



## **ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE PRÉ-TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS PARA OTIMIZAR A DIGESTÃO ANAERÓBIA DO BAGAÇO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

## **ANÁLISIS CIENCIOMÉTRICO DE PRETRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS PARA OPTIMIZAR LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL BAGAZO EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

## **SCIENTOMETRIC ANALYSIS OF THERMOCHEMICAL PRETREATMENTS TO OPTIMIZE ANAEROBIC DIGESTION OF BAGASSE FOR BIOGAS PRODUCTION**

Apresentação: Comunicação Oral

Raphael Rodrigues da Silva Serpa<sup>1</sup>; Rebeca de Lima Oliveira<sup>2</sup>; Liliana Andréa dos Santos<sup>3</sup>; André Felipe de Melo Sales Santos<sup>4</sup>; Tatiana Souza Porto<sup>5</sup>

DOI :<https://doi.org/10.31692/VICIAGRO.0156>

### **RESUMO**

As indústrias produtoras de açúcar e etanol desempenham um papel importante na economia mundial, além de proporcionar insumos e biocombustíveis eficazes e ambientalmente sustentáveis. Entretanto, esta produção acarreta a geração de uma grande quantidade de bagaço que necessitam de um gerenciamento adequado. Métodos de pré-tratamento garantem a quebra da estrutura lignocelulósica destes resíduos, proporcionando a possibilidade de reinserção na cadeia produtiva, seja para produção de novos produtos ou para a produção de energia evitando posteriores impactos ambientais. Este estudo relata a análise cienciométrica direcionada aos métodos de pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes cenários. Foram identificados os estudos por meio de periódicos disponibilizados na base de dados *web of science*, na qual foi acessada através da plataforma digital CapesCafe. A análise cienciométrica foi realizada através do software VOSviewer (versão 1.6.18). Adicionalmente, empregaram-se o Microsoft Excel para a análise e elaboração de gráficos referentes à distribuição anual das publicações e agrupamento dos trabalhos selecionados com seus resumos, e o QGIS (versão 3.40.3) para a produção de um mapa ilustrativo dos países com maior produção científica na área investigada. Dessa maneira, foram selecionados um conjunto de 52 artigos de relevância para o estudo, dos quais o Brasil concentrou 33% das publicações, seguido pelos Estados Unidos e Paquistão. Ressalta-se que os métodos de pré-tratamento físico-químico se destacaram como os mais utilizados, apresentando eficácia comprovada em diversos tipos de biomassa. A análise de tendência de pesquisa demonstrou como cada país lida com a temática abordada, direcionando seus recursos para melhoria contínua dos seus

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, [raphael.serpa@ufrpe.br](mailto:raphael.serpa@ufrpe.br)

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, [rebecalimaoliveira16@gmail.com](mailto:rebecalimaoliveira16@gmail.com)

<sup>3</sup> Pós doutoranda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, [liliana.andrea.santos@gmail.com](mailto:liliana.andrea.santos@gmail.com)

<sup>4</sup> Doutor, Universidade Federal Rural de Pernambuco, [andre.felipesantos@ufrpe.br](mailto:andre.felipesantos@ufrpe.br)

<sup>5</sup> Doutora, Universidade Federal Rural de Pernambuco, [tatiana.porto@ufrpe.br](mailto:tatiana.porto@ufrpe.br)

processos. Dessa maneira, evidencia-se a necessidade de abordar novos métodos de pré-tratamento de resíduos originados da indústria sucroenergética, isto reflete como o gerenciamento de resíduos sólidos desempenha um papel fundamental na cadeia produtiva e econômica dos grandes produtores mundiais.

**Palavras-Chave:** Pré-tratamento físico-químico, indústria sucroalcooleira, Biomassa, gestão de resíduos.

## RESUMEN

Las industrias productoras de azúcar y etanol desempeñan un papel importante en la economía mundial, además de proporcionar insumos y biocombustibles eficaces y ambientalmente sostenibles. Sin embargo, esta producción acarrea la generación de una gran cantidad de bagazo que requiere una gestión adecuada. Los métodos de pretratamiento garantizan la ruptura de la estructura lignocelulósica de estos residuos, proporcionando la posibilidad de reinserción en la cadena productiva, ya sea para la producción de nuevos productos o para la generación de energía, evitando posteriores impactos ambientales. Este estudio describe el análisis cienciométrico dirigido a los métodos de pretratamiento del bagazo de caña de azúcar en diferentes escenarios. Los estudios se identificaron a través de revistas disponibles en la base de datos Web of Science, a la cual se accedió mediante la plataforma digital CapesCafe. El análisis cienciométrico se realizó utilizando el software VOSviewer (versión 1.6.18). Adicionalmente, se empleó Microsoft Excel para el análisis y elaboración de gráficos referentes a la distribución anual de las publicaciones y al agrupamiento de los trabajos seleccionados con sus resúmenes, y QGIS (versión 3.40.3) para la elaboración de un mapa ilustrativo de los países con mayor producción científica en el área investigada. De esta manera, se seleccionó un conjunto de 52 artículos relevantes para el estudio, de los cuales Brasil concentró el 33 % de las publicaciones, seguido por Estados Unidos y Pakistán. Cabe resaltar que los métodos de pretratamiento físico-químico se destacaron como los más utilizados, presentando eficacia comprobada en diversos tipos de biomasa. El análisis de tendencias de investigación demostró cómo cada país aborda la temática, destinando sus recursos a la mejora continua de sus procesos. De esta forma, se evidencia la necesidad de abordar nuevos métodos de pretratamiento de los residuos originados en la industria sucroenergética, lo cual refleja cómo la gestión de residuos sólidos desempeña un papel fundamental en la cadena productiva y económica de los grandes productores mundiales.

