



ROTAS BIOTECNOLÓGICAS PARA A VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO PALHA DE ARROZ: UM PANORAMA GLOBAL SOBRE O USO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS COMO ESTRATÉGIA DE PRÉ-TRATAMENTO

RUTAS BIOTECNOLÓGICAS PARA LA VALORIZACIÓN DEL RESIDUO DE PAJA DE ARROZ: UN PANORAMA GLOBAL SOBRE EL USO DE ÁCIDOS ORGÁNICOS COMO ESTRATEGIA DE PRETRATAMIENTO

BIOTECHNOLOGICAL ROUTES FOR THE VALORIZATION OF RICE STRAW WASTE: A GLOBAL OVERVIEW OF THE USE OF ORGANIC ACIDS AS A PRETREATMENT STRATEGY

Apresentação: Comunicação Oral

Flávio Lucas Azevedo Ferreira¹; Liliana Andréa dos Santos²; Tatiana Souza Porto³ André Felipe de Melo Sales Santos⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0012>

RESUMO

A palha de arroz, subproduto abundante do beneficiamento do cereal, representa uma importante fonte de biomassa lignocelulósica ainda subaproveitada, sobretudo em países com elevada produção agrícola. Nos últimos anos, cresceu o interesse científico na valorização deste resíduo, principalmente por meio de rotas biotecnológicas alternativas e mais sustentáveis para geração de, por exemplo, biocombustíveis e bioprodutos. A dificuldade da ampliação de sua valorização reside nas suas características lignocelulósicas, sendo necessário o uso de processos de pré-tratamento químicos, físicos e biológicos. Nesse contexto, o uso de ácidos orgânicos (processo químico), como o acético e o cítrico, tem se mostrado uma alternativa promissora quando comparada ao uso de ácidos minerais convencionais no pré-tratamento da palha de arroz, devido à aspectos como a sua menor toxicidade, seu melhor desempenho ambiental e maior compatibilidade com processos fermentativos. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre as pesquisas que abordam o uso de ácidos orgânicos no prétratamento da biomassa de arroz, destacando as principais tendências, autores, países e periódicos relacionados ao tema. O levantamento de dados foi realizado na base Scopus, abrangendo o período de 2005 a 2025, e analisado com o auxílio do software VOSviewer®, por meio de redes de coocorrência de palavras-chave, coautoria e citações. Utilizou a combinação de palavras-chave e operadores booleanos: “*pre-treatment*” OR “*pretreatment*” OR “*chemical pretreatment*” AND “*citric*” OR “*acetic*” AND “*acid*” AND “*rice straw*” OR “*rice husk*” OR “*rice hull*”, resultando em 141 documentos, os quais foram analisados e filtrados para que ocorresse o enquadramento eficiente no âmbito da pesquisa, resultando em 63 documentos finais analisados. Os resultados evidenciaram aumento significativo de 550% nas publicações nos últimos 10 anos, com destaque para a China, a Índia, os Estados Unidos, a Coreia do Sul e o Irã como os países mais produtivos, em termos de pesquisas recentes sobre o uso do ácido cítrico e do ácido acético como reagentes de destaque para pesquisas de pré-tratamentos com ácidos orgânicos da palha de arroz. Concluiu-se que, nesse contexto, o tema apresenta relevância científica e ambiental crescente, integrando-se às perspectivas da bioeconomia e da química verde e no aproveitamento mais sustentável de resíduos agroindustriais, produzidos em larga escala.

¹ Engenheiro Ambiental, UFRPE, flavio.luaf@gmail.com.br

² Doutora em Engenharia Civil, UFRPE, liliana.andrea.santos@gmail.com.br

³ Doutora em Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica, UFRPE, tatiana.porto@ufrpe.br

⁴ Doutor em Engenharia Civil, UFPE, andre.felipesantos@ufrpe.br

Palavras-Chave: Biomassa lignocelulósica, hidrólise, ácido acético, ácido cítrico, produção científica.

