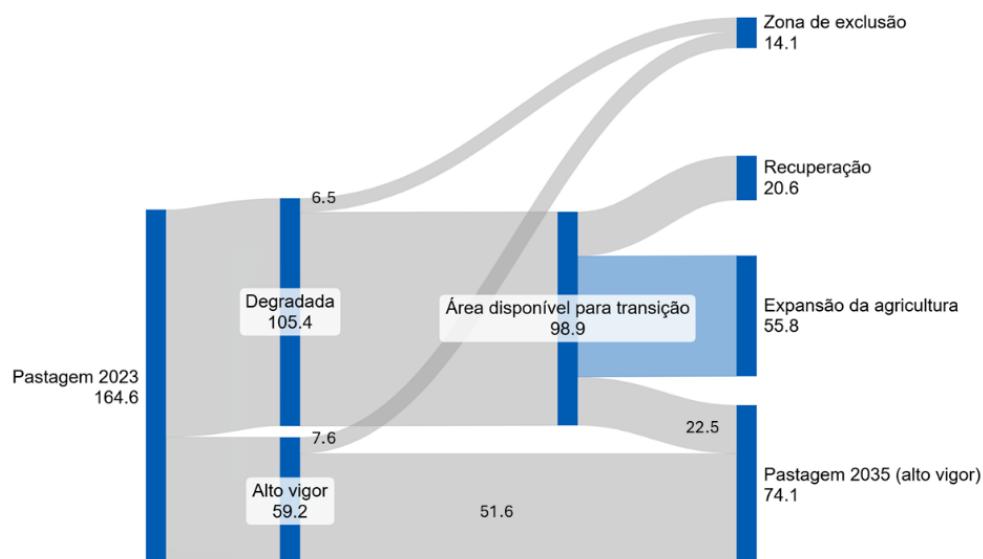
Segundo os dados mais recentes do MapBiomass, o Brasil possuía 59,2 milhões de hectares (Mha) de pastos de alto vigor e outros 105,4 Mha degradados em 2023. Levando em conta que há 14,1 Mha de pastagens localizadas dentro de zonas que precisam ser protegidas — unidades de conservação, territórios indígenas, quilombos e terras públicas não destinadas —, **o Brasil conta com 98,9 Mha de pastos degradados que devem ser recuperados ou convertidos para outros usos.**

Ainda que o Brasil disponha desse importante estoque de pastagens degradadas passíveis de serem usadas, é importante destacar que a proteção e regeneração de áreas naturais e a produção de alimentos deve ter precedência sobre a produção de biocombustíveis.

Assim, desse total disponível, 21 Mha devem ser destinados à recuperação de áreas naturais, conforme o Código Florestal. Além disso, em sua proposta de NDC, o OC calculou, de acordo com políticas vigentes, que 22,5 Mha em pastos degradados precisarão ser recuperados para pastagem de alto vigor, permitindo o aumento da produção e da produtividade da indústria de carne, bem como a remoção de carbono pelo solo.

Sendo assim, **restam 56 Mha para expansão de agricultura de uma forma geral** — incluindo áreas de floresta plantada e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

Transição de pastagens para pastos de alto vigor ou outros usos (em Mha), com destaque para área disponível para expansão da agricultura (incluindo biocombustíveis)



Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomass (2024), Termômetro do Código Florestal (2025) e Proposta de NDC do OC (2024b).



Cenários avaliados

O estudo comparou seis cenários de expansão da oferta de etanol, biodiesel, diesel verde e combustível sustentável de aviação (SAF) até 2050, cada um com diferentes combinações de matérias-primas e tecnologias. Ainda que a matriz de bioenergia seja bastante diversa, esses biocombustíveis foram o principal foco do estudo pelo potencial de serem utilizados em larga escala nos transportes e por serem os que mais demandarão terra nos próximos anos.

Desses seis cenários, quatro “couberam” dentro dos limites propostos anteriormente (56 Mha), demandando uma área adicional de 20 Mha a 35 Mha de cultivos, aproximadamente.

São eles:

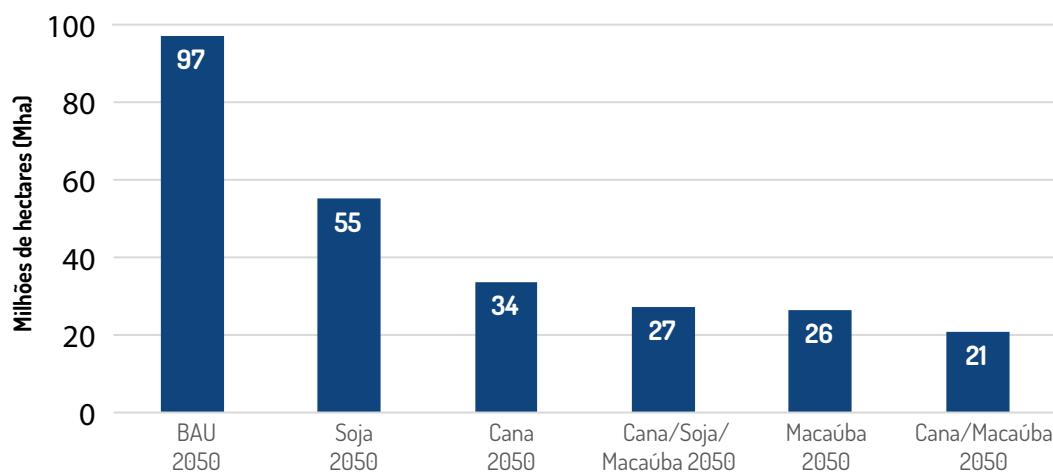
- **Cana/Macaúba 2050 – 21 milhões de hectares adicionais:** 100% do etanol, do diesel verde e do SAF produzidos a partir da cana-de-açúcar e 100% do biodiesel oriundo da macaúba;
- **Macaúba 2050 – 26 milhões de hectares adicionais:** 100% do biodiesel, do diesel verde e do SAF produzidos a partir da macaúba e 100% de etanol oriundo da cana-de-açúcar;
- **Cana/Soja/Macaúba 2050 – 27 milhões de hectares adicionais:** 70% do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e 30% a partir do milho de segunda safra, biodiesel oriundo da soja e da macaúba em proporções iguais e 100% do diesel verde e do SAF produzido a partir da cana;
- **Foco na Cana 2050 – 34 milhões de hectares adicionais:** 40% do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e 60% a partir do milho de segunda safra, 100% do diesel verde e do SAF oriundos da cana e 100% do biodiesel produzido a partir do óleo de soja.

Além dos quatro cenários em que é possível combinar expansão da bioenergia com o objetivo de zerar o desmatamento e regenerar áreas naturais no Brasil, o estudo trouxe dois cenários em que esses objetivos se tornam mais difíceis ou impossíveis de serem cumpridos.

O cenário **Business as Usual (BAU) 2050** mantém a tendência de mercado atual até 2050, ao prever 100% do biodiesel, do diesel verde e do SAF produzidos a partir de óleo de soja, 20% do etanol a partir do milho e 80% de etanol de cana com tecnologia de primeira geração. Com isso, a demanda por área adicional chegaria a **97 milhões de hectares**, muito acima do estoque de terra degradada disponível — o que resultaria, portanto, na necessidade de abrir novas áreas naturais.

Já no cenário **Foco na Soja 2050**, que permanece centrado na soja, mas aproveita todo potencial de produção de etanol, diesel verde e SAF a partir do milho produzido em rotação de cultura, seriam necessários **55 milhões de hectares adicionais**, número próximo ao estoque disponível para expansão da agricultura. Porém, a produção de alimentos, que tem prioridade em relação à bioenergia, e a produção de matérias-primas para outras indústrias, como a têxtil, também deve ser acomodada dentro desses mesmos limites.

Estimativa de áreas adicionais necessárias até 2050 para suprir a demanda por biocombustíveis



Fonte: Elaboração própria.

As áreas adicionais até 2050, nos seis cenários analisados, **se somariam aos 31 milhões de hectares utilizados em 2024** para produção de bioenergia.

É importante frisar que essas valores também contemplam a produção de bagaço de cana e a silvicultura — florestas plantadas, principalmente de eucalipto ou pinus, que geram lenha, carvão vegetal ou lixívia (um subproduto da produção de papel e celulose). A área de silvicultura passaria de **10,7 milhões de hectares em 2024 para 22 milhões de hectares em 2050** em todos os seis cenários analisados.

Resultados da análise de sensibilidade de áreas necessárias para produção de matérias-primas de biocombustíveis em 2050

Cultivo energético	Cenários de uso de terra (Mha)						
	Base - 2024	BAU 2050	Soja 2050	Cana 2050	Cana/Soya/Macaúba 2050	Macaúba 2050	Cana/Macaúba 2050
Cana-de-açúcar	8,1	11,3	11,3	21,7	24,1	19,6	26,6
Soja (sem aproveitamento do milho de 2ª safra)	9,5	87,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soja e Milho (2ª Safra)	3,0	7,6	53,2	21,3	10,6	0,0	0,0
Macaúba	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	16,1	3,6
Silvicultura	10,7	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
TOTAL	31,4	128,5	86,5	64,9	58,5	57,7	52,1
Área adicional em relação ao ano de 2024	-	97,1	55,1	33,5	27,1	26,3	20,7

Fonte: Elaboração própria.



Recomendações

Este estudo evidencia que a combinação de escolhas de cultivos e rotas tecnológicas de maior eficiência — isto é, que demandam menor quantidade de área cultivada por volume de combustível produzido — é necessária para atender a demanda energética em 2050 em um cenário de descarbonização ambicioso e, ao mesmo tempo, cumprir com o compromisso de eliminar o desmatamento, recuperar o passivo ambiental conforme o Código Florestal e capturar carbono por meio da readequação de pastagens degradadas.

Assim, as seguintes recomendações são elencadas, no âmbito das políticas públicas, para avançar no entendimento e planejamento da expansão da produção de biocombustíveis no país:

- 1.** determinar claros objetivos de produção de biocombustíveis para o atendimento do mercado interno atrelados a ambiciosas metas de mitigação de emissões de gases de efeito estufa;
- 2.** delimitar e monitorar áreas de cultivo e áreas de exclusão de cultivos de matérias-primas para a produção de biocombustíveis, em consonância com o compromisso de desmatamento zero e uma estratégia de recuperação de pastagens degradadas;
- 3.** desenvolver uma estratégia de produção de matérias-primas (como óleo vegetal ou etanol) que abarque as vocações geográficas (edafoclimáticas e sociais) do território a ser utilizado para tal finalidade;
- 4.** determinar parâmetros mínimos de eficiência produtiva, mensurados em quantidade de produtos intermediários (como óleo vegetal ou etanol) produzidos por área de cultivo;
- 5.** incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis;
- 6.** elaborar uma estratégia de redução gradual da produção de derivados de petróleo ao mesmo tempo em que se viabilize a produção dos biocombustíveis avançados, avaliando a conversão ou adaptação de refinarias de petróleo para biorrefinarias ou a construção de novos empreendimentos focados em bioenergia.

Sumário

1. Apresentação.....	10
2. Breve contexto sobre biocombustíveis no Brasil.....	12
3. Visão do Observatório do Clima para uso da terra e mitigação de emissões.....	16
3.1 Atualização de áreas de transição de uso da terra conforme dados recentes.....	20
3.2 Distribuição em unidades da federação das áreas disponíveis para expansão da agricultura	21
4. Análise de sensibilidade de estimativas de áreas de cultivo de matérias-primas para biocombustíveis: metodologia e resultados.....	24
4.1 Uso de bioenergia como parte da transição energética no Brasil: a demanda futura por biocombustíveis	24
4.2 Definição de cenários de oferta de biocombustíveis.....	29
4.2.1 Rotas tecnológicas e matérias-primas consideradas	29
4.2.2 Participação de diferentes matérias-primas e tecnologias no fornecimento de cada biocombustível.....	32
4.3 Produtividade: produção de biocombustíveis por hectare de matéria-prima cultivado	34
4.4 Resultados: alocação da demanda de biocombustíveis em áreas	36
5. A necessidade de salvaguardas socioambientais	42
6. Conclusões, recomendações e considerações finais.....	46
7. Referências bibliográficas.....	49
ANEXO: Leis, políticas e regulações vigentes sobre biocombustíveis no Brasil.....	53



1. Apresentação

O Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) e o Observatório do Clima (OC) buscam construir conhecimento para a transição energética brasileira, com vistas ao cumprimento do Acordo de Paris. Como parte desse desafio, é fundamental entender o papel que as diversas fontes de energia podem desempenhar.

A estratégia do Brasil para descarbonizar sua economia pode ter os biocombustíveis como aliados, dada a experiência de décadas do país nesse setor e no cultivo de matérias-primas necessárias, como a cana-de-açúcar, o milho e a soja. Existe a perspectiva de que o Brasil utilize ainda mais esses combustíveis – em conjunto com um leque de outras fontes renováveis – para suprir sua demanda interna por energia, que aumenta em decorrência do crescimento econômico, sem necessariamente elevar suas emissões.

Porém, devido aos impactos socioambientais negativos observados no histórico global do cultivo de matérias-primas para biocombustíveis, a expansão do emprego de bioenergia como alternativa a ser perseguida para a redução de emissões de gases de efeito estufa gera preocupação.

Nesse contexto, este estudo busca avaliar o aumento da produção de matérias-primas para esses biocombustíveis, considerando a demanda necessária para o alcance de uma economia negativa em carbono até 2050, mas utilizando somente parte das áreas hoje ocupadas por pastos degradados, sem a necessidade de qualquer desmatamento adicional ou competição com a produção de alimentos. Busca-se, assim, entender o alinhamento do uso de bioenergia com a preservação de áreas naturais e a recuperação de campos degradados.

Para tanto, foi conduzida uma análise de sensibilidade de estimativas de áreas necessárias para a expansão de culturas energéticas¹, balizada pelas seguintes condições de contorno, que consideram preocupações de potenciais impactos negativos:

- desmatamento zero em todos os biomas até 2030, com exceção de uma taxa residual de perda de área natural de, no máximo, 100 mil hectares (1000 km^2) anuais, conforme indicou o OC em sua proposta para a segunda NDC do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (OC, 2024c);
- uma área existente de cerca de 100 milhões de hectares (Mha) de pasto degradado, segundo dados do MapBiomas (2024);

¹ Culturas energéticas é um termo utilizado para se referir a cultivos agrícolas de espécies vegetais capazes de fornecer matérias-primas para biocombustíveis, como a cana-de-açúcar, a soja ou as florestas plantadas de eucaliptos.



- a destinação de 21 Mha de pasto degradado para a recuperação de vegetação nativa, de 22,5 Mha para a formação de pasto de alto vigor² para a pecuária, e de 56 Mha para a agricultura (o que também contempla cultivos energéticos), conforme diretrizes propostas pelo OC para a segunda NDC do Brasil;
- expansão de culturas energéticas apenas sobre áreas hoje classificadas como pasto degradado (de baixo e médio vigor);
- todas as terras públicas não destinadas³ devem receber classificação de áreas protegidas, terras indígenas, territórios quilombolas ou assentamentos de reforma agrária, como também defendido pelo OC em sua proposta de NDC;
- nenhuma área dentro de unidades de conservação, territórios indígenas ou quilombos é considerada disponível para culturas energéticas;
- uma meta de redução das emissões em todos os setores de 92% até 2035 em relação a 2005 (OC, 2024c);
- o cenário de mitigação de emissões do uso e produção de energia em paralelo a um crescimento médio do PIB de 2,1% ao ano até 2050, publicado no estudo *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil* (OC, 2024b);
- as diretrizes e salvaguardas ambientais propostas no mesmo relatório;
- emprego de cultivos agrícolas e rotas tecnológicas selecionados como mais prováveis para a produção de biocombustíveis no Brasil, segundo a dinâmica atual do setor de bioenergia ou a literatura sobre expectativas para essa atividade;
- projeções de demanda energética apenas para o mercado doméstico.

2 São considerados de alto vigor os pastos com solo em boas condições e com quantidade e crescimento adequado de capim ou outras vegetações. Isso aumenta a produtividade da criação bovina, além de permitir a remoção de carbono da atmosfera e o seu aprisionamento no solo. Manter essa condição por meio de técnicas de manejo, como a adubação de manutenção ou a rotação de áreas de ocupação animal para não compactar excessivamente o solo, é uma boa prática agropecuária.

3 Terras públicas não destinadas “são áreas que pertencem à União, aos estados, aos municípios, ao Distrito Federal ou a entidades da administração indireta, mas que ainda não tiveram uso definido pelos entes federados. Por conta disso, são as áreas mais desprotegidas dos biomas brasileiros, e as que mais sofrem com a grilagem e crimes de desmatamento e garimpo.” (Observatório das Florestas Públicas).



2. Breve contexto sobre biocombustíveis no Brasil

Na perspectiva socioambiental, o incremento do uso de biocombustíveis é avaliado com cautela, já que sua produção em larga escala depende de extensas áreas de monocultura de cana-de-açúcar, milho, soja, entre outros cultivos. Uma das principais questões que emergem dessa avaliação, no contexto brasileiro, é a necessidade de se garantir que a expansão da produção de bioenergia ocorra sem abrir novas áreas de plantio sobre territórios naturais, preservando a cobertura vegetal do país e possibilitando alcançar desmatamento zero. Isso seria possível por meio da conversão de pastos já degradados para novas áreas de agricultura, o que também contempla os cultivos energéticos.

A expansão do uso de energia proveniente de biomassa parece ser um caminho natural para o Brasil, tendo em vista sua experiência acumulada desde a década de 1970, quando o setor de biocombustíveis líquidos para uso em larga escala nos transportes deu seus primeiros passos. Foi nessa época que o país, por meio do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), recorreu ao etanol para driblar as crises globais do petróleo e atender à demanda interna por combustíveis a melhores preços. Em um segundo momento, na década de 2000, os motores *flex fuel*, movidos tanto a gasolina quanto a etanol, deram novo vigor ao setor de bioenergia.

De acordo com a Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2024, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025a), a frota de automóveis era de 37 milhões de unidades naquele ano, sendo que aproximadamente 85% possuíam a tecnologia *flex fuel*. Essa característica do mercado brasileiro potencializa a utilização do etanol.

No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a produção desse biocombustível. Vale citar, no entanto, que o milho vem ganhando relevância, e foi responsável por cerca de 20% da oferta de etanol em 2024 (EPE, 2025a). Isso é um reflexo do fato do milho ser cultivado como segunda safra em áreas focadas na produção de soja, possibilitando a destinação de grandes quantidades do primeiro como matéria-prima para fabricação de álcool. Assim, a produção de etanol em 2024 chegou a um recorde de 37,3 bilhões de litros, 5,7% a mais que o ano anterior, sendo 29,7 bilhões oriundos da cana e 7,7 bilhões a partir do milho.

