



UNILAB

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA
LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

ITHALO LUZ MOTA

**RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMETRICA AVANÇADA**

**REDENÇÃO – CE
2025**

ITHALO LUZ MOTA

RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMETRICA AVANÇADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.

Coorientador: Me. Francisco Simão Neto.

REDENÇÃO – CE
2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Mota, Ithalo Luz.

M917r

Resíduos agrícolas para produção de biocombustíveis: uma análise bibliométrica avançada / Ithalo Luz Mota. - Redenção, 2025.
53f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientador: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.
Coorientador: Me. Francisco Simão Neto.

1. Biocombustíveis. 2. Biomassa residual. 3. Energia Renovável. 4. Bibliometria avançada. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 662.88

ITHALO LUZ MOTA

RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: UMA
ANÁLISE BIBLIOMETRICA AVANÇADA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.

Coorientador: Me. Francisco Simão Neto.

Aprovado em: 30/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes (Orientadora)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Me. Francisco Simão Neto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará

Profa. Dra. Eveline de Abreu Menezes
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Me. Patrick da Silva Sousa
Universidade Federal do Ceará

A minha mãe, Vilma.

A minha tia, Rita.

A minha madrinha, Valquíria.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Vilma Luz, por cada sacrifício que teve que fazer para que pudesse chegar onde estou, e não foram poucos, por cada gesto de carinho, por cada conselho, por estar ao meu lado nos momentos bons e, principalmente, nos difíceis. Me faltam palavras para explicar o quanto eu te amo e o quanto sou agradecido por te ter em minha vida, a senhora é tudo de bom que eu tenho. Com todo meu amor.

A minha madrinha, Valquíria Lima que, embora tenha partido deste mundo, permanece viva em minhas lembranças e no meu coração. Obrigado por tudo o que me ensinou e pelo amor incondicional que sempre me deu. Sei que, de alguma forma, você está vendo esse momento e se sentindo orgulhosa, como sempre estive.

Estendo também minha gratidão a todos os familiares que, mesmo não mencionados diretamente, sempre estiveram presentes com carinho, apoio e palavras de incentivo ao longo da minha caminhada. Em especial ao meu primo Samuel Rodrigues, obrigado por ser como um irmão para mim e a minha tia Rita de Cássia por sempre se fazer presente para mim.

As minhas amigas que a vida me deu como mãe e irmã, Lizandra Régia e Ivina Lorena, respectivamente, sou muito grato por ter vocês ao meu lado. Obrigado por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei, por celebrarem cada pequena vitória e por me ouvirem, me entenderem e me puxarem para a realidade quando foi preciso. A nossa amizade é um presente que carrego no peito com muito amor e orgulho.

A todos os amigos que fiz durante meu percurso, Marcus, Paulo, Elias, Antônio Victor, Giliardson, Marisabel, Marlo, Bruna e Levi. Meu mais sincero agradecimento por cada momento que compartilhamos ao longo dessa caminhada, vocês a tornaram bem mais fácil.

Agradeço aos professores da instituição pelo conhecimento compartilhado, pela dedicação e pelo papel essencial na minha formação. Em especial a minha orientadora, a professora Ada Sanders, por todo o apoio, paciência e dedicação ao longo desta jornada acadêmica e ao meu coorientador professor Simão Neto. Agradeço os conselhos, a disponibilidade e a exigência gentil. A orientação de ambos foi de extrema importância para mim.

Ao Grupo de Extensão e Pesquisa em Energias e Meio Ambiente (GEPEMA/UNILAB), por todo suporte e companheirismo dedicados a mim.

*“Alguns vivem como se nunca fossem morrer,
outros morrem como se nunca tivessem vivido.*

Eu não vivo em vão, vivo para ser feliz.”

(Chorão)

RESUMO

Diante da crescente necessidade de fontes energéticas sustentáveis e políticas públicas voltadas à redução de emissões poluentes, os biocombustíveis oriundos de resíduos agrícolas têm conquistado destaque como alternativa viável na transição energética. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a evolução da produção científica mundial sobre o tema, com ênfase na contribuição de países emergentes, principais autores e instituições. Para isso, foi realizada uma análise bibliométrica com base em 420 artigos indexados na base *Web of Science* (WoS), publicados entre 2015 e abril de 2025. A análise destacou os EUA como o maior número de publicações (7) e a Índia como país com o maior número de citações (2263), dentre os autores Dalai Ajay K. e Francesca Valenti lideram com 6 publicações e a *University of Saskatchewan*, como instituição com mais artigos (14) sobre o tema. Os resultados permitiram identificar tendências de pesquisa, palavras-chave recorrentes e rotas tecnológicas predominantes, como a produção por rota enzimática, o avanço das biorefinarias e a valorização de resíduos agrícolas. Assim, a análise fornece um panorama abrangente do desenvolvimento científico na área e contribuir com Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 para a compreensão de seu papel estratégico no contexto energético global.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Biomassa residual. Energia Renovável. Bibliometria avançada.

ABSTRACT

Given the growing need for sustainable energy sources and public policies aimed at reduction of polluting emissions, biofuels from agricultural waste have been agricultural waste have gained prominence as a viable alternative in the energy transition. In this context, this study aims to analyze the evolution of global scientific scientific production on the subject, with an emphasis on the contribution of emerging countries countries, main authors and institutions. To this end, a bibliometric analysis was carried out based on 420 articles indexed in the Web of Science (WoS), published between 2015 and April 2025. The analysis highlighted the USA as having the highest number of publications (7) and India as the country with the highest number of citations (2263), with authors Dalai Ajay K. and Francesca Valenti lead the way with 6 publications and the University of Saskatchewan, as the institution with the most articles (14) on the subject. The results made it possible to research trends, recurring keywords and predominant technological technological routes, such as enzymatic production, the advance of biorefineries and the biorefineries and the recovery of agricultural waste. The analysis thus provides a comprehensive overview of scientific development in the area and contributes with Sustainable Development Goal (SDG) 7 to its strategic role in the global energy context.

Keywords: Biofuels. Residual biomass. Renewable energy. Advanced bibliometrics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	— Algumas das matérias-primas utilizadas para a produção de briquetes ..	21
Figura 2	— Algumas das matérias-primas utilizadas para a produção de biolubrificantes	25
Figura 3	— Número de patentes sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	26
Figura 4	— Visão geral da estratégia de busca e critérios de refinamento utilizados na base de dados WoS	31
Figura 5	— Tendência global de publicações e citações anuais relacionadas à pesquisa de biocombustíveis gerados a partir de resíduos agrícolas	35
Figura 6	— Distribuição mundial de pesquisas sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas de 2015 a abril de 2025. A densidade das publicações é representada em uma escala de cores	36
Figura 7	— (A) Classificação dos dez principais países com o maior número de publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. (B) Classificação dos dez principais países com a maior frequência de citações de suas publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas	37
Figura 8	— (A) Classificação dos dez principais países com a maior frequência de citações de suas publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas entre 2015 até abril/2015. (B) Distribuição e cooperação internacional de países/regiões envolvidos na produção de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	38
Figura 9	— Mapeamento da rede de citações entre instituições com base em suas publicações sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas	39
Figura 10	— Classificação dos dez autores com mais publicações sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	41
Figura 11	— Mapa da rede de coautoria e colaboração de autores na pesquisa de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	42

Figura 12	—	Mapa da rede de revistas científicas em pesquisa de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	44
Figura 13	—	(A) Análise de nuvem de palavras sobre a síntese enzimática de biolubrificantes para frequências de palavras. Número de palavras = 50. (B) Análise de coocorrência de palavras-chave em pesquisas sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas	46
Figura 14	—	(A) Visualização de sobreposição da análise de coocorrência. (B) Mapa de densidade de palavras-chave gerado pelo VOSviewer mostrando o ponto de acesso à pesquisa sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas	47
Figura 15	—	Gráfico de três campos (diagrama de Sankey) mostrando a relação entre Palavras-chave (direita), Fontes (meio) e Países (esquerda) na pesquisa de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Número de itens representados = 10	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Características dos Processos de Produção de Biodiesel a partir de Diferentes Óleos e Rotas Catalíticas	20
Tabela 2	— Comparativo do poder calorífico de briquetes de diferentes matérias-primas e a lenha	22
Tabela 3	— Características dos Processos de Produção de Biolubrificante a partir de Diferentes Óleos e Rotas Catalíticas	24
Tabela 4	— 10 principais institutos que contribuíram para as publicações de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas	40
Tabela 5	— As dez principais revistas científicas que mais publicaram sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025	44
Tabela 6	— Tabela de classificação das vinte palavras-chave mais frequentes nos artigos analisados. (TLS: Força total do link)	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Resíduos Agrícolas	17
3.2	Biocombustíveis	18
3.2.1	<i>Biodiesel</i>	19
3.2.2	<i>Briquete</i>	21
3.2.3	<i>Biolubrificante</i>	22
3.3	Patentes	25
3.4	Desafios e Limitações	26
3.5	Aplicações Industriais E Perspectivas	27
3.6	Bibliometria Avançada	29
4	METODOLOGIA	30
4.1	Bases De Dados	30
4.2	Coleta De Dados	30
4.3	Extração De Dados	31
4.4	Visualização E Análise Dos Dados	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Tendência Das Publicações e Citações Globais	33
5.2	Contribuições De Países/Regiões	35
5.3	Contribuições Das Instituições	39
5.4	Contribuições Dos Autores	40
5.5	Análise De Revistas	42

5.6	Análise De Palavras-Chave.....	45
6	CONCLUSÃO.....	49
	REFERENCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

No cenário global a busca por fontes alternativas de energia tem alcançado destaque como uma resposta às mudanças climáticas e à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Purohit; Dhar, 2018). O emprego de combustíveis não renováveis, como carvão mineral, petróleo e derivados, se torna uma crescente preocupação ambiental, uma vez que são fontes potencialmente poluentes e, em diversos casos, associadas a custos elevados (Tavares, 2013). Esses recursos, além de contribuírem para a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e outros poluentes atmosféricos, são finitos, o que amplia a urgência por alternativas energéticas mais sustentáveis e economicamente viáveis (Ji, 2024).

A biomassa é uma alternativa viável e sustentável por ser uma fonte renovável e amplamente disponível. Ela reduz a dependência de combustíveis fósseis, diminui as emissões de gases de efeito estufa e aproveita resíduos que seriam descartados (Lim et al., 2024). Além disso, a biomassa pode ser convertida em energia por meio de tecnologias acessíveis, como os biocombustíveis, gerando empregos e renda, especialmente em pequenas comunidades (Tavares, 2013). Sua utilização promove a diversificação da matriz energética, contribui para a segurança energética e ajuda a fechar ciclos de produção, reduzindo desperdícios e impactos ambientais (Sanchez-Roque et al., 2025). Assim, a biomassa se sobressai como uma solução estratégica para um futuro mais sustentável.

No Brasil, a biomassa consolida-se como uma das alternativas energéticas mais estratégicas e sustentáveis, posicionando o país como referência global no aproveitamento de recursos naturais renováveis (Fonseca et al., 2019; Purohit; Dhar, 2018). De acordo com dados de 2023 do Balanço Energético Nacional essa fonte responde por 32,7% da matriz energética nacional, superando a participação de muitas nações desenvolvidas (EPE, 2024). Esse percentual revela uma estrutura diversificada, sendo aproximadamente 50% proveniente da cana-de-açúcar (incluindo bagaço e palha para cogeração e etanol como biocombustível), enquanto os demais 50% compreendem fontes tradicionais e inovadoras: desde a lenha e carvão vegetal, até subprodutos industriais como o licor negro das fábricas de celulose e o biodiesel produzido a partir de diversas oleaginosas.

As regiões com uma rica produção agrícola, geram uma quantidade significativa de resíduos que, muitas vezes, são descartados ou subutilizados (Ji, 2024). Esses resíduos, como cascas de frutas, restos de cultivos e podas de árvores, podem ser transformados em briquetes, por exemplo, agregando valor a materiais que antes seriam considerados lixo (Sanchez-Roque et al., 2025). Além de reduzir o desperdício, essa prática contribui para a diminuição do

desmatamento, já que os briquetes podem substituir a lenha e o carvão vegetal, cuja extração muitas vezes ocorre de forma predatória e ilegal (Gentil, 2010). Diante desse potencial transformador, torna-se fundamental compreender como a comunidade científica tem abordado o aproveitamento de resíduos agrícolas para fins energéticos, lacuna que a análise bibliométrica se propõe a preencher.

A bibliometria avançada constitui uma metodologia fundamental para análise da produção científica, empregando indicadores quantitativos para mapear tendências e padrões em áreas específicas do conhecimento (Simão Neto et al., 2025). Essa abordagem permite identificar não apenas o volume de publicações, mas também as contribuições mais relevantes e as redes de colaboração estabelecidas no campo de estudo (Cavalcante et al., 2024b). No presente trabalho, a aplicação de técnicas bibliométricas avançadas na base *Web of Science* (WoS) possibilitou um levantamento abrangente sobre a evolução das pesquisas relacionadas a biocombustíveis com resíduos agrícolas. A análise pode revelar um panorama detalhado das tecnologias disponíveis, avaliando criticamente suas aplicações potenciais e identificando caminhos promissores para inovações sustentáveis. Esses achados fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de pesquisas futuras nessa área estratégica.