RESUMEN

La paja de arroz, un subproducto abundante del procesamiento del arroz, representa una importante fuente de biomasa lignocelulósica que aún se encuentra subutilizada, especialmente en países con alta producción agrícola. En los últimos años, ha aumentado el interés científico por la valorización de este residuo, principalmente mediante rutas biotecnológicas alternativas y más sostenibles para la producción de biocombustibles y otros bioproductos. Sin embargo, la naturaleza recalcitrante de su estructura lignocelulósica hace necesario el empleo de procesos de pretratamiento químicos, físicos o biológicos. En este contexto, el uso de ácidos orgánicos, especialmente los ácidos acético y cítrico, ha surgido como una estrategia prometedora de pretratamiento químico en comparación con los ácidos minerales convencionales, debido a su menor toxicidad, mejor desempeño ambiental y mayor compatibilidad con los procesos fermentativos posteriores. El presente estudio tuvo como objetivo realizar un análisis bibliométrico de las investigaciones relacionadas con el uso de ácidos orgánicos en el pretratamiento de biomasa de arroz, destacando las principales tendencias de investigación, los autores, países y revistas científicas más relevantes. Los datos se obtuvieron de la base de datos Scopus, abarcando el período de 2005 a 2025, y se analizaron mediante el software VOSviewer® utilizando redes de coocurrencia de palabras clave, coautoría y citaciones. La estrategia de búsqueda combinó las palabras clave y operadores booleanos: “pre-treatment” OR “pretreatment” OR “chemical pretreatment” AND “citric” OR “acetic” AND “acid” AND “rice straw” OR “rice husk” OR “rice hull”, obteniéndose inicialmente 141 documentos. Tras el proceso de selección y aplicación de los criterios de inclusión, se analizaron 63 publicaciones. Los resultados evidenciaron un aumento del 550 % en las publicaciones científicas durante los últimos 10 años., destacándose China, India, Estados Unidos, Corea del Sur e Irán como los países con mayor producción científica. Asimismo, los ácidos cítrico y acético fueron identificados como los principales reactivos utilizados en los estudios sobre el pretratamiento de paja de arroz. Se concluye que esta línea de investigación presenta una creciente relevancia científica y ambiental, en consonancia con los principios de la bioeconomía y la química verde, favoreciendo el aprovechamiento sostenible de residuos agroindustriales producidos a gran escala.

Palabras Clave: Biomasa lignocelulósica, hidrólisis; ácido acético, ácido cítrico, producción científica.

ABSTRACT

Rice straw, an abundant by-product of rice processing, represents an important source of lignocellulosic biomass that remains underutilized, particularly in countries with high agricultural production. In recent years, scientific interest in the valorization of this residue has increased, especially through alternative and more sustainable biotechnological routes for the production of biofuels and other bioproducts. However, the recalcitrant lignocellulosic structure of rice straw requires the application of chemical, physical, or biological pretreatment processes. In this context, the use of organic acids, particularly acetic and citric acids, has emerged as a promising chemical pretreatment strategy compared with conventional mineral acids due to their lower toxicity, improved environmental performance, and greater compatibility with subsequent fermentation processes. This study aimed to perform a bibliometric analysis of research addressing the use of organic acids in the pretreatment of rice biomass, highlighting the main research trends, leading authors, countries, and scientific journals in this field. Data were retrieved from the Scopus database covering the period from 2005 to 2025 and analyzed using VOSviewer® through keyword co-occurrence, co-authorship, and citation network analyses. The search strategy combined the keywords and Boolean operators: “pre-treatment” OR “pretreatment” OR “chemical pretreatment” AND “citric” OR “acetic” AND “acid” AND “rice straw” OR “rice husk” OR “rice hull”, resulting in 141 documents. After screening and applying the inclusion criteria, 63 publications were selected for analysis. The results revealed a 550% increase in scientific publications over the last 10 years., with China, India, the United States, South Korea, and Iran standing out as the leading contributors. Citric and acetic acids were identified as the most prominent organic reagents in rice straw pretreatment studies. Overall, the findings demonstrate the growing scientific and environmental relevance of this research area, which is closely aligned with the principles of the bioeconomy and green chemistry and contributes to the sustainable utilization of agro-industrial residues.

Keywords: lignocellulosic biomass, hydrolysis, acetic acid, citric acid, scientific production.