No caso de caminhões e ônibus, o Brasil vem apostando no biodiesel, que tem no óleo de soja sua principal matéria-prima – 72,4% do volume total produzido em 2024 foi proveniente dessa fonte. Em agosto de 2025, a proporção de biodiesel no óleo diesel comercial foi elevada para 15% (com previsão de chegar a 20%



nos próximos anos). Assim, a produção nacional desse biocombustível em 2024 alcançou 9 bilhões de litros, representando um crescimento de mais de 20% em relação a 2023 (EPE, 2025c).

Nesse contexto, etanol e biodiesel representaram, somados, mais de 22% e 25% da energia utilizada nos transportes em 2023 e 2024, respectivamente, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2025c).

Em 2023, o transporte de passageiros foi responsável pela emissão de 106,1 milhões de toneladas (Mt) de CO₂e na atmosfera, enquanto que o de cargas emitiu 117,7 MtCO₂e no mesmo ano, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024). Essas emissões oriundas dos transportes, sobretudo o de passageiros, teriam sido significativamente piores sem os biocombustíveis⁴. Em 2024, as emissões evitadas pelo uso de etanol e biodiesel em comparação aos equivalentes fósseis (gasolina e diesel) somaram 92 MtCO₂e, segundo dados oficiais (EPE, 2025a).

Devido a esse papel preponderante dos transportes nas emissões brasileiras, o foco do debate sobre bioenergia tem se voltado não só para o etanol e o biodiesel, mas também, mais recentemente, para o diesel verde⁵ e o combustível sustentável de aviação – *Sustainable Aviation Fuel* (SAF)⁶, dado o potencial de crescimento do emprego desses dois biocombustíveis nas próximas décadas. Além do potencial de serem utilizados em larga escala nos transportes, são também os que mais demandam matérias-primas vegetais, oriundas de cultivos intensivos, o que pode representar vetor de pressão pelo uso da terra nos próximos anos.

Mas além dos biocombustíveis citados acima, o setor de bioenergia também abrange bagaço de cana, biogás e biometano, carvão vegetal, lenha, lixívia e outras biomassas utilizadas em menor escala.

Não é só no Brasil que a bioenergia tem relevância. Os Estados Unidos e a Europa – sobretudo a Alemanha, terceiro maior país produtor mundial de biocombustíveis – vêm aumentando a fabricação de biocombustíveis avançados em biorrefinarias, como o diesel verde e o SAF, tido como essencial para a descarbonização do setor aéreo. Outra promessa para o futuro é a expansão da produção de etanol de segunda geração, fabricado a partir de resíduos da cana-de-açúcar, como palha e bagaço, ou outros resíduos agrícolas ricos em biomassa vegetal lignocelulósica.

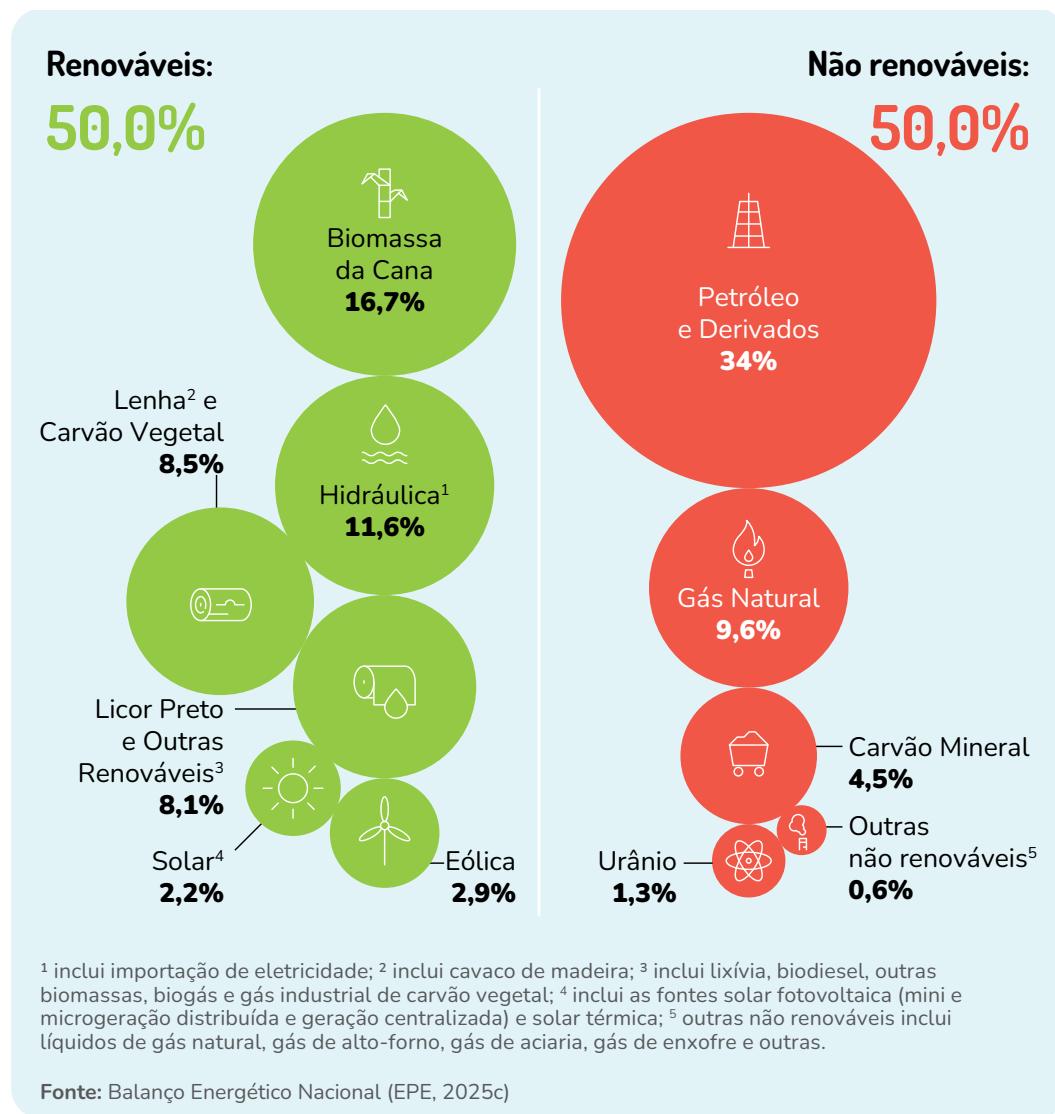
4 Em seus guias, o IPCC — sigla em inglês para Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas — indica que os biocombustíveis podem ser considerados neutros em emissões diretas de CO₂. Isso porque todo CO₂ emitido, resultado da queima desses combustíveis, fora anteriormente capturado da atmosfera, por meio de fotossíntese, durante o ciclo das biomassas utilizadas como matérias-primas para produção de biocombustíveis.

5 Embora tanto o biodiesel como o diesel verde tenham como norte substituir o diesel fóssil em motores à combustão, tratam-se de biocombustíveis diferentes. O primeiro, mais utilizado no Brasil, é um éster de ácidos graxos, obtido pela reação de óleos ou gorduras com um álcool, sobretudo metanol, em processo denominado transesterificação. Por ser menos estável, deve ser misturado ao diesel comum (atualmente em uma proporção de 15%). Já o diesel verde é um hidrocarboneto de composição química semelhante ao diesel de petróleo, produzido a partir do hidroprocessamento, em que se retira oxigênio de óleos vegetais ou gorduras animais. Por seu maior poder calorífico, é mais estável e pode ser usado em qualquer proporção, até mesmo substituindo totalmente o diesel de petróleo nos motores a combustão. O diesel verde mais produzido no mundo é o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil* ou óleo vegetal hidrotratado), que utiliza matérias-primas vegetais, como soja, macaúba e outros tipos de palma. No Brasil, a Petrobras produz, ainda em baixa escala, o HVO coprocessado com o diesel fóssil, em misturada batizada de Diesel R pela petroleira. Espera-se um crescimento da oferta de diesel verde a partir da próxima década.

6 Os combustíveis sustentáveis de aviação podem ser produzidos a partir de óleos vegetais, etanol, resíduos orgânicos ou gorduras recicladas.

Os potenciais avanços tecnológicos do setor e a possibilidade de redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) colocam os biocombustíveis no leque de alternativas que podem suprir o aumento da demanda energética de um país que busca descarbonizar sua economia. No Brasil, a bioenergia já representa 33,3% do total de energia ofertada na matriz, quando somadas as diferentes fontes apresentadas na Figura 1.

Figura 1: Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil em 2024



Essa proporção considerável não se deve somente à inserção dos biocombustíveis nos transportes de passageiros e de carga. Ainda de acordo com o BEN, a renovabilidade da indústria, a segunda atividade econômica que mais demanda energia no Brasil, depois dos transportes, chegou a 64,4% em 2024. E a bioenergia tem um importante papel nisso.

Na indústria de papel e celulose, por exemplo, a lixívia (ou licor preto), um resíduo líquido fruto da digestão da madeira no processo de produção, é usado nas caldeiras para obtenção de vapor para autogeração de eletricidade e para atender às neces-



sidades térmicas da planta industrial. O mesmo se aplica para o bagaço de cana no setor sucroalcooleiro, em que os resíduos da cana (tanto para a produção de açúcar quanto de álcool) são queimados para autogeração de eletricidade, utilizada pela própria unidade industrial, com seu excedente vendido às concessionárias de energia (Embrapa, 2016).

Na geração de eletricidade, a biomassa – bagaço de cana, lixívia, biodiesel, lenha, entre outras fontes – foi a quarta fonte na matriz elétrica brasileira em 2024, segundo o BEN. Ficou atrás de outras fontes renováveis – hidráulica, eólica e solar –, mas na frente de fontes emissoras como gás fóssil e derivados de petróleo.

Já o carvão vegetal é proveniente de florestas plantadas, sobretudo de pinus e eucaliptos, sendo utilizado em indústrias, como a metalúrgica. Por outro lado, o uso de lenha no Brasil ainda está bastante relacionado à coccção, sendo um indicativo de vulnerabilidade social. É desejável que seu consumo decresça conforme o país encontre soluções para superar a pobreza energética de milhões de famílias que não têm acesso a outras formas mais adequadas de energia.

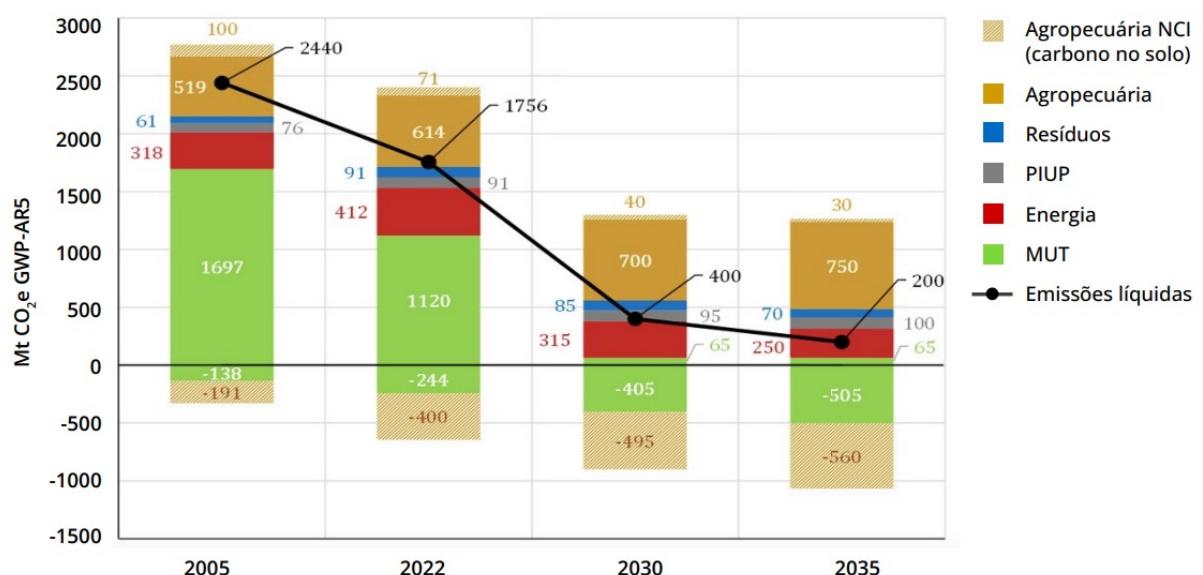
Por fim, mas não menos importante, o biogás e o biometano são biocombustíveis gasosos com potencial de substituir o gás fóssil, o GLP, o diesel, entre outros. São oriundos da decomposição anaeróbica de matéria orgânica de aterros sanitários, dos resíduos do setor sucroalcooleiro e de dejetos da criação de animais. Assim, há um grande potencial, ainda pouco explorado, de produção de energia sem alterações no uso da terra.

Em suma, os biocombustíveis são uma realidade e parte da estratégia das principais autoridades para levar a cabo a transição energética brasileira. Devem seguir relevantes no Brasil no futuro próximo, até 2050, tanto nos transportes de passageiros e de carga como na indústria, entre outras atividades econômicas. Prova disso são as recentes legislações e regulações aprovadas recentemente no Brasil, como a Lei do Combustível do Futuro e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).

3. Visão do Observatório do Clima para uso da terra e mitigação de emissões

Este trabalho toma como ponto de partida a proposta do OC para a segunda NDC do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (OC, 2024c). O documento apresenta um cenário prescritivo de mitigação com a redução de 92% das emissões líquidas brasileiras até 2035 em relação aos níveis de 2005. Esse número é compatível com uma contribuição justa para o Brasil no cumprimento do objetivo de limitar o aumento da temperatura média global em até 1,5°C, como preconiza o Acordo. Trata-se de um compromisso de reduzir as emissões líquidas de GEE de 2,44 bilhões de toneladas de CO₂e, cifra de 2005 estimada pelo SEEG, para cerca de 200 milhões de toneladas de CO₂e (Figura 2), denotando um cenário de descarbonização bastante mais ambicioso que o apresentado pelo governo federal em sua mais nova NDC oficial (MMA, 2024).

Figura 2: Emissões e remoções na proposta do OC para a 2^a NDC do Brasil



Fonte: Bases para a 2^a NDC do Brasil (2030-35) (OC, 2024a).



Para alcançar a redução de emissões oriundas das mudanças de uso da terra (MUT) e da agropecuária, a proposta de 2^a NDC do OC apresenta um cenário de uso da terra no ano de 2035. Nesse cenário, a área de desmatamento anual no país será de 100.000 hectares (1000 km²) já a partir de 2030. Isso significa praticamente zerar o desmatamento no Brasil, com exceção de uma pequena quantidade de novas supressões de vegetação que ainda poderão ser licenciadas. Assim, a área de desmatamento deve cair dos valores atuais para os 100 mil hectares determinados até 2030. Como um dos instrumentos que possibilitarão essa curva de queda, o Brasil deve classificar como áreas protegidas, terras indígenas, territórios quilombolas ou assentamentos de reforma agrária todas suas terras públicas hoje não destinadas.

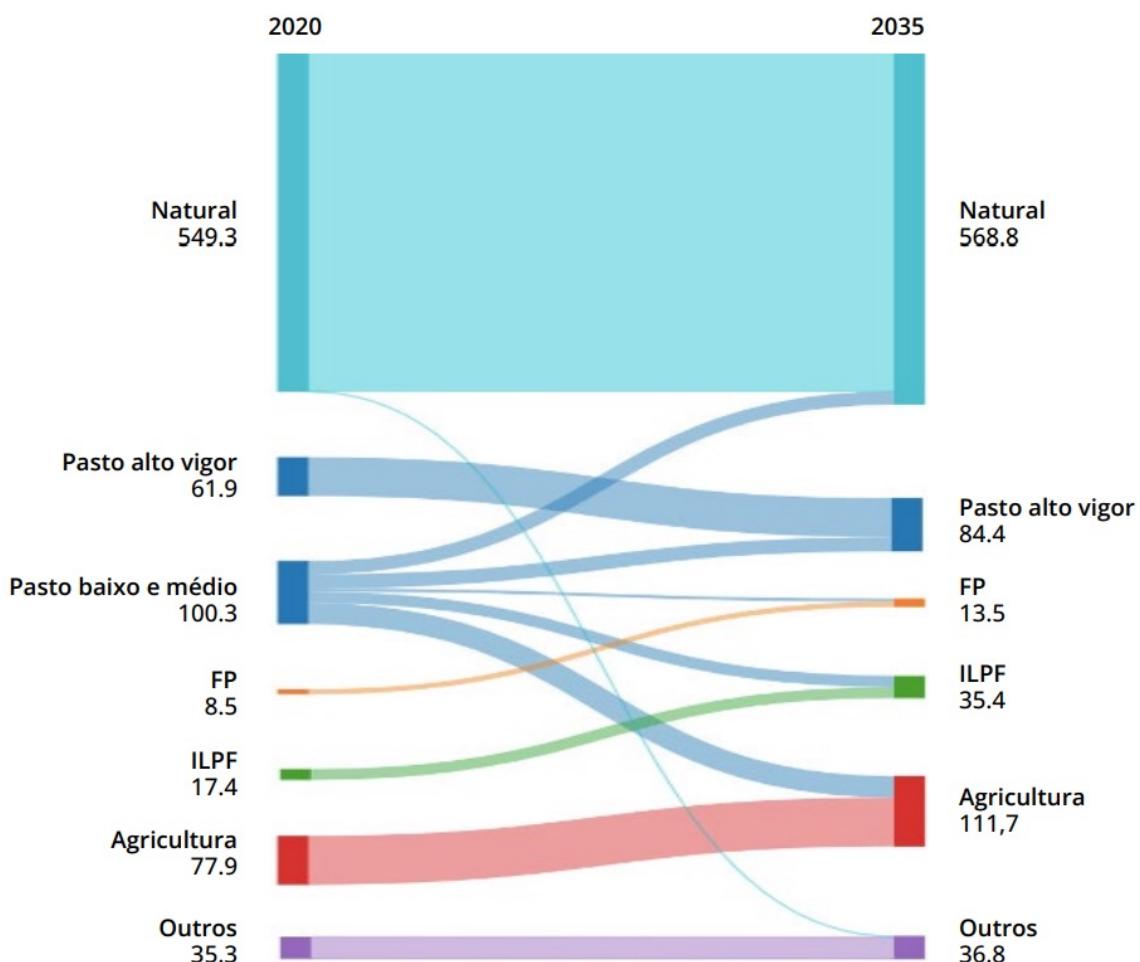
Dessa maneira, nenhuma grande transição de uso da terra poderá ter áreas naturais como ponto de partida.