Por fim, os resultados obtidos destacam a importância de biocombustíveis na transição para uma economia circular, apontando tanto os avanços conquistados quanto às lacunas que demandam atenção da comunidade científica. A metodologia empregada permitiu visualizar a trajetória histórica do campo, bem como projetar perspectivas futuras para essa tecnologia promissora no cenário energético global. Além disso, as seguintes questões são respondidas ao longo do texto:

- RQ1. Como está o desenvolvimento da produção científica relacionada ao desenvolvimento de biocombustíveis de resíduos agrícolas?
- RQ2. Quais autores se destacam na pesquisa de biocombustíveis e resíduos agrícolas?
- RQ3. Quais subáreas emergentes estão relacionadas a pesquisa de biocombustíveis e resíduos agrícolas na literatura recente?
- RQ4. Quais são os principais hotspots (tópicos de destaque) utilizados na busca da literatura?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma análise bibliométrica avançada que contextualize de forma abrangente e sistematizada a produção de biocombustíveis a partir da utilização de resíduos agrícolas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o crescimento e a distribuição temporal das publicações científicas sobre biocombustíveis obtidos de resíduos agrícolas.
- Levantar os principais pesquisadores, instituições e colaborações que se destacam na área.
- Identificar temáticas recentes e novas abordagens que vêm ganhando relevância no campo.
- Mapear os termos e conceitos mais recorrentes nas pesquisas da área para destacar tendências e focos de interesse.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os resíduos agrícolas, também conhecidos como resíduos agroindustriais, referem-se aos materiais orgânicos remanescentes de atividades diversas, como palha, cascas, sabugo, bagaço, entre outros, oriundos da colheita ou processamento de produtos agrícolas (Bhuvaneshwari; Hettiarachchi; Meegoda, 2019). Esses resíduos são classificados em dois tipos principais: resíduos de campo (deixados após a colheita) e resíduos de processo (gerados durante o processamento dos produtos), ambos ricos em compostos lignocelulósicos, com alto potencial energético e biotecnológico (G et al., 2021).

A quantidade de resíduos gerada pela agricultura é significativa. De acordo com a Agência Brasil, a geração de lixo no mundo, somente para resíduos sólidos familiares, pode crescer exponencialmente entre 2020 e 2050, passando de 2,1 bilhões de toneladas ao ano para 3,8 bilhões, dos quais 90% é devidamente coletado (Brasil, 2024). Na Índia, cerca de 500 milhões de toneladas são produzidas anualmente, das quais aproximadamente 92 milhões são queimadas, contribuindo para a emissão de poluentes atmosféricos e impactos negativos na saúde pública e no meio ambiente (Bhuvaneshwari; Hettiarachchi; Meegoda, 2019). Esse padrão de queima é comum em países em desenvolvimento devido à falta de alternativas economicamente viáveis para o reaproveitamento desses materiais.

No entanto, nos últimos anos, tem-se observado uma crescente valorização dos resíduos agrícolas como recursos estratégicos dentro do conceito de economia circular e bioeconomia. Diversos autores destacam que esses resíduos podem ser transformados em biocombustíveis, como biodiesel, briquetes e biolubrificantes, reduzindo custos de produção e a carga poluente no ambiente (Duque-Acevedo et al., 2020).

Entre as tecnologias emergentes, destaca-se a Fermentação Em Estado Sólido (FES), que utiliza substratos lignocelulósicos com baixa umidade, favorecendo o crescimento de microrganismos capazes de produzir enzimas, antibióticos, compostos antioxidantes e outros produtos de valor agregado (Sadh; Duhan; Duhan, 2018). A FES oferece vantagens como menor consumo de energia, baixa geração de efluentes e uso de substratos de baixo custo, como bagaço de cana, palha de arroz e tortas de oleaginosas.

Adicionalmente, o aproveitamento dos resíduos agrícolas é impulsionado por políticas públicas e iniciativas de sustentabilidade. No entanto, muitos países ainda enfrentam dificuldades estruturais, como ausência de infraestrutura, conhecimento técnico limitado por

parte dos produtores e políticas setoriais fragmentadas. Nesse sentido, recomenda-se adotar o “nexus thinking” (Bhuvaneshwari; Hettiarachchi; Meegoda, 2019), uma abordagem integrada que considera as interconexões entre setores como agricultura, energia, saúde e meio ambiente, como solução para a gestão eficiente dos resíduos agrícolas.

Estudos bibliométricos apontam que a produção científica sobre o tema tem crescido significativamente, especialmente a partir de 2010, refletindo o interesse crescente por soluções sustentáveis e pela valorização de resíduos agrícolas como insumos industriais (Duque-Acevedo et al., 2020). Esses avanços indicam uma mudança de paradigma, na qual os resíduos deixam de ser vistos como problema e passam a ser considerados matéria-prima para novos produtos, inclusive biocombustíveis, promovendo uma agricultura mais sustentável e circular.

3.2 BIOCMBUSTÍVEIS

Os biocombustíveis são combustíveis renováveis derivados de biomassa, como plantas, algas ou resíduos orgânicos, utilizados como alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025), sua utilização desempenha um papel importante na transição energética, ajudando a reduzir as GEE e diversificar a matriz energética. Estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) destacam que esses combustíveis também contribuem para a segurança energética, reduzindo a dependência de fontes não renováveis.

O Brasil possui uma série de programas, políticas públicas e legislações que incentivam a valorização de resíduos agrícolas e biomassa para a produção de biocombustíveis, como a Lei nº 13.576/2017 (RenovaBio) que valoriza rotas que utilizam resíduos agrícolas para a produção de biocombustíveis e Política Nacional de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC+) com o incentivo de práticas sustentáveis na agricultura, incluindo o uso energético de resíduos. Esses instrumentos visam promover a redução de emissões de carbono, aproveitamento sustentável de resíduos e o desenvolvimento regional.

No entanto, sua produção enfrenta desafios, como a necessidade de grandes extensões de terra para cultivo, o que pode gerar conflitos com a produção de alimentos. Além disso, especialistas apontam que o aprimoramento tecnológico é essencial para aumentar a eficiência e a viabilidade econômica dessas fontes de energia. Apesar dos obstáculos, os

biocombustíveis continuam sendo uma opção promissora no caminho para uma economia de baixo carbono.

3.2.1 Biodiesel

O biodiesel surge como uma opção renovável e menos poluente diante da crescente busca por combustíveis sustentáveis e da necessidade de reduzir os impactos ambientais. Sua produção é feita a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, transformados em combustível por meio de processos químicos ou biotecnológicos. Entre suas vantagens estão a biodegradabilidade, a menor toxicidade, e a redução das emissões de gases de efeito estufa quando comparado ao diesel fóssil.

A pesquisa em biodiesel tem se ampliado consideravelmente, incorporando tanto a busca por novas matérias-primas quanto o aprimoramento das rotas tecnológicas de produção. O uso do óleo extraído das sementes de pinhão-roxo (*Jatropha gossypifolia*), uma planta nativa do Brasil, mostrou que é possível produzir biodiesel com características próximas às exigidas pelos padrões da Resolução nº 857 da ANP, utilizando uma rota química simples e matéria-prima ainda pouco explorada (Fonseca et al., 2019). Esse tipo de iniciativa reforça o potencial de espécies vegetais regionais como fontes viáveis de energia renovável.

Além das fontes convencionais e cultivadas, a valorização de óleos residuais também tem recebido atenção. O óleo residual de babaçu, por exemplo, subproduto descartado na cadeia agroindustrial, como matéria-prima para a produção de biodiesel por rota enzimática demonstra que é possível transformar resíduos em insumos energéticos de forma eficiente e sustentável (Moreira et al., 2020). A rota mais comum para a produção de biodiesel é a transesterificação, na qual óleos vegetais ou gorduras animais reagem com um álcool, na presença de um catalisador básico. A eficiência dessa rota é alta quando se utilizam óleos de boa qualidade e baixa acidez, sendo amplamente adotada devido ao seu baixo custo e facilidade operacional (Moura et al., 2010; Santos et al., 2022).

Além disso, é possível destacar a rota enzimática para síntese de biodiesel, onde biocatalisadores são utilizados na esterificação entre ácidos graxos livres e álcool. A aplicação de catalisadores biológicos (enzimas) como alternativa aos catalisadores químicos convencionais foi analisada utilizando uma rota de hidrólise seguida de esterificação enzimática do óleo de babaçu refinado. Nesse processo, a utilização da enzima Eversa Transform 2.0 como biocatalisador, possibilitou elevada conversão em biodiesel, mesmo com ácidos graxos livres,

o que demonstra a viabilidade das rotas enzimáticas para óleos de alta acidez e sua vantagem ambiental (Alexandre et al., 2022).

Portanto, a pesquisa em biodiesel caminha para integrar eficiência energética, sustentabilidade e aproveitamento de recursos regionais e residuais. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre diferentes estudos relacionados à produção de biodiesel a partir de distintas matérias-primas. São destacadas as rotas de conversão empregadas, os catalisadores utilizados em cada processo e os rendimentos obtidos em termos de conversão para ésteres. Essa síntese permite visualizar a diversidade de abordagens técnicas e o potencial de diferentes óleos, tanto convencionais quanto residuais, na obtenção de biocombustíveis renováveis.

Tabela 1. Características dos Processos de Produção de Biodiesel a partir de Diferentes Óleos e Rotas Catalíticas

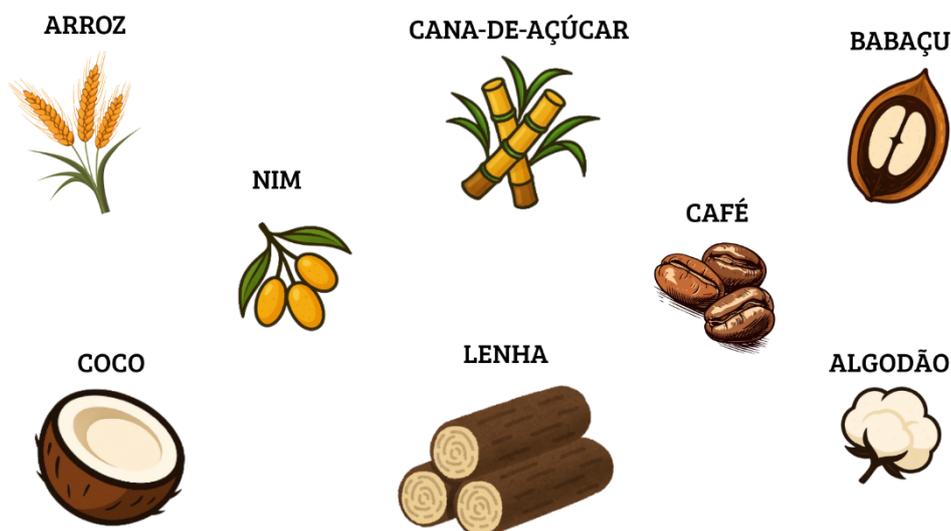
Óleo	Rota	Catalisador	Rendimento (%)	Referência
Óleo de Babaçu	Hidroesterificação enzimática	Lipase de <i>Thermomyces lanuginosus</i> (TLL) e Eversa Transform 2.0	95,76	(Alexandre et al., 2022)
Óleo de Babaçu	Esterificação enzimática	Novozym® 435 Lipase B de <i>Candida antarctica</i>	96,84	(Moreira et al., 2020)
Óleo de Galinha Residual	Esterificação enzimática	Lipases A e B de <i>Candida antarctica</i> e lipase de <i>Rhizomucor miehei</i> (RML)	89,95	(Rocha et al., 2021)
Óleo de sementes pinhão-roxo	Transesterificação via catálise básica (alcalina)	KOH	118,32	(Fonseca et al., 2019)
Óleo de Palma	Transesterificação	Amberlyst 15	98,00	(Talebian-Kiakalaieh; Amin, 2015)
Óleo de Nim	Transesterificação	NaOH	90 ± 2	(Chaudhary, 2022)
Óleo Residual de Semente de Algodão	Transesterificação	KOH	97,76	(Sharma; Kodgire; Kachhwaha, 2020)
Óleo de Microalga (<i>Nannochloropsis oculata</i>)	Transesterificação	MgO-Zr	97,50	(Faruque; Razzak; Hossain, 2020)

Fonte: Autor (2015).

3.2.2 Briquete

O briquete é um combustível sólido produzido a partir da compactação de resíduos orgânicos, como restos agrícolas, serragem, cascas, palhas e outros materiais. Materiais como a borra de café (Soares et al., 2015), cascas das sementes da planta nim e amêndoas do coco babaçu (Ribeiro Filho, 2023). Esse processo de aglomeração, feito sob alta pressão, resulta em um produto denso, uniforme e de fácil manuseio, que pode ser utilizado como alternativa à lenha e ao carvão vegetal. Outras alternativas para a produção de briquetes são citadas na Figura 1.

Figura 1: Algumas das matérias-primas utilizadas para a produção de briquetes.



Fonte: Autor (2025).

A produção de briquetes, embora seja uma alternativa sustentável e vantajosa, enfrenta algumas dificuldades que podem limitar sua adoção, especialmente em pequena escala. Um dos principais desafios é o custo elevado das briquetadeiras, equipamentos essenciais para compactar os resíduos orgânicos e transformá-los em briquetes. Essas máquinas, dependendo da capacidade e da tecnologia utilizada, podem ter um preço alto, o que representa um investimento significativo para pequenos produtores ou comunidades rurais. Além disso, muitas briquetadeiras disponíveis no mercado são projetadas para uso industrial, o que as torna inadequadas para operações menores, tanto pelo custo quanto pela complexidade de operação (Nunes, 2019).

Economicamente, a produção de briquetes impulsiona a economia local, gerando renda para pequenos produtores e comunidades rurais, com equipamentos acessíveis e de baixo custo. O uso de briquetes também reduz custos energéticos, já que o material é eficiente e possui maior poder calorífico que a lenha (Dantas; SANTOS; SOUZA, 2012) como apresentado na Tabela 2. Socialmente, a produção promove a inclusão energética em áreas rurais e isoladas, fortalecendo a autonomia e a resiliência das comunidades ao utilizar resíduos locais e reduzir a dependência de combustíveis externos (Tavares, 2013).

Tabela 2. Comparativo do poder calorífico de briquetes de diferentes matérias-primas e a lenha.

Produto	Tipo de resíduo	Poder calorífico superior [kcal/kg]	Peso específico [kg/m³]	Peso a granel [kg/m³]	Umidade
Briquete	Casca de arroz	3.800	1.100	650 – 700	12%
Briquete	Casca de café	4.100	1.100	650 – 700	12%
Briquete	Resíduos de algodão	4.300	1.100	650 – 700	12%
Briquete	Resíduos de pinus	4.600	1.170	700 – 750	12%
Briquete	Bagaço de cana	4.700	1.100	650 – 700	14%
Briquete	Resíduos de madeira lei	4.900	1.200	750 – 800	12%
Briquete	Resíduos de eucalipto	4.800	1.180	720 – 780	12%
Lenha	Lenha comercial	2.200 a 2.500	600	350 – 400	25% - 30%

Fonte: Adaptado de (BIOMAX, 2022).

