



## ***Produção de biomassa e biocombustíveis de aviação: perspectivas regionais no Brasil***

**José Ricardo de Santana**

Departamento de Economia, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, Brasil. E-mail: [jrsantanaufs@gmail.com](mailto:jrsantanaufs@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5617-2096>

**Lindomayara França Ferreira**

Departamento de Economia, Universidade Federal Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [lindomayara@hotmail.com](mailto:lindomayara@hotmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7014-4294>

**Marcelo da Costa Mendonça**

Faculdade Tiradentes. E-mail: [marcelo\\_costa@unit.br](mailto:marcelo_costa@unit.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6003-4796>

**Claudio Dariva**

Faculdade Tiradentes. E-mail: [claudio.dariva@gmail.com](mailto:claudio.dariva@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-9039>

### **Resumo**

Diante dos desafios de descarbonização, uma série de acordos internacionais têm buscado mitigar o problema, com foco nas áreas mais críticas. No setor de transportes, onde existem elevados níveis de emissões de CO<sub>2</sub>, o Brasil tem desenvolvido políticas e instrumentos destinados para a produção de combustíveis sustentáveis, a partir de biomassa. A biomassa é um material orgânico e tem sido utilizada como uma fonte energética limpa, sustentável e renovável. A legislação em discussão no país busca ampliar a produção de combustíveis sustentáveis para os segmentos atuais e iniciar a produção em novos segmentos, como aviação, a partir de 2027, a fim de atender as metas dos ODS. Considerando a experiência brasileira de produção de biocombustível veicular a partir da biomassa de cana-de-açúcar, essa matéria-prima tem sido apontada como uma rota viável para a produção de bioquerosene de aviação no país. Com uma estimativa preliminar da necessidade de produção de bioquerosene no Brasil, o presente artigo tem como objetivo identificar as localidades das regiões brasileiras com potencial para atender as futuras demandas de biocombustíveis sustentáveis para aviação, utilizando bagaço de cana-de-açúcar. A partir da construção do indicador de especialização de Quociente Locacional (QL) para a produção de biomassa em cada estado do Brasil, além dos estados que apresentam o maior volume de produção – São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul – foi identificada uma concentração na região Nordeste, representando um potencial para uma das regiões mais pobres do país, especialmente, nos estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do

Norte e Sergipe. Esses resultados apontam localidade com capacidades pré-estabelecidas para atender a produção de bioquerosene, trazendo uma indicação importante para o planejamento governamental de futuras demandas do setor de transporte.

**Palavras-chave:** Descarbonização; Cana-de-açúcar; Bioquerosene de aviação.

### **Biomass production and aviation biofuels: regional perspectives in Brazil**

#### **Abstract**

Faced with the challenges of decarbonization, a series of international agreements have sought to mitigate the problem, focusing on the most critical areas. In the transport sector, where there are high levels of CO<sub>2</sub> emissions, Brazil has developed policies and instruments aimed at producing sustainable fuels, from biomass. The legislation under discussion in the country seeks to expand the production of sustainable fuels for current segments and start production in new segments, such as aviation, from 2027, to meet the goals of the Sustainable Development Goals (SDGs). Considering the Brazilian experience of producing vehicle biofuel from sugarcane biomass, this raw material has been identified as a viable route to produce aviation biofuel in the country. With a preliminary estimate of the need for biofuel production in Brazil, this article aims to identify locations in Brazilian regions with the potential to meet future demands for sustainable biofuels for aviation, using sugarcane bagasse. From the construction of the Locational Quotient (QL) specialization indicator for biomass production in each state of Brazil, a concentration was identified in the Northeast region of the country, especially in the states of Paraíba, Alagoas and Pernambuco. These results also indicate the state of São Paulo as the location with the greatest productive potential, followed by Goiás and Mato Grosso do Sul. Therefore, it is possible to identify a trend towards concentration of biofuel production in these states with pre-established capacities, providing an indication important for government planning of future demands in the transport sector.

**Keywords:** Decarbonization; Sugar cane; Sustainable Aviation Fuel.

### **Producción de biomasa y biocombustibles para aviación: perspectivas regionales en Brasil**

#### **Resumen**

Ante los desafíos de la descarbonización, una serie de acuerdos internacionales han buscado mitigar el problema, centrándose en las áreas más críticas. En el sector del transporte, donde hay altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub>, Brasil ha desarrollado políticas e instrumentos destinados a producir combustibles sostenibles, a partir de biomasa. La biomasa es un material orgánico y se ha utilizado como fuente de energía limpia, sostenible y renovable. La legislación en discusión en el país busca ampliar la producción de combustibles sustentables para los segmentos actuales e iniciar la producción en nuevos segmentos, como el de aviación, a partir de 2027, con el fin de cumplir con las metas de los ODS. Considerando la experiencia brasileña en la producción de biocombustible para vehículos a partir de biomasa de caña de azúcar, esta materia prima ha sido identificada como una ruta viable para la producción de bioquerosene de aviación en el país. Con una estimación preliminar de la necesidad de producción de bioquerosene en Brasil, este artículo tiene como objetivo identificar lugares en regiones brasileñas con potencial para satisfacer las demandas futuras de biocombustibles sostenibles para la aviación, utilizando bagazo de caña de azúcar. A partir de la construcción del indicador de especialización Cociente Localizador (QL) para la producción de biomasa en cada estado de Brasil, además de los estados que presentan el mayor volumen de producción – São Paulo, Minas Gerais, Goiás y Mato Grosso do Sul – se

obtuvo una concentración fue identificada en la región Nordeste, representando un potencial para una de las regiones más pobres del país, especialmente en los estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte y Sergipe. Estos resultados apuntan a lugares con capacidades preestablecidas para satisfacer la producción de bioqueroseno, lo que proporciona una indicación importante para la planificación gubernamental de las demandas futuras en el sector del transporte.

**Palabras clave:** Descarbonización; Caña de azúcar; Bioqueroseno de aviación.

## 1 Introdução

Nos últimos anos, têm ocorrido um intenso debate sobre a urgência da descarbonização mundial e a transformação dos setores intensivos em carbono. Com metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) nas Conferências das Partes (COP), diferentes economias têm adotado políticas e medidas direcionadas para a redução das emissões até 2050 (IRENA, 2023).

Dentre as estratégias para reduzir a emissão, está a priorização de ações em determinados setores de atividade intensivas em combustíveis fósseis. Um dos setores-chave é o segmento de transportes (incluindo terrestres, aéreos e marítimos), com estimativas para uma redução nos níveis de emissões de 8,1 GtCO<sub>2</sub>, em 2019, para 0,4 GtCO<sub>2</sub>, em 2050. A alternativa mais utilizada ocorre a partir do uso de biomassa, que é considerado como um material orgânico e pode ser utilizado na geração de energia térmica, elétrica e de combustíveis, sendo este um material limpo, sustentável e renovável. Em 2019, a bioenergia a partir de biomassa sólida, biogás e biocombustíveis líquidos, correspondia cerca de 9% do fornecimento total de energia primária mundial, destinada especialmente para a indústria e o setor de transportes. Para o cenário de alcançar elevação de temperatura até 1,5°C dos níveis pré-industriais, espera-se que a bioenergia represente 17% do fornecimento total de energia primária até 2030 e que a produção de biocombustíveis líquidos cresça cerca de cinco vezes mais até 2050. Isso corresponderia a 25% da procura global de energia no setor dos transportes. No entanto, essas estimações ressaltam o grande desafio que o aumento da produção de biomassa apresenta para suprir a demanda futura do setor de transportes, evitando os danos ambientais ou sociais adversos (IRENA, 2021; 2022).