Simplificadamente, pode-se classificar os usos da terra no Brasil como natural, agropecuário ou outros (zona urbana, mineração etc.). Detalhando um pouco mais, abre-se o uso agropecuário em: (i) pasto de alto vigor; (ii) pasto de baixo e médio vigor; (iii) floresta plantada (FP); (iv) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF); e (v) agricultura. A proposta de NDC do OC determina que a expansão do uso agropecuário deve ocorrer sobre áreas de pasto de baixo e médio vigor, que tendem a ser menos produtivas e têm indicativos de degradação do solo, bem como não são capazes de estocar e remover carbono pelo solo (OC, 2024a).

Além disso, somando ao esforço de eliminação do desmatamento, o Brasil deverá recuperar cerca de 21 milhões de hectares em áreas naturais. Esse montante, estimado pelo Termômetro do Código Florestal (2025), refere-se ao passivo ambiental do Código Florestal (Lei 12.651/2012), ou seja, áreas, dentro de propriedades rurais, que foram convertidas de seu estado natural sem autorização. “Esses locais devem passar por recuperação para fins de regularização ambiental da propriedade rural” (OC, 2024c). Considera-se que a totalidade dessa recuperação também partirá de áreas de pasto degradado (baixo e médio vigor).

A Figura 3 ilustra a dinâmica de transição de uso e cobertura da terra entre 2020 e 2035 elaborada pelo OC em sua proposta de NDC, com vistas à redução de emissões, à preservação ambiental, ao aumento da produtividade pecuária e à expansão da produção de alimentos e outros insumos agrícolas. Destaca-se o fim do desmatamento concomitante ao empenho de recuperação, culminando no aumento de áreas naturais e no fim da conversão dessa categoria de cobertura da terra em outros usos. Além disso, é possível perceber que toda e qualquer mudança de uso do solo acontece apenas nas atuais áreas de pastagens de baixo e médio vigor. Isso implica em uma redução no total de pastagens no país, mas em um aumento de mais de 35% em pastos de alto vigor, mais produtivos, possibilitando a expansão da produção de carne, conforme expectativas do setor.

Figura 3: Uso da terra e transições em 2020 e 2035 em milhões de hectares, de forma consoante com a redução de emissões proposta pelo OC para a 2^a NDC do Brasil

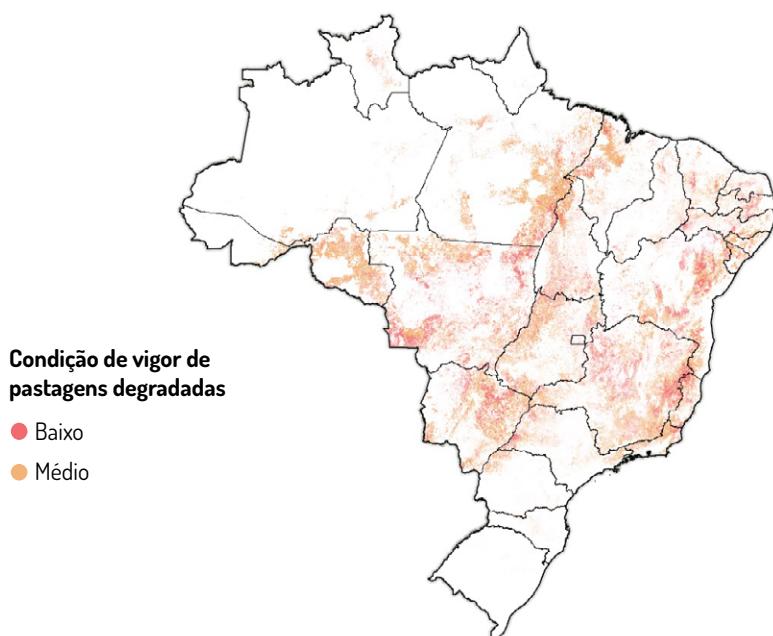


Fonte: Bases para a 2^a NDC do Brasil (2030-35) (OC, 2024a).

Somada à parcela das pastagens degradadas que deve se tornar pastos recuperados ou ser destinada para reflorestamento, existe uma outra importante fatia, de cerca de 60 milhões de hectares (Mha), disponível para se tornar principalmente agricultura.

A Figura 4 traz a localização de todas as pastagens de baixo e médio vigor no Brasil (distribuição de 2024), totalizando cerca de 100 Mha que deverão ter outra destinação até 2035, conforme explanado nos parágrafos anteriores.

Figura 4: Pastagens de médio e baixo vigor no Brasil (2024)



* pastagens de alto vigor não estão aqui representadas

Fonte: MapBiomas (2025).

Este trabalho toma justamente como **premissa** todo esse quadro de uso da terra e de conversão de pastagens degradadas para que o Brasil leve a cabo uma transição energética e ecológica justa, conforme defende o OC.

O Brasil pode, assim, transformar pastos de médio e baixo vigor em áreas de agricultura, eliminando qualquer abertura de novas áreas de cultivo sobre vegetação natural ou territórios protegidos. Deve-se priorizar, sobretudo, a produção justa de alimentos. E, quando cabível, essas áreas de agricultura poderão incluir potenciais cultivos para a produção de biocombustíveis, desde que sejam seguidas todas as salvaguardas socioambientais necessárias.

Iniciativas para impulsionar tanto a recuperação ambiental quanto a produtividade do setor agropecuário estão amparadas por políticas públicas como a “Caminho Verde Brasil”, do Ministério da Agricultura e Pecuária, que busca justamente restaurar áreas degradadas e promover melhores práticas no campo. O programa propõe a recuperação de até 40 milhões de hectares de pastagens de baixa produtividade ao longo dos próximos 10 anos, convertendo essas áreas em terras agricultáveis de alto rendimento, sem a necessidade de desmatamento (Mapa, 2025).

O programa está amparado pelo Decreto 11.815/2023 (DOU, 2023), a partir do qual o governo federal instituiu o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis (PNCPD), com a finalidade de “promover e coordenar políticas públicas destinadas à conversão de pastagens degradadas em sistemas de produção agropecuários e florestais sustentáveis, com vistas ao fomento de boas práticas agropecuárias que levem à captura de carbono em nível superior ao da pastagem degradada”.



3.1 Atualização de áreas de transição de uso da terra conforme dados recentes

Segundo as mais recentes estatísticas do MapBiomass (2024), as áreas de pastagem degradadas (baixo e médio vigor) e de alto vigor já não são as mesmas de 2020, utilizadas como referência para a construção da proposta de NDC do OC (2024b). Em 2023, o Brasil possuía 59,2 milhões de hectares (Mha) de pastos de alto vigor e outros 105,4 Mha degradados. Conforme explanado anteriormente, todas as novas transições de uso da terra devem partir de pastagens degradadas. No entanto, a presente análise, agora, desconsidera as pastagens localizadas dentro de zonas que precisam ser protegidas, aqui chamadas de **zonas de exclusão**: unidades de conservação, territórios indígenas, quilombos e terras públicas não destinadas. Ainda segundo imagens de satélite classificadas pelo MapBiomass, dentro dessas zonas de exclusão, existem 6,5 e 7,6 Mha de pastos degradados e de alto vigor respectivamente, totalizando 14,1 Mha que devem ser recuperados ou preservados.

Portanto, ao desconsiderar as pastagens nessas zonas de exclusão, o Brasil conta com 51,6 Mha de pastagens produtivas (alto vigor), que devem ser mantidas como tal, e 98,9 Mha de pastos degradados, que devem ser recuperados ou convertidos para outros usos.

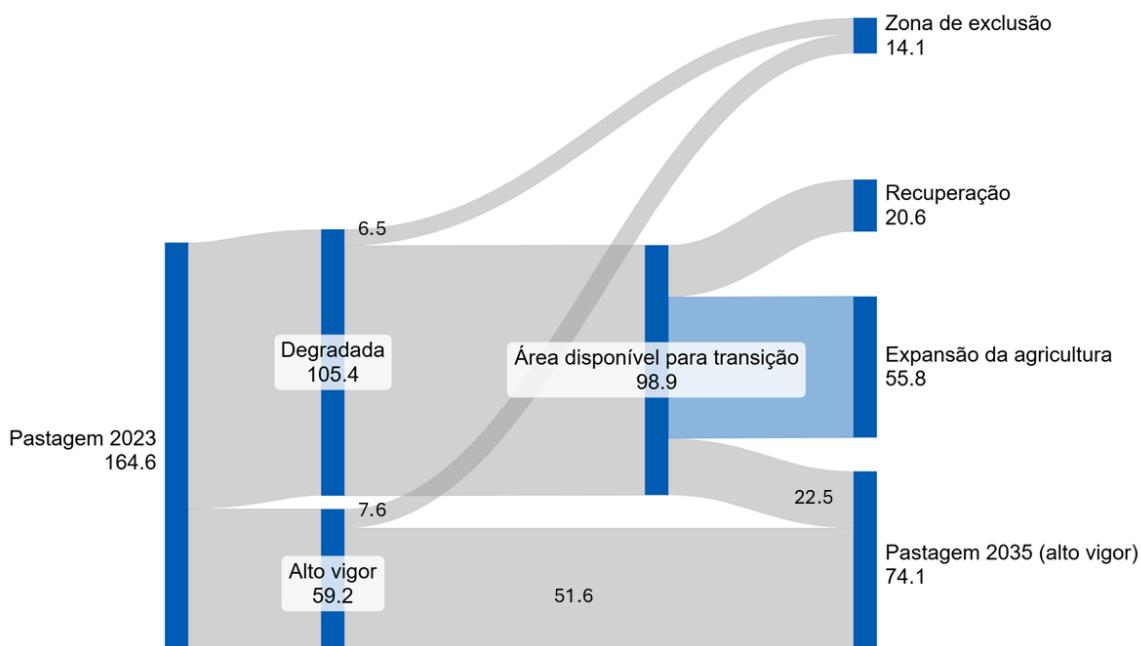
Desses 98,9 Mha de pastagens que precisam sofrer transição, considera-se que 20,6 Mha devem ser destinados à recuperação de áreas naturais, conforme o Código Florestal – esses são os valores mais atuais monitorados pelo Termômetro do Código Florestal (2025). Além disso, em sua proposta de NDC, o OC calculou, de acordo com políticas vigentes, que 22,5 Mha em pastos degradados precisarão ser recuperados para pastagem de alto vigor, permitindo o aumento da produção e da produtividade da indústria de carne, bem como a remoção de carbono pelo solo.

Sendo assim, conforme destacado na Figura 5, restam 55,8 milhões de hectares para expansão de agricultura de uma forma geral – incluindo áreas de floresta plantada e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).



Assim, este estudo toma como premissa fundamental que é somente em parte desses 55,8 Mha que o Brasil poderá expandir sua produção de matéria-prima para a indústria de biocombustíveis.

Figura 5: Transição de pastagens para pastos de alto vigor ou outros usos (em milhões de hectares), com destaque para área disponível para expansão da agricultura (incluindo biocombustíveis)



Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomas (2024), Termômetro do Código Florestal (2025) e Proposta de NDC do OC (2024b).

3.2 Distribuição em unidades da federação das áreas disponíveis para expansão da agricultura

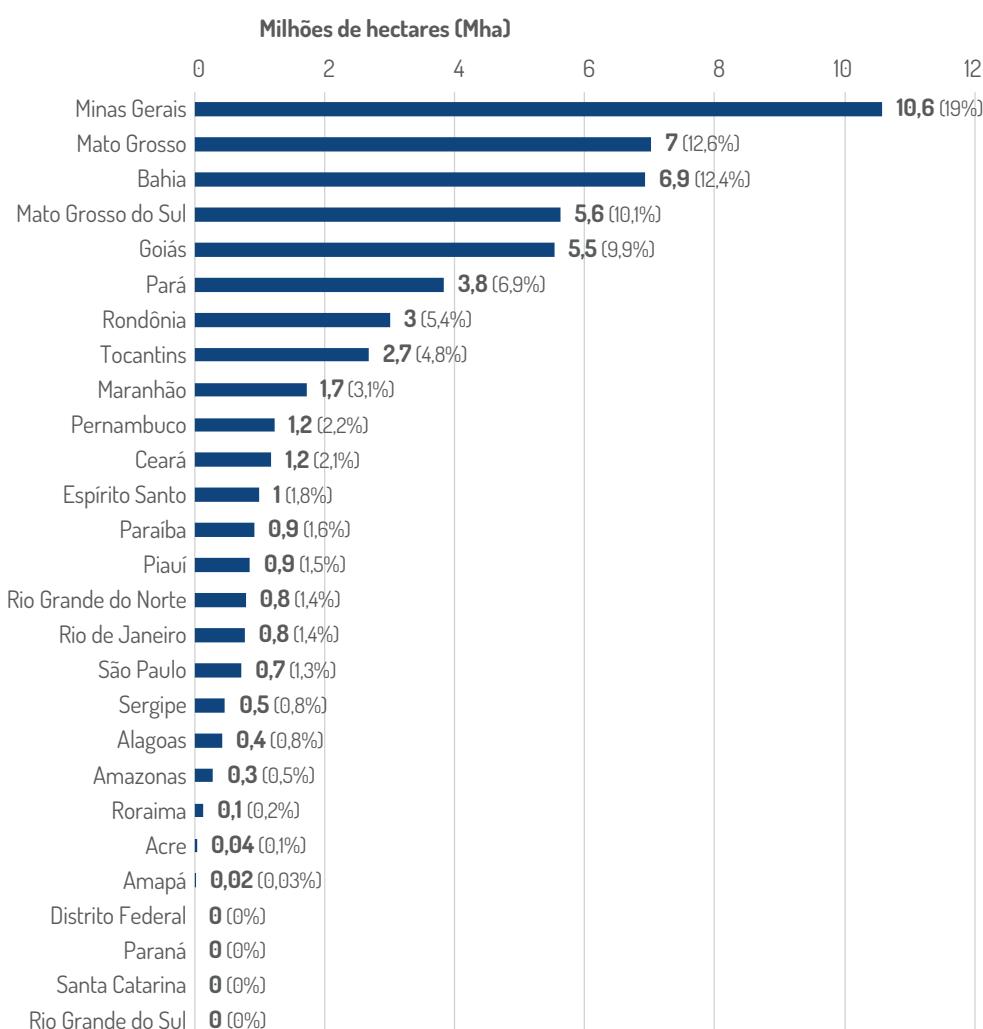
As áreas disponíveis para expansão da agricultura, conforme premissas deste estudo, o que inclui cultivos energéticos, foram alocadas em unidades da federação (UF) por meio das seguintes etapas:

- 1.** foram levantadas as áreas de pastagem de baixo e médio vigor por UF, totalizando 105,4 milhões de hectares (Mha);
- 2.** foram filtradas, UF por UF, as pastagens de baixo e médio vigor localizadas dentro de zonas de exclusão (unidades de conservação, territórios indígenas, quilombos e terras públicas não destinadas), restando, ao todo, 98,9 Mha distribuídos nos estados brasileiros;
- 3.** cada UF teve seu passivo ambiental retirado do montante de pastagem degradada que deve passar por transição – o passivo ambiental por estado foi levantado por meio do Termômetro do Código Florestal (2025);
- 4.** os 22,5 Mha de pastagens degradadas que, segundo a NDC do OC, devem ser convertidos para pasto de alto vigor foram, por simplificação, distribuídos nas unidades da federação na mesma proporção da

quantidade atual de pasto degradado em seus respectivos territórios em relação ao total existente no Brasil; por exemplo, sabendo que Minas Gerais possui 16% dos pastos de baixo e médio vigor do país, considerou-se que 3,6 Mha (16% de 22,5 Mha) dos pastos degradados desse estado devem ser convertidos para pasto produtivo;

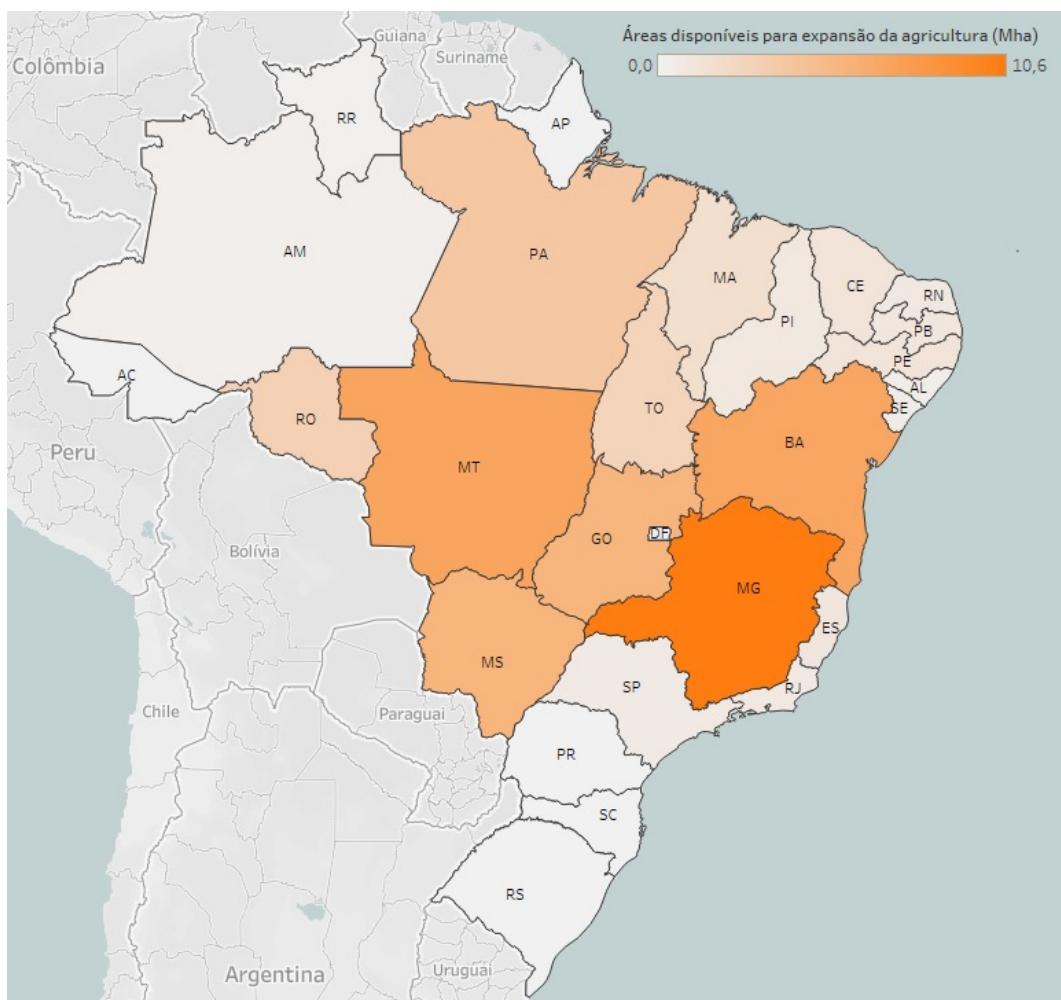
5. das áreas de pastagem por UF disponíveis para transição restantes do passo 3 (um total de 78,3 Mha), foram retirados, para cada UF, os valores futuros de pasto de alto vigor determinados no passo 4;
6. restaram, assim, 55,8 Mha em áreas disponíveis para expansão da agricultura, distribuídas por UF, sendo que a maioria delas (64%) estão localizadas em cinco estados (Minas Gerais, Mato Grosso, Bahia, Mato Grosso do Sul e Goiás), conforme as Figuras 6 e 7.