**Palabras clave:** Pretratamiento físico-químico, industria cañero-alcoholera, biomasa, gestión de residuos

## ABSTRACT

The sugar and ethanol producing industries play an important role in the global economy, in addition to providing effective and environmentally sustainable inputs and biofuels. However, this production results in the generation of a large amount of bagasse that requires adequate management. Pretreatment methods ensure the breakdown of the lignocellulosic structure of these residues, providing the possibility of reinsertion into the production chain, either for the production of new products or for energy generation, avoiding subsequent environmental impacts. This study reports the scientometric analysis directed at pretreatment methods of sugarcane bagasse in different scenarios. The studies were identified through journals available in the Web of Science database, which was accessed via the CapesCafe digital platform. The scientometric analysis was performed using VOSviewer software (version 1.6.18). Additionally, Microsoft Excel was employed for the analysis and creation of graphs related to the annual distribution of publications and the clustering of the selected works with their abstracts, and QGIS (version 3.40.3) was used to produce an illustrative map of the countries with the highest scientific output in the investigated area. In this way, a set of 52 articles relevant to the study was selected, of which Brazil accounted for 33 % of the publications, followed by the United States and Pakistan. It is noteworthy that physicochemical pretreatment methods stood out as the most used, demonstrating proven efficacy on various types of biomass. The research trend analysis showed how each country addresses the topic, directing its resources toward the continuous improvement of its processes. Thus, the need to address new pretreatment methods for residues originating from the sugar-energy industry

is evidenced, reflecting how solid waste management plays a fundamental role in the production and economic chain of the world's major producers.

**Keywords:** Physicochemical pretreatment, sugar and ethanol industry, biomass, waste management

## INTRODUÇÃO

A indústria sucroenergética desempenha um fator essencial para economia brasileira desde o período colonial, o cultivo da cana iniciou-se em 1532 passando de uma atividade familiar para um mercado de alto valor agregado. Passando o tempo, em 1975 com a crise do petróleo foi instituído o programa ProÁlcool que inseriu o Brasil como um dos destaques na produção de açúcar e etanol. Atualmente a produção brasileira é considerada a segunda maior do mundo, sendo responsável por 13,8% do etanol consumido no planeta (Barbosa *et al.*, 2022; Rodrigues & Machado, 2023; Souza *et al.*, 2022).

O aumento produtivo do etanol proporcionou a modernização e o crescimento do setor sucroenergético, atualmente o Brasil conta com 418 usinas produtoras de açúcar e etanol distribuídas em todo o país. A região sudeste ocupa o primeiro lugar com 235 usinas, seguida do centro-oeste (81 usinas) e o nordeste (73 usinas) (Alves *et al.*, 2021). Estes dados podem ser confirmados a partir da análise da safra 2024/2025 onde o estado foi responsável pela produção de 315.747,0 m<sup>3</sup> de etanol e 1.206,2 mil toneladas de açúcar (Conab, 2024).

A valorização dos resíduos gerados a partir da cana-de-açúcar é um desafio global, no que diz respeito ao bagaço, existem diversas utilidades como a produção de energia elétrica e produção de vapor. Porém, a queima deste resíduo não é uma alternativa ambientalmente viável, sendo capaz de produzir uma grande quantidade de teor de cinzas (5%) e consequentemente causando poluição atmosférica (Matsueda & Antunes, 2024).

O pré-tratamento do bagaço é um fator primordial pela capacidade de promover a quebra e reorganização entre celulose, lignina e hemicelulose (Jain & Mahalingam, 2024). Para sua eficácia, são levados em consideração fatores econômicos e tecnológicos. Dentre os métodos usados, têm-se métodos físicos, químicos e biológicos, dos quais são escolhido de acordo com a necessidade de cada pesquisa (Machín *et al.*, 2022).

Portanto, o presente estudo objetivou realizar uma análise cienciométrica visando mapear os estudos científicos sobre os métodos de pré-tratamentos utilizados para o bagaço de cana-de-açúcar advindos do processo de fabricação do etanol, observando as tendências da temática-foco

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O atual cenário mundial de diminuição de recursos naturais, de aumento do preço do petróleo, de insegurança energética e o crescente desenvolvimento rural potencializa a necessidade de produção de biocombustíveis (Dunkelberg, Finkbeiner, Hirschl 2014). Tendo em vista esta necessidade o Brasil desponta como um dos maiores produtores do mundo de etanol. Em território brasileiro existem 355 destilarias de bioetanol, ocupando o segundo lugar na produção mundial, com 27,8 bilhões de litros produzidos em 2018 (Neto & Gallo 2021).

O setor econômico de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar se tornou a alternativa mais eficaz para suprir o uso de combustíveis fósseis, reduzindo cerca de 80% das emissões de Gases de Efeito Estufa – GEE (De Oliveira *et al.*, 2013). Entretanto, apesar de diminuir as emissões de GEE, a cadeia produtiva de etanol promove diversos impactos ambientais associados ao manejo da cana como a contaminação do solo e da água devido ao uso de pesticidas, perda de biodiversidade pelo alto consumo de água para irrigação, além de utilizar uma grande quantidade de energia elétrica e emitir parcelas significativas de GEE (Milindi, Nsenuka, Chopra 2024).

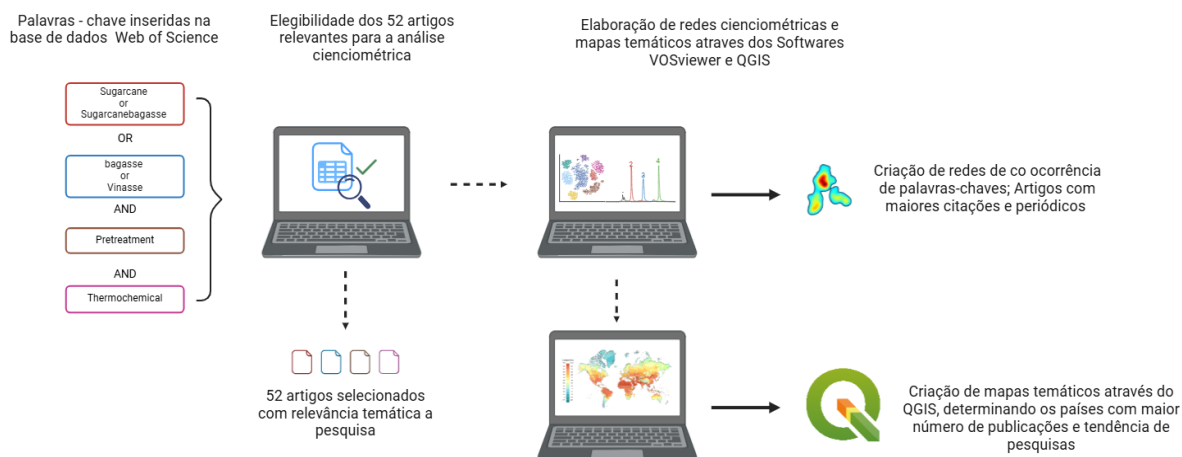
O reaproveitamento energético através da queima do bagaço de cana-de-açúcar para a geração de energia térmica ou elétrica cumprem com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7 e 12, dos quais permitem o acesso à energia limpa e acessível, além de estimular o consumo e produção responsáveis. Embora seja uma prática sustentável, esta promove a emissão de diversas substâncias prejudiciais ao meio ambiente, como Carbonos Orgânicos Voláteis-COV, monóxido de carbono, material particulado e cinzas (Cevallos-Molina *et al.*, 2023; Michael & Moussa 2021; ONU, 2015).