Diante da disponibilidade tecnológica e redução dos custos de produção, a substituição de combustíveis fósseis para bioenergia aumentou, especialmente nas atividades intensivas em carbono. No contexto do mercado de aviação, o combustível a partir de fontes renováveis é um produto ainda subexplorado. Uma recente alternativa para reduzir os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> do setor de transporte, em até 87%, é o projeto para a produção de biocombustíveis sustentáveis para aviação (SAF - *Sustainable Aviation Fuel*) (WATSON *et al.*, 2024). De acordo com IRENA (2022), a atividade de SAF demandará cerca de 82 bilhões de litros de biocombustíveis anualmente, até 2030. No caso do Brasil, onde há uma produção de etanol veicular a partir da cana-de-açúcar (combustível renovável), existe uma disponibilidade

considerável dessa biomassa voltada para o setor de transportes, constituindo uma alternativa para a produção de biocombustíveis para o setor de aviação.

Embora ainda incipiente, o Brasil tem desenvolvido iniciativas direcionadas para a atividade de aviação a fim de atingir seus objetivos de descarbonização e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos na COP 26 (IRENA, 2024). Majoritariamente de fonte fósseis, em 2022, a produção de combustíveis para o setor aéreo no Brasil atingiu 4,9 milhões de m<sup>3</sup>, representando cerca de 5% da produção de derivados de petróleo no país (ANP, 2023). O país tem experiência consolidada na produção de biocombustíveis, utilizando sobretudo o etanol a partir da cana-de-açúcar, sendo uma das mais bem-sucedidas políticas de produção e distribuição de biocombustíveis para veículos automotores (MILANEZ *et al.*, 2021). Considerando a cadeia produtiva estruturada no país para a produção de etanol, a biomassa gerada como resíduo dessa atividade representa uma oportunidade importante para o desenvolvimento da indústria de produção de SAF. O bagaço da cana é a principal fonte de biomassa disponível no país, sendo responsável por mais de 71% da matéria-prima para produção de combustíveis, seguida de fonte florestal (licor negro, resíduos florestais e lenha), que chega a mais de 25% (ANEEL, 2023).

Nesse sentido, é importante analisar o caso brasileiro nesse esforço internacional, pela relevância e o potencial do país no processo de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. Mas é preciso investigar como essa oportunidade de produção de combustíveis renováveis para aviação influenciará a produção de biomassa nas regiões do país. Assim, com uma estimativa preliminar da necessidade de produção de bioquerosene no Brasil, o presente artigo tem como objetivo identificar as localidades das regiões brasileiras com potencial para atender as futuras demandas de biocombustíveis sustentáveis para aviação, utilizando bagaço de cana-de-açúcar. A partir da construção do indicador de especialização, o Quociente Locacional (QL), para a produção de biomassa (GW) em cada estado do Brasil, foi possível identificar uma concentração produtiva na região Nordeste, representando um potencial para uma das regiões mais pobres do país, especialmente, nos estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Sergipe. Também foi identificado como estados de alto nível de especialização os estados São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul, líderes no volume de produção energética a partir da biomassa de cana-de-açúcar (kW) e com o maior número de empreendimentos em operação.

O presente trabalho está estruturado em cinco seções, incluindo a introdução e as conclusões finais. Na segunda seção, propõe-se discutir as políticas e os instrumentos de incentivos destinados ao setor de transporte, em específico a agenda sustentável para as atividades de aviação no Brasil. Na terceira seção, propõe-se apresentar a composição e a fonte de dados para as estimativas de produção de bioquerosene e construção do indicador de Quociente Locacional (QL). Por fim, na quarta seção, são apresentadas as estimativas de produção, o mapeamento da produção de cana-de-açúcar e o mapeamento dos resultados do QL, além de discutir as principais implicações para o desenvolvimento produtivo de SAF no Brasil e o atendimento de futuras demandas.

## **2. Descarbonização e as possibilidades regionais para produção de bioquerosene no Brasil**

Esta seção tem como objetivo discutir os desafios do processo de descarbonização mundial, bem como, as estratégias destinadas para o setor de transportes, especialmente, para as atividades de biocombustíveis. Subdividida em duas seções: i) perspectivas para a descarbonização e o papel dos biocombustíveis, com ênfase na discussão regional; e ii) iniciativas destinadas para ampliar o uso de biocombustíveis, incluindo o setor aéreo, no Brasil.

## 2.1 Desafios da descarbonização e os biocombustíveis

O intenso debate sobre a urgência para a mitigação das mudanças climáticas antropogênicas tem sido fomentado desde a década de 1990, conforme destaca o Quadro 1. Com o protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris na Conferência das Partes (COP) na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), a Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU) estabeleceu metas para promover o desenvolvimento sustentável e acordos de cooperação entre os países, sobretudo, os países industrializados.

**Quadro 1:** Conferência das Partes da Convenção-Quadro (COP), (1995-2023)

Conferência	País (ano)	Ênfase
1ª COP	Berlim, Alemanha (1995)	Negociação de metas e prazos específicos para a redução de emissões de gases de efeito estufa pelos países desenvolvidos.
2ª COP	Genebra, Suíça (1996)	Decisão da criação de obrigações legais de metas de redução.
3ª COP	Kyoto, Japão (1997)	Criação do Protocolo de Kyoto, que estabeleceu metas de redução para gases de efeito estufa para os países desenvolvidos.
4ª COP	Buenos Aires, Argentina (1998)	Implementação e ratificação do Protocolo de Kyoto.
5ª COP	Bonn, Alemanha (1999)	Discussões sobre atividades para remoção de gás carbônico da atmosfera, como florestamento e reflorestamento.
6ª COP-I	Haia, Holanda (2000)	Discussões sobre Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, mercado de carbono e financiamento de países em desenvolvimento.
6ª COP-II	Bonn, Alemanha (2001)	Saída dos Estados Unidos do Protocolo de Kyoto.
7ª COP	Marrakech, Marrocos (2001)	Decisão de limitar o uso de créditos de carbono gerados de projetos florestais e o estabelecimento de fundos de ajuda a países em desenvolvimento.
8ª COP	Nova Delhi, Índia (2002)	Início da discussão sobre uso de fontes renováveis na matriz energética.
9ª COP	Milão, Itália (2003)	Discussão da regulamentação no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.
10ª COP	Buenos Aires, Argentina (2004)	Aprovação de regras para a implementação do Protocolo de Kyoto.
11ª COP	Montreal, Canadá (2005)	Pela primeira vez, o debate do desmatamento tropical e a das mudanças no uso da terra.
12ª COP	Nairóbi, Quênia (2006)	Revisão do Protocolo de Quioto e regras para o financiamento de projetos.

13ª COP	Bali, Indonésia (2007)	Pela primeira vez, a questão de florestas é incluída no texto da decisão final da Conferência.
14ª COP	Poznan, Polônia (2008)	Discussão de um possível acordo climático global.
15ª COP	Copenhague, Dinamarca (2009)	O mais importante dos acordos multilaterais ambientais, estabelecendo o tratado que substitui o Protocolo de Kyoto.
16ª COP	Cancún, México (2010)	Criação do Fundo Verde do Clima.
17ª COP	Durban, na África do Sul (2011)	Reuniu mais de 190 países, com compromissos de ações para conter o aumento da temperatura no mundo.

Continuação

18ª COP	Doha, Catar (2012)	Extensão do Protocolo de Kyoto.
19ª COP	Varsóvia, Polônia (2013)	Criação da “moeda-carbono” para remunerar os países que reduzirem as emissões de gases de efeito estufa.
20ª COP	Lima, no Peru (2014)	Apresentação dos compromissos de redução de emissões e de adaptação à mudança climática dos 195 países.
21ª COP	Paris, França (2015)	Pela primeira quase todos os países estavam em um esforço para reduzir as emissões de carbono e conter os efeitos do aquecimento global.
22ª COP	Marrakech, no Marrocos (2016)	Foco de ações relacionadas a adaptação, transparência, transferência de tecnologias, mitigação, capacitação, e perdas e danos.
23ª COP	Bonn, Alemanha (2017)	Metas de energias renováveis e aumento do financiamento para a adaptação climática.
24ª COP	Katowice, Polônia (2018)	Estabelece como os governos mediriam e reportariam seus esforços de redução de emissões.
25ª COP	Madrid, Espanha (2019)	No papel da ciência, a inclusão de questões como oceanos e uso do solo, e a aprovação de um novo Plano de Ação de Gênero.
26ª COP	Glasgow, Escócia (2020)	Promessa de eliminação progressiva dos combustíveis fósseis
27ª COP	Sharm el-Sheikh, Egito (2021)	Criação de um fundo para “perdas e danos”.
28ª COP	Dubai, Emirados Árabes (2023)	Transição para energias renováveis e a construção de resiliência climática.