3.2.3 Biolubrificante

Os biolubrificantes são óleos e graxas derivados de fontes renováveis, como óleos vegetais ou gorduras animais, se destacam por sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e bom desempenho lubrificante, tornando-se promissores substitutos para lubrificantes minerais em diversas aplicações industriais e automotivas (Cecilia et al., 2020). Apesar do potencial dos biolubrificantes, seu uso comercial ainda é limitado, principalmente por causa de desvantagens como baixa estabilidade térmica e oxidativa, ponto de fluidez elevado e inconsistência nas propriedades físico-químicas dos óleos vegetais utilizados como matéria-prima (Bolina; Gomes; Mendes, 2021). Para contornar essas limitações, estratégias como modificação

química, uso de catalisadores enzimáticos, e seleção de óleos com perfil lipídico mais estável vêm sendo amplamente exploradas.

Em termos de matérias-primas, os óleos vegetais são os mais empregados, com destaque para óleos de soja, palma, girassol, mamona, óleos residuais e não comestíveis, como o de pinhão-manso (*Jatropha curcas*), como pode ser observado, dentre outras, na Figura 2. A escolha da fonte oleaginosa impacta diretamente as propriedades do biolubrificante, sendo o teor de ácido oleico um fator crítico na estabilidade oxidativa. Nesse contexto, o uso de óleos geneticamente modificados com alta concentração de ácidos graxos monoinsaturados, como o óleo de cártamo alto oleico, tem se mostrado vantajoso (Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021).

As rotas de produção mais utilizadas envolvem reações de transesterificação entre ésteres metílicos de ácidos graxos e álcoois polihídricos, como etileno glicol ou trimetilolpropano (Attia et al., 2020). Além disso, o uso de CaO como catalisador heterogêneo se mostrou bastante viável para produzir diésteres de etileno glicol a partir de diferentes óleos vegetais, como girassol, soja, jatrofa e óleo de cozinha usado (Moreira et al., 2020). Na Tabela 3 é possível ver a comparação de diferentes estudos sobre a produção de biolubrificantes a partir de várias matérias-primas. Evidenciando a rota de conversão usada, os catalisadores aplicados e o tempo de produção em cada caso, além de destacar as abordagens técnicas e o potencial dos óleos para a geração de biocombustíveis.

Paralelamente, o uso de enzimas lipases como catalisadores tem sido foco de crescente interesse, especialmente por permitir reações sob condições mais brandas e por sua seletividade. A produção enzimática de biolubrificantes, embora ainda enfrente desafios como o custo elevado e a estabilidade operacional das enzimas, é uma alternativa promissora dentro dos princípios da Química Verde, com potencial para viabilização em escala industrial mediante o uso de lipases imobilizadas (Bolina; Gomes; Mendes, 2021).

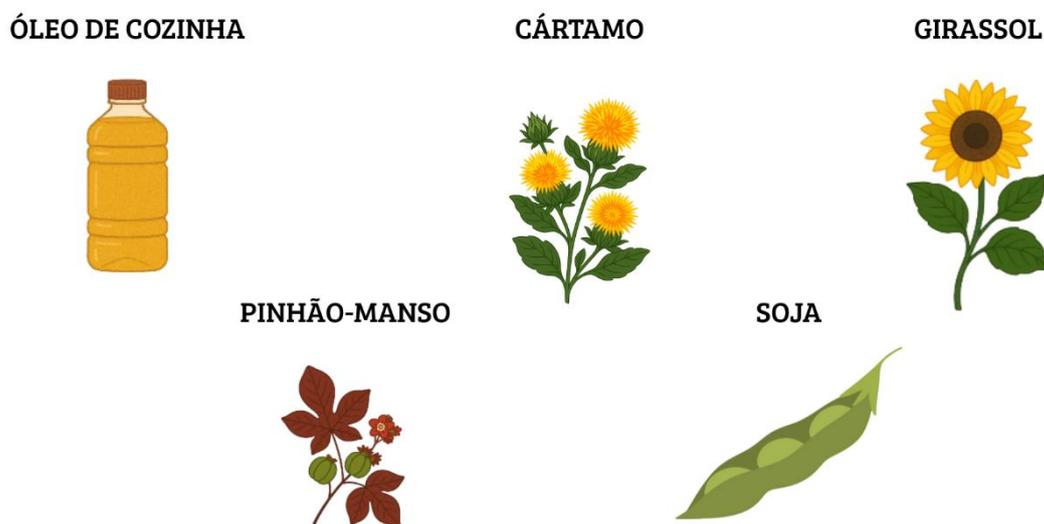
Tabela 3. Características dos Processos de Produção de Biolubrificante a partir de Diferentes Óleos e Rotas Catalíticas

Óleo	Rota	Catalisador	Tempo (h)	Referência
Óleo de Palma e Trimetilolpropano	Esterificação	Lipase de <i>Thermomyces lanuginosus</i> (TLL) e Duolite A568	9	(Bolina; Gomes; Mendes, 2021)
Óleo Residual de Cozinha e Neopentilglicol	Hidroesterificação	Lipase de <i>Thermomyces lanuginosus</i> (TLL) e Nanopartículas de Fe ₃ O ₄	24	(Bolina; Gomes; Mendes, 2021)
Óleo de Soja e Óleo de Girassol	Transesterificação	CaO	2	(Attia et al., 2020)
Óleo de Cártamo	Transesterificação	CH ₃ ONa	1,5	(Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021)
Óleo de Maçã Amarga (<i>Citrullus colocynthis</i> L.)	Transesterificação	CaO	2	(Teshome et al., 2025)
Óleo de Microalgas	Transesterificação Enzimática	Lipase de <i>Burkholderia Cepacia</i>	120	(Da Silva et al., 2020)
Óleo de Semente de Gamelina	Transesterificação	KOH	1	(Hadiza et al., 2025)
Óleo do Bagaço de Caju	Esterificação Enzimática	Lipase B de <i>Candida antarctica</i>	36	(Levy et al., 2025)

Fonte: Autor (2015).

Além das características técnicas, a implementação de biolubrificantes também está alinhada com a criação de biorrefinarias, onde a produção integrada de biodiesel e lubrificantes a partir de uma única matéria-prima permite o aproveitamento máximo dos recursos e a redução de resíduos (Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021). Dessa forma, os biolubrificantes apresentam-se como uma solução viável tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental. A bibliografia recente reforça a necessidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento, sobretudo na seleção de matérias-primas alternativas e na aplicação de rotas catalíticas mais sustentáveis, como as enzimáticas, para consolidar a produção de biolubrificantes em escala industrial (Cecilia et al., 2020).

Figura 2: Algumas das matérias-primas utilizadas para a produção de biolubrificantes.



Fonte: Autor (2025).

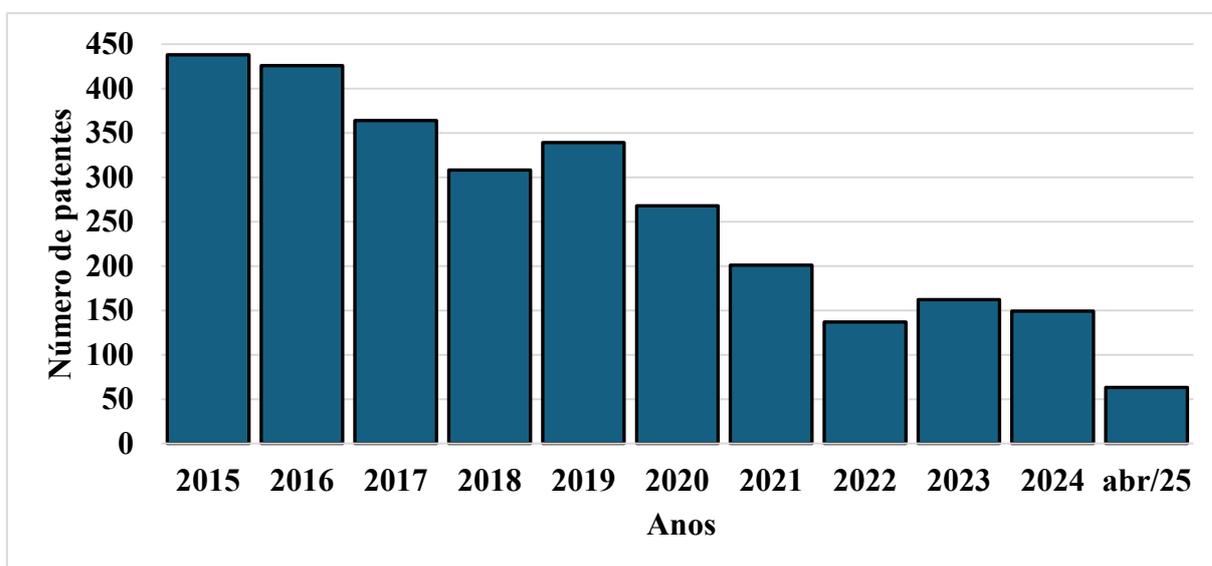
3.3 PATENTES

Ao longo da última década, observa-se um aumento expressivo no número de publicações científicas relacionadas à produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Esse crescimento se intensificou até alcançar uma relativa estabilização em torno de 2022, com uma nova tendência de ascensão registrada em 2024, indicando potencial de continuidade em 2025. Esse comportamento reflete o crescente interesse da comunidade científica e industrial diante das perspectivas promissoras dos biocombustíveis.

Dessa forma, a criação de patentes está acompanhando a pesquisa e o desenvolvimento de novas tendências. Utilizando a base de dados SCOPUS, plataforma de repositórios internacional amplamente utilizada, foram encontradas ao todo 2,855 patentes sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre os anos de 2015 até abril de 2025. O *United States Patent & Trademark Office* (USPTO) detém 2.410 dessas patentes representando um total de 84,41% do total, seguido por *European Patent Office* (EPO) com 239 (8,37%) e *Japan Patent Office* (JPO) com 119 (4,16%). Essa disparidade expressiva pode ser justificada pelo *Total Link Strength* (TLS) dos EUA com outras regiões, indicando um elevado nível de cooperação internacional. Essa intensa rede colaborativa contribui diretamente para o aumento no número de patentes registradas pelo país.

A Figura 3 apresenta a evolução do número de patentes registradas nos últimos dez anos no contexto de biocombustíveis derivados de resíduos agrícolas. Observa-se uma leve tendência de declínio a partir de 2017, que se acentua entre os anos de 2020 e 2022. Esse recuo mais expressivo pode estar relacionado aos impactos da pandemia de COVID-19, que afetou significativamente o ritmo das atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação em escala global. A partir de 2023, contudo, nota-se uma retomada no registro de patentes, sugerindo uma possível recuperação.

Figura 3: Número de patentes sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.



Fonte: Autor (2025).

3.4 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Alguns obstáculos metodológicos foram encontrados para o desenvolvimento do estudo de bibliometria avançada. Como a natureza dinâmica da própria plataforma WoS, onde os registros são constantemente atualizados sendo um fator limitador durante a análise. Isso significa que os resultados obtidos refletem apenas um período específico e estão sujeitos a alterações à medida que novas pesquisas surgem. Além disso, outra limitação refere-se ao número reduzido de publicações disponíveis nas bases de dados selecionadas, o que prejudicou a geração de mapas visuais mais detalhados e, conseqüentemente, dificultou a observação precisa das inter-relações entre os estudos analisados.

Com relação aos biocombustíveis, embora representem alternativas sustentáveis frente aos combustíveis fósseis, ainda enfrentam desafios significativos para sua ampla adoção. No caso dos briquetes de biomassa, as limitações incluem a baixa densidade energética inicial e umidade elevada da matéria-prima, custos logísticos associados ao transporte e armazenamento (Sanchez-Roque et al., 2025), além da necessidade de melhorias tecnológicas nos aparelhos de briquetagem devido ao alto custo e escassez de briquetadeiras tanto para uso comercial quanto para pesquisas de laboratório (Nunes, 2019).

Quanto ao biodiesel, os obstáculos mais recorrentes estão relacionados ao uso de matérias-primas de primeira geração, que competem com a produção de alimentos e elevam os custos em períodos de escassez agrícola, afetando a segurança alimentar (Heo; Choi, 2019). Além disso, muitos óleos alternativos (óleos residuais e de sementes não comestíveis) apresentam alta acidez, em decorrência da rota de transesterificação, portanto a exploração de rotas alternativas e de pré-tratamentos seria uma solução, porém encarecem o processo e inviabilizam a produção do biodiesel em larga escala (Alexandre et al., 2022; Fonseca et al., 2019). Outro desafio técnico é a baixa estabilidade oxidativa de muitos biodieseis produzidos a partir de óleos poli-insaturados, o que compromete seu armazenamento e performance, demandando o uso de aditivos antioxidantes ou a seleção de óleos com maior teor de ácido oleico, como o de cártamo (Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021).

Já os biolubrificantes, embora ofereçam vantagens ambientais claras, enfrentam dificuldades como custo elevado de produção, menor estabilidade térmica e oxidativa em comparação com lubrificantes minerais e desafios na viabilização comercial de rotas catalíticas mais sustentáveis, como as enzimáticas, além da necessidade de matéria-prima com perfil lipídico específico para assegurar desempenho técnico adequado (Attia et al., 2020; Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021). Assim, embora promissores, os biocombustíveis exigem esforços contínuos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas para superar suas limitações e alcançar competitividade em escala industrial.

3.5 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E PERSPECTIVAS

A partir da análise bibliométrica apresentada neste artigo, será possível contextualizar as aplicações industriais e perspectivas dos biocombustíveis de resíduos agrícolas em escala global. Os biocombustíveis briquetes, biodiesel e biolubrificantes

apresentam aplicações industriais distintas e complementares, com perspectivas promissoras dentro do contexto da transição energética e da economia circular.