Figura 6: Áreas disponíveis para expansão da agricultura por Unidade da Federação



Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomas (2024), Termômetro do Código Florestal (2025) e Proposta de NDC do OC (2024b).

Figura 7: Áreas disponíveis para expansão da agricultura no Brasil



Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomas (2024), Termômetro do Código Florestal (2025) e Proposta de NDC do OC (2024b).



4. Análise de sensibilidade de estimativas de áreas de cultivo de matérias-primas para biocombustíveis: metodologia e resultados

A fim de avaliar o uso da terra para aumento da produção de matérias-primas para biocombustíveis, considerando a demanda necessária para o alcance de uma economia negativa em carbono até 2050, foi conduzida uma análise de sensibilidade de estimativas de áreas necessárias para a expansão de culturas energéticas. Para tanto, os seguintes passos foram adotados, sendo descritos ao longo das subseções deste capítulo:

1. projeção da **demand**a de biocombustíveis até 2050 (*Futuro da Energia*);
2. definição de cenários de **oferta**, considerando diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas;
3. levantamento de parâmetros de **produtividade** (litros ou toneladas por hectare); e
4. análise comparativa das **áreas** de culturas energéticas necessárias frente ao quadro de áreas disponíveis (2035), segundo proposta de NDC do OC.

4.1 Uso de bioenergia como parte da transição energética no Brasil: a demanda futura por biocombustíveis

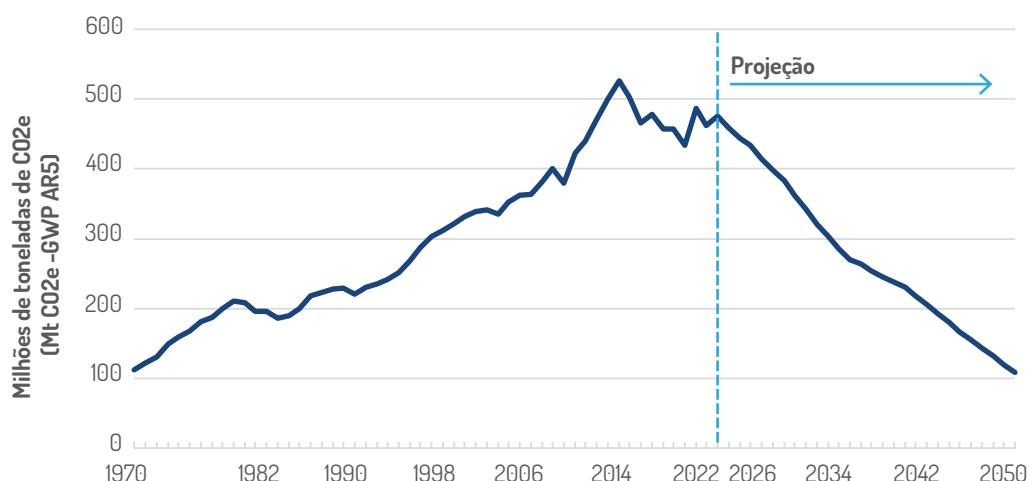
No segundo semestre de 2024, o Observatório do Clima (OC), por meio de seu Grupo de Trabalho sobre Clima e Energia (GT Clima e Energia), lançou o documento *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil* (OC, 2024b), trazendo uma estratégia que considera necessária para a transição energética brasileira. Trata-se de um cenário ambicioso de penetração de tecnologias de baixas ou zero emissões, bem como mudanças estruturais que aumentam a

eficiência sistêmica do uso de energia, visando reduzir ao máximo a utilização de combustíveis fósseis no país, com a premissa de contínuo crescimento da economia.

Conforme observado historicamente, o uso de energia tende a subir de maneira proporcional ao crescimento econômico, representado pelo indicador Produto Interno Bruto (PIB). Para suprir a esperada elevação da demanda por energia, projetou-se o aumento da participação de fontes energéticas não fósseis, como a eletricidade proveniente de usinas fotovoltaicas ou eólicas, o hidrogênio verde e os biocombustíveis. Além disso, foram adotadas taxas de elevação de eficiência energética em diferentes atividades econômicas, o que desacelerou a curva de demanda projetada. Com o objetivo de testar a sensibilidade do modelo desenvolvido, assumiram-se três diferentes taxas médias de crescimento anual do PIB (1,3%; 2,1%; e 2,8%), o que significa três diferentes curvas de demanda de energia até 2050. As soluções empregadas para descarbonizar essa demanda são as mesmas para os três cenários de crescimento de PIB, e, por isso, quanto maior o crescimento da economia, maior é a permanência de combustíveis fósseis na matriz energética, acarretando maiores emissões.

O perfil de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) obtido neste trabalho – considerando o cenário médio de crescimento do PIB (2,1% ao ano) – é apresentado na Figura 8. Com a transição energética defendida pela visão do OC, as emissões brasileiras do setor de energia e do consumo de combustíveis redutores em processos industriais da metalurgia chegarão a 108,9 milhões de toneladas (Mt) de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) em 2050, o que representa uma queda de 77% em relação ao emitido em 2024 (475,8 Mt CO_2e).

Figura 8: Emissões históricas (1970 - 2023) e projetadas conforme visão do OC (2024 - 2050) para o setor de energia e o consumo de combustíveis redutores nos processos industriais da metalurgia⁷



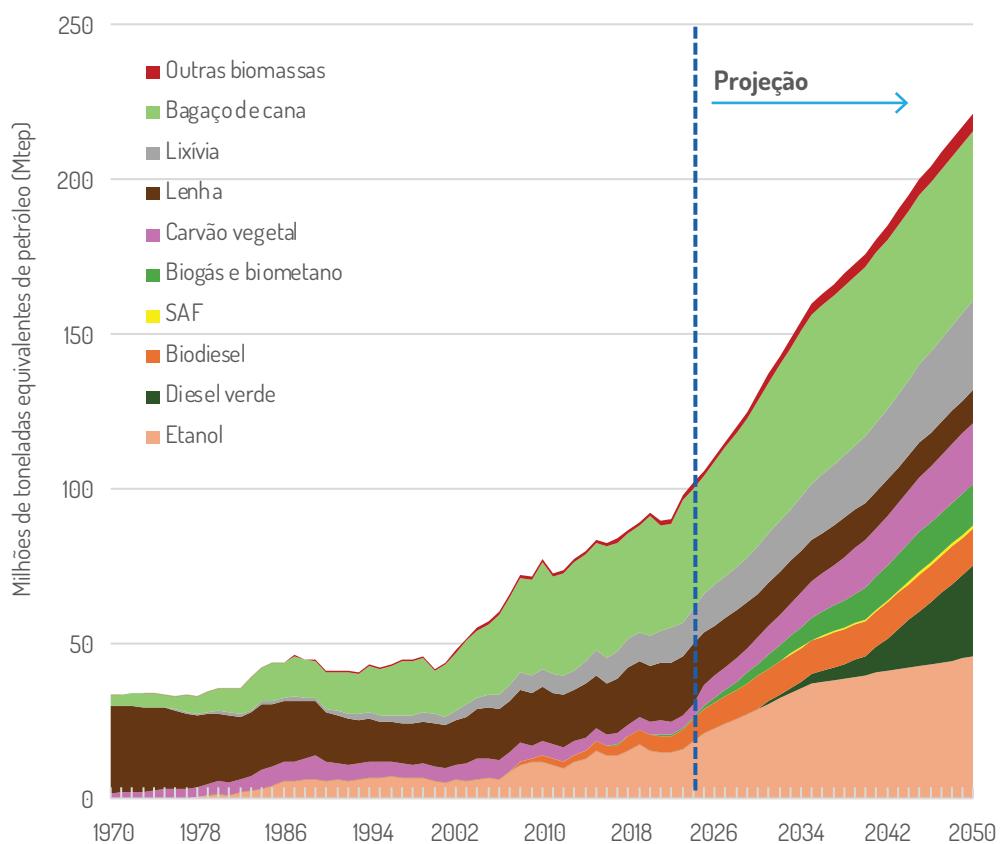
Fonte: adaptado de Futuro da Energia (OC, 2024b).

⁷ Os resultados históricos de emissões utilizados na elaboração do trabalho *Futuro da Energia* (OC, 2024b) foram retirados da coleção 11 do SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa), publicada em 2023, contando com dados até o ano-base 2022. Na figura, as emissões referentes ao período de 1970 a 2023 foram atualizadas com dados da coleção 12 do SEEG, lançada em 2024 com ano-base 2023 (SEEG, 2024). As projeções referentes a 2024 em diante são as mesmas publicadas no documento *Futuro da Energia*.

Esta subseção tem como objetivo detalhar os resultados de evolução do uso de bioenergia alcançados no trabalho *Futuro da Energia* (OC, 2024b), considerando, aqui, apenas o cenário de crescimento de 2,1% ao ano para o PIB brasileiro. **Ou seja, será apresentada a visão do OC para o uso de biocombustíveis como uma das soluções para a transição energética no Brasil.**

Na Figura 9, observa-se a curva histórica do uso de bioenergia no Brasil, bem como o quanto esse uso precisa aumentar. Ao todo, considerando os diversos tipos de biocombustíveis, o consumo de bioenergia no país foi de 102 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) em 2024 (EPE, 2025b), com destaque para bagaço de cana, lenha e etanol. Até 2050, essa oferta de combustíveis provenientes de biomassa deve mais do que dobrar, chegando a 221,1 Mtep. A matriz de biocombustíveis também deverá ser mais variada, passando a contar com novas fontes energéticas.

Figura 9: Consumo histórico de bioenergia (1970 - 2024) e projeções conforme visão do OC para transição energética no Brasil (2025 - 2050)

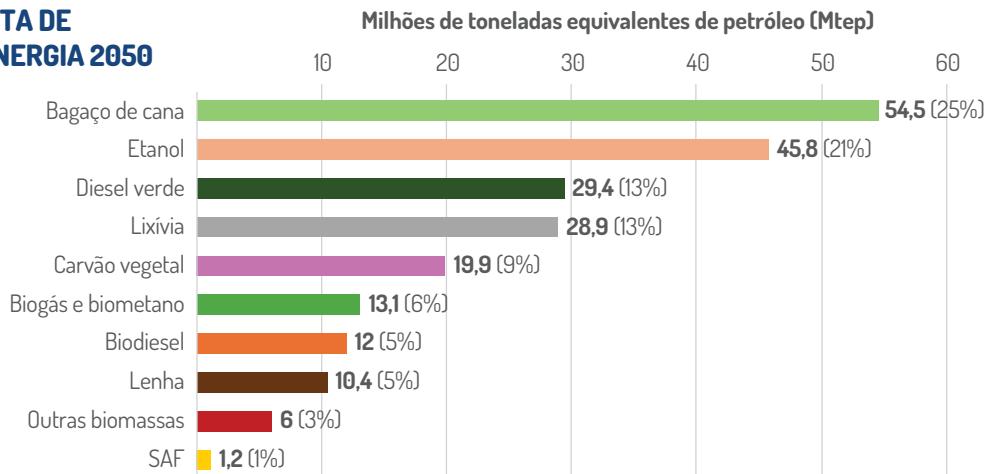


Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e *Futuro da Energia* (OC, 2024b).

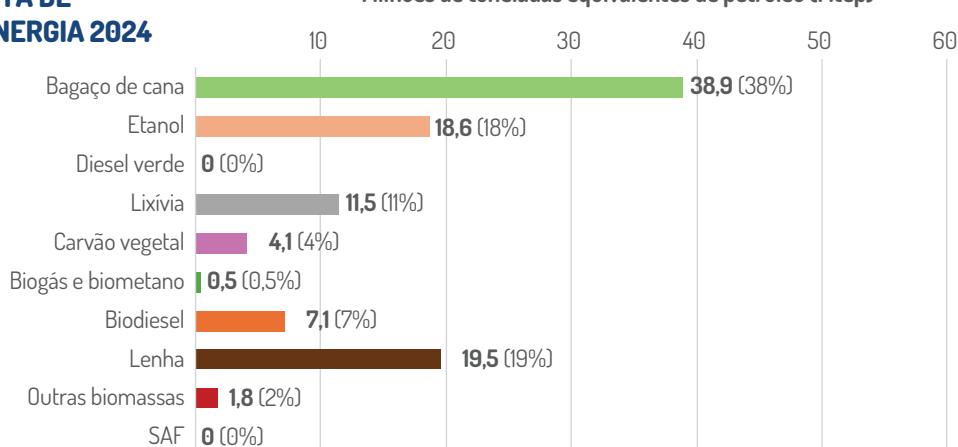
Na Figura 10, é possível observar com mais detalhes tanto qual foi a oferta de bioenergia no ano de 2024, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b), quanto qual é a visão do Observatório do Clima para essa oferta em 2050 (OC, 2024b).

Figura 10: Oferta de bioenergia e participação de cada biocombustível em tal oferta para os anos de 2024 (valor histórico) e 2050 (projeção)

OFERTA DE BIOENERGIA 2050



OFERTA DE BIOENERGIA 2024



Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e Futuro da Energia (OC, 2024b).

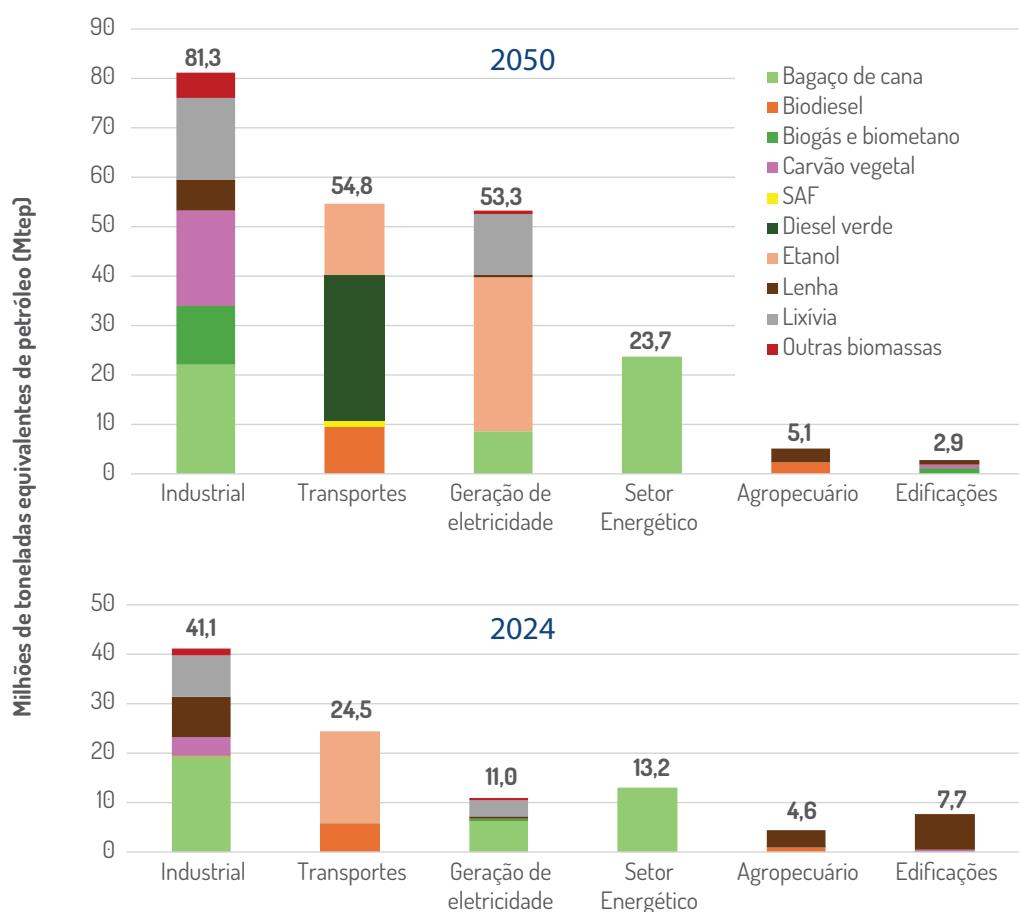
Observa-se a necessidade de expansão relevante de praticamente todos os biocombustíveis, com exceção da lenha, fonte de energia ainda muito usada para cocção residencial. Esse uso da lenha é energeticamente ineficiente, intensivo em emissões de metano (CH_4 – gás com potencial de efeito estufa dezenas de vezes maior do que o CO_2) e de poluentes atmosféricos locais, que causam danos diretos à saúde das pessoas expostas a eles, como o material particulado (MP) e o monóxido de carbono (CO). Esse uso da lenha, na realidade, constitui um indicador mais de pobreza energética do que de emprego adequado de bioenergia, devendo ser reduzido ao máximo, chegando a ser eliminado do contexto urbano.

Tecnologias hoje já bem consolidadas, como o etanol e o carvão vegetal, precisarão ser potencializadas, apoiando a descarbonização dos transportes (principalmente de veículos leves), da geração de eletricidade e da indústria (sobretudo da siderurgia). A visão do OC projeta que o uso de etanol deve crescer 146% entre 2024 e 2050, enquanto o uso de carvão vegetal deve ter uma adição de 384% no mesmo período.