Fonte: Elaboração própria, a partir de MMA (2024).

Na COP 26, na Escócia, a transformação da matriz de transportes foi apontada como uma das principais estratégias para promover o processo de descarbonização. O objetivo é reduzir as emissões líquidas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para zero até 2050 e limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C nos níveis pré-industriais (1850-1900) (IRENA, 2023). Para o ITF (2021), o setor de transporte é o mais intensivo em emissões no uso final de energia, responsáveis por mais de 25% das emissões diretas de CO<sub>2</sub> provenientes de combustíveis combustão. Para a SEEG (2023), são classificados como os maiores emissores de CO<sub>2</sub> do mundo a China, os Estados Unidos, a Índia, a Rússia, a Indonésia e o Brasil, sendo este último, responsável por cerca de 3% das emissões globais. Parte dos níveis de emissões se concentram nas atividades energéticas e no uso intensivo dos combustíveis fósseis (IRENA, 2024).

Embora haja avanços na utilização de combustíveis renováveis no setor de transportes, sobretudo, no modal terrestre, as mudanças no setor aéreo continuam sendo um desafio. Nesse sentido, merecem destaque as metas direcionadas para as atividades de aviação nos países com participação acima de 0,5%. De acordo com Watson *et al.* (2024), a partir de 2027, haverá uma transformação no setor, com mecanismos de compensação (por meio de aquisição de crédito de carbono) e redução nos níveis de emissões (uso de combustíveis sustentáveis), apresentados pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) com o Programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) (ANAC, 2019).

No Brasil, o segmento de transportes representa um dos setores-chave para a redução da poluição atmosférica. Em 2022, os níveis de emissões do setor de transportes, de 210 milhões de toneladas (Mton) de CO<sub>2</sub> equivalente, representaram cerca de 50% do total de emissões do país e superaram os níveis de emissões das indústrias, de 76 Mton de CO<sub>2</sub> equivalente (EPE, 2023). O país, desde a década de 1970, tem proposto e implementado programas voltados para a redução do uso de combustíveis fósseis no setor de transporte, como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em 2004, e mais recentemente o Programa Nacional do Bioquerosene e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) em 2021 (BRASIL, 2017).

Considerada como um material orgânico, de fonte limpa, sustentável e renovável, a biomassa pode ser gerada por bagaço de cana-de-açúcar, licor negro, resíduos florestais, resíduos urbanos e lenha tem uma participação promissora na indústria brasileira. Em 2016, a fonte supria mais de 39% do consumo energético e mais de 17% nos transportes no Brasil (GREENPEACE BRASIL, 2016). Utilizada principalmente na geração de eletricidade e biocombustíveis, as atividades de geração de biomassa se concentram nos estados: São Paulo (7,5 GW), Minas Gerais (2,3 GW) e Mato Grosso do Sul (2,3 GW). Além disso, mais de 420 empreendimentos são produtores da fonte gerada por bagaço de cana-de-açúcar, concentrados nos estados: São Paulo, Minas Gerais (Sudeste), Paraná (Sul), Mato Grosso do Sul, Goiás (Centro-Oeste), Alagoas e Pernambuco (Nordeste) (ANEEL, 2024).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus resíduos, e apresenta um enorme potencial para promover essas atividades como uma das principais fontes de biomassa (IRENA, 2023). Com uma predominância das atividades nas regiões Sul-Sudeste, a ampliação da demanda por biocombustíveis pode ser uma oportunidade para o desenvolvimento de políticas com múltiplos alcances que permitam explorar o potencial do processo de transição desses mercados em outras regiões com potencial. Em outras palavras, a criação de políticas que sejam capazes de promover a descarbonização do setor, mas também capazes de atrair investimentos, geração de renda e emprego em regiões com menor nível de desenvolvimento econômico, como as regiões Norte e Nordeste do país.

Cabe ressaltar que a expansão do plantio de cana-de-açúcar teve como pano de fundo às condições edafoclimáticas existentes e o Proálcool (1975-1980). O programa foi inicialmente previsto para minimizar as desigualdades regionais no país, contudo, visou apenas questões econômicas, deixando de lado aspectos de sustentabilidade ambiental (ALBUQUERQUE *et al.*, 2022). De acordo com Cortez *et al.* (2016), o período de 1975-1985, o Brasil registrou um crescimento acelerado de implantação e substituição de gasolina, com quase metade da produção de cana-de-

açúcar concentrada na região Nordeste. No entanto, com o fim do Proálcool, em 1989, o setor registrou um desequilíbrio com o excesso da produção de açúcar e a crise do etanol. Posteriormente, entre 2003 e 2008, a atividade voltou a ter fôlego com a introdução do automóvel *flex-fuel*. Entretanto, após 2009, uma nova crise ocorreu no setor, com a perda de produtividade e a falta de políticas mais efetivas de governo.

A redução das desigualdades regionais continua sendo um desafio relevante no país. As regiões Norte e Nordeste do Brasil, são marcadas historicamente como regiões de elevadas desigualdades econômicas e sociais (LEAL *et al.*, 2021), sua gênese está na formação econômica produtiva desfavorável para essas localidades (SOUZA *et al.*, 2022). Com o fim do ciclo do açúcar, concentrado no Nordeste, e o início do ciclo do ouro e do café, concentrados no Sudeste, os impactos negativos da transição do modelo agroexportador para o modelo industrial perpetuam até os dias atuais, e se apoiam nas disparidades de infraestrutura básica, logística e do sistema educacional (POCHMANN; SILVA, 2020). Portanto, essas diferenças são, em grande parte, consequências da organização econômica regional e do padrão de desenvolvimento local (SOUZA *et al.*, 2022).

Nos dias atuais, embora inferior as capacidades locais das regiões Sul-Sudeste, as regiões Norte e Nordeste, compostas por 16 estados, possuem cadeias produtivas de biomassa de pequeno e médio porte, conforme destaca os dados da Aneel (2024), nos respectivos 13 estados: Bahia, Alagoas, Pernambuco, Maranhão, Paraíba, Rio Grande do Norte, Sergipe, Acre, Pará, Amazônia, Roraima, Rondônia e Amapá. De acordo com o IRENA (2021), uma das características-chave das matérias-primas de biomassa é a sua baixa densidade energética, o que torna seu transporte para longas distâncias economicamente desafiadoras, além disso, o grau de novidade (no primeiro momento) pode acarretar custos superiores as rotas com combustíveis tradicionais.

Diante desse contexto, as oscilações do mercado associadas a políticas de curto prazo, e a uma estruturação sistêmica inadequada, o processo de transição para uma economia de baixo carbono poderá intensificar as disparidades existentes. Isso pode ocorrer não só no âmbito regional, mas também no cenário internacional, do país em relação aos principais líderes do mercado, fazendo com que o Brasil se torne apenas um país exportador de matéria-prima. Caracterizado como um país com extensão de terras agrícolas, condições naturais e capacitação humana, o Brasil tem uma grande oportunidade para desenvolver uma indústria de combustíveis renováveis em alta escala (CORTEZ *et al.*, 2016). Considerando as condições de produção de biomassa e de localização de unidades industriais de fabricação de biocombustíveis, há também uma perspectiva de se pensar em ações associadas de estímulo ao desenvolvimento regional, proporcionando alternativas para regiões menos desenvolvidas do país.

## 2.2 Programas de ampliação do uso de biocombustíveis no Brasil

Diante dos múltiplos desafios apontados, são necessários o desenvolvimento e a otimização da cadeia de produção para que se possa obter os benefícios das economias de escala, incluindo o desenvolvimento tecnológico da atividade e o

estabelecimento de infraestruturas de processamento. O que exigirá um quadro político de apoio e instrumentos destinados para oferta e demanda do setor.