Os briquetes de biomassa vêm sendo aplicados principalmente em sistemas de aquecimento, caldeiras industriais e geração de energia térmica, substituindo carvão mineral e lenha em processos de combustão controlada (Sanchez-Roque et al., 2025). Sua aplicação é favorecida em ambientes rurais e industriais que possuem acesso a resíduos lignocelulósicos, como cascas, serragens e palhadas agrícolas. Apesar do potencial promissor, a adoção em larga escala desse combustível ainda enfrentará desafios críticos nos próximos anos, como baixa densidade energética em comparação a combustíveis fósseis, alta umidade e custos logísticos associados à estocagem e transporte (Vibhakar et al., 2022). A tendência é que com os avanços tecnológicos essas problemáticas irão diminuindo.

No caso do biodiesel, as aplicações estão bem estabelecidas no setor de transporte, podendo ser utilizado puro ou em misturas com diesel fóssil (Purohit; Dhar, 2018). Além disso, o biodiesel vem sendo explorado em sistemas estacionários de geração de energia, especialmente em zonas remotas. A utilização de matérias-primas não comestíveis, como óleo de pinhão-roxo (Fonseca et al., 2019) e resíduos oleosos, amplia a viabilidade do biodiesel sem comprometer a cadeia alimentar (Moreira et al., 2020). As perspectivas incluem o avanço de biorrefinarias integradas, capazes de gerar não apenas combustível, mas também coprodutos valiosos como glicerol e biolubrificantes (Alexandre et al., 2022; Moreira et al., 2020).

Por fim, os biolubrificantes têm despertado crescente interesse como substitutos de óleos lubrificantes minerais em setores como indústria automotiva (Bolina; Gomes; Mendes, 2021), metalmeccânica e agrícola (Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021). Seu uso é especialmente relevante em aplicações com risco de contaminação ambiental, como sistemas hidráulicos ao ar livre ou equipamentos agrícolas (Bolina; Gomes; Mendes, 2021). As pesquisas têm avançado no uso de óleos com alto teor de ácido oleico, por apresentarem maior estabilidade térmica e oxidativa (Nogales-Delgado; Encinar; González Cortés, 2021). Além disso, o desenvolvimento de rotas enzimáticas mais eficientes e sustentáveis, utilizando lipases como catalisadores em substituição aos processos químicos tradicionais (Alexandre et al., 2022; Bolina; Gomes; Mendes, 2021). Assim, embora cada biocombustível apresente desafios específicos, todos compartilham perspectivas promissoras à medida que políticas públicas, avanços tecnológicos e demandas por sustentabilidade impulsionam seu desenvolvimento e suas aplicações em escala industrial.

3.6 BLIBIOMETRIA AVANÇADA

A bibliometria avançada constitui uma abordagem metodológica essencial para a análise sistemática da produção científica, permitindo a identificação de padrões, tendências e relações complexas entre autores, instituições, áreas temáticas e redes de colaboração(Cavalcante et al., 2024b). Diferente da bibliometria tradicional, que se limita a métricas básicas como contagem de publicações e citações, a bibliometria avançada integra métodos computacionais, estatísticos e de visualização de dados para oferecer uma visão mais profunda e estratégica do desenvolvimento científico(Alves Martins et al., 2024).

Os principais procedimentos da bibliometria avançada envolvem a análise de coautoria, cocorrência de palavras-chave, cocitação, acoplamento bibliográfico e clusterização temática(Simão Neto et al., 2025). Por meio desses métodos, é possível compreender como os campos científicos se estruturam e evoluem ao longo do tempo, além de identificar os atores mais influentes em cada domínio(Bizerra et al., 2024b). Ferramentas como VOSviewer, Bibliometrix (R) são amplamente utilizadas para a construção de mapas científicos que representam, de forma visual e interativa, as conexões entre os elementos analisados(Almeida et al., 2024).

Além de seu papel analítico, a bibliometria avançada desempenha um papel estratégico na ciência contemporânea ao apoiar decisões sobre financiamento, cooperação internacional, gestão editorial e prospecção tecnológica(Bizerra et al., 2024a). Por meio da identificação de lacunas e oportunidades no panorama científico global, instituições de ensino, centros de pesquisa e agências de fomento podem alinhar seus investimentos a áreas prioritárias e em expansão(Cavalcante et al., 2024a). Ainda assim, à medida que as ciências da informação se consolidam como campo interdisciplinar, a bibliometria avançada tende a se tornar um instrumento cada vez mais indispensável para a compreensão da dinâmica do conhecimento e para a construção de uma ciência mais integrada, transparente e orientada por evidências(Simão Neto et al., 2023).

4 METODOLOGIA

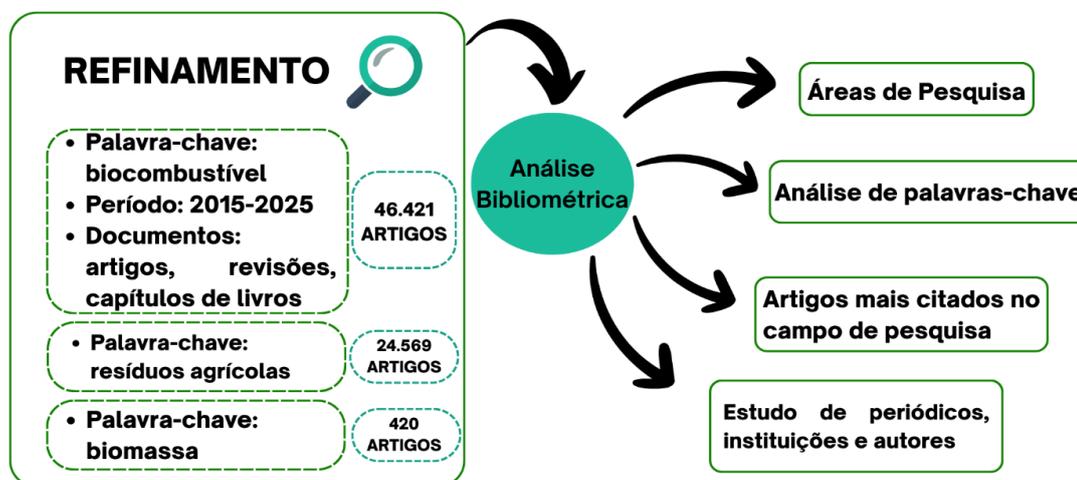
4.1 BASES DE DADOS

A metodologia incluiu uma análise minuciosa em plataformas de indexação científica, com seleção criteriosa de publicações para formação de um corpus analítico abrangente. Como principal fonte de dados, foi utilizada a *Web of Science - Core Collection* (WoS), reconhecida como um dos mais completos repositórios de literatura científica internacional. A escolha por esta base de dados justifica-se por sua abrangência e confiabilidade, garantindo uma amostragem representativa do estado atual das pesquisas sobre síntese de biocombustíveis (Simão Neto et al., 2023).

4.2 COLETA DE DADOS

A pesquisa foi conduzida na base *Web of Science Core Collection* utilizando os termos "biofuel", "biomass", "agricultural residues". O período analisado compreendeu janeiro de 2015 a abril de 2025, considerando apenas publicações em inglês. A delimitação temporal justifica-se pela necessidade de mapear a produção científica mais recente sobre o tema, enquanto a restrição linguística visou garantir homogeneidade nos dados e reduzir distorções associadas à cobertura desigual de fontes (Autor, Ano). Como controle de qualidade, realizou triagem manual para eliminar duplicatas e registros incompletos. O processo de seleção seguiu protocolos rigorosos, conforme ilustrado na Figura 4, garantindo a qualidade dos dados para a análise bibliométrica subsequente. Este procedimento viabilizou um mapeamento completo do conhecimento científico existente sobre a pesquisa de biocombustíveis com resíduos agrícolas (Almeida et al., 2024).

Figura 4. Visão geral da estratégia de busca e critérios de refinamento utilizados na base de dados WoS.



Fonte: Autor (2025).

4.3 EXTRAÇÃO DE DADOS

Para o tratamento dos dados bibliométricos, realizou-se um processo meticuloso de organização e análise das informações coletadas. Os registros completos das publicações, após criteriosa compilação, foram sistematicamente transferidos para planilhas do Microsoft Excel (Microsoft Corporation, EUA), onde foram submetidos a diversos procedimentos estatísticos e analíticos. A investigação abrangeu múltiplas dimensões da produção científica, focalizando especialmente: o impacto dos trabalhos através de suas citações, a dispersão geográfica das pesquisas por nacionalidades, o volume de publicações relacionadas a biocombustíveis e resíduos agrícolas, a identificação dos autores mais relevantes, a evolução temporal das publicações anuais e as instituições com maior representatividade no campo de estudo. Essa abordagem analítica permitiu caracterizar de forma abrangente o panorama científico da área investigada (Bizerra et al., 2024a).

4.4 VISUALIZAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

O presente estudo adotou uma abordagem metodológica multidimensional para análise da produção científica, com técnicas quantitativas avançadas, a investigação concentrou-se em quatro eixos principais de avaliação: (1) produtividade científica, analisada através de indicadores de autoria e afiliação institucional; (2) impacto acadêmico, mensurado por métricas de citação e indicadores de qualidade de periódicos; (3) redes de colaboração, mapeando interações entre pesquisadores e instituições; e (4) evolução conceitual, identificando tendências temáticas ao longo do tempo (Alves Martins et al., 2024; Cavalcante et al., 2024a).

Para o mapeamento das redes científicas, utilizou-se o software VOSviewer, ferramenta especializada na análise de colaborações entre pesquisadores, instituições e países, com foco particular no campo dos biocombustíveis. A metodologia empregou técnicas de análise de citação e cocitação, investigando tanto a frequência de citações individuais quanto os padrões de referência cruzada entre artigos. A aplicação do software permitiu ainda examinar redes de coautoria, padrões de cocitação entre periódicos e a coocorrência de termos-chave, revelando conexões significativas entre os diversos elementos que compõem o campo de estudo. As representações visuais produzidas pelo VOSviewer materializaram os elementos de análise mediante estruturas nodais e conexões, onde a dimensão e posicionamento dos nós espelhavam sua relevância no contexto estudado, enquanto a robustez das linhas traduzia a intensidade dos vínculos. O índice Total Link Strength (TLS) quantifica essas relações, oferecendo uma base objetiva para análise das interconexões identificadas. O processo considerou múltiplos parâmetros ajustáveis, abrangendo desde a proveniência dos termos analisados até critérios de seleção fundamentados no mérito acadêmico (Catumba et al., 2023).

Como complemento analítico, o estudo incorporou o software *Bibliometrix*, ferramenta especializada que viabilizou análises quantitativas sofisticadas e modelagem estatística dos dados bibliométricos. Diferentemente do *VOSviewer*, que priorizou o mapeamento visual das interconexões, o *Bibliometrix* revelou-se particularmente eficaz para desvendar padrões cronológicos na produção científica, traçar perfis de autoria e descrever redes de influência por meio de citações. Esta dupla abordagem metodológica - combinando a força da visualização de redes com o rigor da análise temporal - proporcionou uma visão integral do desenvolvimento científico no campo dos biocombustíveis, capturando simultaneamente sua arquitetura relacional e sua trajetória evolutiva (Simão Neto et al., 2025).

A sinergia entre essas plataformas tecnológicas permitiu construir uma análise multidimensional, capaz de identificar desde estruturas consolidadas de colaboração até tendências emergentes na pesquisa acadêmica sobre o tema. A metodologia incluiu ainda procedimentos rigorosos de controle de qualidade, como: normalização de afiliações institucionais, padronização de nomes de autores e tratamento de homônimos. Esses cuidados metodológicos garantiram a confiabilidade dos resultados e permitiram traçar um panorama abrangente e preciso da pesquisa sobre biocombustíveis, identificando desde os principais centros produtores de conhecimento até as fronteiras mais recentes de investigação na área (Cavalcante et al., 2024b).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento por meio de métodos bibliométricos permitiu mapear mudanças e tendências emergentes neste campo, evidenciando o crescente envolvimento de países em desenvolvimento, instituições acadêmicas e autores que se tornaram referências no tema. Além de identificar os principais eixos temáticos existentes atualmente, os chamados hot spots, a análise também permite traçar as perspectivas futuras da pesquisa no setor energético. Nesse processo, o uso de ferramentas computacionais especializadas para visualização e organização de dados bibliométricos é crucial, pois permite uma apresentação interativa e gráfica do panorama completo da produção acadêmica, facilitando a compreensão da dinâmica envolvida.

Para embasar a análise, extraímos dados do banco de dados Web of Science (WoS), reconhecido internacionalmente por sua robustez e confiabilidade nesse tipo de pesquisa. A partir do processo de extração, os dados foram cuidadosamente processados para fornecer uma compreensão mais profunda do estado atual da pesquisa sobre produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas.

5.1 TENDÊNCIA DAS PUBLICAÇÕES E CITAÇÕES GLOBAIS

O uso da análise bibliométrica como ferramenta para mapear a produção científica resultou, após toda a coleta da base de dados, em 420 publicações, incluindo artigos, artigos de revisão e artigos de conferência. Dessa forma, a Figura 5 a seguir, apresenta a evolução do número de publicações e citações relacionadas à produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas, conforme indexadas na base *Web of Science* (WoS), no período de 2015 até abril de 2025.