Destaca-se também a consolidação de novas soluções hoje pouco exploradas ou inexistentes: biometano, diesel verde e SAF – do inglês, *Sustainable Aviation Fuel*, ou Combustível de Aviação Sustentável, em português. Em 25 anos, o Brasil deve ser capaz de produzir, por exemplo, 29,4 Mtep de diesel verde por meio de biorrefinarias. Esse biocombustível será fundamental para substituir o diesel de petróleo que, sobretudo, abastece veículos pesados, uma vez que pode ser utilizado em motores existentes sem a necessidade de adaptações ou introdução de novas tecnologias veiculares. Isso é particularmente promissor por permitir a descarbonização da operação sem exigir a renovação completa dos 2,1 milhões de caminhões circulantes⁸ – veículos que estão rodando hoje permanecerão por anos operando – ou da infraestrutura de distribuição de combustível.

A Figura 11 mostra a importância que o diesel verde terá nos transportes em 2050, bem como a utilização dos diferentes biocombustíveis para cada atividade consumidora de energia.

Figura 11: Demanda de biocombustíveis por setor para os anos de 2024 [valor histórico] e 2050 [projeção]



Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e Futuro da Energia (OC, 2024b).

⁸ Valores referentes ao ano de 2024, calculados a partir da metodologia do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, publicado em 2014 pelo Ministério do Meio Ambiente, em parceria com o IEMA e outras organizações (MMA, 2014).



4.2 Definição de cenários de oferta de biocombustíveis

4.2.1 Rotas tecnológicas e matérias-primas consideradas

Após a modelagem da demanda futura de biocombustíveis para descarbonização do uso de energia em um cenário de crescimento médio do PIB brasileiro a 2,1% ao ano, este trabalho busca estimar a magnitude da área necessária para cultivar as matérias-primas a serem utilizadas na expansão da oferta de bioenergia no país. Com isso, pode-se avaliar como a estratégia defendida pelo OC no documento *Futuro da Energia* (OC, 2024b) se alinha com as premissas de transição de uso da terra, bem como de recuperação e preservação de áreas naturais, apontadas em sua proposta de NDC (2024b).

O modelo desenvolvido para o *Futuro da Energia* apontou a demanda de diferentes biocombustíveis até 2050, mas não determinou as rotas tecnológicas e matérias-primas a serem empregadas. O passo de distribuir os biocombustíveis em respectivos modos de fabricação é necessário para estimar a área demandada em cultivos energéticos, já que cada combinação de tecnologia e matéria-prima tem uma diferente produtividade (montante de energia disponibilizada em um biocombustível em relação à quantidade de área utilizada no cultivo da matéria-prima agrícola).

O etanol, o biodiesel, o diesel verde e o SAF apresentam uma variedade relevante de tecnologias de produção, assim como de matérias-primas passíveis de serem utilizadas. Um mesmo cultivo agrícola pode dar origem a biocombustíveis diferentes, a depender das rotas tecnológicas escolhidas. As possibilidades consideradas neste trabalho para determinadas culturas energéticas, visando a posterior estimativa de cenários de áreas territoriais demandadas, são apresentadas a seguir.

Cultivo de cana-de-açúcar:

- o caldo retirado da cana pode ser utilizado para produção de etanol (1^a geração);
- a moagem da cana-de-açúcar para obtenção do caldo gera o bagaço de cana, que pode ser queimado para aproveitamento energético (geração de eletricidade e calor);
- ao invés de ser queimado, o bagaço também pode ser utilizado para fabricação de etanol, no processo de 2^a geração, assim chamado por não demandar matéria-prima alimentar; nesse processo, ainda resta uma parcela de bagaço de cana, que não é mais capaz de gerar etanol, mas que pode ser aproveitado diretamente como combustível (queima);
- o etanol, tanto de 1^a quanto de 2^a geração, pode ser utilizado diretamente como combustível ou como insumo para produção de diesel verde e SAF, por meio de uma rota tecnológica chamada ATJ (*Alcohol to Jet*).



Cultivo de soja:

- o óleo extraído do grão de soja pode, a partir do processo de transesterificação, dar origem ao biodiesel FAME (sigla para *Fatty Acid Methyl Ester*, que significa Éster Metílico de Ácido Graxo, em português);
- o óleo de soja também pode, como outra alternativa, ser direcionado para fabricação de diesel verde⁹ e SAF da categoria HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* ou Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados), ambos produzidos simultaneamente em uma biorrefinaria.

Cultivo de soja em rotação de cultura com o milho como segunda safra:

- como apontado acima, o óleo de soja pode ser utilizado para fabricação de biodiesel FAME ou diesel verde e SAF HEFA;
- do milho, pode-se extrair amido e, então, produzir etanol (1^a geração);
- o etanol de milho pode ser direcionado para consumo final energético ou para servir de insumo em biorrefinarias de diesel verde e SAF ATJ.

Cultivo de macaúba:

- a macaúba é uma espécie de palmeira nativa do continente americano e, por meio de seu fruto, pode ser fonte de óleo vegetal com grande produtividade, similar ao observado com o dendê (*palm-oil*); é possível utilizar tal óleo na fabricação de biodiesel (FAME) ou diesel verde e SAF (HEFA).

Silvicultura:

- a partir de florestas plantadas, principalmente de eucalipto ou pinus, obtêm-se lenha, carvão vegetal ou lixívia (um subproduto da produção de papel e celulose).

Outras fontes de biocombustíveis:

- o biogás é proveniente da decomposição anaeróbica (sem a presença de oxigênio) de matéria orgânica e pode ser coletado de forma controlada, por exemplo, em aterros sanitários ou biodigestores alimentados por resíduos agroindustriais, como dejetos animais ou vinhaça (gerada na produção de etanol); dessa maneira, considerou-se, aqui, que esse biocombustível não é um vetor direto de ocupação de novas áreas territoriais.
- já o biometano é obtido a partir da purificação do biogás, eliminando impurezas de forma que o gás resultante seja composto praticamente apenas de metano;

⁹ O diesel verde resultante do biorrefino HEFA é do tipo HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*, que significa Óleo Vegetal Hidrotratado).



- o Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) – e, portanto, as projeções do *Futuro da Energia* – ainda considera uma categoria agregada de bioenergia denominada de “outras biomassas”, o que inclui biocombustíveis menos utilizados como capim elefante; a área territorial necessária para produção dessas “outras biomassas” não será estimada aqui, já que a demanda por esses biocombustíveis é diminuta em comparação aos demais e, principalmente, porque não há informação específica sobre a real composição dessa agregação.

Os cultivos de soja, milho e cana-de-açúcar foram aqui escolhidos como origens das matérias-primas de etanol, biodiesel, diesel verde e SAF pelo fato de, atualmente, serem responsáveis pela maior parte da produção de etanol (cana e milho) e biodiesel (soja). Apesar da possibilidade de utilização de outros produtos, como trigo, mamona e beterraba, é muito provável a continuidade do uso dominante de soja, milho e cana tanto para produção de etanol e biodiesel, que já fazem parte da matriz energética nacional, quanto para fabricação de diesel verde e SAF, praticamente inexistentes no Brasil¹⁰.

Além disso, esses cultivos estão ligados a outras cadeias produtivas que acabam por impulsionar a adoção dessa tríade como matérias-primas hegemônicas da produção de biocombustíveis. Trata-se da produção de açúcar (cultivo de cana) e de grão, farelo e óleo de soja (cultivo de soja e milho na segunda safra), produtos muito importantes no mercado interno e externo brasileiro.

Como representante de alternativas para a produção de óleo vegetal, escolheu-se, simplificadamente, apenas o cultivo de macaúba. Essa palmeira oleaginosa está no extremo oposto da soja em termos de produtividade de óleo (kg/ha). Enquanto o cultivo de macaúba é capaz de fornecer 4000 kg de óleo por hectare plantado, o de soja fornece cerca de 400 kg/ha (Embrapa). Além disso, a macaúba é nativa do Brasil e presente em quase todo território (especialmente no cerrado) (BiodieselBR, 2023), o que caracteriza uma possibilidade de produção utilizando boas práticas agrícolas, como a agrofloresta, que integra espécies agrícolas e florestais.

Quanto aos processos produtivos de diesel verde e SAF, a análise de sensibilidade de áreas necessárias para fabricação desses combustíveis levará em conta apenas as rotas HEFA e ATJ, mesmo existindo outras, como a gaseificação/Fischer-Tropsch. Isso porque são as duas rotas que mais se viabilizaram até o momento. A tecnologia HEFA tem sido a dominante (EPE, 2025a), com custos médios internacionais que tendem a ser menores do que os de outras alternativas (ICCT, 2019). A rota ATJ também tem crescido comercialmente (EPE, 2025a) e pode se adequar bem à realidade do Brasil, que possui uma já muito consolidada indústria de etanol, insumo para tal rota. Nesse sentido, os custos de produção de diesel verde e SAF via tecnologia ATJ no Brasil podem chegar a ser até menores do que via HEFA (MIT, 2024). Além disso, já existem projetos sendo anunciados por empresas, inclusive a Petrobras, para construção de biorrefinarias HEFA e ATJ no país (EPE, 2025a).

¹⁰ A Petrobras já é capaz de produzir diesel verde em coprocessamento com o diesel de petróleo, resultando em uma mistura de 5% do primeiro e 95% do segundo, chamada de diesel R (Petrobras, 2025).



Por fim, vale também citar que considerou-se o emprego apenas de bagaço de cana para fabricação de etanol de 2^a geração, ou seja, produzido por matéria-prima lignocelulósica que não serve como alimento. O bagaço (e a palha de cana) é uma matéria-prima que tem sido utilizada para isso nas poucas unidades de usinas operantes no Brasil e que, provavelmente, terá essa aplicação expandida de forma mais dominante no futuro próximo.

4.2.2 Participação de diferentes matérias-primas e tecnologias no fornecimento de cada biocombustível

A Tabela 1 traz a demanda projetada no *Futuro da Energia* (OC, 2024b) para cada um dos biocombustíveis que serão considerados na **análise de sensibilidade do total de áreas de culturas energéticas necessárias** para fabricá-los.

Nesse exercício, as matérias-primas e tecnologias empregadas para ofertar os valores apresentados na Tabela 1 só variarão para biodiesel, etanol, diesel verde e SAF.

No ano de 2024, 80% do etanol foi produzido utilizando cana-de-açúcar e outros 20% utilizou milho (EPE, 2025b), sempre com a rota de primeira geração. Apesar de 72,4% do biodiesel fabricado no Brasil em 2024 ter utilizado a soja como matéria-prima¹¹ (EPE, 2025a), considera-se aqui, para fins de simplificação, que 100% desse biocombustível foi proveniente do óleo de soja.

Essa participação de cada matéria-prima e tecnologia no fornecimento de etanol e biodiesel em 2024 é considerada, então, o **cenário base** da análise.

Tabela 1: Demanda de bioenergia em unidades comerciais para os anos de 2024 (valor histórico), 2035, 2045 e 2050 (projeção)

	2024	2035	2045	2050	Demandad adicional (2050 em relação a 2024)
Bilhões de litros					
Biodiesel	9,0	13,8	14,9	15,2	6,2
Etanol	36,0	72,6	84,0	89,7	53,8
Diesel verde	0,0	3,5	20,8	34,6	34,6
SAF	0,0	0,4	1,0	1,4	1,4
Milhões de toneladas					
Bagaço de cana	182,6	256,6	256,5	255,8	73,2
Carvão vegetal	6,4	18,3	26,8	30,8	24,5
Lenha	63,0	42,7	36,2	33,7	-29,3
Lixívia	40,0	63,3	88,0	100,9	60,9

Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2025b) e Futuro da Energia (OC, 2024b).

¹¹ Os outros 27,6% foram produzidos utilizando sebo bovino (5,6%), óleo de palma/dendê (0,7%) e outros materiais graxos (óleos e gorduras) diversos (21,3%), como óleo de cozinha usado (EPE, 2025a).



Para entender a ordem de grandeza de áreas demandadas por cultivos energéticos relacionados às diferentes combinações de rota tecnológica e matéria-prima detalhadas anteriormente (Tópico 4.2.1), foram, então, definidos seis cenários de oferta/fornecimento em 2050, apresentados na Figura 12, e que se aplicam aos valores presentes na Tabela 1.

Figura 12: Cenários de participação de matérias-primas e rotas tecnológicas no volume ofertado de biodiesel, etanol, diesel verde e SAF em 2050

CENÁRIO BASE - 2024:	
Etanol: 80% de cana (1G) + 20% de milho de 2 ^a safra (1G)	
Biodiesel: 100% de soja (FAME)	
Diesel verde e SAF: sem produção	
(mesmas participações de 2024)	
BUSINESS AS USUAL (BAU) 2050:	
Etanol: 80% de cana (1G) + 20% de milho de 2 ^a safra (1G)	
Biodiesel: 100% de soja (FAME)	
Diesel verde e SAF: 100% de soja (HEFA)	
FOCO NA SOJA 2050:	
Etanol: 100% de milho de 2 ^a safra (1G)	
Biodiesel: 100% de soja (FAME)	
Diesel verde e SAF: 45% de soja (HEFA) + 55% de milho (1G+ATJ)	
FOCO NA CANA 2050:	
Etanol: 40% de cana (1G+2G) + 60% de milho de 2 ^a safra (1G)	
Biodiesel: 100% de soja (FAME)	
Diesel verde e SAF: 100% de cana (1G+2G+ATJ)	
CANA/SOJA/MACAÚBA 2050:	
Etanol: 70% de cana (1G+2G) + 30% de milho de 2 ^a safra (1G)	
Biodiesel: 50% de soja (FAME) + 50% de macaúba (FAME)	
Diesel verde e SAF: 100% de cana (1G+2G+ATJ)	
FOCO NA MACAÚBA 2050:	
Etanol: 100% de cana (1G+2G)	
Biodiesel: 100% de macaúba (FAME)	
Diesel verde e SAF: 100% de macaúba (HEFA)	
CANA/MACAÚBA 2050:	
Etanol: 100% de cana (1G+2G)	
Biodiesel: 100% de macaúba (FAME)	
Diesel verde e SAF: 100% de cana (1G+2G+ATJ)	

Fonte: Elaboração própria.

É importante destacar as seguintes considerações acerca da Figura 12:

- por ser a rota mais comum atualmente (EPE, 2025a), foi considerado que diesel verde e SAF serão produzidos com a tecnologia HEFA no cenário BAU 2050; ademais, a única matéria-prima para isso será a soja, já que é a principal fonte brasileira de óleo vegetal para produção de biocombustíveis no momento;
- com exceção do cenário BAU 2050, determinou-se que toda área de soja plantada para biocombustíveis em 2050 também produzirá milho na segunda safra, que deve ser primeiramente direcionada para a produção de etanol (a ser consumido diretamente) e depois, caso haja excedente, para a fabricação de diesel verde e SAF com tecnologia ATJ;



- as participações do milho de segunda safra na produção de etanol e de diesel verde/SAF nos cenários “Foco na soja 2050”, “Foco na cana 2050” e “Cana/Soja/Macaúba 2050” foram calculadas considerando a premissa anterior, bem como já tendo sido levantadas as produtividades (L/ha) de biocombustíveis produzidos a partir de milho ou de derivados da soja (Tabela 2);
- as produções de bagaço de cana, carvão vegetal, lenha e lixívia são consideradas na análise de sensibilidade de áreas agrícolas demandadas, mas não estão aqui representadas por não variarem de rota tecnológica e matéria-prima;
- “1G” significa primeira geração e “1G+2G” se refere à primeira e segunda geração combinadas.

4.3 Produtividade: produção de biocombustíveis por hectare de matéria-prima cultivado

Para converter as quantidades de biocombustíveis demandadas em 2024 e 2050 (vide Tabela 1) em ocupações de áreas referentes aos diferentes cenários de utilização de rotas tecnológicas e matérias-primas (vide Figura 12), foi necessário levantar produtividades em termos de litros ou quilogramas de biocombustíveis fabricados por hectare de matéria-prima agrícola demandada. Os números obtidos e as respectivas referências estão presentes na Tabela 2.

Assim, por exemplo, **ao multiplicar 15.200.000 L**, demanda projetada para o biodiesel em 2050, **por 50%**, participação da macaúba para produção desse biocombustível (FAME) no cenário “Cana/Soja/Macaúba 2050”, **e, então, dividir o resultado parcial por 4.210 L/ha/ano, teremos a resposta** de área de cultivo de macaúba necessária em tal cenário: **1,8 milhões de hectares por ano.**

É importante mencionar que, como colocado no Tópico 4.2.1, algumas áreas de cultivo podem suprir diferentes matérias-primas e, consequentemente, biocombustíveis distintos. É o caso da cultura de soja em rotação com o milho que hoje, em uma mesma área, fornece tanto milho para fabricação de etanol quanto óleo de soja para produção de biodiesel. É o mesmo que acontece com o cultivo de cana-de-açúcar. A partir da mesma cana e, portanto, de uma mesma área, pode-se obter caldo para produção de etanol concomitantemente ao bagaço, utilizado para geração de eletricidade ou calor. Nesses casos, as áreas de cultivo agrícola foram contabilizadas apenas uma vez na análise, eliminando qualquer dupla contagem.