No Brasil, a tradição de assumir compromissos internacionais em temas envolvendo a preservação do meio ambiente tem se materializado em medidas específicas. No caso do setor de transportes, as principais medidas estão relacionadas à política de combustíveis. O Quadro 2 traz algumas das principais leis implementadas no país, a partir de 1993. A Lei nº 8.723, de 1993, já previa a redução da emissão de poluentes por veículos automotores, com foco inicialmente em veículos de passageiros. Outras medidas complementares estão relacionadas à regulação da política energética (Lei nº 9.478, de 1997) e à fiscalização do setor (Lei nº 9.847, de 1999). Merece referência ainda o texto que prevê a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado (Lei nº 10.033, de 2014), demonstrando uma ampliação da abrangência da regulamentação de combustíveis para os veículos de carga.

**Quadro 2:** Legislação inicial, relacionada à implantação de medidas de descarbonização, com foco no setor de transportes – Brasil, 1993-2014

Ano	Legislação / Temática
1993	<b>Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993</b> Redução de emissão de poluentes por veículos automotores e outras providências
1997	<b>Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997</b> Política energética nacional e institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo
1999	<b>Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999</b> Fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis
2014	<b>Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014</b> Adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final

Fonte: Elaboração dos autores.

O Brasil tem reafirmado os acordos de cooperação internacional para a preservação do meio ambiente, com medidas que visam à utilização cada vez maior de uma matriz energética limpa, a partir da utilização de fontes renováveis. Recentemente, foram instituídas ações nesse sentido, refletidas na Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio (Lei nº 13.576, de 2017) e na instituição do Programa de Mobilidade Verde e Inovação – MOVER (Medida Provisória nº 1.205, de 2023). Além desses, está em tramitação no Congresso Nacional o Programa Combustível do Futuro (Projeto de Lei nº 528, de 2020). O Quadro 3 apresenta essas iniciativas, com os respectivos objetivos.

**Quadro 3:** Iniciativas recentes para incentivar o uso de combustíveis sustentáveis – Brasil, 2017-2024

Programas	Objetivos
<b>Política Nacional de Biocombustíveis -</b>	i. Contribuir para atender os compromissos do Acordo de Paris, Convenção sobre Mudanças do Clima ii. Contribuir para redução de emissões de gases de efeito estufa

<b>RenovaBio (Lei nº 13.576/2017)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>iii. Promover a expansão da produção e uso de biocombustíveis na matriz energética nacional</li> <li>iv. Contribuir para redução de emissões de gases de efeito estufa</li> </ul>
<b>Programa Mobilidade Verde e Inovação - MOVER (MP nº 1.205/2023)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Apoiar a descarbonização, com medidas na cadeia de produção de veículos</li> <li>ii. Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a competitividade e integração nas cadeias globais de valor</li> </ul>
<b>Programa Combustível do Futuro (PL nº 528/2020)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Instituir programas de combustíveis sustentáveis</li> <li>ii. Alterar limites de combustíveis sustentáveis na mistura com fósseis</li> <li>iii. Regularizar as atividades de captura de carbono e comercialização de combustíveis sintéticos</li> <li>iv. Integrar iniciativas adotadas em programas federais - RenovaBio, Mover, PBEV</li> </ul>

Fonte: Elaboração dos autores.

O RenovaBio traz claramente entre os seus objetivos a preocupação com a redução das emissões de gases de efeito estufa, destacando a importância de promover a produção e uso de biocombustíveis na matriz energética nacional. O Programa MOVER reforça a preocupação com a descarbonização, buscando apoiar o desenvolvimento tecnológico na cadeia de produção de veículos. Por sua vez, o Programa Combustível do Futuro, aponta para a ampliação do uso de combustíveis sustentáveis em diversos segmentos, inclusive na mistura com os fósseis, e para a regulamentação das atividades de captura de carbono, além de buscar integrar as ações em andamento no Governo Federal, como o RenovaBio e o MOVER.

O Programa Combustível do Futuro é composto por um conjunto de outros programas, envolvendo: i) Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; ii) Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV); e iii) Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (PROBIOQAV). Isso está apresentado no Quadro 4.

**Quadro 4:** Iniciativas do Programa Combustíveis do Futuro – Brasil

<b>Programas</b>	<b>Objetivos e Medidas</b>
<b>Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e incentivo ao Biometano; <i>Incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso do biometano e do biogás na matriz energética brasileira com vistas à descarbonização do setor de gás natural.</i></li> <li>b) Diminuição da poluição através de gases de efeito estufa; <i>Regulariza o exercício das atividades de captura de dióxido de carbono para fins de estocagem geológica.</i></li> <li>c) Descarbonização gradativa da gasolina, com acréscimo de etanol. <i>Aumenta o percentual de álcool acrescido na gasolina.</i></li> </ul>
<b>Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Descarbonização gradativa do óleo diesel, por meio do acréscimo de biodiesel à composição. <i>Incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do diesel verde, estabelecido em regulamento da ANP, na matriz.</i></li> </ul>
<b>Programa Nacional de</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Descarbonização gradativa do combustível utilizado na aviação brasileira.</li> </ul>

<b>Combustível Sustentável de Aviação (PROBIOQAV)</b>	<i>Incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético, na matriz energética brasileira, do combustível sustentável de aviação (Sustainable Aviation Fuel – SAF)</i>
---	--

Fonte: Elaboração dos autores.

O Programa Combustível do Futuro, busca intensificar as ações de descarbonização, em três frentes: i) elevar o uso de etanol na gasolina, incentiva o uso do biometano e busca regular a captura de carbono; ii) ampliar as ações para o segmento de transporte de carga, com o incentivo ao uso do biodiesel (PNDV) e, por fim, iii) abranger o segmento de aviação seguindo uma tendência mundial, ao incentivar a pesquisa, a produção e o uso do bioquerosene de aviação (PROBIOQAV).

### 3. Procedimentos metodológicos

Esta seção tem como objetivo apresentar os procedimentos metodológicos utilizados no presente trabalho. No primeiro momento, apresenta os procedimentos utilizados para as estimativas da produção de SAF e biomassa no Brasil, posteriormente, para a construção do indicador de especialização regional, a base de dados e suas respectivas fontes.

#### 3.1 Estimativa da produção de SAF e de biomassa no Brasil

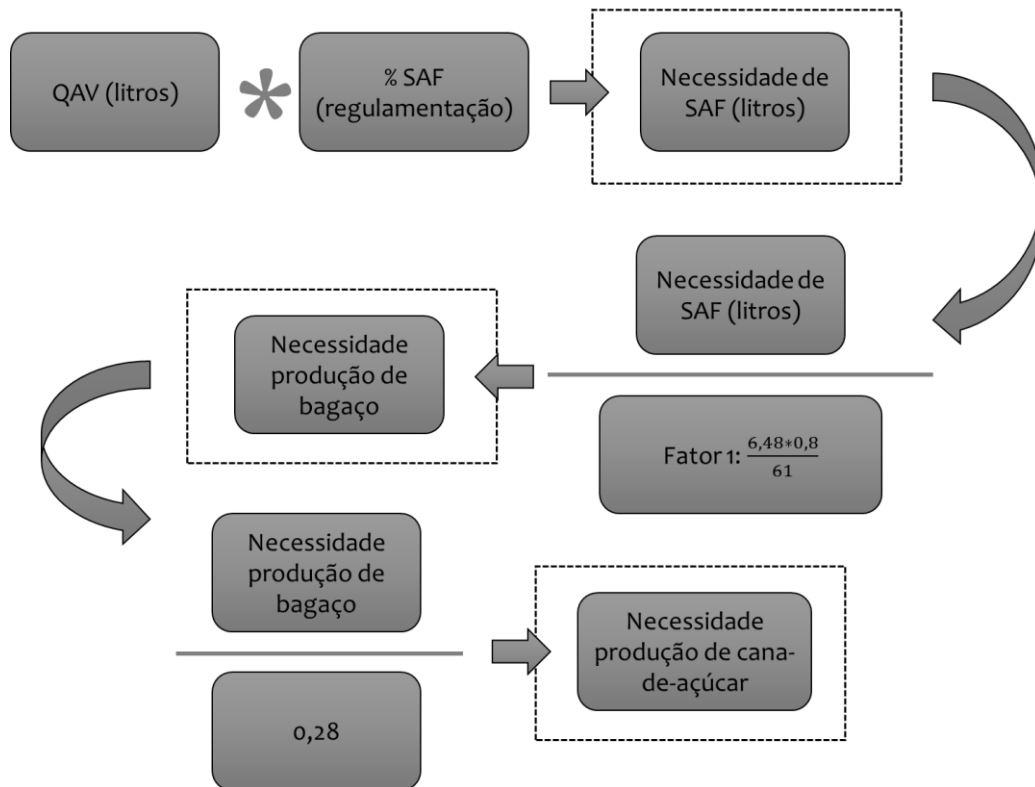
No Brasil, em 2015, 65% do combustível de aviação usado deveu-se às viagens internacionais (PROQR, 2022). Com a pauta de descarbonização setorial em nível global, a partir de 2027, a produção de SAF no Brasil terá limite mínimo estabelecido pela legislação doméstica, com exigência de um percentual de mistura progressiva, a fim de atender as metas estabelecidas pelo acordo internacional do CORSIA. Esse volume está relacionado com a produção de biomassa no país, no qual, se sobressai com a matéria-prima a partir da cana-de-açúcar, correspondendo por 82% do total utilizado no país (ANEEL, 2024).