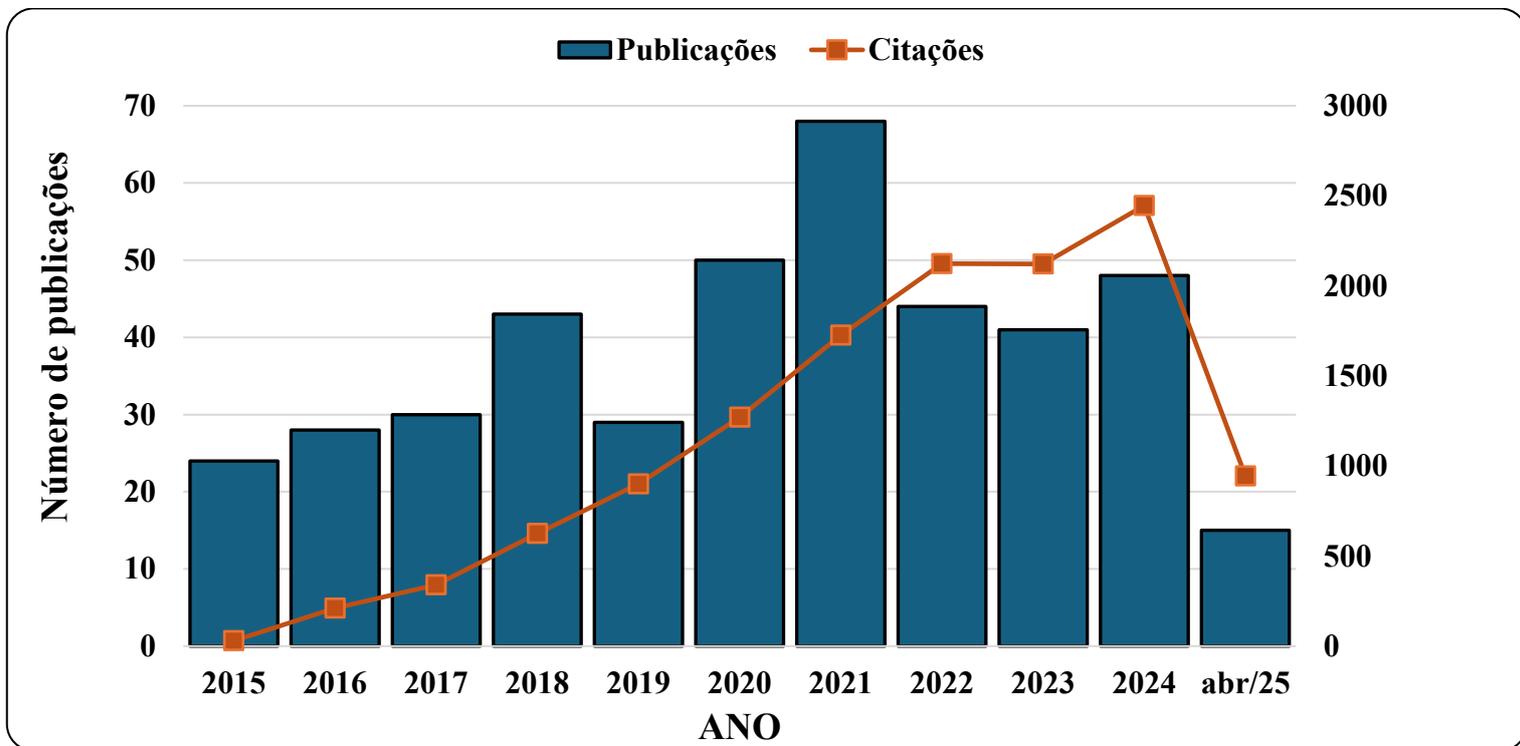
Em relação ao número de publicações, observa-se um crescimento constante entre 2015 e 2021, com destaque para este último ano, em que se registrou o maior volume de publicações (68 publicações). A partir de 2017, a temática começou a ganhar maior visibilidade, esse aumento pode ser atribuído à crescente preocupação com a sustentabilidade, à busca por fontes de energia renovável, ao avanço nas tecnologias de conversão de resíduos agrícolas em biocombustíveis. O pico observado em 2021 pode refletir um momento de maturação científica, em que novas rotas tecnológicas começaram a ser mais amplamente exploradas e divulgadas. Nos anos seguintes (2022 a 2024), apesar de uma leve queda no número de publicações, a produção se manteve em patamares elevados e consistentes, o que evidencia a consolidação da

área como linha de pesquisa. É importante destacar que as publicações de 2019 e 2020 foram desenvolvidas antes da pandemia de COVID-19, por isso não apresentaram declínio. A queda observada ocorreu apenas nos anos posteriores, refletindo possíveis impactos desse período, mas sem comprometer a solidez da produção científica na área.

No que se refere às citações, observa-se um crescimento expressivo ao longo do período analisado, com um aumento contínuo até o ano de 2024, quando se atinge o pico de aproximadamente 2.500 citações. Esse crescimento indica não apenas o aumento do interesse acadêmico pelo tema, mas também a consolidação da área como um campo relevante e emergente dentro da agenda científica global voltada à sustentabilidade. O aumento das citações sugere que os estudos desenvolvidos a partir de 2019, especialmente os publicados entre 2020 e 2022, passaram a servir como base teórica e metodológica para novas pesquisas, refletindo um amadurecimento das discussões técnicas sobre rotas de conversão de resíduos agrícolas em biocombustíveis, bem como sobre sua viabilidade econômica e impacto ambiental. Além disso, o elevado número de citações em 2024 pode estar relacionado à intensificação de políticas públicas e compromissos internacionais voltados à transição energética e à redução das emissões de gases de efeito estufa, o que impulsiona a busca por soluções sustentáveis como os biocombustíveis.

A queda aparente nos números de 2025, tanto em número de publicações quanto o de citações, deve-se ao fato de os dados se referirem apenas até o mês de abril, não refletindo o ano completo. De maneira geral, os resultados demonstram que a produção científica sobre biocombustíveis derivados de resíduos agrícolas tem ganhado destaque progressivo na comunidade acadêmica, tanto em volume quanto em impacto, refletindo sua importância estratégica no contexto da transição energética e da economia circular. Entretanto é perceptível que a partir de 2022, há uma queda no volume de publicações, embora os valores se mantenham relativamente altos, indicando uma estabilidade após o pico observado.

Figura 5. Tendência global de publicações e citações anuais relacionadas à pesquisa de biocombustíveis gerados a partir de resíduos agrícolas.



Fonte: Autor (2025).

5.2 CONTRIBUIÇÕES DE PAÍSES/REGIÕES

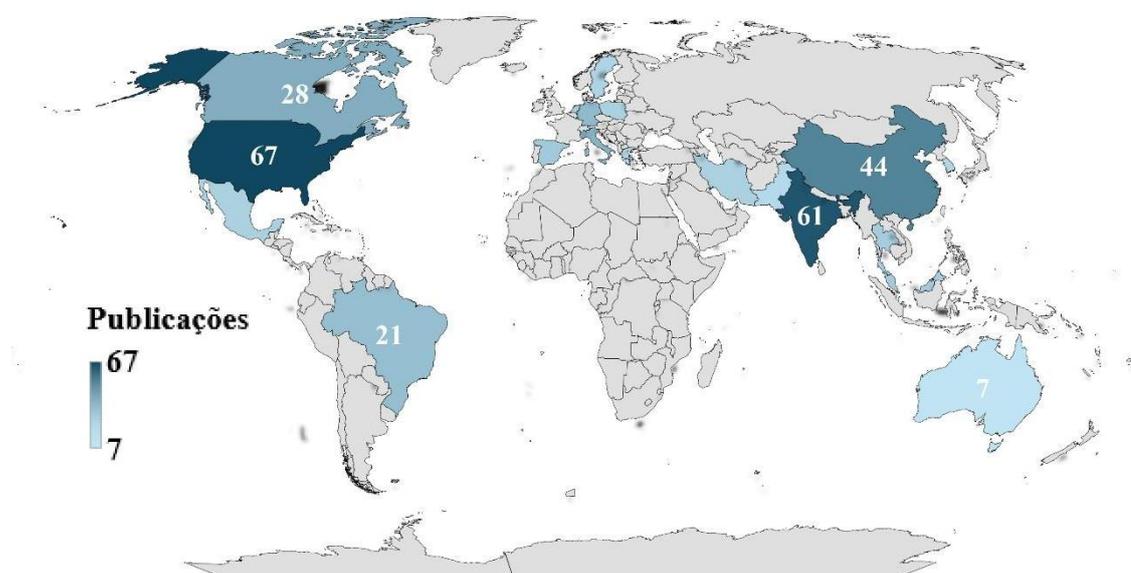
Os resultados apresentados nesta seção abordam a primeira questão estudo:

- *RQ1. Como está o desenvolvimento da produção científica relacionada ao desenvolvimento de biocombustíveis de resíduos agrícolas?*

Com o objetivo de representar graficamente a distribuição geográfica das publicações, foi elaborado um mapa mundial (Figura 6), a partir da análise dos dados processados no software Excel. A coloração do mapa permite visualizar a concentração de trabalhos publicados por país, evidenciando os locais com maior produção científica. O Brasil, por sua vez, se destaca como único país da América do Sul com 21 publicações. Essa representação facilita a compreensão de como os artigos se distribuíram globalmente ao longo do período de 2015 até abril de 2025. As Figuras 7A e 7B apresentam, para o mesmo intervalo de tempo, a participação dos países com maior relevância na pesquisa relacionada à produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. O gráfico da Figura 7A revela que, dentre os

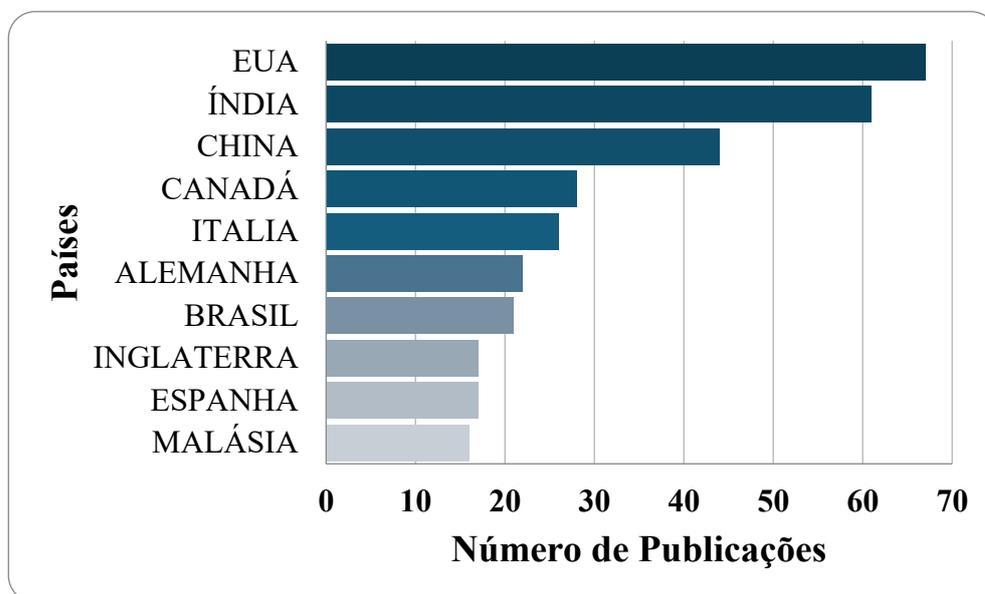
420 artigos publicados, os que mais se destacam são os Estados Unidos (EUA) e a Índia, com 67 (15,95%) e 61 (14,52%) artigos publicados, respectivamente. A Figura 7B, por sua vez, apresenta o número de citações recebidas por país. Entre os 78 países que colaboraram com pesquisas na área, somando um total de 12.738 citações, destaca-se a Índia como o país mais citado, com 2.263 menções, seguida pela Itália com 1.596 citações.

Figura 6. Distribuição mundial de pesquisas sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas de 2015 a abril de 2025. A densidade das publicações é representada em uma escala de cores.

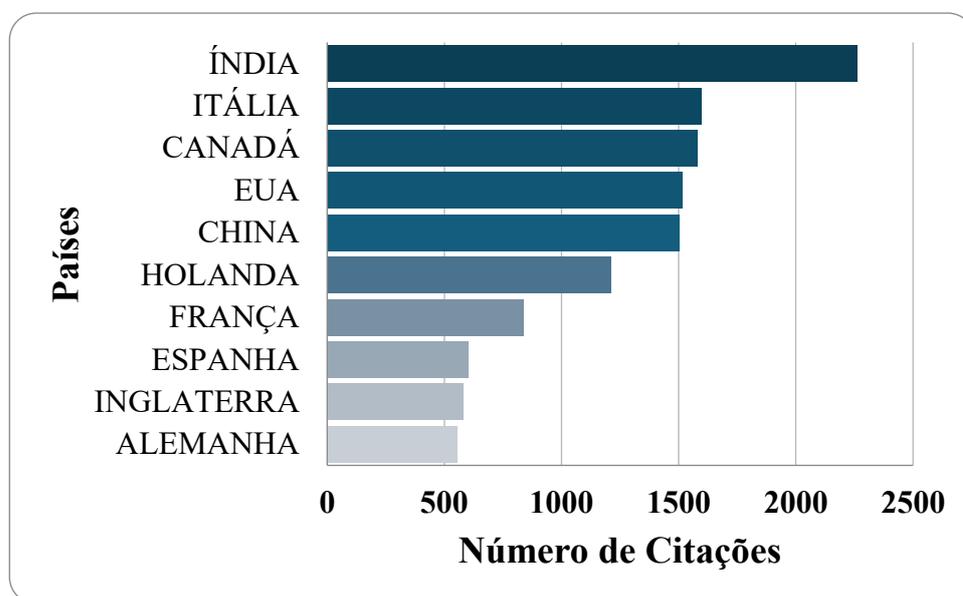


Fonte: Autor (2025).

Figura 7. (A) Classificação dos dez principais países com o maior número de publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. **(B)** Classificação dos dez principais países com a maior frequência de citações de suas publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas.