Tabela 2: Produtividades por biocombustível e rota tecnológica/matéria-prima

Biocom- bustível	Matéria- prima	Tecnologia	Produtivi- dade	Parâmetros e referências utilizados
mil litros por hectare por ano (mil L/ha/ano)				
Etanol	Cana-de- -açúcar	1ª Geração (1G)	6,88	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 85,0 litros de etanol (1G)/tonelada de cana (Socicana, 2020)
		2ª Geração (2G)	1,73	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 0,28 toneladas de bagaço/tonelada de cana moída (NovaCana) 50% de água por tonelada de bagaço (NovaCana) 153 litros de etanol (2G)/tonelada de bagaço seco (Pinheiro et al., 2025)
Milho				
Biodiesel	Soja	1ª Geração (1G)	2,48	6,1 toneladas de milho/ha/ano (Conab, 2025) 407 litros de etanol (1G)/tonelada de milho (Senar, 2023)
	Soja	FAME	0,71	3,56 toneladas de soja/ha/ano (Embrapa, 2025) 19% de óleo por tonelada de grão de soja (StoneX, 2022) 926,1 gramas de óleo de soja/litro de óleo de soja (Costa, 2021) 0,975 litros de biodiesel/litro de óleo vegetal (Ferrari; Oliveira; Scabio, 2005)
Diesel verde	Macaúba	FAME	4,21	4000 kg de óleo/ha/ano (Embrapa) 926 gramas de óleo/litro de óleo (Moura et al., 2019) 0,975 litros de biodiesel/litro de óleo vegetal (Ferrari; Oliveira; Scabio, 2005)
	Soja	HEFA (processo otimizado para diesel verde)	0,47	3,56 toneladas de soja/ha/ano (Embrapa, 2025) 19% de óleo por tonelada de grão de soja (StoneX, 2022) 926,1 gramas de óleo de soja/litro de óleo de soja (Costa, 2021) 0,83 litros de combustível refinado/litro de óleo vegetal (Yeoh; Goh, 2022) 0,77 litros de diesel verde/litro de combustível refinado (ICCT, 2019)
Diesel verde	Macaúba	HEFA (processo otimizado para diesel verde)	2,77	4000 kg de óleo/ha/ano (Embrapa) 926 gramas de óleo/litro de óleo (Moura et al., 2019) 0,83 litros de combustível refinado/litro de óleo vegetal (Yeoh; Goh, 2022) 0,77 litros de diesel verde/litro de combustível refinado (ICCT, 2019)
	Cana-de- -açúcar	ATJ (com etanol 1G e 2G) (processo otimizado para diesel verde)	3,99	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 85,0 litros de etanol (1G)/tonelada de cana (Socicana, 2020) 0,28 toneladas de bagaço/tonelada de cana moída (NovaCana) 50% de água por tonelada de bagaço (NovaCana) 153 litros de etanol (2G)/tonelada de bagaço seco (Pinheiro et al., 2025) 0,56 litros de SAF/litro de etanol em processo otimizado para SAF (Copersucar, 2025) 90% de saída de SAF em processo otimizado para SAF (LanzaJet, 2025) 75% de saída de diesel verde em processo otimizado para diesel verde (LanzaJet, 2025)
Milho	Milho	ATJ (com etanol 1G) (processo otimizado para diesel verde)	1,15	6,1 toneladas de milho/ha/ano (Conab, 2025) 407 litros de etanol (1G)/tonelada de milho (Senar, 2023) 0,56 litros de SAF/litro de etanol em processo otimizado para SAF (Copersucar, 2025) 90% de saída de SAF em processo otimizado para SAF (LanzaJet, 2025) 75% de saída de diesel verde em processo otimizado para diesel verde (LanzaJet, 2025)



Biocom-bustível	Matéria-prima	Tecnologia	Produtivi-dade	Parâmetros e referências utilizados
SAF	Soja	HEFA (processo otimizado para diesel verde)	0,09	3,56 toneladas de soja/ha/ano (Embrapa, 2025) 19% de óleo por tonelada de grão de soja (StoneX, 2022) 926,1 g de óleo de soja/litro de óleo de soja (Costa, 2021) 0,83 litros de combustível refinado/litro de óleo vegetal (Yehoh; Goh, 2022) 0,15 litros de SAF/litro de combustível refinado (ICCT, 2019)
	Macaúba	HEFA (processo otimizado para diesel verde)	0,47	4000 kg de óleo/ha/ano (Embrapa) 926 gramas de óleo/litro de óleo (Moura et al., 2019) 0,83 litros de combustível refinado/litro de óleo vegetal (Yehoh; Goh, 2022) 0,15 litros de SAF/litro de combustível refinado (ICCT, 2019)
	Cana-de-açúcar	ATJ (com etanol 1G e 2G) (processo otimizado para diesel verde)	1,33	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 85,0 litros de etanol (1G)/tonelada de cana (Socicana, 2020) 0,28 toneladas de bagaço/tonelada de cana moída (NovaCana) 50% de água por tonelada de bagaço (NovaCana) 153 litros de etanol (2G)/tonelada de bagaço seco (Pinheiro et al., 2025) 0,56 litros de SAF/litro de etanol em processo otimizado para SAF (Copersucar, 2025) 90% de saída de SAF em processo otimizado para SAF (LanzaJet, 2025) 25% de saída de SAF em processo otimizado para diesel verde (LanzaJet, 2025)
	Milho	ATJ (com etanol 1G) (processo otimizado para diesel verde)	0,38	6,1 toneladas de milho/ha/ano (Conab, 2025) 407 litros de etanol (1G)/tonelada de milho (Senar, 2023) 0,56 litros de SAF/litro de etanol em processo otimizado para SAF (Copersucar, 2025) 90% de saída de SAF em processo otimizado para SAF (LanzaJet, 2025) 25% de saída de SAF em processo otimizado para diesel verde (LanzaJet, 2025)
mil quilogramas por hectare por ano (mil kg/ha/ano)				
Bagaço de cana	Cana-de-açúcar	Pós-moagem da cana	22,65	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 0,28 toneladas de bagaço/tonelada de cana moída (NovaCana)
		Pós-moagem da cana e pós-produção de etanol	4,55	80,9 toneladas de cana/ha/ano (EPE, 2024) 0,28 toneladas de bagaço/tonelada de cana moída (NovaCana) 50% de água por tonelada de bagaço (NovaCana) 30% de lignina e cinzas por tonelada de bagaço seco pós-moagem (Antunes et al., 2022) 10% de perdas na fabricação de etanol 2G (Melo, 2020)
Lenha	Eucalipto	Silvicultura	13,14	33,7 m ³ de madeira/ha/ano (Ibá, 2024) 390 gramas de madeira/m ³ de madeira (EPE, 2022)
Carvão vegetal	Eucalipto	Silvicultura	3,36	33,7 m ³ de madeira/ha/ano (Ibá, 2024) 390 gramas de madeira/m ³ de madeira (EPE, 2022) 25% da massa de lenha é convertida para massa de carvão vegetal em carvoarias (EPE, 2025b)
Lixívia	Eucalipto	Silvicultura	9,86	33,7 m ³ de madeira/ha/ano (Ibá, 2024) 390 gramas de madeira/m ³ de madeira (EPE, 2022) 0,5 toneladas de polpa por tonelada de madeira (Gominho et al., 2015) 1,5 tonelada de lixívia produzida por tonelada de polpa (Tran; Vakkilainen, 2016)

4.4 Resultados: alocação da demanda de biocombustíveis em áreas

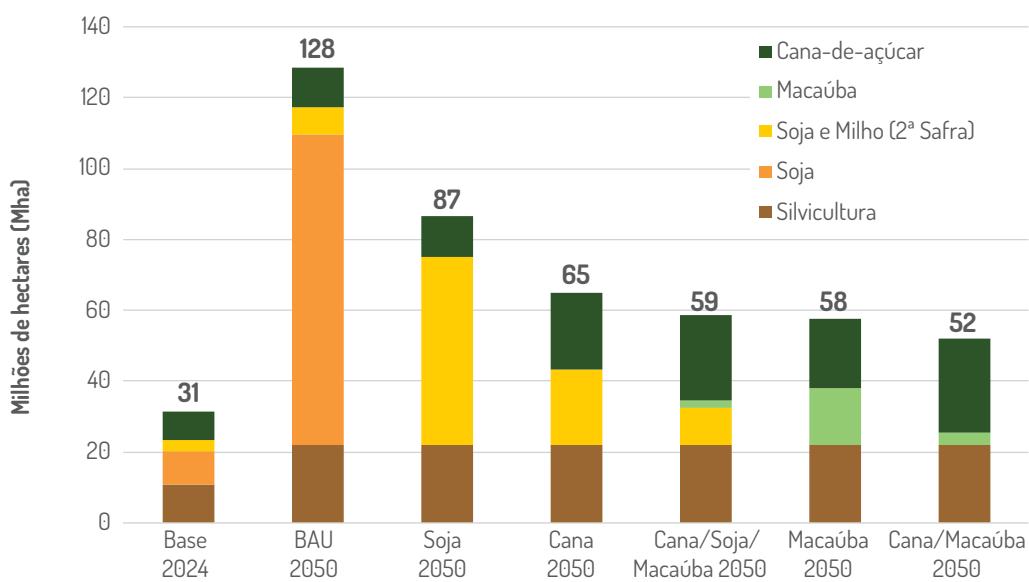
A Tabela 3 e a Figura 13 trazem as estimativas de áreas necessárias para produção de matérias-primas para biocombustíveis, de modo a suprir a demanda projetada pelo Observatório do Clima em sua visão de transição energética justa. Os números, em milhões de hectares (Mha), estão organizados para cada cultura energética e cada cenário de oferta. Abaixo, para cada cenário analisado, é possível consultar tanto as estimativas de área total quanto as de área adicional em relação ao ano de 2024.

Tabela 3: Resultados da análise de sensibilidade de áreas necessárias para produção de matérias-primas de biocombustíveis em 2050

Cultivo energético	Cenários de uso de terra (Mha)						
	Base - 2024	BAU 2050	Soja 2050	Cana 2050	Cana/Soja/ Macaúba 2050	Macaúba 2050	Cana/ Macaúba 2050
Cana-de-açúcar	8,1	11,3	11,3	21,7	24,1	19,6	26,6
Soja (sem aproveitamento do milho de 2ª safra)	9,5	87,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soja e Milho (2ª Safra)	3,0	7,6	53,2	21,3	10,6	0,0	0,0
Macaúba	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	16,1	3,6
Silvicultura	10,7	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
TOTAL	31,4	128,5	86,5	64,9	58,5	57,7	52,1
Área adicional em relação ao ano de 2024	-	97,1	55,1	33,5	27,1	26,3	20,7

Fonte: Elaboração própria.

Figura 13: Estimativa de áreas totais de cultivos de matérias-primas necessárias para suprir a demanda de biocombustíveis (vide Tabela 1) conforme os cenários de oferta propostos (vide Figura 12)



Fonte: Elaboração própria.

Vale frisar que esses valores não representam uma ocupação exclusiva para biocombustíveis. No cálculo do cenário Base, estimou-se que 4,1 Mha em plantações de cana-de-açúcar foram necessários para obtenção do caldo de cana utilizado na



fabricação de 28,8 bilhões de litros de etanol. A área de 8 Mha ocupada por canavais em 2024 é completada por 3,9 Mha utilizados para plantar a cana direcionada à extração do mesmo caldo, mas, dessa vez, convertido em açúcar. A moagem da cana com o objetivo de produzir etanol ou açúcar sempre gera bagaço como resíduo aproveitável energeticamente. Ou seja, em aproximadamente 50% das áreas de canavais, há sobreposição entre produção de alimentos (açúcar) e bioenergia (bagaço).

O mesmo acontece em 100% dos territórios utilizados pela soja. Todos os 12,5 Mha estimados nesta análise como área de soja foram aproveitados tanto para a extração de óleo, direcionado à indústria de biodiesel, quanto para produção, mesmo que indireta, de alimentos, mais especificamente de farelo, utilizado majoritariamente para ração de animais domesticados para obtenção de carne, leite, ovos e derivados. Dessa forma, a alimentação animal é a principal razão econômica do cultivo de soja. O farelo de soja, que posteriormente é direcionado para a atividade pecuária, é obtido por meio do esmagamento do grão de soja, o que também gera óleo como coproducto, abrindo a possibilidade de fabricação de biocombustíveis.

Mesmo na silvicultura há múltiplos usos de matérias-primas e, consequentemente, de áreas agrícolas. É o que ocorre na manufatura de papel e celulose: a madeira é utilizada como principal matéria-prima desses produtos, mas, como resíduo do processo industrial, obtém-se lixívia, aproveitada como fonte energética/biocombustível.

Essas possíveis sobreposições de uso também devem ser levadas em consideração ao se interpretar os resultados projetados para 2050. De modo geral, percebe-se, na Figura 13, que as estimativas variam de 50 a 130 milhões de hectares. Isso denota a grande sensibilidade que a ocupação de terras para produção de matérias-primas utilizadas, total ou parcialmente, por biocombustíveis apresenta em relação às categorias de cultivos empregados. Cenários com maior oferta de biocombustíveis de soja atingem elevados montantes de áreas demandadas em 2050, por mais que essa cultura seja concomitantemente utilizada por outras indústrias (alimentação) e que permita a produção de milho como segunda safra.

O mais elevado valor de áreas necessárias se refere ao cenário *Business as Usual* (BAU): 100% do biodiesel, do diesel verde e do SAF sendo produzidos a partir de óleo de soja, 20% do etanol sendo fabricado com milho cultivado em parcela da área também ocupada pela soja em um ano (segunda safra), além de 80% de etanol de cana. Sem aproveitamento das áreas de cultivo de soja para também produzir milho de segunda safra a ser convertido em etanol ou diesel verde/SAF, a demanda por territórios no cenário BAU explode. Chega-se a 128 milhões de hectares necessários para acomodar produção de bioenergia.

Esse número cai para 87 Mha no cenário “Foco na Soja 2050”, que permanece centrado na soja, mas aproveita todo potencial de produção de etanol, diesel verde e SAF a partir do milho produzido em rotação de cultura com soja, uma boa prática para “economizar” território.

Em cenários com maior penetração da cana e da macaúba, a demanda por áreas de cultivos energéticos permanece alta, mas começa a cair de forma a indicar a

possibilidade de se produzir biocombustíveis no Brasil ao mesmo tempo em que também se produz alimentos, bem como se recupera e protege áreas naturais.

Assim, ao analisar esses resultados, volta-se à pergunta:

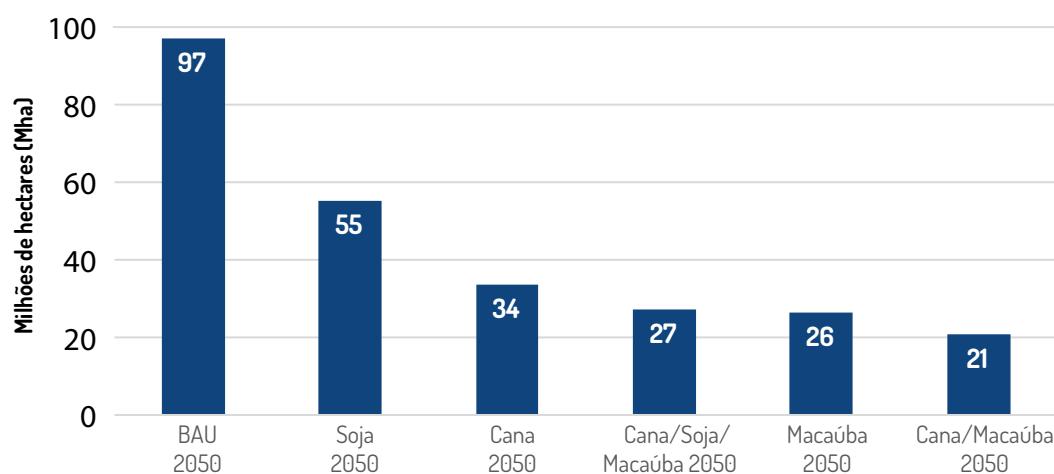


É possível expandir a produção de matérias-primas dos biocombustíveis somente dentro dos cerca de 56 Mha de pastos degradados a serem convertidos em novas áreas para agricultura?

Os resultados, mesmo que simplificados, indicam que a tendência é responder sim a tal pergunta, desde que a produção de biodiesel, diesel verde e SAF não esteja centrada exclusivamente no cultivo de soja. Convém reafirmar, porém, que, dentro dessa área disponível para expansão da agricultura, a produção de alimentos deve ter precedência sobre a de biocombustíveis.

Diminuindo os 31 Mha atualmente utilizados para produção de biocombustíveis dos resultados totais referentes aos diferentes cenários considerados para 2050, obtêm-se os seguintes números de área adicional necessária, conforme Figura 14: 97, 55, 34, 27, 26 e 21 Mha. Esses números representam, em diferentes cenários de oferta (combinações de matérias-primas e rotas tecnológicas), as áreas adicionais que seriam necessárias para suprir toda a demanda por biocombustíveis projetada como visão do OC.

Figura 14: Estimativa de áreas adicionais necessárias até 2050 para suprir a demanda por biocombustíveis



Fonte: Elaboração própria.

Os dois cenários que resultam na necessidade de adição de 97 ou de 55 Mha em culturas energéticas ultrapassam o “estoque” de 56 Mha passíveis de utilização, sobretudo lembrando que a expansão até 2050 da agricultura de alimentos e de matérias-primas para outras indústrias, como a têxtil, também deve ser acomoda-



da dentro desses mesmos 56 Mha. No entanto, os demais cenários ocupariam de 60% a 37,5% das áreas hoje classificadas como pastos degradados e que devem ter seu uso convertido especificamente para agricultura, conforme visão do OC exposta no Capítulo 3.

Assim, cultivos energéticos podem demandar, aproximadamente, de 35 a 20 milhões de hectares adicionais até 2050. Mais do que isso, não seria coerente com o “estoque” de terras potencialmente disponíveis. Esse intervalo de áreas se explica pelos diferentes caminhos que podem ser adotados pela indústria de bioenergia até 2050:

- Cenário “**Cana/Macaúba 2050**”, em que etanol, diesel verde e SAF seriam produzidos exclusivamente a partir da cana-de-açúcar, enquanto o biodiesel seria oriundo apenas da macaúba;
- cenário “**Macaúba 2050**”, com 100% do biodiesel, do diesel verde e do SAF produzidos a partir da macaúba, enquanto o etanol seria 100% oriundo da cana-de-açúcar;
- cenário “**Cana/Soya/Macaúba 2050**”, em que o etanol seria produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho, o biodiesel a partir da soja e da macaúba, e 100% do diesel verde e do SAF a partir da cana;
- cenário “**Cana 2050**”, em que o etanol seria produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho, o diesel verde e o SAF seriam oriundos também da cana, e 100% do biodiesel viria do óleo de soja.

Portanto, os resultados indicam que é possível, mesmo com metas bastante ambiciosas de descarbonização da economia brasileira, aumentar a produção de matérias-primas dos biocombustíveis somente dentro de áreas de pastos de médio e baixo vigor, sem promover novos desmatamentos e respeitando a destinação de parte dessas áreas degradadas para restauração florestal e para a produção de alimentos, conforme mostra a Figura 5.

No entanto, para que isso efetivamente ocorra, é preciso que a soja, uma das matérias-primas com menor produtividade para produção de biocombustíveis, não seja o carro-chefe dessa expansão da bioenergia. É preciso incentivar o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas, como o etanol de 2^a geração, assim como o cultivo de matérias-primas, como a macaúba, que demandam menos hectares de terra para produzir biodiesel, diesel verde e SAF.

Além disso, não se pode negar que a ordem de grandeza das áreas potencialmente necessárias para produção de biocombustíveis até 2050 é muito relevante. Por isso, para garantir que áreas de cultivos energéticos não entrem em competição com usos fundamentais da terra, como florestas e produção de alimentos, serão necessárias políticas públicas de planejamento, monitoramento e controle da expansão da indústria de biocombustíveis.