Nesse cenário, a estimativa da quantidade de produção de cana-de-açúcar para a produção de SAF foi realizada em três etapas:

- i. considerou-se um fator de conversão de Dantas Filho (2019), que calcula a geração de 28% de bagaço, a partir da produção de cana-de-açúcar, resultando na quantidade de biomassa de cana-de-açúcar necessária para produzir a biomassa demandada;
- ii. considerou-se um outro fator de conversão de numa razão de 0,10623, colocada por Milanez *et al.* (2021), para identificar a relação entre o volume de SAF e a quantidade exigida de biomassa de cana-de-açúcar, no período entre 2027 e 2037, para atender o país;
- iii. identificou-se o volume necessário de SAF a partir da produção doméstica de querosene de aviação (ANP, 2023), relacionando-a com os percentuais exigidos pela legislação brasileira a partir de 2027 (BRASIL, 2024).

Esse dado permitiu dimensionar a produção necessária de cana-de-açúcar no país. Com esta mesma razão, estimou-se a capacidade de produção de biomassa em cada região, a partir da produção de cana-de-açúcar, conforme ilustra a Figura 1.

**Figura 1:** Procedimento utilizados



Fonte: Elaboração dos autores.

A partir dessas estimativas preliminares, foi possível desenvolver um quadro do cenário da produção de bioquerosene no Brasil, considerando a utilização da biomassa de cana-de-açúcar, a fim de atender à futura demanda por SAF do país, no período entre 2027 e 2037.

Adicionalmente, foi mapeada a produção de cana-de-açúcar nas diferentes regiões do país, localizando a produção efetiva em cada unidade da federação, a partir de dados do IBGE (2017). Considerando esses dados, foram identificadas as regiões e estados que teriam potencial para atender a demanda de bagaço de cana-de-açúcar necessária para suprir a demanda nacional para produção de SAF, conforme prevista pela legislação brasileira em fase de implementação.

### 3.2 Especialização regional da produção de energia a partir de biomassa (QL)

A etapa posterior da metodologia considerou os dados referentes ao potencial de produção de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar. Nesse sentido, foram utilizados dados da outorga de produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar, que representam a autorização para produção de energia usando biomassa. Para identificação do potencial de produção de cada estado, utilizou-se o indicador de Quociente Locacional (QL).

O indicador QL é um instrumento para identificação dos padrões de concentração ou dispersão espacial das atividades regionais em uma economia. De fácil adaptação para diferentes temáticas, a análise por meio de indicadores, em geral, mapeia importantes informações (MONASTERIO,2011). No presente trabalho, para a construção do QL foram utilizados dados da capacidade autorizada para produção de energia a partir de biomassa (GW) e do somatório de fontes renováveis de energia (GW) para todas as Unidades Federativas do Brasil. Calculado conforme descreve a Equação 1.

$$QL = \frac{\frac{PRODBiomassa\ Estadual}{PRODRenovável\ Estadual}}{\frac{PRODBiomassa\ Brasil}{PRODRenovável\ Brasil}} (1)$$

Os resultados são interpretados a partir do numeral 1, seguindo adaptações de Haddad (1989), quando o resultado da equação for maior do que 1, diz-se que o estado é relativamente mais importante na atividade, em relação ao contexto nacional. Contudo, embora o QL seja um cálculo simples, sua interpretação de escala requer que sejam tratados com parcimônias. Assim, considerando um intervalo de três escalas<sup>1</sup>, tem-se a seguinte relação:

- $0 < QL < 0,5$  para os estados não especializados;
- $0,5 < QL < 1$  para estados que possuem indícios de especialização em biomassa;
- $QL \geq 1$  para estados com alto grau de especialização.

Por fim, para a construção dos indicadores e execução das análises, realizou-se uma coleta de dados secundários construída a partir dos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para o ano de 2023. Além disso, para a estimação da produção em diferentes cenários (plano corrente, de médio prazo e longo prazo), utilizou-se os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Petróleo e Gás (ANP) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

#### 4. Análise De Resultados

Esta seção tem como objetivo mapear e discutir os resultados obtidos com as estimações de cenários de produção do bioquerosene no Brasil e o indicador de especialização regional, o QL. Além disso, serão apontadas algumas preposições políticas para que se possa aproveitar as potencialidades das futuras demandas desse mercado.

##### 4.1 Perspectivas para produção de bioquerosene e necessidade de biomassa no Brasil

De acordo com os dados da EPE (2022), o Brasil tinha em operação 361 unidades sucroalcooleiras, em 2020, com capacidade anual de moagem de cerca de 745 milhões de toneladas e moagem efetiva de 663 milhões de toneladas. Estima-se

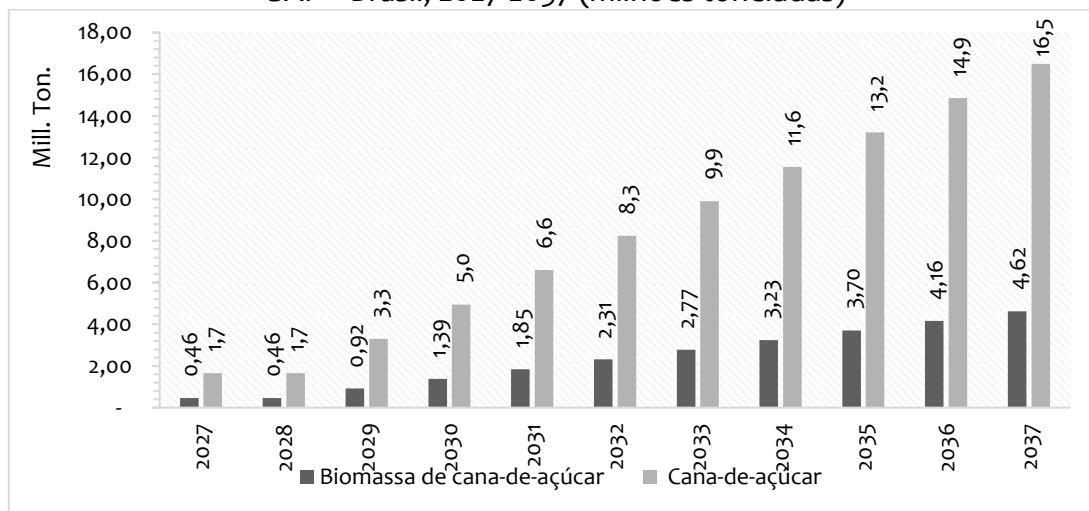
<sup>1</sup> Ver Lima e Simões (2010).

que esse processo tenha gerado cerca de 186 milhões de toneladas de bagaço de cana, considerando uma produção em torno de 28% de resíduo, conforme fator estimado por Dantas Filho (2009). Esse montante poderia gerar até cerca de 19 bilhões de litros de bioquerosene, tomando como referência 0,1063 como o fator de conversão utilizado por Milanez *et al.* (2021).