Dessa maneira, a Cientometria surge como ferramenta de análise de trabalhos específicos voltados ao tema estudado. Além disso, permite acompanhar a evolução da ciência, identificando padrões, tendências e lacunas na produção do conhecimento. Por meio de métricas e indicadores, auxilia na alocação eficiente de recursos e no direcionamento de investimentos em pesquisa (Corrêa *et al.*, 2024).

## METODOLOGIA

Este trabalho fundamentou-se em uma análise cientiométrica sobre os métodos de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar, cujo objeto de análise foi a produção científica veiculada em periódicos indexados na Base de Dados Web of Science, através da plataforma digital CapesCafe. A metodologia proposta constituiu-se em duas etapas: I. Realização de pesquisa e coleta de dados; e II. análise cientiométrica (Figura 01).

**Figura 01:** Sequência metodológica para análise cientiométrica



Fonte: Própria (2025)

A busca dos documentos ocorreu no dia 31 de janeiro de 2025 e para isso, no critério de identificação, foram usadas as seguintes palavras-chave (indicadores) em inglês: (*sugarcane or "sugarcane bagasse" or bagasse or vinasse*) and *pretreatment and thermochemical*. A busca foi efetuada por título do artigo, resumo e palavras-chave (*article title, abstract, Keywords*), sendo encontrados 102 documentos. Uma leitura inicial dos temas e resumos foi realizada para a elegibilidade dos artigos que seriam utilizados. O intuito desta seleção foi filtrar os documentos que apresentavam estudos sobre os tipos de pré-tratamentos destinados ao bagaço de cana-de-açúcar. Dessa maneira, após a separação foram escolhidos 52 artigos que continham as informações desejadas.

## ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA

A aplicação da análise cienciométrica é necessária para realizar a identificação de tendências estratégicas sobre o tema proposto, realizando o rastreamento de padrões de temas de pesquisas potenciais, autores influentes, resultados significativos e fatores relevantes. Dessa maneira, o uso de ferramentas como o software *VOSviewer* é primordial para um mapeamento seguro e eficaz (Tushar *et al.*, 2023).

Neste estudo foram construídas redes de co-ocorrências de informações através dos metadados obtidos dos trabalhos selecionados, o *Vosviewer* versão 1.6. 18 foi o software utilizado para construção e interpretação destes dados. Assim, as informações contidas na base de dados *Web o Science* foram exportadas para o software para que a análise fosse realizada.

A análise cienciométrica deste documento realizou uma apuração dos países que mais publicam artigos sobre o tema estudado, as suas tendências de pesquisa, as palavras-chaves mais utilizadas, além de evidenciar os documentos mais citados, sendo estes mais influentes em

trabalhos subsequentes e os periódicos mais relevantes na publicação de artigos relacionados. Para melhoria e organização visual, o software QGIS foi escolhido para realizar a elaboração de mapas geográficos a partir dos dados obtidos na pesquisa.

Por fim, foi realizada uma análise de tendência do tema abordado. Dessa maneira, os dados sobre a quantidade de artigos publicados anualmente foram exportados para o software *Microsoft Excel*, onde foi calculado a soma das publicações realizadas ano a ano, permitindo analisar a evolução do tema ao longo do tempo. Além disso, todos os títulos e resumos foram exportados para este software para análise de pesquisas realizadas pelos países responsáveis pelas publicações dos artigos selecionados, ajudando a entender a linha de estudos de cada território.

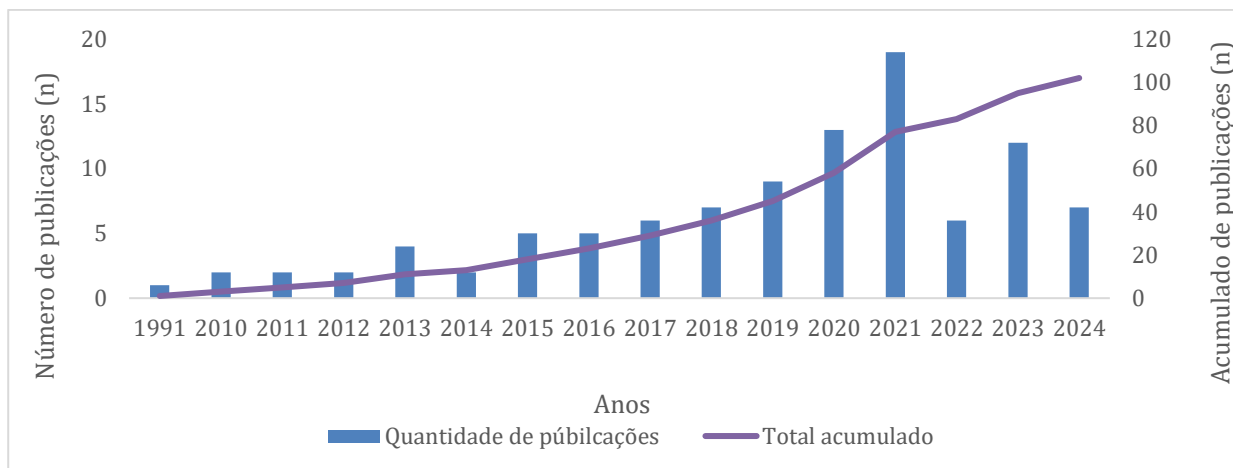
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS ESTUDADOS

Com base na metodologia descrita (Figura 1), 102 artigos foram encontrados no banco de dados *Web of Science* com as palavras-chave combinadas e os operadores booleanos: “AND” e “OR”, determinando a busca em: “(*sugarcane or "sugarcane bagasse" or bagasse or vinasse*) and pretreatment and thermochemical”. Após análise inicial, 52 artigos foram selecionados correspondendo a 48% da amostra inicial coletada.

A análise temporal demonstrou 102 artigos publicados no período de 33 anos, contendo uma média de 3,09 por ano. O primeiro foi publicado em 1991, já o segundo apenas em 2010, indicando um hiato de 19 anos. A maior quantidade de publicações ocorreu em 2021, com 19 publicações (Figura 02). Entre 2010 e 2021 houve crescimento exponencial do interesse pelo tema. Nos anos posteriores houve uma queda nas publicações, porém, manteve-se a relevância devido à demanda por novas tecnologias de pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos, visando reduzir impactos ambientais. Assim, os métodos de pré-tratamento do bagaço seguem em evidência na pesquisa científica.