Limites da análise e potencial de novos estudos

Este estudo não pretende esgotar o debate sobre os caminhos para o Brasil expandir a oferta de biocombustíveis para descarbonizar sua economia de forma ambiciosa e justa, sem que isso resulte em mais desmatamento. Na verdade, é um ponto de partida. Espera-se que, a partir dos limites desta análise, outros estudos venham a ser desenvolvidos de modo a refinar ainda mais o debate e os entendimentos sobre o tema.

Este trabalho considerou dados bastante agregados de uso da terra, bem como produtividades atuais dos cultivos usados, em sistemas de monocultura, para fornecimento de matérias-primas dos biocombustíveis. Foi a partir dessas informações que este estudo mapeou a área disponível e necessária para expandir a produção de matérias-primas, apresentando caminhos para que isso seja feito sem novos desmatamentos e respeitando uma série de salvaguardas socioambientais.

Entre os fatores que podem servir de encaminhamento para outros trabalhos, e que não foram considerados neste, destacam-se:

- uma avaliação sobre preço e posse de terras que se encontram degradadas;
- um mapa de aptidão (solo e clima) para diversos cultivos energéticos;
- o potencial de ganhos de produtividade desses cultivos até 2050;
- as possibilidades de produzir matérias-primas a partir de outros modelos mais sustentáveis (integração lavoura-pecuária-floresta, agrofloresta, entre outros);
- uma caracterização topográfica das áreas com potencial de expandir a produção de matérias-primas;
- uma avaliação sobre a disponibilidade de água nessas áreas e a demanda por recursos hídricos que a produção de matérias-prima deve gerar;
- cenários de mudanças climáticas que podem afetar a agricultura;
- expansão dos cenários de matérias-primas e rotas tecnológicas a serem utilizadas para fabricação de biocombustíveis;
- análise da demanda internacional por bioenergia, principalmente por SAF;
- impactos do uso de transgênicos e agrotóxicos, bem como levantamento de outras soluções de manejo;
- potencial da bioenergia em termos de qualidade e quantidade de empregos;
- avaliação integrada acerca de áreas necessárias para outras formas de uso e geração de energia, notadamente a eletricidade, já que usinas eólicas e solares também demandam locais para se instalarem.



5. A necessidade de salvaguardas socioambientais

Aposta nos biocombustíveis também significa que o Brasil deverá seguir produzindo matérias-primas agrícolas em larga escala, que atualmente contam com uso intensivo de agrotóxicos¹², a partir de monocultivos que afetam o solo, a água e os ecossistemas locais. O risco é o de intensificar uma série de impactos socioambientais, como o aumento do desmatamento, o êxodo rural, o crescimento da concentração de terras, a exploração de trabalhadores e a contaminação de corpos d'água. Somados à questão da competição do uso de terra para a produção de alimentos, são esses os principais fatores que geram resistências em relação à bioenergia como caminho para a transição energética brasileira.

Há receio que o uso da terra para a produção de commodities possa afetar a própria segurança alimentar da população. Sem salvaguardas mínimas, a busca e aquisição de mais áreas de solo fértil para produção de biocombustíveis pode não só aumentar a concentração de propriedade, como também, em decorrência disso, intensificar conflitos de terra e deslocamentos populacionais, bem como ameaçar a biodiversidade.

É o que já aconteceu na região Centro-Sul brasileira, com a cana-de-açúcar pressionando o arroz, o feijão, o milho, o café, entre outros cultivos, a se expandir por novas áreas (Aguiar; Souza, 2014). Além disso, apesar da possibilidade de se produzir biodiesel a partir de uma gama de insumos vegetais ou animais, como macaúba, girassol, dendê, amendoim, mamona ou sebo bovino, mais de 70% é fabricado a partir do óleo da soja, produzida em larga escala para exportação.

12 O Brasil é considerado o maior usuário de agrotóxicos do mundo, segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO). Mais de 800 toneladas de pesticidas foram aplicados em 2023 nas lavouras nacionais, mais do que a soma do utilizado pelos Estados Unidos e Indonésia, segundo e terceiro maiores consumidores, respectivamente. Pesquisa da consultoria Kynetec Brasil de 2024 mostrou que a soja, o milho e a cana-de-açúcar aparecem, respectivamente, em primeiro, segundo e quinto lugar entre as culturas que mais utilizam agrotóxicos no país. Especialistas alertam para o fato de que monoculturas em larga escala tornam os cultivos mais vulneráveis a pragas e doenças, o que torna necessário o uso de agrotóxicos para manter a alta produtividade. Mais informações podem ser encontradas nos seguintes *links*:

JORNAL DA USP, 2025. **Monocultura, alicerce do agronegócio, é dependente do uso de agrotóxicos.** Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/monocultura-alicerce-do-agronegocio-e-dependente-do-uso-de-agrotoxicos/>. Acesso em: 12 set. 2025.

GLOBO RURAL, 2024. **Área tratada com defensivos aumenta mais de 10% no Brasil.** Disponível em: <https://globorural.globo.com/insumos/noticia/2024/11/area-tratada-com-defensivos-aumenta-mais-de-10percent-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 12 set. 2025.

FAO, 2025. **FAOSTAT - Pesticides Use.** Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>. Acesso em: 12 set. 2025.



Já a produção de carvão vegetal e de lenha estão relacionadas a florestas energéticas, que são plantadas, extraídas e replantadas, em um ciclo que busca reduzir a pressão sobre as florestas naturais. O eucalipto e o pinus são as principais espécies usadas para esse fim, devido ao alto teor energético e rápido crescimento, mas não são espécies nativas brasileiras. A depender da região, do bioma, das condições prévias de plantio e das técnicas de manejo empregadas, podem trazer impactos para os ecossistemas locais, como o ressecamento e a degradação do solo, a redução da biodiversidade e o rebaixamento do lençol freático (Repórter Brasil, 2011).

A Indonésia traz um exemplo do que o Brasil deve evitar se quiser avançar em direção a uma transição energética justa e sem novos impactos socioambientais. O país do Sudeste Asiático expandiu a produção de óleo de palma (espécie similar à macaúba brasileira) sobre sua floresta tropical primária para produzir o óleo utilizado principalmente pela indústria de alimentos, mas também de cosméticos, detergentes e outros produtos manufaturados, além de biocombustíveis. De acordo com estudo sobre o tema (Gaveau *et al.*, 2022), estima-se que a área para o cultivo de óleo de palma na Indonésia dobrou entre 2001 e 2019, alcançando 16,2 milhões de hectares, sendo 64% de produção industrial, em larga escala, e 36% de pequenos agricultores. Paralelamente, a área de floresta natural teve uma redução de 9,8 milhões de hectares, o que representou uma queda de 11% de sua cobertura no mesmo período.

Um relatório da União Europeia (Parlamento Europeu, 2020), que coloca a Indonésia e a Malásia como principais produtores de óleo de palma – responsáveis por 42% e 36% da produção global, respectivamente –, afirma que o monocultivo dessa *commodity* vem colocando em risco as florestas tropicais, ameaçando a biodiversidade e, contradictoriamente, contribuindo para o aumento das emissões de GEE causadas por desmatamento.

“Alega-se que o setor fornece emprego direto para quase 1 milhão de pessoas na Malásia e 4 milhões na Indonésia, muitas vezes em áreas rurais remotas, onde o emprego alternativo é escasso. No entanto, nem todos se beneficiaram; na Indonésia, as comunidades indígenas muitas vezes carecem de documentos legais para certificar sua propriedade de terras, e há muitos conflitos legais entre as empresas com concessões governamentais em áreas florestais e as pessoas que usam a terra há séculos. Em alguns casos, isso levou a população local a perder o acesso à terra e aos recursos”, afirma o documento.

“O desmatamento é a principal razão pela qual o óleo de palma é controverso. Expandir a produção significa que mais terra é necessária para novas plantações. Isso não resulta necessariamente em mais desmatamento, pois os dendezeiros podem ser plantados em terrenos degradados ou anteriormente utilizados para outras culturas. No entanto, estudos científicos sugerem que 45% da superfície coberta por novas plantações era de floresta natural”, acrescenta.

O documento do bloco europeu afirma que a Indonésia vem tomado uma série de medidas para tornar a produção do óleo de palma mais sustentável. Por exemplo, desde 2011 deixou de autorizar novas concessões para o desmatamento de florestas primárias para abrir novas fronteiras de produção. Apesar disso, diz o relatório, o país perdeu mais de 10.000 km² de floresta por ano entre 2017 e



2019, em grande parte por conta da produção do óleo de palma. “A boa notícia é que isso ainda é menos da metade da taxa recorde de desmatamento de 24.000 km² em 2016. O desmatamento também desacelerou na vizinha Malásia, o outro principal produtor, que tem um compromisso de manter pelo menos metade de sua área de terra sob cobertura florestal natural”.

Convém ponderar que Indonésia e Malásia são grandes fornecedores de óleo para o mercado internacional, realidade, ao menos por enquanto, distinta do Brasil – que, por outro lado, é o principal fornecedor mundial de soja, cujo óleo pode ser aproveitado para a produção de biocombustíveis. Assim, os casos mencionados anteriormente se inserem dentro de um contexto global em que os países produtores de *commodities* agrícolas estão longe de serem os principais consumidores do produto final.

Seja como for, os fatos e preocupações descritos acima são os mesmos abordados no documento *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil*. Apesar da importância dos biocombustíveis, cabe aqui, portanto, reafirmar a necessidade de salvaguardas socioambientais, com controle de áreas e recursos a serem empregados para produzir bioenergia, além de definição e regulamentação de zonas de exclusão, como a Floresta Amazônica.

O documento também descreve medidas gerais de mitigação dos impactos socioambientais das renováveis, sob a premissa de que a transição energética precisa ser justa e contar com ampla participação das comunidades afetadas, além de guiada por um arcabouço regulatório robusto, que dê conta dos desafios atuais.

Entre tais medidas, destacam-se:

- os processos de licenciamento ambiental devem ser mais estruturados e cuidados, priorizando a conservação e a redução dos impactos causados pelos novos projetos;
- devem-se estabelecer salvaguardas socioambientais e territoriais, não apenas no licenciamento, com mecanismos de controle e monitoramento de risco e de garantia de cumprimento de direitos;
- o poder público deve mapear as áreas social e ambientalmente sensíveis para a implantação de projetos de energia renovável, estabelecendo zonas de exclusão e zonas de amortecimento no entorno de áreas protegidas ou habitadas;
- de modo a garantir os direitos das populações locais, deve-se acelerar a regularização fundiária de territórios que se encontram em meio a processos demorados de reconhecimento, demarcação e proteção por parte do poder público.

Um exemplo de política pública a ser seguido é o Decreto 6961/2009, que estabeleceu o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (ZAE Cana) e, entre outras



medidas, proibiu seu plantio na Amazônia, no Pantanal e na Bacia do Alto Paraguai¹³.

Por outro lado, é temerário que a recém sancionada Lei Geral do Licenciamento Ambiental (Lei 15.190/2025)¹⁴, que busca criar uma legislação unificada para o licenciamento ambiental, vá em direção contrária – promovendo, isso sim, um verdadeiro desmonte das regras para a emissão das licenças. É importante dizer que o licenciamento ambiental na área rural já era falho mesmo antes da aprovação do projeto, já que o setor agropecuário está sujeito a legislações estaduais que isentam ou deixam de fiscalizar uma série de atividades.

Mas, no momento em que o Brasil precisa de normas ambientais mais rígidas, inclusive para se firmar como potência ambiental e energética, a nova legislação vai além e torna isento do licenciamento ambiental, em todo o território nacional, o cultivo de espécies de interesse agrícola, temporárias, semiperenes e perenes; a pecuária extensiva e semi-intensiva; a pecuária intensiva de pequeno porte; e a pesquisa de natureza agropecuária que não implique risco biológico; entre outras atividades.

As atividades agrícolas que sustentam o setor de biocombustíveis estarão, portanto, isentas de licenciamento ambiental – justamente o contrário do que é necessário para um futuro com expansão de bioenergia, mas, ao mesmo tempo, com proteção ambiental.

Cabe mencionar que a isenção de licenciamento ambiental não isenta os produtores de seguirem as regras do Código Florestal, como a obrigação de se manter Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de Reserva Legal (RL). Assim, a supressão de vegetação nativa, os usos hídricos, entre outras formas de utilização de recursos ambientais, ainda deverão ser autorizadas pelos órgãos competentes, conforme destaca o texto do projeto. Além disso, as atividades seguirão, mesmo que isentas de licenciamento, sujeitas à fiscalização por órgãos ambientais e às sanções aplicáveis no caso de infrações.

Por fim, frisa-se que nenhuma fonte de energia está isenta de impactos socioambientais. Grandes projetos de usinas hidrelétricas foram responsáveis pelo deslocamento de populações e por impactos negativos em ecossistemas locais; plantas de usinas eólicas e solares vêm trazendo uma série de distúrbios psicossociais e conflitos territoriais em áreas socialmente sensíveis, como territórios quilombolas; baterias de veículos elétricos exigem mineração de metais estratégicos em áreas igualmente sensíveis; entre outros exemplos. Portanto, os riscos trazidos pelos biocombustíveis não desaparecem quando optamos por outras fontes. Há, assim, a percepção de que, uma vez respeitadas as salvaguardas socioambientais, a bioenergia pode ser estratégica para que o Brasil impulse sua transição energética desde já, dentro de uma gama de soluções que abrange outras fontes renováveis e a eletrificação.

13 CASA CIVIL, 2009. Decreto nº 6.961, de 17 de setembro de 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6961.htm. Acesso em: 12 set. 2025.

14 SENADO FEDERAL, 2025. Projeto de Lei nº 2159, de 2021. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/148785>. Acesso em: 15 jul. 2025.



6. Conclusões, recomendações e considerações finais

O presente trabalho mostra, em primeiro lugar, que o Brasil pode expandir a produção de biocombustíveis e, ao mesmo tempo, eliminar o desmatamento de novas áreas de vegetação natural para convertê-las em plantios de matérias-primas. Essa conclusão, convém destacar, considera uma expansão da produção de bioenergia em escala e velocidade que atendem à urgente necessidade de descarbonizar a economia brasileira, num cenário compatível com a contribuição justa do país ao cumprimento do Acordo de Paris – conforme prescrito no estudo *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil* (OC, 2024b).

No entanto, a concretização dessa possibilidade dependerá de como será orientada a produção dessas fontes energéticas, de quais cultivos serão transformados em matérias-primas, quais rotas tecnológicas serão aplicadas e, claro, do planejamento e gestão territorial para direcionar o estratégico uso de parte das áreas atualmente classificadas como pastagens degradadas.

Para suprir a crescente demanda energética do país até 2050 em paralelo a uma trajetória de rápida redução de emissões, a oferta de biocombustíveis deve mais que dobrar, com destaque para o uso de combustíveis de baixa emissão *drop-in* – aqueles que podem ser usados diretamente em equipamentos já existentes e em uso (sobretudo os veículos automotores), independentemente da introdução de uma nova tecnologia –, junto de outras medidas igualmente necessárias, como a eletrificação e o aumento da eficiência sistêmica.

Vale destacar que atender a essa demanda a partir do padrão atual de matérias-primas cultivadas e rotas tecnológicas vigentes significará uma expansão da área agricultável incompatível com o cenário de descarbonização proposto pelo Observatório do Clima. Portanto, é inviável que a soja continue a ser o carro-chefe para produção de óleo vegetal, dado sua menor produtividade de óleo por hectare de produção.

Ainda que exista potencial de agregar valor à produção de soja, exportando o farelo e aproveitando o óleo internamente no país para a produção de biocombustíveis,



só será possível atender a demanda futura por bioenergia sem novos desmatamentos caso diferentes culturas com maior produtividade sejam consideradas, como a macaúba.

A análise de sensibilidade conduzida neste estudo evidencia que a combinação de escolhas de cultivos e rotas tecnológicas de maior eficiência – isto é, que demandam menor quantidade de área cultivada por volume de combustível produzido – se mostra promissora para atender, ao mesmo tempo, a demanda energética supracitada e adequar o quadro de uso da terra no país a fim de cumprir com o compromisso de eliminar o desmatamento, recuperar o passivo ambiental conforme o Código Florestal e capturar carbono por meio da readequação de pastagens degradadas.

Ainda que o Brasil disponha de um importante estoque de pastagens degradadas passíveis de serem usadas, a área potencialmente demandada para tal cultivo também não é desprezível. É importante destacar, inclusive, que a proteção e regeneração de áreas naturais e a produção de alimentos – que não deve ser confundida com o cultivo de *commodities* para fins de exportação, como a própria soja – deve ter precedência sobre a produção de biocombustíveis.

Além disso, áreas que teoricamente estariam disponíveis para produzir biocombustíveis estão próximas da Amazônia e devem ser olhadas com ainda mais cuidado, de modo a cumprir com as salvaguardas defendidas pelo Observatório do Clima.

Por todos esses fatores, além de outras salvaguardas importantes citadas acima, é que políticas de monitoramento e regramento do uso do solo ganham ainda mais importância.

Por outro lado, também deve-se considerar que parte da área adicional necessária para expandir a produção de biocombustíveis é sobreposta à área degradada que será destinada para a produção de soja, que é cultivada independentemente da produção de biocombustíveis – que, no caso deste cultivo, é considerado um subproduto.

Também vale mencionar que os biocombustíveis trazem oportunidades para a reindustrialização brasileira, a partir de uma nova cadeia de bioenergia. A própria Petrobras, com toda sua experiência, capacidade de investimento e histórico de contribuição para o desenvolvimento econômico brasileiro, pode ser uma ferramenta importante para acelerar o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas e a conversão da indústria de refino de petróleo em uma indústria de biorrefino.

Assim, a partir do processo de elaboração deste estudo, chega-se às seguintes recomendações, no âmbito das políticas públicas, para avançar no entendimento e planejamento da expansão da produção de biocombustíveis no país:

- 1.** determinar claros objetivos de produção de biocombustíveis para o atendimento do mercado interno atrelados a ambiciosas metas de mitigação de emissões de gases de efeito estufa;
- 2.** delimitar e monitorar áreas de cultivo e áreas de exclusão de cultivos de matérias-primas para a produção de biocombustíveis, em consonância



com o compromisso de desmatamento zero e uma estratégia de recuperação de pastagens degradadas;

- 3.** desenvolver uma estratégia de produção de matérias-primas (como óleo vegetal ou etanol) que abarque as vocações geográficas (edafoclimáticas e sociais) do território a ser utilizado para tal finalidade;
- 4.** determinar parâmetros mínimos de eficiência produtiva, mensurados em quantidade de produtos intermediários (como óleo vegetal ou etanol) produzidos por área de cultivo;
- 5.** incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis;
- 6.** elaborar uma estratégia de redução gradual da produção de derivados de petróleo ao mesmo tempo em que se viabilize a produção dos biocombustíveis avançados, avaliando a conversão ou adaptação de refinarias de petróleo para biorrefinarias ou a construção de novos empreendimentos focados em bioenergia.