A partir desses dados, tomou-se como referência a regulamentação atualmente em discussão no país, que tem como meta inicial a utilização de 1% de fontes renováveis na composição dos combustíveis, a partir de 2027, de forma progressiva, chegando a 10% até 2037. Considerando a produção interna de querosene de aviação de 4.908 milhões de litros, em 2022, mantendo estável a produção, haveria necessidade de produzir internamente 49,09 milhões de litros de bioquerosene no país, para atender o setor aéreo, já em 2027. Esse volume deve atingir, considerando a necessidade de 10% na mistura do combustível, o total de 490,89 milhões de litros, em 2037.

Essa produção de bioquerosene exigiria a utilização de 460 mil de toneladas de bagaço de cana. Esse quantitativo de biomassa poderia ser obtido a partir da produção de 1,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que representaria 0,25% da produção disponível no país. O Gráfico 1 mostra essa evolução, entre 2027 e 2037.

**Gráfico 1:** Necessidade de cana-de-açúcar e biomassa de cana para a produção de SAF – Brasil, 2027-2037 (milhões toneladas)



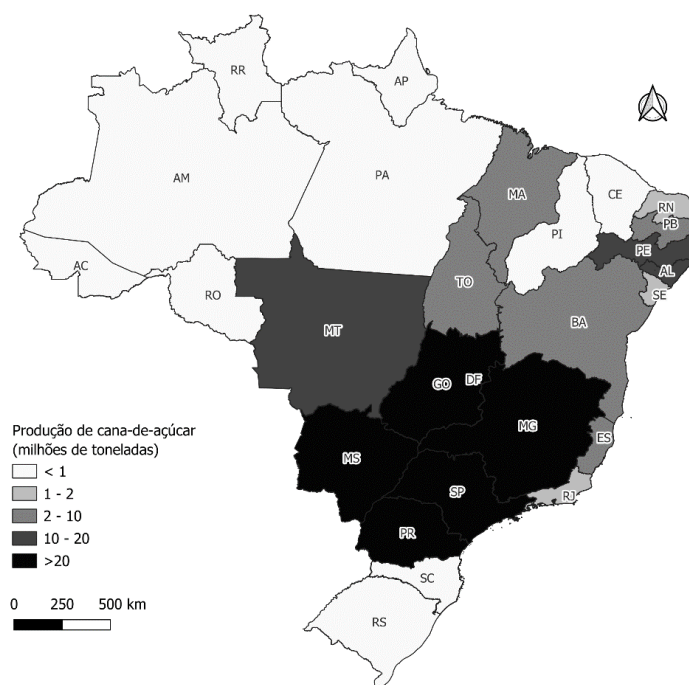
Fonte: Elaboração dos autores.

Até 2037, os dados sinalizam um crescimento significativo da demanda por biomassa de cana, caso o país opte por esta matéria-prima no processo de produção de SAF, de forma a atender a regulamentação atualmente em tramitação no Congresso Nacional. A regulamentação brasileira prevê um percentual de mistura na composição do querosene utilizado no país, iniciando com 1% de SAF, em 2027, e atingindo 10% de SAF, em 2037. Mesmo supondo uma estabilidade na venda de querosene de aviação, o aumento do percentual de mistura de SAF no combustível, considerando a rota de produção a partir da biomassa de cana-de-açúcar, resultará numa elevação da demanda desta biomassa, passando de 460 mil toneladas, em 2027, para 4,62 milhões de toneladas em 2037.

A demanda por bagaço de cana-de-açúcar, considerando a manutenção dos sistemas de produção, irá requer também a utilização crescente da produção deste produto agrícola. Em 2027, seria necessário utilizar o bagaço decorrente da produção de 1,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Já em 2037, seriam necessárias 16,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para suprir os 4,62 milhões de toneladas de bagaço a serem convertidos em 490,89 milhões de litros de SAF.

Em termos de capacidade local de produção de cana-de-açúcar, a Figura 2 ilustra a produção na safra de 2017 em milhões de toneladas. De acordo com os dados do Censo IBGE (2017), considerando a demanda de produção de 1,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, em 2027, teriam capacidade de atender toda a demanda nacional diversos estados isoladamente, das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste.

**Figura 2:** Produção de cana-de-açúcar (milhões de toneladas)



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados do IBGE (2017).

Já para atender a demanda estimada de 16,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, em 2037, os estados de São Paulo e Minas Gerais (Sudeste), Paraná (Sul), Mato Grosso do Sul (Centro-Oeste) seriam aqueles com capacidades instaladas pré-existentz capazes de suprir isoladamente toda a demanda nacional. Na região Nordeste, os estados de Alagoas e Pernambuco conseguiriam atender em conjunto a demanda estimada.

Em linhas gerais, conforme destacado anteriormente, há um mercado sinalizando futuras demandas de biocombustíveis sustentáveis no mundo, o Brasil não só possui potencialidades para usufruir desse *boom* a partir da disponibilidade de terras de cultivo para a produção de biomassa com cana-de-açúcar, como também pode promover o desenvolvimento de cadeias produtivas e com alto valor agregado na região Nordeste do país, apresentando potencial para geração de empregos e

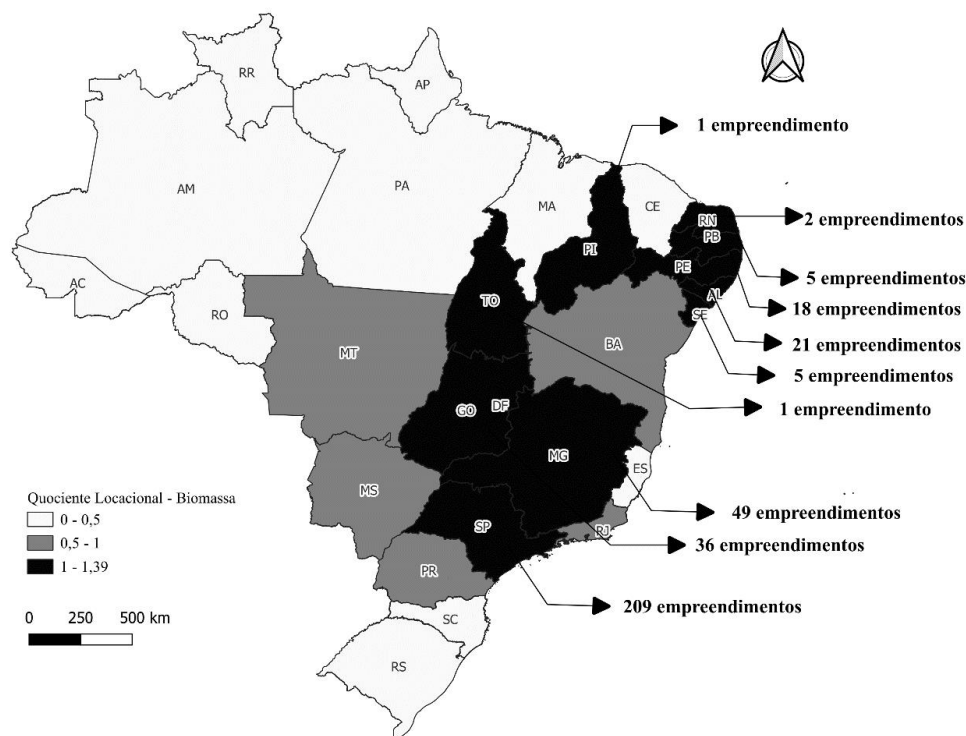
renda a partir da bioeconomia local. Contudo, para que se possa usufruir dos benefícios associados a esse mercado, o desenvolvimento de infraestruturas adequadas, de refinarias e de projetos destinados para a melhoria na conversão do querosene no motor são primordiais, isto é, o desenvolvimento de uma indústria doméstica no setor.