**Figura 02:** Sequência cronológica dos artigos publicados entre os anos de 1991 e 2024

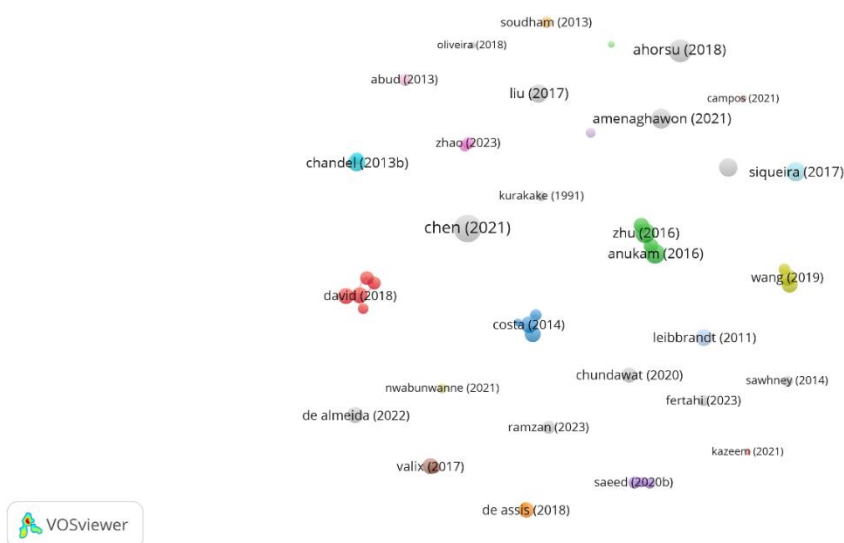


**Fonte:** Própria (2025)

## IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS DOCUMENTOS MAIS CITADOS

Com a utilização do *VOSviewer* foram criadas redes de análise dos documentos e autores mais citados com o tema pesquisado. Os resultados obtidos foram representados através de clusters de diferentes tamanhos, nos quais apresentaram a maior relevância e maior quantidade de citações de acordo com o tamanho do cluster (Figura 03). Dessa maneira, verificou-se uma fraca conexão entre os autores, o que indica uma grande diversidade nos temas envolvidos. Este cenário pode estar relacionado tanto à especificidade das abordagens adotadas quanto à proximidade temporal das publicações, limitando o intercâmbio entre os autores.

**Figura 03:** Rede de autores com mais trabalhos citados



**Fonte:** Própria (2025)

Após a primeira etapa, realizou-se a avaliação dos dados obtidos, foi necessário a

utilização do software *Microsoft Excel* elencando e distribuindo os 10 autores com mais influência do tema estudado de acordo com o número de citações, cm o respectivo DOI da publicação, o país e o ano das publicações, (Tabela 01). Portanto, esta avaliação serviu para verificar a influência dos trabalhos publicados, além de servir como avaliação dos respectivos fatores de impacto dos trabalhos realizados.

**Tabela 01:** Análise dos 10 documentos mais citados

| <b>Autor/ ano da publicação</b> | <b>Origem da publicação</b> | <b>DOI</b>                                                                                                        | <b>Nº de citações</b> |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Chen <i>et al.</i> , 2021       | Taiwan                      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887">https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887</a>               | 497                   |
| Ahorsu, Medina, Constanti, 2018 | Espanha                     | <a href="https://doi.org/10.3390/en11123366">https://doi.org/10.3390/en11123366</a>                               | 227                   |
| Anukam <i>et al.</i> , 2016     | África do Sul               | <a href="https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046">https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046</a>               | 118                   |
| Zhu <i>et al.</i> , 2016        | Reino Unido                 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.bio.mbioe.2016.06.017">https://doi.org/10.1016/j.bio.mbioe.2016.06.017</a>     | 116                   |
| Amenagawon <i>et al.</i> , 2021 | Nigéria                     | <a href="https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5">https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5</a>               | 112                   |
| Siqueira <i>et al.</i> , 2017   | Brasil                      | <a href="https://doi.org/10.1186/s13068-017-0860-7">https://doi.org/10.1186/s13068-017-0860-7</a>                 | 99                    |
| Biswas, Uellendahl, Ahring 2015 | Estados Unidos              | <a href="https://doi.org/10.1007/s12155-015-9590-5">https://doi.org/10.1007/s12155-015-9590-5</a>                 | 80                    |
| Liu, Chmely, Abdoulmoumine 2017 | Estados Unidos              | <a href="http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00258">http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00258</a> | 75                    |
| Chandel <i>et al.</i> , 2013    | Brasil                      | <a href="https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-4">https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-4</a>                         | 70                    |
| Costa <i>et al.</i> , 2014      | Brasil                      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.060">https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.060</a>                 | 59                    |

**Fonte:** Própria (2025)

Ao analisar cada documento, pode-se observar que os artigos avaliados apontam diferentes metodologias de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar. A utilização destas práticas visam o reuso dos resíduos gerados em processos industriais promovendo principalmente a substituição de combustíveis fósseis e aplicação do conceito de sustentabilidade, destacando o reuso de resíduos obtidos na cadeia produtiva.



Dessa maneira, a torrefação é apresentada como um dos métodos eficazes que suprem as desvantagens apresentadas por resíduos lignocelulolíticos aplicados para a produção de energia térmica, eletricidade e gás de síntese. Além disso, a utilização de resíduos torrefeitos promovem a diminuição de emissões de CO<sub>2</sub>, se destacando como matéria prima para a produção de bioenergia (Chen *et al.*, 2021).

A explosão a vapor é um método eficiente com um consumo energético baixo e com pouca utilização de reagentes, entretanto sua eficácia é dependente de fatores como temperatura, tempo de residência, tamanho da partícula e umidade. Por outro lado, os subprodutos gerados podem dificultar as próximas etapas do processo (Amenagawon *et al.*, 2021). Já a explosão úmida, é baseada em temperatura, oxigênio e tempo de residência apresenta alta eficiência no processo de hidrólise enzimática, baixa geração de subprodutos, boa versatilidade e boa viabilidade industrial (Biwas, Uellendahl e Ahring, 2015).