INTRODUÇÃO

O avanço das pesquisas voltadas à conversão de biomassa lignocelulósica em produtos de valor agregado, como biocombustíveis, biopolímeros e biofertilizantes, tem se consolidado como um campo estratégico para o desenvolvimento sustentável e para a transição energética mundial (Fan, 2025; Marecos, 2025). Nesse contexto, a busca por alternativas tecnológicas que permitam o aproveitamento de resíduos agroindustriais vem ganhando destaque, sobretudo em cadeias produtivas de grande relevância socioeconômica em nível mundial, como a do arroz. Ao contrário da soja, onde uma fatia gigantesca da produção global é exportada, a maior parte do arroz produzido no mundo é consumida dentro dos próprios países produtores, sobretudo na Ásia. Apenas cerca de 8% a 10% do arroz produzido globalmente é comercializado internacionalmente. A palha e a casca de arroz, geradas em grandes quantidades no processamento do cereal, representam um desafio ambiental e logístico devido à sua disposição inadequada e queima a céu aberto, práticas que contribuem para a emissão de gases de efeito estufa e para a degradação ambiental (Rody, 2023). Segundo Mussatto, Roberto (2002), a produção de 1 tonelada de arroz gera cerca de 400 kg de palha no campo e 200 kg de casca na indústria. A cadeia do arroz gera mais de 600 kg de resíduos lignocelulósicos por tonelada de grão comercializável.

A biomassa lignocelulósica presente nesses resíduos é composta majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, cuja estrutura rígida e complexa dificulta sua biodegradação natural. Essa recalcitrância estrutural é intensificada no caso da palha de arroz, que apresenta elevado teor de lignina e sílica, elementos que conferem resistência física e química à parede celular vegetal (De Oliveira, 2021; El-Sayed, 2025). Assim, para superar essa barreira, o pré-tratamento é considerado a etapa mais determinante e, ao mesmo tempo, mais onerosa na conversão de biomassa vegetal em açúcares fermentescíveis, biogás ou bioetanol (Soares, 2018; Ethaib, 2020;).

Entre as diferentes rotas desenvolvidas, o uso de ácidos orgânicos como agentes de pré-tratamento tem emergido como uma alternativa promissora frente aos ácidos minerais tradicionalmente utilizados, como o sulfúrico e o clorídrico. Dentre eles, destacam-se o ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) e o ácido acético (CH_3COOH), ambos reconhecidos por sua eficiência na modificação da estrutura lignocelulósica, por apresentarem menor toxicidade e por se enquadrarem nos princípios da química verde (Mosier *et al.*, 2005; Huang, 2025). O ácido cítrico, por seu caráter tricarboxílico e poder quelante, atua rompendo as ligações entre lignina e hemicelulose e interagindo com metais e sílica, enquanto o ácido acético, de acidez moderada, contribui para a solubilização parcial da hemicelulose e para a redução da cristalinidade da celulose, favorecendo o ataque enzimático subsequente (Momayez, *et al.*, 2017). Além de serem biodegradáveis, esses compostos permitem condições operacionais mais brandas, o que reduz o consumo energético e o impacto ambiental dos

processos (Verma, 2023). Destaca-se também que esta temática está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 e 13.

Diante desse panorama, compreender a evolução das pesquisas que investigam o uso de ácidos orgânicos, especialmente o cítrico e o acético, no pré-tratamento da palha de arroz é fundamental para identificar possíveis lacunas, tendências e oportunidades na valorização deste resíduo. Assim, este trabalho apresenta uma análise bibliométrica das publicações científicas sobre o tema, realizadas entre 2005 e 2025, buscando mapear os principais autores, países, periódicos e palavras-chave relacionados à temática. Assim, o objetivo central é caracterizar o estado da arte das pesquisas sobre o uso de ácidos orgânicos no pré-tratamento da biomassa lignocelulósica da palha de arroz, destacando a importância dessa biomassa para o desenvolvimento de processos biotecnológicos mais limpos, sustentáveis e economicamente viáveis.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cadeia produtiva orizícola

Na indústria orizícola, o arroz destaca-se por ser um dos alimentos mais consumidos mundialmente, sobretudo em países asiáticos, o que impulsiona o desenvolvimento tecnológico, incluindo variedades geneticamente modificadas introduzidas a partir de 1996. O arroz se consolida como uma das commodities agrícolas mais vitais para a segurança alimentar global. De acordo com as projeções mais recentes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para a safra, a produção mundial de arroz está estimada em aproximadamente 556,4 milhões de toneladas (em base beneficiada) (FAO, 2025).