Existe uma sinalização para a construção desse mercado no país, em virtude da regulamentação internacional e da normatização interna, especialmente com a criação do Programa Combustível do Futuro (Resolução CNPE nº 7/2021) e a regulamentação do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (PL 4.516/2023), conforme mencionada anteriormente. Esse movimento deve impulsionar a produção de matérias-primas para fabricação de combustíveis renováveis, motivando a economia das regiões do país onde haja maior potencial para a produção dessas matérias-primas.

#### 4.2 Potencial de produção de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar: disponibilidade regional

Esse aumento da produção de SAF para atender a composição de querosene de aviação, conforme exigido pela legislação doméstica, já a partir de 2027, pode gerar oportunidades regionais. Nesse sentido, é importante situar as principais localidades produtoras da cana-de-açúcar, que é a biomassa mais relevante no caso brasileiro, e identificar as localidades com outorga para a produção de energia a partir dessa biomassa.

**Figura 3:** Quociente Locacional da Produção de Biomassa a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Elaboração dos autores, a partir dos dados da ANEEL (2024).

Embora o estado de São Paulo se destaque como a localidade com o maior volume de produção (6.306.548.2 kW), seguido por Minas Gerais (1.649.920 kW), Goiás (1.474.068 kW) e Mato Grosso do Sul (1.159.409 kW), o mapeamento da produtividade de matéria-prima e de áreas de cultivo existentes apontam uma especialização produtiva nas Unidades da Federação da região Nordeste do Brasil, sendo está uma região com elevada produção energética de fontes renováveis (eólica, solar e hídrica). Dentre os estados da região Nordeste destacam-se: Alagoas (357.462 kW), Pernambuco (317.575 kW), Paraíba (101.500 kW), Rio Grande do Norte (61.000 kW) e Sergipe (59.700 kW) respectivamente, conforme ilustra a Figura 3.

Cabe mencionar que resultados do  $QL > 1$  (maior que um) poderão ser interpretados considerando que aquela região é relativamente mais importante no contexto nacional, na produção de biomassa a partir do bagaço da cana-de-açúcar. E, portanto, podem ser apontadas como unidades com capacidades pré-estabelecidas para atender a futura demanda do mercado de produção de biocombustíveis sustentáveis para aviação.

Os resultados ainda apontam indícios de especialização nos respectivos estados: Rio de Janeiro (49.000 kW), Mato Grosso do Sul (1.159.409 kW), Paraná (592.640 kW), Bahia (22.000 kW) e Mato Grosso (9.400 kW). Nesse contexto, são estados com potencial para desenvolver as atividades na produção de biomassa a partir da cana.

Considerada como uma região de elevado desempenho econômico, a região Sul-Sudeste concentra o maior número de empreendimentos agroindustriais da produção de biomassa a partir da cana-de-açúcar. O estado de São Paulo, em 2023, apresentou um Produto Interno Bruto (PIB) superior a R\$ 2.719.751 milhões e registrou um total de 209 empreendimentos de produção de biomassa em operação dessa fonte. O estado de Minas Gerais, teve um PIB de R\$ 857.593 milhões e um total de 49 empreendimentos e Goiás um PIB de R\$ 269.628 milhões e um total de 36 empreendimentos. Em contrapartida, os estados da região Nordeste do país registram um número inferior de empreendimentos. O estado de Alagoas, em 2023, registrou um PIB de R\$ 76.266 milhões e um total 21 empreendimentos em operação, Pernambuco um PIB de R\$ 220.814 milhões e um total de 18 empreendimentos, Paraíba um PIB de R\$ 77.470 milhões e Sergipe R\$ 51.861 milhões, ambos com um total de 5 empreendimentos cada, Rio Grande do Norte com um PIB de R\$ 80.181 milhões e um total de 2 empreendimentos e Tocantins um PIB de R\$ 51.781 milhões e Piauí R\$ 64.028 milhões, ambos apenas com 1 empreendimento cada.

À luz desse debate, os estados das regiões menos desenvolvidas, como o Norte e Nordeste do país, poderiam tornar-se centros de produção e fornecer mão de obra e matéria-prima local, cuja combinação exerceria um duplo papel: ofertar serviços para atender a futura demanda do mercado de SAF e promover a redução das disparidades entre as estruturas produtivas do Sul/Sudeste e o Norte/Nordeste (POCHMANN; SILVA, 2020). Cabe ressaltar que, as disparidades existentes entre essas regiões no Brasil são frutos da organização econômica e da dinâmica produtiva de desenvolvimento local, portanto, é imprescindível impulsionar atividades de maior valor agregado, dado que regiões mais desenvolvidas tendem a atrair maiores investimentos (SOUZA *et al.*, 2022).

## 5. CONCLUSÃO

Diante do arcabouço do processo de descarbonização do setor de transporte e dos desafios para atender futuras demandas por matérias-primas (segurança energética) em atividades-chave e intensivas em carbono, como no caso das atividades de aviação, diferentes economias têm adotado políticas e medidas direcionadas para o setor. Dentre as estratégias para atender as metas estabelecidas nos acordos de cooperação, destaca-se o projeto para a produção de biocombustíveis sustentáveis para aviação (SAF - *Sustainable Aviation Fuel*).

Considerado como uma atividade intensiva em combustíveis fósseis, estima-se que até 2050 a transformação do setor acarretará uma redução de até 87% dos níveis de emissões de CO<sub>2</sub>. No Brasil, em 2022, a produção de combustíveis para o setor aéreo atingiu 4,9 milhões de m<sup>3</sup>, representando cerca de 5% da produção de derivados de petróleo no país. Com uma experiência consolidada na produção de biocombustíveis para veículos automotores, a partir da produção de etanol com biomassa de cana-de-açúcar, o Brasil apresenta potencialidades para o desenvolvimento de uma indústria de produção de SAF.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo identificar as localidades das regiões brasileiras com potencial para atender as futuras demandas de biocombustíveis sustentáveis para aviação, utilizando bagaço de cana-de-açúcar. Tomou-se como base uma estimativa da necessidade de produção de bioquerosene no Brasil e a construção do indicador de Quociente Locacional para a produção de biomassa (GW) em cada Unidade da Federação.

Considerada como um material orgânico, de fonte limpa, sustentável e renovável, a biomassa pode ser gerada por bagaço de cana-de-açúcar, licor negro, resíduos florestais, resíduos urbanos e lenha. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus resíduos, embora haja uma predominância das atividades nas regiões Sul-Sudeste, há também cadeias produtivas de pequeno e médio porte nas regiões Norte e Nordeste. Sendo estas últimas regiões marcadas historicamente por intensas disparidades sociais e econômicas no país, em parte, como consequência da organização econômica regional e do padrão de desenvolvimento local do Brasil. Nesse sentido, o desenvolvimento das atividades nessas regiões que são menos desfavorecidas economicamente, mas que apresentam potencialidades para atender uma futura demanda, poderia ser um canal com duplo objetivo: descarbonizar as atividades de aviação e promover o desenvolvimento local.

Com as metas estabelecidas pelo Programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA) estima-se que, a partir de 2027, haverá uma transformação no setor, com mecanismos de compensação (por meio de aquisição de crédito de carbono) e redução nos níveis de emissões, a partir do uso de combustíveis sustentáveis, o SAF.

A produção de SAF no Brasil terá limite mínimo estabelecido pela legislação doméstica, com exigência de um percentual de mistura progressiva, a fim de atender as metas estabelecidas pelo acordo internacional do CORSIA. De acordo com a regulamentação, atualmente em discussão no país, a meta inicial consiste na utilização de 1% de fontes renováveis na composição dos combustíveis, a partir de 2027, de forma progressiva, chegando a 10% até 2037. A partir dessa meta e

considerando a atual produção, estimou-se que haveria necessidade de produzir internamente 49,09 milhões de litros de bioquerosene no país, para atender o setor aéreo, já em 2027, que poderia ser obtido a partir da produção de 1,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que representaria 0,25% da produção disponível no país. Para 2037, seguindo as metas do CORSIA, haverá numa elevação da demanda desta biomassa de cana-de-açúcar, passando de 460 mil toneladas, em 2027, para 4,62 milhões de toneladas em 2037.