(A)



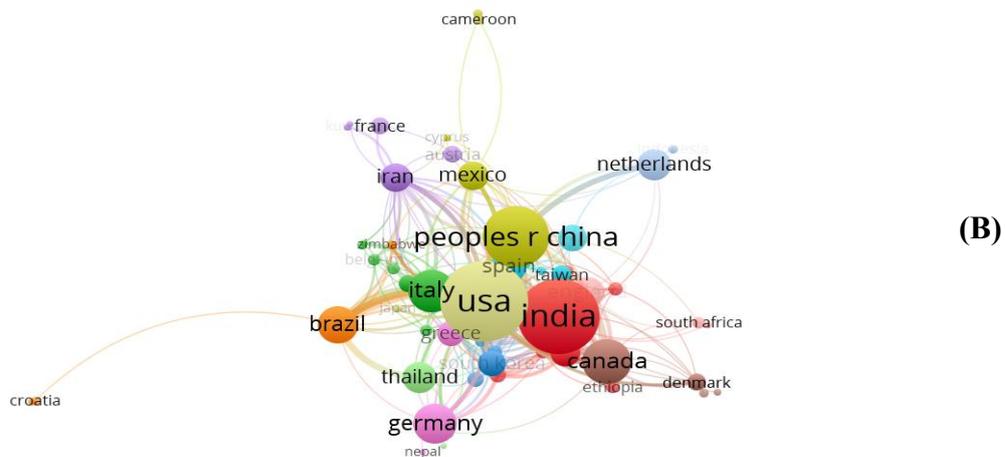
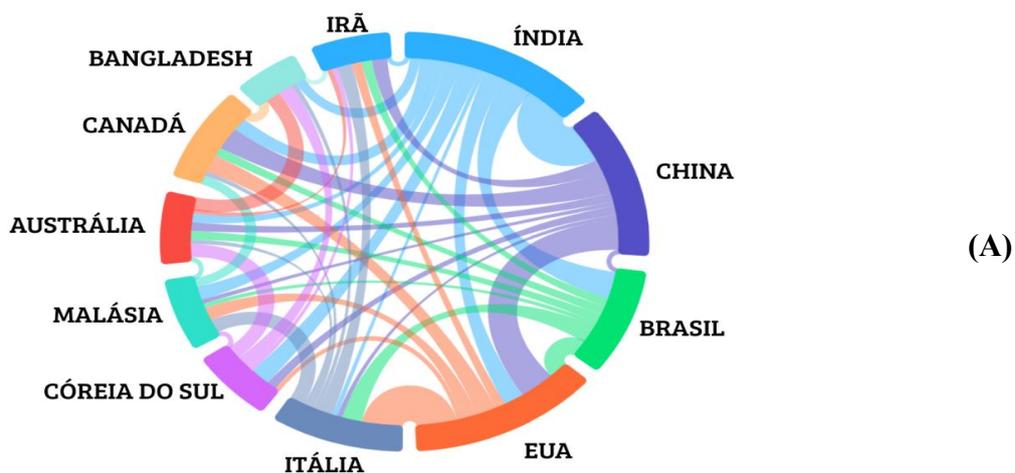
(B)

Fonte: Autor (2025).

No que diz respeito à cooperação internacional, a Figura 8A oferece uma representação visual da análise de coautoria entre países, destacando as redes colaborativas estabelecidas na pesquisa sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Estados Unidos, Índia e China se sobressaem por apresentarem relações de colaboração particularmente

intensas, evidenciando sua atuação conjunta e estratégica na área. Já a Figura 8B demonstra a participação de 78 países, com base no critério de que cada nação deveria possuir ao menos um documento indexado para inclusão na análise realizada com o software VOSviewer. Nesse mapa de rede, cada “nó” simboliza um país colaborador, permitindo a identificação das conexões e contribuições à comunidade científica ao longo dos últimos anos. Os dados de Total Link Strength (TLS) indicam que a Índia lidera com um TLS de 71, seguida de perto pela China, com 70.

Figura 8. (A) Classificação dos 11 principais países com a maior frequência de citações de suas publicações na área de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas entre 2015 até abril/2015. **(B)** Distribuição e cooperação internacional de países/regiões envolvidos na produção de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 4 apresenta uma visão sintética das dez instituições mais produtivas em termos de publicações científicas na área. Essa classificação destaca as organizações que mais se destacaram nos últimos anos, tanto em volume de produção quanto em relevância para o avanço das pesquisas nesse campo estratégico.

Tabela 4. 10 principais institutos que contribuíram para as publicações de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas.

Classificação	País/Região	Instituições	Publicações
1	Canadá	University of Saskatchewan	14
2	EUA	Idaho National Laboratory	8
3	Itália	University of Catania	7
4	Tailândia	Chiang Mai University	6
5	Malásia	Universiti Teknologi PETRONAS	6
6	China	Chinese Academy of Sciences	5
7	EUA	Ohio State University	5
8	Holanda	University of Groningen	5
9	Grécia	University of Patras	5
10	Malásia	Universiti Putra Malaysia	4

Fonte: Autor (2025).

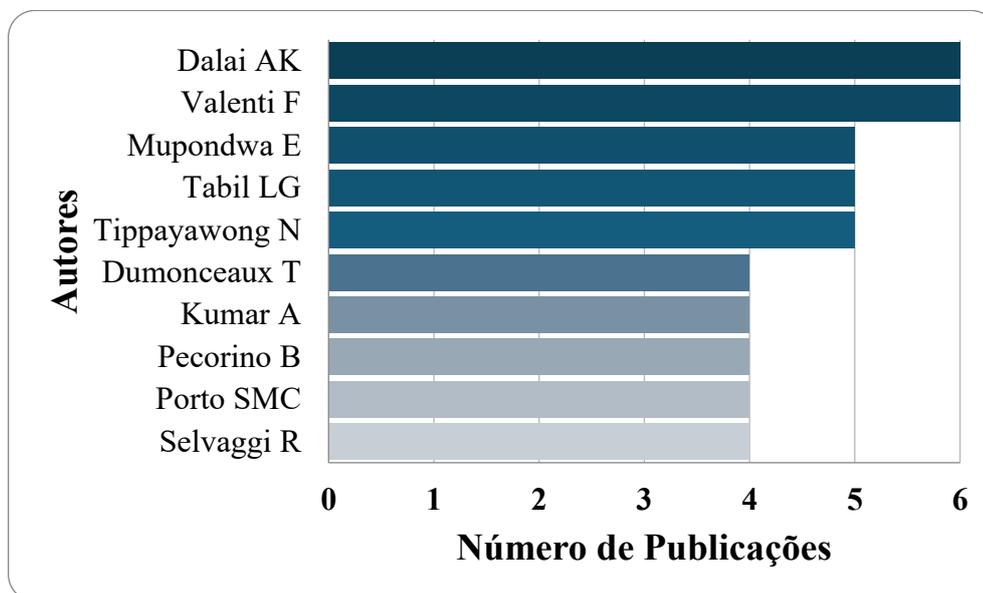
5.4 CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Os resultados desta seção abordam a segunda RQ:

- *RQ2. Quais autores se destacam na pesquisa de biocombustíveis e resíduos agrícolas?*

Entre os principais autores emergentes na pesquisa sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas, destacam-se Dalai Ajay K. e Francesca Valenti, ambos com seis publicações no período de 2015 até abril de 2025, o que representa 1,429% do total de artigos na área. Logo em seguida, aparecem Lope G. Tabil, Edmund Mupondwa e Nakorn Tippayawong, com cinco publicações cada, correspondendo individualmente a 1,19% do volume total de trabalhos científicos. Vale ressaltar que Dalai e Mupondwa são pesquisadores com foco em biomassas na *University of Saskatchewan*, justificando a maior quantidade de publicações da instituição, enquanto Valenti pesquisa na *University of Catania*, principalmente sobre resíduos agrícolas. Os demais autores listados na Figura 10 contribuíram com quatro publicações cada, consolidando-se como nomes relevantes no avanço das pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de biocombustíveis.

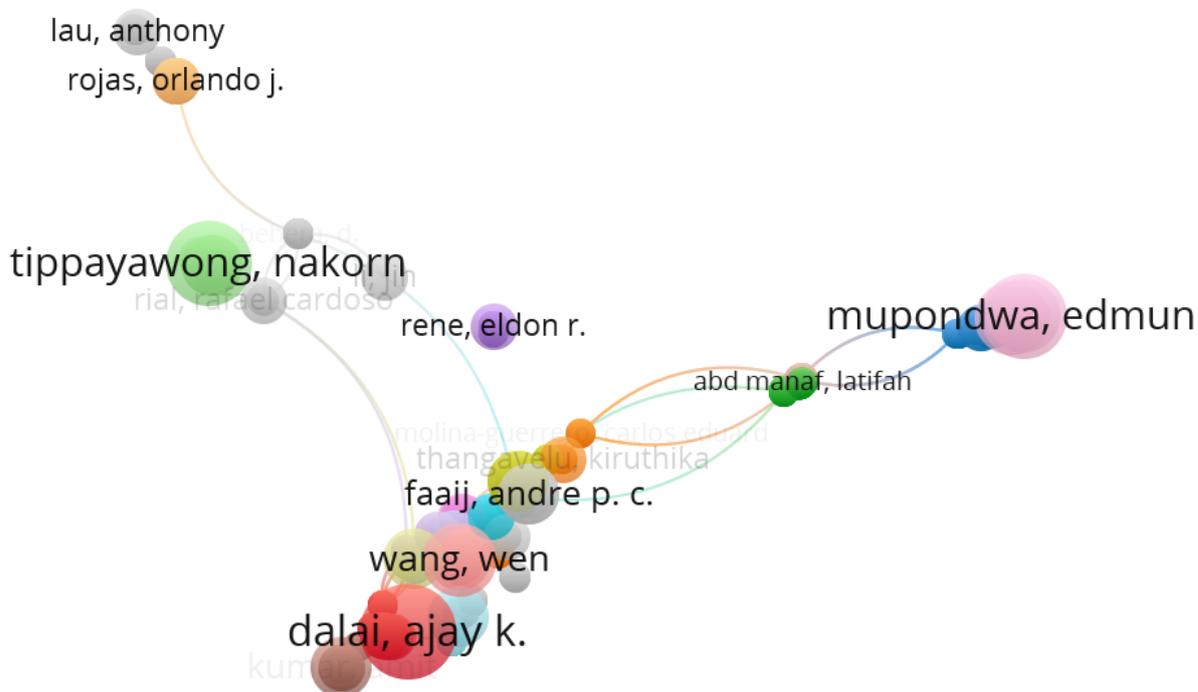
Figura 10. Classificação dos dez autores com mais publicações sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 11 foi elaborada a partir de dados que incluem autores com no mínimo, 1 publicação, proporcionando uma representação mais abrangente das conexões existentes no panorama científico da área. Ao todo, foram identificados 1.878 autores envolvidos nas pesquisas sobre biocombustíveis oriundos de resíduos agrícolas. O mapa de rede resultante apresenta 646 nós, que representam os autores com vínculos colaborativos, interligados por 2.927 conexões, demonstrando a ampla articulação entre pesquisadores e a formação de redes colaborativas significativas no avanço das investigações nesse campo científico.

Figura 11. Mapa da rede de coautoria e colaboração de autores na pesquisa de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.



Fonte: Autor (2025).

5.5 ANÁLISE DE REVISTAS

Os resultados obtidos nesta seção abordam a terceira RQ:

- *RQ3. Quais subáreas emergentes estão relacionadas a pesquisa de biocombustíveis e resíduos agrícolas na literatura recente?*

Para a análise das revistas científicas, foram consideradas, entre as 179 fontes identificadas, apenas aquelas que publicaram no mínimo cinco documentos sobre biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Esse critério resultou em um total de 21 periódicos selecionados, conforme ilustrado na Figura 12. A rede formada por essas revistas apresenta 44 conexões e um *Total Link Strength* (TLS) de 62, indicando uma interação significativa entre os periódicos.

A Tabela 5 apresenta um ranking dos dez periódicos que mais contribuíram com publicações relacionadas à produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Entre eles, destaca-se a revista *Biofuels, Bioproducts & Biorefining – BIOFPR*, que lidera com 24 artigos, representando 5,71% do total de publicações analisadas e um Fator de Impacto (FI) 3,2 e Quartil Q2, especializada na integração de biotecnologia, engenharia e sustentabilidade para o desenvolvimento de biocombustíveis, bioprodutos e processos de biorrefinaria. Em seguida, encontram-se *Renewable & Sustainable Energy Reviews* e *Energies*, ambas com 21 publicações (5%). Na terceira posição, aparecem empatadas as revistas *Biomass & Bioenergy* e *Biomass Conversion and Biorefinery*, com 17 artigos cada, equivalentes a 4,05% do volume total. Nota-se também que, apesar de menos publicações, a *Renewable & Sustainable Energy Reviews* possui o maior fator de impacto (16,3) e 2,519 citações, significativamente mais que o primeiro colocado, demonstrando a influência da revista dedicada à análise crítica e abrangente do progresso em fontes de energia renovável e sustentabilidade energética.

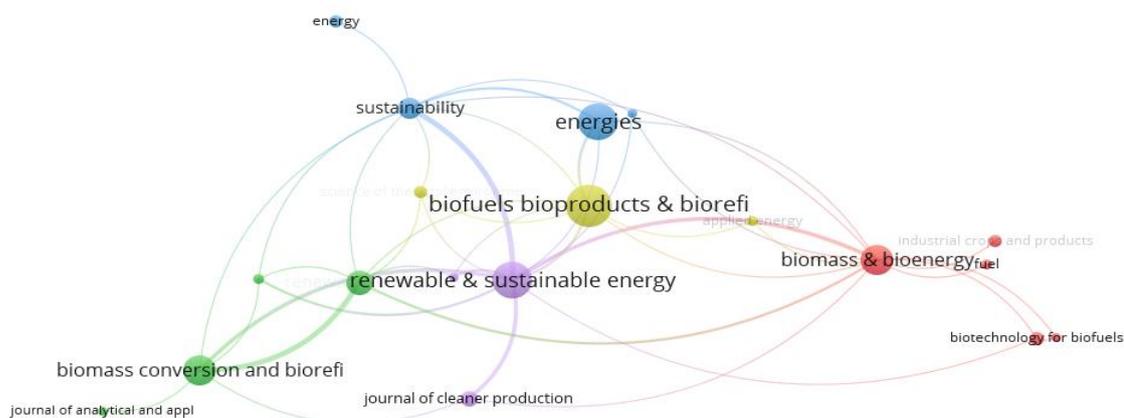
Esses periódicos representam importantes veículos de disseminação do conhecimento científico voltado ao desenvolvimento de fontes energéticas sustentáveis. Esses dados sugerem que as revistas atuam de forma colaborativa na disseminação de conhecimento científico voltado às fontes renováveis de energia, contribuindo para o fortalecimento e a coesão do campo de pesquisa.

Tabela 5. As dez principais revistas científicas que mais publicaram sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.