Por fim, convém destacar que a produção de biocombustíveis no Brasil, embora relevante para a descarbonização do setor de transportes e da indústria, não elimina a restauração ecológica como alternativa estratégica para a captura de carbono, conforme colocado no Capítulo 3 (Visão do OC para uso da terra e mitigação de emissões). O país dispõe de uma vasta extensão de áreas degradadas e de pastagens de baixa produtividade que podem ser restauradas nas próximas décadas sem comprometer a segurança alimentar ou a produção de bioenergia.



7. Referências bibliográficas

ANTUNES, F.; MOTA, I.F.; BURGAL, J.S.; PINTADO, M.; COSTA, P.S. **A review on the valorization of lignin from sugarcane by-products: From extraction to application.** Porto, p. 14. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106603>>. Acesso em: Set. 2025.

AGUIAR, C.J.; SOUZA, P.M. **Impactos do crescimento da produção de cana-de-açúcar na agricultura dos oito maiores estados produtores.** Viçosa, p. 12. 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rceres/a/dwVBqtRvxcq4LqVcX9CSYGY/?format=html&lang=pt>>. Acesso em: Set. 2025

BIODIESELBR. Por que a brasileira macaúba é a planta da vez na produção de biocombustíveis. **BiodieselBR**, 2023. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macauba/por-que-a-brasileira-macauba-e-a-planta-da-vez-na-producao-de-biocombustiveis-261023>>. Acesso em: Set. 2025.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. 10º Levantamento - Safra 2024/25 - Tabela de dados - Produção e balanço de oferta e demanda de grãos. **Governo Federal**, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/10o-levantamento-safra-2024-25/10o-levantamento-safra-2024-25>>. Acesso em: Set. 2025.

COPERSUCAR. Workshop do Grupo de Trabalho de Tributação - Conexão SAF - Apresentação Copersucar. **Ministério de Minas e Energia - Governo Federal**, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/eventos/workshop-do-grupo-de-trabalho-de-tributacao-da-conexao-saf/copersucar-conexao-saf-gt-tributacao-daniel-valle.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

COSTA, T.K.O. **Avaliação da conversão do óleo de soja em biodiesel utilizando álcoois de cadeia curta.** Natal, p. 114. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/ee3d8d43-6d43-4e2f-86a2-f0d627ed201e/content>>. Acesso em: Set. 2025.

DOU - DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Decreto Nº 11.815, de 5 de Dezembro de 2023. **Diário Oficial da União**, 2023. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.815-de-5-de-dezembro-de-2023-528496572>>. Acesso em: Set. 2025.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Macaúba - Oleaginosas no Brasil. **Embrapa Agroenergia**. Disponível em: <<https://lp-cnpae.comunica.embrapa.br/macauba>>. Acesso em: Set. 2025.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Uso da Biomassa para a Geração de Energia.** Aracaju, p. 28. 2016. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1063559/1/Doc211.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Soja em números (safra 2024/25). **Embrapa Soja**, 2025. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: Set. 2025.



EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, p. 230. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topicos-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional - Manual Metodológico - BEN - 2ª Edição**. Rio de Janeiro, p. 93. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-904/NT-EPE-DPG-SDB-2025-06_An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura_Ano%20base%202024.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 - Oferta de Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, p. 43. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topicos-709/PDE2034_Caderno%20de%20Oferta%20de%20Biocombust%C3%ADveis_2024-09-24.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2024**. Rio de Janeiro, p. 112. 2025a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-904/NT-EPE-DPG-SDB-2025-06_An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura_Ano%20base%202024.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2025 - Ano base 2024**. Rio de Janeiro, p. 321. 2025b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topicos-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025 - Ano base 2024**. Rio de Janeiro, p. 73. 2025c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topicos-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf>. Acesso em: Set. 2025

FERRARI, R.A.; OLIVEIRA, V.S.; SCABIO, A. **Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia**. Ponta Grossa, p. 5. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100004>>. Acesso em: Set. 2025.

GAVEAU, D.L.A.; LOCATELLI, B.; SALIM, M.A.; HUSNAYAEN; MANURUNG, T.; DESCALS, A.; ANGELSEN, A.; MEIJARD, E.; SHEIL, D. **Slowing deforestation in Indonesia follows declining oil palm expansion and lower oil prices**. Martel, p.19. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266178>>. Acesso em: Set. 2025.

GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; NEIVA, D.; FERNANDES, L.; AMARAL, M. E.; DUARTE, A. P.; SIMÕES, R.; AND PEREIRA, H. **Variation of wood pulping and bleached pulp properties along the stem in mature Eucalyptus globulus trees**. Lisboa, p. 9. 2015. Disponível em: <<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/variation-of-wood-pulping-and-bleached-pulp-properties-along-the-stem-in-mature-eucalyptus-globulus-trees/>>. Acesso em: Set. 2025.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Ibá 2024 - Relatório Anual**. [S.I.], p. 96. 2024. Disponível em: <<https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

ICCT - INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union**. [S.I.], p. 20. 2019. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Alternative_jet_fuels_cost_EU_2020_06_v3.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

LANAJET. News & Insights - Next-Generation SAF by LanzaJet and IAG. **LanzaJet**, 2025. Disponível em: <<https://www.lanzajet.com/news-insights/next-generation-saf-by-lanzajet-and-iag>>. Acesso em: Set. 2025.

MAPBIOMAS. Estatísticas - Pastagem. **MapBiomass**, 2024. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org>>



mapbiomas.org/estatisticas/. Acesso em: Set. 2025.

MAPBIOMAS. Plataforma. **MapBiomas**, 2025. Disponível em: <[https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/pastagem/pastagem_vigor_condition?tl\[id\]=19&tl\[themeKey\]=pastagem&tl\[subthemeKey\]=pastagem_vigor_condition&tl\[pixelValues\]\[\]=1&tl\[pixelValues\]\[\]=2&tl\[legendKey\]=pastagem_vigor_condition_mapbiomas_vigor_condition&tl\[year\]=2024&tl\[regionKey\]=brazil&tl\[ids\]\[\]=1-1-1&tl\[divisionCategoryId\]=1](https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/pastagem/pastagem_vigor_condition?tl[id]=19&tl[themeKey]=pastagem&tl[subthemeKey]=pastagem_vigor_condition&tl[pixelValues][]=1&tl[pixelValues][]=2&tl[legendKey]=pastagem_vigor_condition_mapbiomas_vigor_condition&tl[year]=2024&tl[regionKey]=brazil&tl[ids][]=1-1-1&tl[divisionCategoryId]=1)>. Acesso em: Set. 2025.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Caminho Verde. **Governo Federal**, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/campanhas/caminho-verde>>. Acesso em: Set. 2025.

MELO, N.R. **Etanol 2G: processo produtivo e seu contexto no Brasil**. Uberlândia, p 45. 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31885/1/Etanol2GProcesso.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

MIT CENTER FOR SUSTAINABILITY SCIENCE AND STRATEGY (CS3) - MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Sustainable Decarbonization of Aviation in Latin America - Assessing emission mitigation policies, aviation demand, and jet fuel consumption up to 2050**. Cambridge, p. 52. 2024. Disponível em: <<https://cs3.mit.edu/publication/118414/file/Sustainable%20Decarbonization%20of%20Aviation%20in%20Latin%20America>>. Acesso em: Set. 2025.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012**. Brasília, p. 114. 2014. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2013/01/2014-05-27inventario2013.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. “Nova NDC do Brasil representa paradigma para o desenvolvimento do país”, diz Marina na COP29. **Governo Federal**, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/nova-ndc-do-brasil-representa-paradigma-para-o-desenvolvimento-do-pais-diz-marina-na-cop29>>. Acesso em: Set. 2025.

MOURA, C. V. R.; SILVA, B. C.; CASTRO, A. G.; MOURA, E. M.; VELOSO, M. E. C.; SITTOLIN, I. M.; ARAUJO, E. C. E. **Caracterização Físico-Química de Óleos Vegetais de Oleaginosas Adaptáveis ao Nordeste Brasileiro com Potenciais para Produção de Biodiesel**. Teresina, p. 23. 2019. Disponível em <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110781/1/CaracterizacaoOleosVegetaisRevVirtQuimica2019.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

NOVACANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. **NovaCana**. Disponível em <<https://www.novacana.com/noticias/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>>. Acesso em: Set. 2025.

OBSERVATÓRIO DAS FLORESTAS PÚBLICAS. Glossário. **De Olho nas Florestas Públicas**. Disponível em: <<https://deolhonasflorestaspublicas.org.br/>>. Acesso em: Set. 2025.

OC - OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Bases para a 2ª NDC do Brasil (2030-35)**. [S.I.], p. 101. 2024a. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil2045_Bases_NDC.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

OC - OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil**. [S.I.], p. 235. 2024b. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2025/08/Brasil2045_Futuro_Energia_0825.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

OC - OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Proposta do Observatório do Clima para a Segunda Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (2030-2035)**. [S.I.], p. 17. 2024c. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/08/NDC-do-OC_2024-template.pdf>. Acesso em: Set. 2025.

PARLAMENTO EUROPEU. **Palm oil: Economic and environmental impacts**. [S.I.], P.2. 2020. Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2020/659335/EPRS>>



[ATA\(2020\)659335_EN.pdf](#). Acesso em: Set. 2025.

PETROBRAS. Diesel R. **Petrobras**, 2025. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/quem-somos/diesel-r5>>. Acesso em: Set. 2025.

PINHEIRO, L.P.; LONGATI, A.A.; ELIAS, A.M.; PEREZ, C.L.; PEREIRA, L.P.R.D.C.; ZANGIROLAMI, T.C.; FURLAN, F.F.; GIORDANO, R.D.C.; MILESSI, T.S. **Improving the Feasibility of 2G Ethanol Production from Lignocellulosic Hydrolysate Using Immobilized Recombinant Yeast: A Technical–Economic Analysis and Life Cycle Assessment**. [S.I.], p.27. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/fermentation11030116>>. Acesso em: Set. 2025.

REPÓRTER BRASIL. **Deserto verde: Os impactos do cultivo de eucalipto e pinus no Brasil**. [S.I.], p.24. 2011. Disponível em: https://reporterbrasil.org.br/wp-content/uploads/2015/02/8.-caderno_deserto_verde.pdf. Acesso em: Set. 2025.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. SEEG. **SEEG**, 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/>>. Acesso em: Set. 2025.

SENAR - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. Milho invade as indústrias de produção de etanol. **CNA/SENAR**, 2023. Disponível em: <<https://www.cnabrasil.org.br/noticias/milho-invade-as-industrias-de-producao-de-etanol>>. Acesso em: Set. 2025.

SOCICANA - ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA DE GUARIBA. **Bioenergy from sugarcane**. Guariba, p. 298, 2020. Disponível em: <<https://unica.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Bioenergy-from-Sugar-Cane-by-Fava-Neves-Kalaki-2021.pdf>>. Acesso em: Set. 2025.

STONEX INTELIGÊNCIA DE MERCADO. Margem de esmagamento de soja: definição e calculadora. **Mercados Agrícolas**, 2022. Disponível em: <<https://mercadoseagricolas.com.br/inteligencia/margem-de-esmagamento-de-soja-definicao-e-calculadora/>>. Acesso em: Set. 2025.

TERMÔMETRO DO CÓDIGO FLORESTAL. Plataforma. **Termômetro do Código Florestal**, 2025. Disponível em: <<https://termometroflorestal.org.br/plataforma>>. Acesso em: Set. 2025.

TRAN, H.; VAKKILAINEN, E.K. **The kraft chemical recovery process**. [S.I.], p. 8. 2016 Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267565045_THE_KRAFT_CHEMICAL_RECOVERY_PROCESS>. Acesso em: Set. 2025.

YEOH, M.L.; GOH, C.S. (2022). **Hydrotreated vegetable oil production from palm oil mill effluents: Status, opportunities and challenges**. Selangor, p. 6. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/359819244_Hydrotreated_vegetable_oil_production_from_palm_oil_mill_effluents_Status_opportunities_and_challenges>. Acesso em: Set. 2025.



ANEXO: Leis, políticas e regulações vigentes sobre biocombustíveis no Brasil

Uma importante legislação brasileira que versa sobre a bioenergia é a Lei 13.576/2017, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)¹⁵. A lei busca ampliar a produção e uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira a partir de três eixos: o estabelecimento de metas individuais compulsórias, aplicadas a todos os distribuidores de combustíveis, de redução das emissões de GEE para a comercialização de combustíveis; a certificação de produção ou importação eficiente de biocombustíveis, em que produtores e importadores recebem uma nota de eficiência energético-ambiental que reflete a contribuição individual de cada agente para a mitigação de GEE; e a emissão por parte de produtores e importadores de Créditos de Descarbonização (CBIO) – em que 1 CBIO equivale a 1 tonelada de CO₂e que deixou de ser emitido –, a serem adquiridos por distribuidoras de combustíveis como compensação ambiental.

As metas de redução de GEE e de emissão de CBIO são definidas anualmente, para um período de 10 anos, pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). As últimas foram estabelecidas por meio da Resolução nº 14, de 10 de dezembro de 2024¹⁶, que determina diminuir a intensidade de carbono da matriz brasileira de combustíveis de 71,7 gCO₂/MJ em 2025 para 65 gCO₂/MJ em 2034; e a emissão de 40,39 milhões de CBIOs em 2025, com aumento até 72,54 milhões em 2034.

Complementar ao RenovaBio, a Lei 14.993/2024, conhecida como Lei do Combustível do Futuro¹⁷, criou o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Incentivo ao Biometano.

Em relação ao setor aéreo, a legislação estabelece que as empresas são obrigadas a reduzir suas emissões por meio do uso de SAF a partir de 2027, em percentual de mistura de SAF ao querosene fóssil que varia de 1% até 10% do volume total do combustível de aviação comercial até 2037. A fiscalização e metodologia do cálculo de verificação das emissões ficam sob responsabilidade da Agência Na-

15 PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2017. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm. Acesso em: 14 jul. 2025.

16 MME, 2024. **Resolução nº 14, de 10 de dezembro de 2024.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-602955102>. Acesso em: 12 jul. 2025.

17 PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2024. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm. Acesso em: 14 jul. 2025.



cional de Aviação Civil (Anac), ainda segundo a lei. As metas seguem os objetivos da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) de atingir a neutralidade de carbono até 2050, através de um mecanismo concebido para esse processo – o CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*)¹⁸.

Além disso, a legislação determina que a parcela de etanol misturado à gasolina deve ser de, no mínimo, 22% do volume total, podendo chegar a 35% por determinação do governo federal. Em julho de 2025, o governo oficializou que, a partir de agosto, a gasolina deveria ter 30% de etanol em sua composição.

Por sua vez, o biodiesel deve ser obrigatoriamente misturado ao diesel fóssil em proporção de 15% do volume total a partir de 2025. Essa parcela de mistura deve subir um ponto percentual (p.p.) anualmente, até atingir 20% em 2030. A partir de então, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) poderá elevar a parcela de mistura obrigatória para até 25%, desde que comprovada viabilidade técnica.

Em relação ao biometano, a legislação determina que o CNPE deve definir a meta anual de redução de emissões de GEE no mercado de gás fóssil comercializado, produzido ou importado, o que deve ser feito por meio da participação do biometano no consumo. Essa obrigação deve entrar em vigor em 1º de janeiro de 2026, com uma meta inicial de redução de pelo menos 1%, mas sem poder exceder os 10%.

Paralelamente, o governo federal também aprovou a Lei 14.902/2024, que instituiu o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover)¹⁹. O programa busca estimular investimentos em novas rotas de tecnologia veicular e em eficiência energética, além de aumentar as exigências de descarbonização da frota de veículos do país, incluindo carros de passeio, ônibus e caminhões. Também prevê limites mínimos de reciclagem na fabricação dos veículos e a criação do IPI Verde, um sistema no qual quem polui menos paga menos imposto.

A legislação deixa explícito que uma de suas diretrizes é a “promoção do uso de biocombustíveis, de outros combustíveis de baixo teor de carbono e de formas alternativas de propulsão e valorização da matriz energética brasileira”. Também prevê R\$ 19,3 bilhões de créditos financeiros entre 2024 e 2028, a serem utilizados pelas empresas para abatimento de impostos federais em contrapartida a investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e em novos projetos de produção.

Levando todas essas políticas em conta, tanto o Plano Nacional de Energia 2050 (EPE, 2020) como o Plano Decenal de Expansão da Energia (PDE) 2034 (EPE, 2024), que trazem perspectivas do Ministério de Minas e Energia (MME) acerca da expansão do setor de energia, além de serem um instrumento formal do governo brasileiro para planejamento energético no médio e longo prazo, projetam um crescimento contínuo da oferta e da demanda de biocombustíveis para os transportes nos próximos anos, com destaque para etanol e biodiesel.

Para o período entre 2025 e 2034, o PDE prevê uma rede de transporte de cargas ainda majoritariamente rodoviário, com uma crescente demanda energética, além

18 Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional.

19 PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2024. [Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14902.htm). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14902.htm. Acesso em: 14 jul. 2025.



de bastante associada ao uso intensivo do óleo diesel. Os obstáculos tecnológicos e de custos para a eletrificação dos motores de caminhões pesados, que percorrem longas distâncias, ainda são uma realidade, o que evidencia a importância do biodiesel e do diesel verde na transição.

Por fim, o Brasil vem construindo internamente a Estratégia Nacional de Mitigação (ENM), que integra o Plano Clima juntamente com a Estratégia Nacional de Adaptação. A ENM possui sete planos setoriais, entre eles os de energia e de transportes. A proposta contempla, entre seus objetivos nacionais, “expandir a produção sustentável de biocombustíveis, promover a inovação tecnológica e desenvolver cadeias de valor relacionadas à bioenergia”. Também fala em “incentivar a substituição de combustíveis fósseis, promovendo o desenvolvimento e uso eficiente de biocombustíveis sustentáveis, soluções de eletrificação e de hidrogênio de baixa emissão de carbono”.

BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL:

**ALINHANDO TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E USO DA
TERRA PARA UM PAÍS CARBONO NEGATIVO**