Pré-tratamentos que utilizam ácidos e alcalinos com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> são utilizados em sua maioria para romper a estrutura lignocelulósica do bagaço. Assim, o acesso a celulose e hemicelulose é facilitado. Entretanto, tais métodos são mais lentos e demandam mais energia (Zhu *et al.*, 2016; Ahorsu; Medina e Constantí, 2018). Além disso, a relação sólido:líquido de 1:10 (bagaço: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/NaOH) é apresentada como a ideal diminuir a resistência da parede celular e intensificar a hidrólise da celulose (Siqueira *et al.*, 2017).

Além de métodos térmicos, técnicas físicas de densificação como a paletização e a briquetagem são essenciais para superar as limitações físicas do bagaço, tais como sua baixa densidade, alta umidade e heterogeneidade. Estas práticas permitem uniformizar o tamanho e a forma das partículas, melhorar o valor calorífico e reduzir a incidência de impurezas, fatores cruciais para melhorar o desempenho dos sistemas termoconversores (Anukam *et al.*, 2016).

No que diz respeito a eficácia na remoção de metais alcalinos e de alguns contaminantes de cloro, a lixiviação por água demonstra ser um método eficiente, caracterizando-se na ausência de produtos químicos e com baixo custo de energia. Este método se aplica a diversos tipos de biomassa promovendo diferentes benefícios. Quando aplicado ao bagaço de cana-de-açúcar promove uma redução do teor de cinzas, além de garantir uma perda de massa entre 18% e 20% (Liu, Chmely e Abdoulmomine, 2017). Além disso, o pré-tratamento hidrotérmico também surge como técnica eficaz, apresentando benefícios para posterior Digestão Anaeróbia (DA), como maior produção de metano (197,5 L CH<sub>4</sub>/ kg de bagaço), maior eficiência de hidrólise anaeróbica (14,8%) e maior biodegradabilidade anaeróbica (27,4%) (Costa *et al.*, 2014).

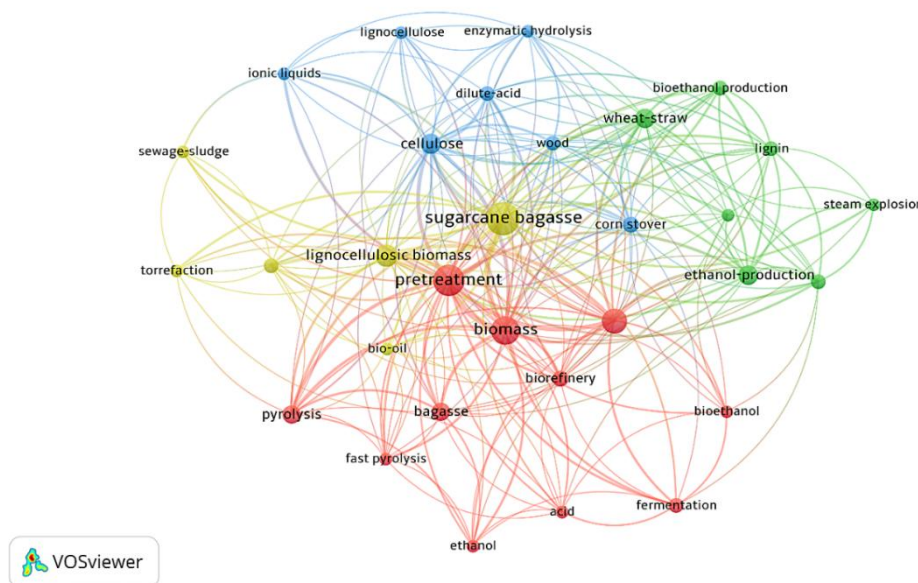
Diante de alguns casos, há a necessidade de um pré-tratamento mais agressivo e preciso,

portanto, a utilização Ácido Oxálico (AO) como método de pré-tratamento é empregado. A vantagem da sua utilização está na completa solubilização da hemicelulose liberando açúcares e facilitando a acessibilidade da celulignina para posteriores processos (Chandel *et al.*, 2013).

## CO OCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE

A co-ocorrência revelou a interação entre as palavras-chaves escolhidas nos 52 documentos selecionados. A análise demonstrou a presença de 31 termos, nos quais foram selecionados os mais utilizados com a presença mínima de 4 ocorrências (Figura 04). O termo mais utilizado foi “*sugarcane bagasse*”, no qual obteve o maior destaque sendo o mais destacado, sendo registrado 26 vezes. Isto demonstra a centralidade da palavra-chave na pesquisa realizada, demonstrando ser o tema principal dos documentos analisados. Outros termos também obtiveram destaque, sendo: “*pretreatment*” – registrado 23 vezes e “*biomass*” – registrado 19 vezes.

**Figura 04:** Rede de coocorrência de palavras-chaves encontradas nos artigos analisados



Fonte: Própria (2025)

Os resultados obtidos da rede de dados são apresentados em 4 clusters, organizados nas cores:

**Vermelho - cluster 1:** composto por 11 palavras-chaves. Este cluster foca exclusivamente na conversão energética da biomassa, tendo como destaque a pirólise e produção de bioetanol. A conexão neste cluster evidencia o interesse em rotas bioquímicas e

termoquímicas para valorização do bagaço.

**Verde – cluster 2:** contém 7 palavras-chaves e trata sobre a produção de bioetanol e tem o método de explosão a vapor como destaque. Pode-se evidenciar a importância da fração lignina na eficiência e sucesso do processo, além disso demonstra conexões com palavras-chaves como “*wheat straw*”, isto indica que em alguns artigos as tecnologias utilizadas no processo de pré-tratamento são utilizadas para outros tipos de biomassas.

**Azul - cluster 3:** com 7 palavras-chaves, nas quais descrevem a representatividade da hidrólise enzimática e química, isto determina que a tendência deste cluster está na utilização de produtos químicos como ácidos diluídos e líquidos iônicos. A presença de palavras-chave como “*wood*” e “*corn stover*” demonstra que os estudos apresentados não são exclusivos do bagaço da cana, abrangendo uma diversidade de biomassas lignocelulósicas.

**Amarelo – cluster 4:** é composto por 6 palavras-chaves, determinando a importância de estudos voltados a estabilização térmica da biomassa, e possíveis aplicações de resíduos para a valorização energética do bagaço.

Determinando a importância do tema pesquisado, foram elencadas as 10 palavras-chaves mais utilizadas pelos autores determinam a ligação entre o conceito de pré-tratamento e diferentes tipos de biomassa lignocelulolíticas (Tabela 02).