Classificação	Revista	Artigos	Porcentagem (%)	Citações	FI	Quartil	H-Index
1	Biofuels, Bioproducts & Biorefining - BIOFPR	24	5,71	239	3,2	Q2	107
2	Renewable & Sustainable Energy Reviews	21	5	2.519	16,3	Q1	421
3	Energies	21	5	302	3	Q2	152
4	Biomass & Bioenergy	17	4,05	444	5,8	Q2	214
5	Biomass Conversion and Biorefinery	17	4,05	246	3,5	Q2	45
6	Renewable Energy	14	3,33	515	8,6	Q1	270
7	Sustainability	12	2,86	280	3,3	Q2	152
8	Journal of Cleaner Production	9	2,14	277	9,7	Q1	354
9	Biotechnology for Biofuels	8	1,9	214	7,48	Q1	12
10	Science of the Total Environment	7	1,67	253	8,2	Q1	399

Fonte: Autor (2025).

Figura 12. Mapa da rede de revistas científicas em pesquisa de biocombustíveis de resíduos agrícolas entre 2015 e abril de 2025.



Fonte: Autor (2025).

5.6 ANÁLISE DE PALAVRAS-CHAVE

Os resultados fornecidos nesta seção abordam a quarta RQ:

- *RQ4. Quais são os principais hotspots (tópicos de destaque) utilizados na busca da literatura?*

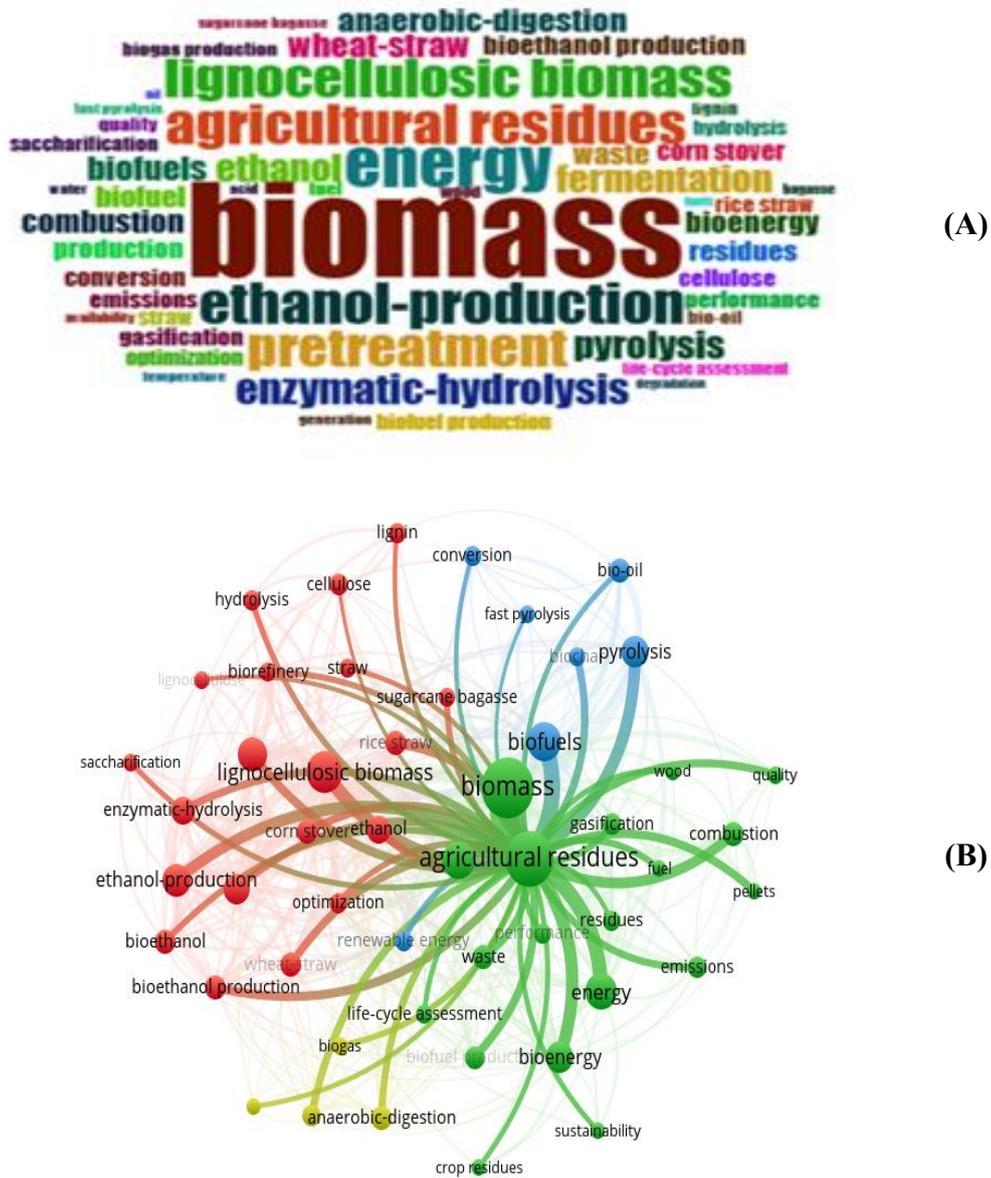
A análise de coocorrência de palavras-chave é um recurso importante na bibliometria, pois possibilita identificar tendências emergentes, mapear redes de conhecimento e examinar as relações entre os principais conceitos presentes na literatura científica. Esse tipo de análise oferece uma visão mais aprofundada sobre a estrutura temática de um campo de estudo, permitindo observar como os temas se articulam e evoluem ao longo do tempo. A partir dos 420 artigos coletados e analisados, foram identificadas 2.328 palavras-chave distintas. Dentre elas, 50 atendiam aos critérios estabelecidos para a construção das Figuras 13A e 13B, que consideraram como requisito mínimo a ocorrência de pelo menos 15 menções ao longo dos textos analisados. Essa filtragem permitiu focar nas palavras-chave mais recorrentes e, portanto, mais representativas do campo de estudo, entretanto algumas dessas palavras podem ter variações mínimas, como pluralidade, tornando-se duplicatas. A Tabela 6, por sua vez, apresenta um *ranking* das vinte palavras-chave que mais foram mencionadas dentre os periódicos. As palavras *biomass*, *biofuel* e “*agricultural residues*” estão no pódio com 157, 142 e 138 ocorrências, respectivamente.

Tabela 6. Tabela de classificação das vinte palavras-chave mais frequentes nos artigos analisados. (TLS: Força total do link).

Rank	Palavra-chave	Ocorrências	TLS	Rank	Keyword	Occurrences	TLS
1	Biomass	157	628	11	Ethanol	40	166
2	Biofuel	142	563	12	Enzymatic-Hydrolysis	39	220
3	Agricultural Residues	138	549	13	Rice Straw	31	152
4	Lignocellulosic Biomass	81	375	14	Corn Stover	31	144
5	Energy	67	258	15	Bioethanol	31	137
6	Pretreatment	56	268	16	Combustion	31	118
7	Ethanol Production	52	286	17	Bioethanol Production	30	168
8	Pyrolysis	51	193	18	Wheat Straw	30	158
9	Bioenergy	50	209	19	Anaerobic Digestion	30	142
10	Fermentation	45	213	20	Waste	30	123

Fonte: Autor (2025).

Figura 13. (A) Análise de nuvem de palavras sobre a produção de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Número de palavras = 50. **(B)** Análise de coocorrência de palavras-chave em pesquisas sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas.

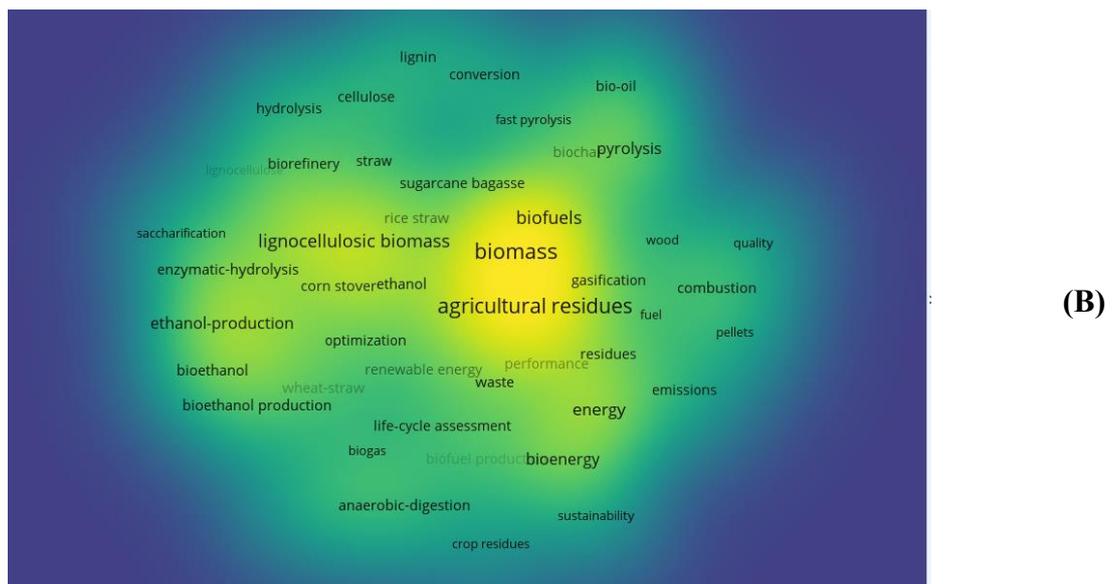
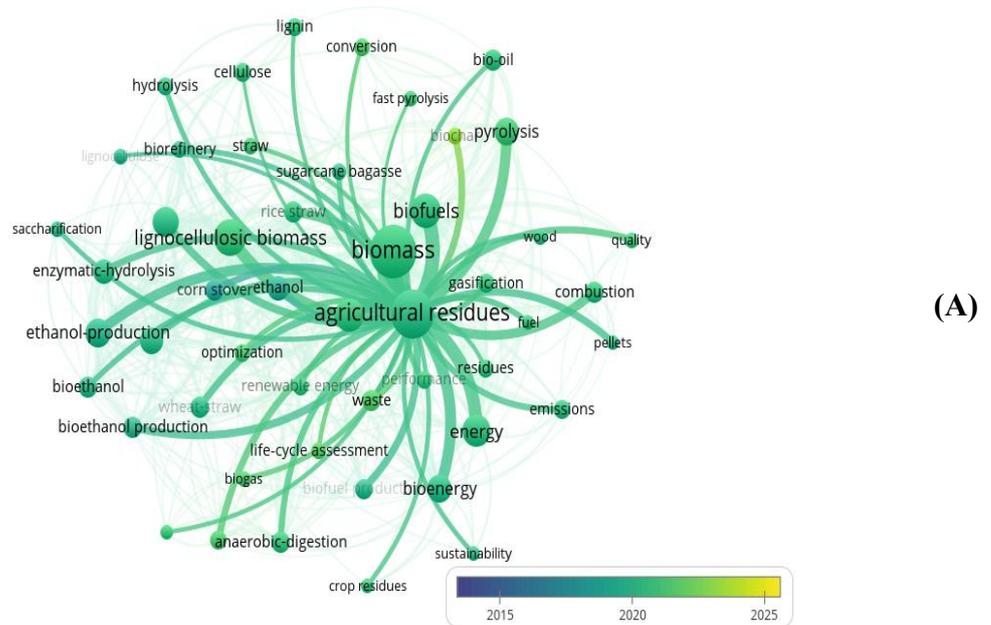


Fonte: Autor (2025).

A Figura 14A apresenta um mapa de sobreposição gerado por análise de coocorrência, destacando a progressão temporal e as conexões entre os principais termos de pesquisa relacionados a biocombustíveis derivados de resíduos agrícolas. Este mapa de rede mostra que a maior parte dos termos possuem um ano de publicação médio de 2020. Enquanto

a Figura 14B representa um mapa de densidade de palavras-chave coletada da base de dados, onde as cores variam do azul, menor ou nenhuma densidade, para o amarelo, maior densidade.

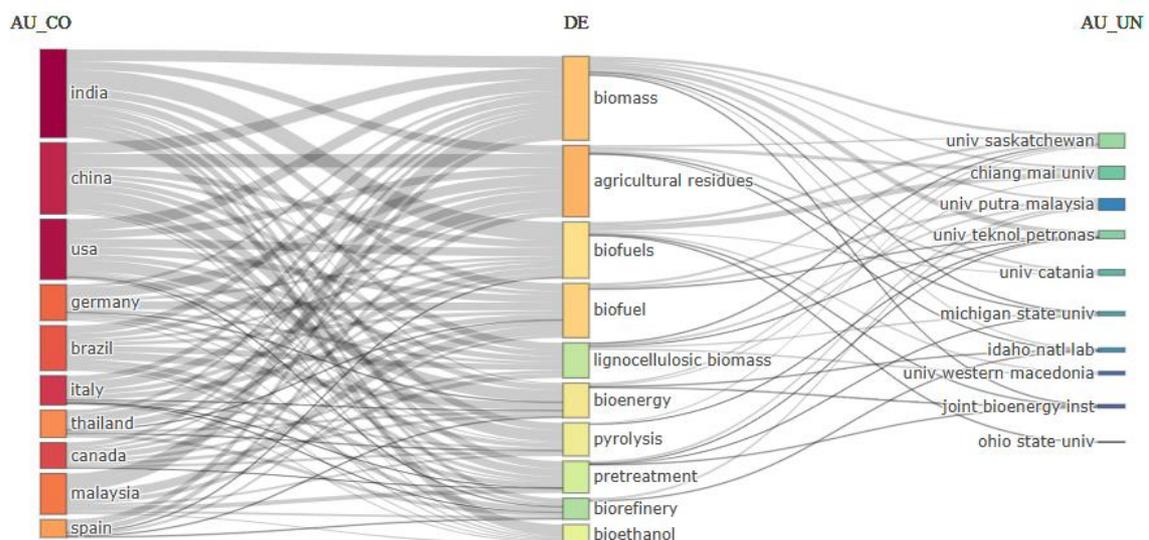
Figura 14. (A) Visualização de sobreposição da análise de coocorrência. **(B)** Mapa de densidade de palavras-chave gerado pelo VOSviewer mostrando o ponto de acesso à pesquisa sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas.



Fonte: Autor (2025).