Além dos estados que apresentam o maior volume de produção de cana-de-açúcar, como São Paulo (6.306.548.2 kW), Minas Gerais (1.649.920 kW), Goiás (1.474.068 kW) e Mato Grosso do Sul (1.159.409 kW), os resultados do Quociente Locacional (QL) apontam uma especialização produtiva para alguns estados da região Nordeste do Brasil, especialmente, os Estados de Alagoas (357.462 kW), Pernambuco (317.575 kW), Paraíba (101.500 kW), Rio Grande do Norte (61.000 kW) e Sergipe (59700 kW) respectivamente.

Nesse sentido, a partir das metas estabelecidas, a partir de 2027 já pode haver importantes implicações regionais. Os únicos estados que apresentam capacidades produtivas para atender a futura demanda até 2037 são: São Paulo, Minas Gerais (Sudeste), Paraná (Sul) e Mato Grosso do Sul (Centro-Oeste). No Nordeste, os estados com capacidades pré-existentes para atender inteiramente a demanda estimada até 2037, mantendo tudo mais constante, são Alagoas e Pernambuco, mas considerando a produção conjunta destes.

Neste aspecto, há algumas proposições iniciais que podem ser destacadas: i) embora a produção inicial possa acarretar custos superiores a produção de combustíveis tradicionais já estabelecidos no mercado – especialmente devido ao estágio tecnológico –, ainda assim, o Brasil apresenta potencial para desenvolver uma escala de produção direcionada para as atividades de biocombustíveis de aviação em diferentes regiões do país; ii) tendo em vista a necessidade de mitigação dos níveis de emissões de gases de efeito estufa, a criação desse mercado a partir de normas, certificação e regulação, se faz primordial para que possa alcançar as metas estabelecidas nos acordos de cooperação internacional, bem como, aproveitar a janela de oportunidade que esse mercado apresenta para o Brasil; e iii) por fim, para reduzir a dependência tecnológica externa, faz-se primordial o desenvolvimento de políticas ambiciosas e estáveis, em especial, o desenvolvimento de políticas industriais, capazes de promover uma mudança sistêmica a partir da colaboração entre diversos atores desse mercado, bem como, indústria, centros de pesquisa, empresas aéreas, governo e *stakeholders*.

Portanto, a fim de atender futuras demandas de biocombustíveis sustentáveis no mundo, o Brasil tem apresentado potencialidades para usufruir desse *boom*, a partir da disponibilidade de terras de cultivo para a produção de biomassa com cana-de-açúcar. Além disso, o desenvolvimento da cadeia produtiva do SAF com alto valor agregado pode ser um canal para promover a descarbonização do setor e mitigar as disparidades existentes entre as regiões do país, em especial, na região Nordeste. No entanto, para que se possa usufruir dos benefícios associados a transição desse mercado é imprescindível o desenvolvimento de uma indústria doméstica, em localidades com disponibilidade de terras de cultivo para a produção de biomassa destinada ao setor. Não obstante, faz-se imprescindível um planejamento de médio e longo prazos para essas atividades, pois a dinâmica atual de produção pode limitar

a oferta de biomassa destinada para o mercado de SAF e, conseqüentemente, exercer uma pressão sobre os níveis de preços.

## Referências

ALBUQUERQUE, Cristhian *et al.* **Produção de energia renovável por meio de biomassa avícola: o caso do Norte do Paraná.** *Brazilian Applied Science Review*, v. 6, n. 2, p. 731-750, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.** Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL.** Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2023.** Rio de Janeiro: ANP, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 7, de 20 de abril de 2021. **Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências.** *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 abr. 2021.

BRASIL. Resolução nº 778, de 5 de abril de 2019. **Estabelece as especificações do querosene de aviação, querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação [...].** *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 67, p. 40, 8 abr. 2019. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/KujrwoTZC2Mb/content/id/70491356/doi-2019-04-08-resolucao-n778-de-5-de-abril-de-2019-70491250](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/KujrwoTZC2Mb/content/id/70491356/doi-2019-04-08-resolucao-n778-de-5-de-abril-de-2019-70491250).

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa *et al.* **PROÁLCOOL 40 anos: universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro.** São Paulo: Blucher, 2016.

DANTAS FILHO, Paulo. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de conjuntura dos biocombustíveis: ano 2020.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2023.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2023.

GREENPEACE BRASIL. **Revolução energética: rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis.** Ricardo Baitelo (org.). São Paulo: Greenpeace Brasil, 2016.

HADDAD, Paulo Roberto *et al.* **Economia regional: teorias e métodos de análise.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global renewables outlook: energy transformation 2050**. Abu Dhabi: IRENA, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Reaching zero with renewables: biojet fuels**. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2024). **Sustainable bioenergy potential in Caribbean small island developing states**. Abu Dhabi.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Sustainable bioenergy potential in Caribbean small island developing states**. Abu Dhabi: IRENA, 2024.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). **Transport outlook 2021**. Paris: OECD Publishing, 2021.

LEAL, Alan *et al.* **Efeitos do crescimento econômico sobre a desigualdade salarial por gênero no Nordeste – Brasil**. *Revista GeoNordeste*, n. 1, p. 151-169, 2021.

MENEZES, Rômulo *et al.* **Biomassa, energia e desenvolvimento na região Nordeste do Brasil: histórico e perspectivas**. *Revista Inovação e Desenvolvimento*, v. 1, n. 9, 2022.

MILANEZ, Artur *et al.* **Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade**. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 361-398, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Conferência das Partes**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/conferencia-das-partes.html>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Nosso futuro comum: comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1991.

POCHMANN, Marcio; SILVA, Luciana. **Concentração espacial da produção e desigualdades sociais**. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 22, 2020.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>.

SOUZA, Solange *et al.* **Efeitos da segmentação regional nos salários dos trabalhadores do Nordeste e Sudeste do Brasil**. *Interações*, v. 23, n. 4, p. 1051-1067, 2022.

WATSON, M. *et al.* **Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: a critical review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 449, 2024.

**José Ricardo de Santana.** Doutor em Economia de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, Brasil. Departamento de Economia, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, Brasil. Professor do Programa de Pós-Graduação em Economia. E-mail: jrsantanaufs@gmail.com

**Lindomayara França Ferreira.** Doutora em Economia pela Universidade Federal Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. Departamento de Engenharia da Faculdade de Tiradentes, Sergipe, Brasil. Pós-doutorado em Economia. E-mail: lindomayara@hotmail.com

**Marcelo da Costa Mendonça.** Doutorado em Química e Biotecnologia pela Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, Brasil. Departamento de Engenharia da Faculdade de Tiradentes, Sergipe, Brasil. Professor do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial. E-mail: marcelo\_costa@unit.br

**Claudio Dariva.** Doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Departamento de Engenharia da Faculdade de Tiradentes, Sergipe, Brasil. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. E-mail: claudio.dariva@gmail.com

Submetido em: 08/09/2024

Aprovado em: 05/05/2026

#### CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

**Conceituação:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Curadoria de Dados:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Análise Formal:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Obtenção de Financiamento:** Não se aplica

**Investigação/Pesquisa:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Metodologia:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Administração do Projeto:** José Ricardo de Santana

**Recursos:** Não se aplica

**Software:** Não se aplica

**Supervisão/orientação:** José Ricardo de Santana

**Validação (Validation):** José Ricardo de Santana, Lindomayara França Ferreira, Marcelo da Costa Mendonça, Claudio Dariva

**Visualização (Visualization):** José Ricardo de Santana, Lindomayara França Ferreira, Marcelo da Costa Mendonça, Claudio Dariva

**Escrita – Primeira Redação:** José Ricardo de Santana e Lindomayara França Ferreira

**Escrita – Revisão e Edição:** José Ricardo de Santana, Lindomayara França Ferreira, Marcelo da Costa Mendonça, Claudio Dariva

**Fontes de financiamento:** Não se aplica