**Tabela 02:** Ranking das 10 palavras-chaves mais utilizadas e suas ocorrências

| Palavra-chave utilizada | Número de ocorrência | Número de links |
|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Sugarcane bagasse       | 26                   | 9               |
| Pretreatment            | 23                   | 9               |
| Biomass                 | 19                   | 8               |
| Enzymatic - hydrolysis  | 15                   | 9               |
| Lignocellulosic biomass | 12                   | 8               |
| Cellulose               | 10                   | 9               |
| Ethanol-production      | 9                    | 8               |
| Wheat-Straw             | 9                    | 7               |
| Pyrolysis               | 8                    | 7               |
| Bagasse                 | 8                    | 8               |

Fonte: Própria (2025)

A relação determinada na Tabela 02 descreve como o bagaço de cana-de-açúcar está

diretamente ligado aos conceitos de produção de etanol, celulose, biomassa lignocelulolíticas, além de estar relacionado a processos de pré-tratamento como a hidrólise enzimática e o método de conversão de biomassa em biocombustível (pirólise).

As conexões entre as palavras-chave de cada um dos quatro clusters ilustram a coocorrência dessas palavras em diversos artigos. As interações entre clusters evidenciam uma forte relação temática entre os subtemas analisados.

## PERIÓDICOS COM MAIOR RELEVÂNCIA

Com o auxílio do *Microsoft excel*, foram analisados os dados correspondentes aos 10 periódicos responsáveis pela maior quantidade de artigos publicados em relação ao tema proposto. A seleção ocorreu através da elegibilidade dos resultados obtidos pelo *VOSviewer*, foram utilizados dois critérios de elegibilidade, o primeiro se trata do número de documentos publicados pela revista em relação ao tema estudado, o segundo se trata da quantidade de citações deste periódico (Tabela 03).

**Tabela 03:** Ranking dos 10 periódicos com maior relevância no tema estudado

| Periódicos                                         | Origem            | Doc.<br>publicados | Nº de citações |
|----------------------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| Biotechnology for<br>biofuels                      | Estados<br>Unidos | 5                  | 245            |
| Bioresource<br>technology                          | Reino<br>Unido    | 5                  | 156            |
| Biomass and<br>bioenergy                           | Reino<br>Unido    | 4                  | 170            |
| Energy & fuels                                     | Estados<br>Unidos | 3                  | 98             |
| Energies                                           | Suíça             | 2                  | 233            |
| Industrial crops<br>and products                   | Reino<br>Unido    | 2                  | 36             |
| Progress in<br>energy and<br>combustion<br>science | Reino<br>Unido    | 1                  | 497            |
| Renewable &<br>sustainable<br>energy reviews       | Reino<br>Unido    | 1                  | 118            |
| Environment<br>development and<br>sustainability   | Países<br>baixos  | 1                  | 112            |

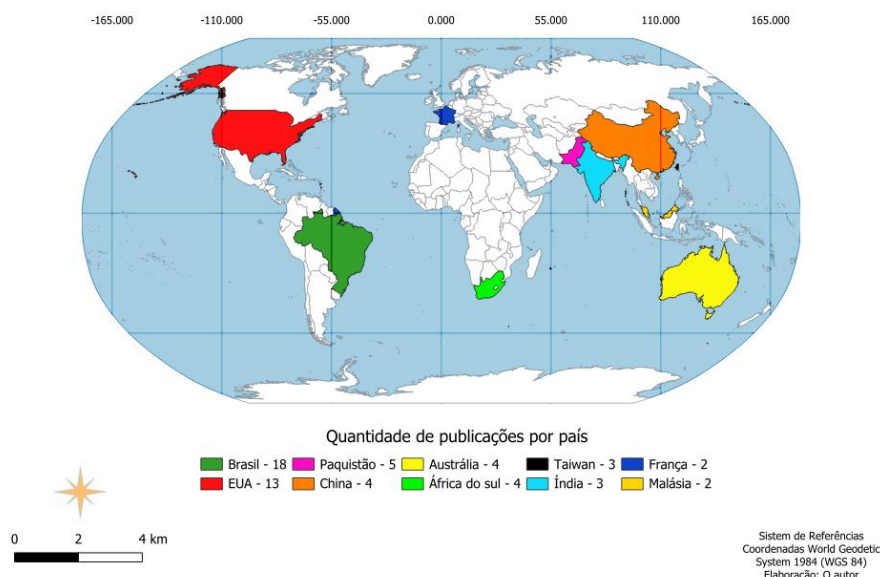
Fonte: Própria (2025)

Todos os periódicos analisados encontram-se na Europa e nos Estados Unidos, isto demonstra a importância que estes locais desempenham na pesquisa científica, elegendo-os como os principais países quanto a produção científica.

## DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E TENDÊNCIAS DAS PUBLICAÇÕES

Na distribuição geográfica dos artigos de coautoria, notou-se que os 52 artigos selecionados foram publicados em 31 países diferentes, tendo o Brasil como destaque com 18 publicações correspondendo a 33% das publicações, outros países com destaque são os Estados Unidos (13 publicações), Paquistão (5 publicações) e China (4 publicações). O top 10 de maiores contribuições acadêmicas é completado com Austrália, África do Sul, Taiwan, Índia, França e Malásia (Figura 5).

**Figura 05:** Distribuição geográfica dos países com maior número de publicações, citações e tendências



Fonte: Própria (2025)

Além disso, também foi investigada a tendência de pesquisa de cada país, a fim de entender a linha de produção científica dos países selecionados (Figura 06).

**Figura 06:** Distribuição geográfica das tendências de pesquisas científicas do tema estudado



Fonte: Própria (2025)

A partir da análise de tendência dos trabalhos elaborados no Brasil, há uma inclinação para os estudos relacionados a conversão de biomassa e produção de etanol de primeira e segunda geração. Os estudos refletem uma preocupação dos autores com a sustentabilidade do processo produtivo, o número elevado de citações dos trabalhos elaborados no território brasileiro reflete a importância que o setor sucroenergético desempenha no país.

Isto é refletido a partir da expressiva produção de cana-de-açúcar no país, estimada em 750 milhões de toneladas anuais (Magalhães *et al.*, 2019). O reaproveitamento dos resíduos gerados por este setor econômico reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui os impactos ambientais associados a produção de etanol. Isto reflete o compromisso industrial com a sustentabilidade, no qual a biotecnologia destaca-se como uma ferramenta promissora, proporcionando métodos alternativos e eficientes de pré-tratamentos (Costa *et al.*, 2014; Yaverino-Gutiérrez *et al.*, 2024).