Outra forma de observar a correlação entre as palavras-chaves é apresentando um gráfico de três campos no formato de diagrama de Sankey (Figura 15), utilizado para ilustrar a inter-relação entre os países (à esquerda), os principais descritores temáticos (centro) e as instituições de pesquisa (à direita) no contexto dos estudos sobre biocombustíveis produzidos a partir de resíduos agrícolas. Foram representados os 10 principais itens em cada categoria, permitindo visualizar de forma integrada como diferentes nações contribuem para tópicos específicos da área e quais universidades ou centros de pesquisa estão associados a esses temas. O Brasil, embora representado, parece ter conexões mais limitadas, o que pode indicar menor visibilidade internacional ou foco em revistas locais ou temas mais específicos. A espessura das linhas representa a intensidade das conexões entre os elementos, possibilitando identificar padrões de colaboração, áreas de maior concentração temática e instituições com maior protagonismo nas publicações. Em síntese, o diagrama Sankey evidencia um cenário global dinâmico e diversificado, no qual países emergentes e desenvolvidos compartilham protagonismo na pesquisa de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. A análise revela uma concentração temática em torno da biomassa e seus processos de conversão, além de destacar instituições que funcionam como núcleos científicos estratégicos nessa área de investigação.

Figura 15. Gráfico de três campos (diagrama de Sankey) mostrando a relação entre Palavras-chave (direita), Fontes (meio) e Países (esquerda) na pesquisa de biocombustíveis a partir de resíduos agrícolas. Número de itens representados = 10.



Fonte: Autor (2025).

6 CONCLUSÃO

A análise bibliométrica realizada neste estudo permitiu identificar tendências, lacunas e avanços no campo dos biocombustíveis produzidos a partir de resíduos agrícolas, evidenciando sua crescente relevância na literatura científica e nas agendas de pesquisa voltadas à sustentabilidade energética. Entre 2015 e 2020, observou-se um aumento significativo no número de publicações e citações relacionadas aos biocombustíveis produzidos a partir de resíduos agrícolas. A partir de 2021 até abril de 2025, embora tenha ocorrido uma leve redução no volume de publicações, a produção científica manteve-se em um ritmo estável. Portanto, a pesquisa nesse campo é justificada não apenas por seu potencial tecnológico e energético, mas também por seu impacto positivo na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, na diversificação da matriz energética e na promoção de soluções sustentáveis e acessíveis para diferentes realidades socioeconômicas.

No cenário internacional, os Estados Unidos e a Índia se destacam como os países com maior número de estudos publicados sobre o tema, sendo que a Índia também lidera em número de citações. Ao lado da China, essas nações se consolidam como os principais polos de pesquisa em biocombustíveis de resíduos agrícolas na atualidade. Estes resultados sintetizam que, além da busca para reduzir a poluição e a abundância de resíduos agrícolas, os três países apresentam altos níveis de demanda energética, o que cria pressão por diversificação da matriz e maior autossuficiência, especialmente por meio de fontes locais e renováveis. Nesse contexto, o Brasil também se destaca por já possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, de acordo com o BEN, com forte participação de fontes renováveis como a biomassa e a energia hidrelétrica, além de consolidar políticas públicas voltadas à valorização de resíduos para fins energéticos.

No que se refere às instituições de maior destaque na área, a *University of Saskatchewan*, no Canadá, lidera em número de publicações, seguida pelo *Idaho National Laboratory*, nos Estados Unidos. Entre os pesquisadores com maior contribuição para o avanço dos estudos sobre biocombustíveis de resíduos agrícolas, destacam-se Dalai Ajay K. e Francesca Valenti, ambos com produções significativas e impacto relevante na área. Dessa forma, as perspectivas para o crescimento de novos projetos de pesquisa sobre o tema são promissoras. No entanto, é fundamental que haja o fortalecimento da colaboração interinstitucional e cooperativa entre grupos de pesquisa, a fim de ampliar a visibilidade científica, promover o intercâmbio de conhecimentos e potencializar os impactos das produções futuras no campo dos biocombustíveis.

Entre os termos e conceitos recorrentes nas pesquisas sobre biocombustíveis, excluindo-se os mais evidentes, como “*biofuel*” e “*biomass*”, destacam-se: o avanço das rotas enzimáticas e processos de catálise verde. A partir desses termos é possível constatar a busca por maior eficiência e sustentabilidade na conversão de biomassa e o desenvolvimento de biorrefinarias integradas, capazes de produzir múltiplos produtos de valor agregado a partir de uma mesma fonte renovável. Somado a isso, ainda existe a crescente ênfase na valorização de resíduos agrícolas e agroindustriais, visando ao aproveitamento energético de materiais antes descartados.

De modo geral, a estruturação dos dados em planilhas eletrônicas mostrou-se particularmente eficaz para identificar correlações, tendências e padrões evolutivos na pesquisa sobre aproveitamento energético de biomassa residual. Assim, os resultados obtidos através desta abordagem oferecem uma perspectiva abrangente sobre o desenvolvimento científico neste tema de base tecnológica estratégica, revelando dentre outros, os centros de excelência e as trajetórias temporais das investigações mais relevantes. Estes resultados reforçam a importância e a relevância do presente estudo.

REFERENCIAS

ALEXANDRE, Jeferson Yves Nunes Holanda *et al.* A Theoretical and Experimental Study for Enzymatic Biodiesel Production from Babassu Oil (*Orbignya sp.*) Using Eversa Lipase. **Catalysts**, v. 12, n. 11, p. 1322, 27 out. 2022.

ALMEIDA, Cinthia Silva *et al.* Enhancing Lipase Immobilization via Physical Adsorption: Advancements in Stability, Reusability, and Industrial Applications for Sustainable Biotechnological Processes. **ACS Omega**, v. 9, n. 47, p. 46698–46732, 26 nov. 2024.

ALVES MARTINS, Wladilson *et al.* Biohydrogen production in bioreactors: Global trends, key factors, and emerging directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 94, p. 943–958, dez. 2024.

ANP. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano>>. Acesso em: 18 maio. 2025.

ATTIA, N. K. *et al.* Chemical and rheological assessment of produced biolubricants from different vegetable oils. **Fuel**, v. 271, p. 117578, jul. 2020.

BHUVANESHWARI, S.; HETTIARACHCHI, Hiroshan; MEEGODA, Jay N. Crop Residue Burning in India: Policy Challenges and Potential Solutions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 5, p. 832, 7 mar. 2019.

BIOMAX. **O que são briquetes?** Disponível em: <<https://www.biomaxind.com.br/briquetes/>>. Acesso em: 18 maio. 2025.

BIZERRA, Viviane de Castro *et al.* Opportunities for cleaner leather processing based on protease enzyme: Current evidence from an advanced bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 191, p. 114162, mar. 2024a.

BIZERRA, Viviane de Castro *et al.* Exploring the synergy of ionic liquids and lipase in sustainable enzymatic engineering. **Journal of Molecular Liquids**, v. 399, p. 124373, abr. 2024b.

BOLINA, Iara C. A.; GOMES, Raphael A. B.; MENDES, Adriano A. Biolubricant Production from Several Oleaginous Feedstocks Using Lipases as Catalysts: Current Scenario and Future Perspectives. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 4, p. 1039–1057, 5 dez. 2021.

BRASIL. **Agencia Brasil**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente>>. Acesso em: 14 maio. 2025.

CATUMBA, Batista Dala *et al.* Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 22, p. 7975–7992, mar. 2023.

CAVALCANTE, Antônio Luthierre Gama *et al.* Advancements in enzyme immobilization on magnetic nanomaterials: toward sustainable industrial applications. **RSC Advances**, v. 14, n. 25, p. 17946–17988, 2024a.

CAVALCANTE, Israel Oliveira *et al.* Evolving sustainable energy technologies and assessments through global research networks: advancing the role of blue hydrogen for a cleaner future. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 348–368, 2024b.

CECILIA, Juan Antonio *et al.* An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives. **Processes**, v. 8, n. 3, p. 257, 25 fev. 2020.

CHAUDHARY, Jyoti. Producing Biodiesel from Neem Oil Using a Two-Step Transesterification Process. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 10, n. 7, p. 3929–3934, 31 jul. 2022.

DA SILVA, Ana Paula T. *et al.* Enzymatic catalysis: An environmentally friendly method to enhance the transesterification of microalgal oil with fusel oil for production of fatty acid esters with potential application as biolubricants. **Fuel**, v. 273, p. 117786, ago. 2020.

DANTAS, Arícia Pessoa; SANTOS, R. R. dos; SOUZA, S. C. de. O briquete como combustível alternativo para a produção de energia. *In*: 2012.

DUQUE-ACEVEDO, Mónica *et al.* Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. **Global Ecology and Conservation**, v. 22, p. e00902, jun. 2020.

EPE. Balanço Energético Nacional. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2024.

FARUQUE, Mohammed O.; RAZZAK, Shaikh A.; HOSSAIN, Mohammad M. Application of Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production from Microalgal Oil—A Review. **Catalysts**, v. 10, n. 9, p. 1025, 7 set. 2020.

FONSECA, Aluísio Marques da *et al.* A new raw material in the production of biodiesel: purple pinion seeds. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 23, p. 25, 1 jun. 2019.

G, Ginni *et al.* Valorization of agricultural residues: Different biorefinery routes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105435, ago. 2021.

GENTIL, Luiz Vicente Bocorny. Tecnologia e economia do briquete de madeira. 2010.

HADIZA, M. *et al.* Kinetics and characterization of Gmelina arborea biolubricant via two-step transesterification. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 10, p. 100240, jun. 2025.

HEO, Sujung; CHOI, Joon Weon. Potential and Environmental Impacts of Liquid Biofuel from Agricultural Residues in Thailand. **Sustainability**, v. 11, n. 5, p. 1502, 12 mar. 2019.

Jl, Li-Qun. Insight into Energy Production and Consumption, Carbon Emissions and Agricultural Residues Resources Available for Energy and Environmental Benefits in China. **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, n. 6, p. 3679–3690, 1 jun. 2024.

LEVY, Hildyson Moreira *et al.* Biosynthesis of biolubricant catalyzed by lipase B from *Candida antarctica* immobilized on nanocomposite of cashew apple bagasse lignin. **Renewable Energy**, v. 243, p. 122452, abr. 2025.

LIM, Huei Yeong *et al.* Recent advancement in thermochemical conversion of biomass to biofuel. **Biofuels**, v. 15, n. 5, p. 587–604, 27 maio 2024.

MOREIRA, Katerine S. *et al.* Optimization of the Production of Enzymatic Biodiesel from Residual Babassu Oil (*Orbignya sp.*) via RSM. **Catalysts**, v. 10, n. 4, p. 414, 9 abr. 2020.

NOGALES-DELGADO, Sergio; ENCINAR, José María; GONZÁLEZ CORTÉS, Álvaro. High oleic safflower oil as a feedstock for stable biodiesel and biolubricant production. **Industrial Crops and Products**, v. 170, p. 113701, out. 2021.

NUNES, João Vitor da Silveira. **Desenvolvimento de molde para produção de briquetes e análise de biomassas**. Fortaleza: [S.n.]. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/54710>>. Acesso em: 8 maio. 2025.

PUROHIT, Pallav; DHAR, Subash. Lignocellulosic biofuels in India: current perspectives, potential issues and future prospects. **AIMS Energy**, v. 6, n. 3, p. 453–486, 2018.

RIBEIRO FILHO, Manoel Nazareno. Estudo comparativo do potencial energético das cascas das Sementes da planta Nim Azadirachta Indica e das Amêndoas do Coco Babaçu Attlea Speciosa Mart. Para Produção de Briquete. 2023.

ROCHA, Thales G. *et al.* Lipase Cocktail for Optimized Biodiesel Production of Free Fatty Acids from Residual Chicken Oil. **Catalysis Letters**, v. 151, n. 4, p. 1155–1166, 2 abr. 2021.

SADH, Pardeep Kumar; DUHAN, Surekha; DUHAN, Joginder Singh. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 5, n. 1, p. 1, 2 dez. 2018.

SANCHEZ-ROQUE, Y. *et al.* Biomass briquettes: Raw material, technologies and densification parameters, quality and future challenges. **Scientia Agropecuaria**, v. 16, n. 2, p. 293–306, 15 abr. 2025.

SHARMA, Anvita; KODGIRE, Pravin; KACHHWAHA, Surendra Singh. Investigation of ultrasound-assisted KOH and CaO catalyzed transesterification for biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil: Process optimization and conversion rate evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120982, jun. 2020.

SIMÃO NETO, Francisco *et al.* Research Progress and Trends on Utilization of Lignocellulosic Residues as Supports for Enzyme Immobilization via Advanced Bibliometric Analysis. **Polymers 2023, Vol. 15, Page 2057**, v. 15, n. 9, p. 2057, 26 abr. 2023.

SIMÃO NETO, Francisco *et al.* Exploring molecular catalysis in the enzymatic synthesis of biolubricants: A comprehensive review and bibliometric assessment. **Molecular Catalysis**, v. 583, p. 115191, ago. 2025.

SOARES, Larissa de Souza *et al.* Utilização de Resíduos de Borra de Café e Serragem na Moldagem de Briquetes e Avaliação de Propriedades. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 2, p. 550–560, jun. 2015.

TALEBIAN-KIAKALAEH, Amin; AMIN, Nor Aishah Saidina. Single and Two-Step Homogeneous Catalyzed Transesterification of Waste Cooking Oil: Optimization by Response Surface Methodology. **International Journal of Green Energy**, v. 12, n. 9, p. 888–899, 2 set. 2015.

TAVARES, Marília Amaral de Moura Estevão. Estudo da viabilidade da produção de briquetes e seus possíveis impactos sobre o meio ambiente e o mercado de trabalho da região do baixo-Açu, RN. 2013.

TESHOME, Ababu Girma *et al.* Synthesis and characterization of bio-lubricant from *Citrullus colocynthis* L. (Bitter Apple) seed oil: A two-step transesterification approach. **Industrial Crops and Products**, v. 231, p. 121218, set. 2025.

VIBHAKAR, Chirag *et al.* Production and Optimization of Energy Rich Biofuel through Co-Pyrolysis by Utilizing Mixed Agricultural Residues and Mixed Waste Plastics. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, p. 1–9, 3 jan. 2022.