Com relação aos Estados Unidos, nota-se que ele foi o sétimo mais citado em estudos relacionados a alternativas de pré-tratamento, a tendência de pesquisa dos norte-americanos estão voltadas a inovação científica de tecnologia avançada e produção de energia sustentável. Os métodos abordados são constituídos de tratamentos termoquímicos avançados e métodos biotecnológicos avançados através de engenharia genética.

Os métodos adotados pelos pesquisadores analisados demonstram a concentração em

novas tecnologias, como a Expansão de Fibras de Amônia (AFEX), explosão de vapor, ultrassom e NaOH, no qual visam o reaproveitamento dos resíduos através da produção de biogás. Tais métodos são utilizados a fim de introduzir inovações sustentáveis ao setor agropecuário (Mokomele *et al.*, 2019). A eficiência energética promovida por reuso de resíduos como o bagaço promove a diminuição de impactos ambientais, a adoção de pré-tratamentos baseados em utilização de microrganismos concretiza este conceito. Dessa maneira, o estímulo da degradação da lignocelulose por microrganismos modificados geneticamente facilitam a produção de biogás através de açúcares fermentáveis presentes no bagaço de cana-de-açúcar (Sawhney & Preston, 2014).

O Paquistão apresentou uma baixa quantidade de artigos citados tendo 53, este cenário é reflexo da abordagem de pesquisa adotada pelo país, no qual adota o desenvolvimento de métodos de reutilização de resíduos para produção de biocombustíveis a partir de fontes locais.

O conceito de pré-tratamento utilizado nos artigos estudados abordam a análise de métodos térmicos e químicos, além de analisar a introdução de outros compostos junto com o bagaço de cana-de-açúcar, tendo a finalidade de facilitar a quebra estrutural do resíduo.

Um pré-tratamento adequado é responsável por tornar um resíduo como o bagaço em um recurso energético ambientalmente sustentável. A utilização de métodos térmicos associados a outros compostos como líquidos iônicos facilitam a quebra da ligação intermolecular do bagaço, além de promover a abertura da estrutura lignocelulósica para dissolução (Saeed, Saleem & Durrani, 2020). Este tipo de processo está diretamente ligado a otimização de sistemas energéticos, de modo que a utilização de líquidos iônicos reduz a volatilidade e o teor de cinzas, promovendo a degradação térmica de forma mais rápida e acentuada (Said *et al.*, 2021).

## CONCLUSÃO

A análise cienciométrica é uma ferramenta utilizada para analisar a produção científica em diversos temas. O presente trabalho avaliou a evolução e as pesquisas relacionadas aos métodos de pré-tratamentos do bagaço de cana-de-açúcar, as principais contribuições científicas, os países com maiores contribuições para o tema abordado e suas tendências de pesquisa. Observou-se que no intervalo de 30 anos houve um crescimento exponencial nas pesquisas, demonstrando uma evolução científica positiva relacionadas ao tema. Os artigos analisados demonstraram uma tendência aos processos de pré-tratamento físico-químicos aplicados a metodologias seguras e replicadas em escalas laboratoriais e industriais. Além disso, observa-se o foco em evoluir as tecnologias adotadas, a utilização da biotecnologia e associação

de métodos para otimizar os processos de pré-tratamento. Em relação aos países que mais publicaram estudos, o Brasil lidera com a maior contribuição, em seguida os Estados Unidos e o Paquistão completam o ranking com maiores publicações, cada país de forma distinta contribui significativamente com pesquisas, tendo como objetivo promover métodos sustentáveis de reutilização dos resíduos gerados pelo processo produtivo de etanol. Por fim, este estudo demonstra a importância dos métodos de pré-tratamento para gestão de resíduos originados nos processos produtivos da indústria sucroenergética a partir da cana-de-açúcar, demonstrando a importância do correto gerenciamento de resíduos. Além disso, evidencia o compromisso mundial com o tema, contendo estudos em todos os continentes do planeta, demonstrando e aplicando técnicas eficazes para reaproveitamento do bagaço.

## REFERÊNCIAS

AHORSU, R; MEDINA, F; CONSTANTÍ, M. Significance and challenges of biomass as a suitable feedstock for bioenergy and biochemical production: A review. **Energies**, v. 11, n. 12, p. 3366, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11123366>

ALVES, Q. L; FRANCO, N. P; ZANETTI, L. A. W; GÓES, C. B. Desempenho da produção da cultura da cana-de-açúcar nos principais estados produto. **BioEng**. V. 15. N. 2. P. 303-317. (2021). <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p303-317>

AMENAGHAWON, A. N; ANYALEWECHI, C. L; OKIEIMEN, C. O; KUSUMA, H. S. BIOMASS pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. **Environment, development and sustainability**, p. 1-55, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5>

ANUKAM, A; MAMPHWELI, S; REDDY, P; MEYER, E; OKOH, O. Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 775-801, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>

BARBOSA, I.P; SZKLO, A; GURGEL, A. Sugarcane ethanol companies in Brazil: Growth challenges and strategy perspectives using Delphi and SWOT-AHP methods. **Biomass and Bioenergy**. V. 158. P. 106368. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106368>



BISWAS, R.; UELLEND AHL, H; AHRING, B. K. Wet explosion: a universal and efficient pretreatment process for lignocellulosic biorefineries. **BioEnergy Research**, v. 8, p. 1101-1116, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9590-5>

CEVALLOS-MOLINA, E. R; VÉLEZ-VÉLEZ, T. V; BAQUERIZO-CRESPO, R. J; GÓMEZ-SALCEDO, Y. Anaerobic treatment of sugarcane bagasse. An opportunity for sustainability in rural environments? **Environmental Advances**, v. 13, p. 100427, 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100427>

CHANDEL, A. K; ANTUNES, F. F.; ANJOS, V; BELL, M. J; RODRIGUES, L. N; SINGH, O. V; DA SILVA, S. S. Ultra-structural mapping of sugarcane bagasse after oxalic acid fiber expansion (OAFEX) and ethanol production by *Candida shehatae* and *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology for biofuels**, v. 6, p. 1-15, 2013. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-4>

CHEN, W. H; LIN, B. J; LIN, Y. Y.; CHU, Y. S; UBANDO, A. T; SHOW, P. L; Pétrissans, M. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 82, p. 100887, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100887>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira, safra 2024/25 3º levantamento. P. 1-55. N.3. Brasília, nov. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.

CORRÊA, N. F; PARANHOS FILHO, A. C; DE OLIVEIRA RIBEIRO, V; DIODATO, J. O. Scientometrics and bibliometrics of geotechnologies and sanitation study in the porto murinho region. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 1-14, 2024.  
<https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-066>

COSTA, A. G; PINHEIRO, G. C; PINHEIRO, F. G. C; DOS SANTOS, A. B; SANTAELLA, S. T; LEITÃO, R. C. The use of thermochemical pretreatments to improve the anaerobic biodegradability and biochemical methane potential of the sugarcane bagasse. **Chemical Engineering Journal**, v. 248, p. 363-372, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.060>

DE OLIVEIRA, B. G; CARVALHO, J. L. N; CERRI, C. E. P; CERRI, C. C; FEIGL, B. J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200, p. 77-84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.005>

DUNKELBERG, E; FINKBEINER, M; HIRSCHL, B. Sugarcane ethanol production in Malawi: Measures to optimize the carbon footprint and to avoid indirect emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, p. 37-45, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.006>

EL BARI, H; HABCHI, S. Enhancing biogas production from vinasse through optimizing hydraulic retention time and added load using the response surface methodology. **Heliyon**, v. 10, n. 19, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38967>

JAIN, S; MAHALINGAM, H. Pretreatment of lignocellulosic biomass waste mixtures using a low-cost ionic liquid. **Sustainable Chemistry for Climate Action**, v. 5, p. 100052, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2024.100052>

LIU, Q; CHMELY, S. C; ABDOULMOUMINE, N. Biomass treatment strategies for thermochemical conversion. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 4, p. 3525-3536, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00258>

MAGALHÃES JR, A. I; DE CARVALHO, J. C; DE MELO PEREIRA, G. V; KARP, S. G; CÂMARA, M. C; MEDINA, J. D. C; SOCCOL, C. R. Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 6, p. 1505-1519, 2019. <https://doi.org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1002/bbb.2048>

MATSUEDA, Y; ANTUNES, E. A Review of Current Technologies For The Sustainable Valorisation of Sugarcane Bagasse. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 114900, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114900>

MICHEAL, A; MOUSSA, R. R. Investigating the economic and environmental effect of integrating sugarcane bagasse (SCB) fibers in cement bricks. **Ain shams Engineering journal**, v. 12, n. 3, p. 3297-3303, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.012>

MILINDI, P. S; NSENUKA, E. E; CHOPRA, S. S. Driving sustainability in the sugarcane industry: Life Cycle Assessment of conventional and emerging spraying technologies in Tanzania. **Science of The Total Environment**, v. 955, p. 176963, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176963>

MOKOMELE, T; DA COSTA SOUSA, L; BALAN, V; VAN RENSBURG, E; DALE, B. E; GÖRGENS, J. F. Incorporating anaerobic co-digestion of steam exploded or ammonia fiber expansion pretreated sugarcane residues with manure into a sugarcane-based bioenergy-livestock nexus. **Bioresource technology**, v. 272, p. 326-336, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.049>

NETO, J. V. S; GALLO, W. L. Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110281, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110281>

RODRIGUES, G. T; MACHADO, L. R. Life Cycle Assessment of the Sugarcane Supply Chain in the Brazilian Midwest Region. **Sustainability**. V. 16. N. 1. P. 285. (2023). <https://doi.org/10.3390/su16010285>

SAEED, S; SALEEM, M; DURRANI, A. Thermal performance analysis of sugarcane bagasse pretreated by ionic liquids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 312, p. 113424, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113424>

RODRÍGUEZ-MACHÍN, L; PILOTO-RODRÍGUEZ, R; RUBIO-GONZÁLEZ, A; ITURRIA-QUINTERO, P. J; RONSSE, F. Pretreatment of sugarcane residues for combustion in biomass power stations: A review. **Sugar Tech**, v. 24, n. 3, p. 732-745, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01091-2>

SAEED, S; SALEEM, M; DURRANI, A; HAIDER, J; RIAZ, M; SAEED, S; LEE, M. Determination of kinetic and thermodynamic parameters of pyrolysis of coal and sugarcane bagasse blends pretreated by ionic liquid: A step towards optimization of energy systems. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2544, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14092544>

SAWHNEY, N; PRESTON, J. F. GH51 arabinofuranosidase and its role in the methylglucuronoarabinoxylan utilization system in *Paenibacillus* sp. strain JDR-2. **Applied and environmental microbiology**, v. 80, n. 19, p. 6114-6125, 2014. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1128/AEM.01684-14>

SILVA, L. V. D; SANTOS-SILVA, J. C. D; RHODEN, S. A; SOUZA, A. L. F. D; Mapeamento de produções científicas (1997-2021) sobre bioaerossóis associados a estações de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 909-917. (2022). <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210276>

SIQUEIRA, G; ARANTES, V; SADDLER, JN, FERRAZ, A; MILAGRES, AM. Limitation of cellulose accessibility and unproductive binding of cellulases by pretreated sugarcane bagasse lignin. **Biotechnology for biofuels**, v. 10, p. 1-12, 2017. <https://doi.10.1186/s13068-017-0860-7>

SOUZA, C. C; JUNIOR, C. A. B. J; CRISTALDO F. M; CASTELÃO, A. R; FRAINER, M. D. Aplicação de inteligência artificial na previsão de produções de açúcar e etanol, no período de 2020 até 2025, nas macrorregiões Centro-Sul e Norte-Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 15. N.05. P. 2200-2211. (2022). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2200-221>.

TUSHAR, Q; SUN, W; ZHANG, G; NAVARATNAM, S; HOU, L; GIUSTOZZI, F. Evolution in impacts assessment for managing and recycling of waste: a scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 139685, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139685>

YAYERINO-GUTIERREZ, M. A; RAMOS, L.; ASCENCIO, J. J; CHANDEL, A. K. Enhanced Production of Clean Fermentable Sugars by Acid Pretreatment and Enzymatic Saccharification of Sugarcane Bagasse. **Processes**, v. 12, n. 5, p. 978, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12050978>

ZHU, Z; REZENDE, C. A; SIMISTER, R; MCQUEEN-MASON, S. J; MACQUARRIE, D. J., POLIKARPOV, I; GOMEZ, L. D. Efficient sugar production from sugarcane bagasse by microwave assisted acid and alkali pretreatment. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 269-278, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.017>