No Brasil, a cadeia produtiva do arroz possui elevada relevância socioeconômica, com produção distribuída em praticamente todos os estados, contribuindo para a geração de empregos e renda. Cerca de 95% da produção nacional é destinada ao consumo interno e apenas 5% à exportação, o que reforça a necessidade de modernização tecnológica e melhoria contínua dos processos frente às exigências do mercado globalizado (Santos, 2021). Além disso, a produção orizícola é fortemente influenciada por fatores ambientais, sendo que as mudanças climáticas, associadas a temperaturas elevadas, irregularidade das chuvas e esgotamento de recursos hídricos, afetam diretamente a floração, a polinização e o desenvolvimento das culturas, além de favorecer a ocorrência de pragas e plantas invasoras (Kobayashi, 2023).

A cadeia orizícola envolve etapas que vão do cultivo e colheita ao beneficiamento e à comercialização. Após a colheita, os grãos passam pela secagem para redução da umidade e posterior armazenamento; em seguida, ocorre o descascamento, que remove a casca externa, e, quando aplicável, o polimento, responsável pela retirada da película externa do grão. Esse processo resulta

em arroz branco com maior estabilidade durante o armazenamento, em função do menor teor de lipídios e da reduzida atividade enzimática (Mendes, 2024).

Nas últimas décadas, o setor tem se modernizado para atender a um consumidor mais exigente quanto à segurança alimentar, com avanços na adoção de boas práticas de fabricação, controle de qualidade, rastreabilidade, padronização de processos e diversificação de produtos, fundamentais para sistemas eficazes de gestão da segurança dos alimentos (De Oliveira, 2021).

Mercado Mundial

O arroz é o principal alimento de mais da metade da população mundial e um dos cereais mais produzidos globalmente. China e Índia lideram a produção, respondendo juntas por cerca de 50% do total mundial, enquanto os países asiáticos concentram aproximadamente 90% dessa produção (De Miranda, 2021). Em 2020, a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) ocupou cerca de 163 milhões de hectares, consolidando-se como a segunda maior cultura cerealífera do mundo (De Miranda, 2021).

Além do interesse relacionado à qualidade tecnológica, como rápido preparo e bom rendimento de panela, o arroz apresenta elevada relevância nutricional. Os grãos são compostos por 75% a 80% de amido, cerca de 7% de proteína e elevada concentração de carboidratos, o que o torna base alimentar de diversas populações, especialmente as mais carentes. Estima-se que o arroz contribua com cerca de 20% do consumo mundial de energia e 15% do consumo mundial de proteína (De Souza, 2022).

O Brasil destaca-se como país desenvolvido nos setores agrícola, industrial e de serviços, com influência do Mercado Comum do Sul (Mercosul), criado em 1991, responsável por aproximadamente 75% da economia da América do Sul. A integração econômica favoreceu o crescimento das importações entre países parceiros; contudo, na década de 1990, fatores como altas taxas de juros, o fim da garantia de preços mínimos e da compra governamental para formação de estoques afetaram a rentabilidade da produção de arroz no país (Sato, 2021).

Em 2012, foi criado o projeto Brazilian Rice, com o objetivo de ampliar a participação do arroz brasileiro no mercado internacional, por meio da parceria entre a Associação Brasileira da Indústria do Arroz e a Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos (Sato, 2021). Embora a produção nacional seja majoritariamente voltada ao mercado interno, as exportações apresentaram crescimento nos últimos 16 anos, passando de 1.348.944,6 toneladas (9,9% da produção total) em 2011 para 1.458.676,4 toneladas (12,1%) em 2018. Esse avanço é um fenômeno recente e está associado principalmente à ampliação dos mercados da América do Sul, América Central e África como destinos do arroz brasileiro (Sato, 2021). Na Tabela 01, apresentam-se os 10 maiores

países produtores de arroz em 2024 e 2025.

Tabela 01: Rank de países produtores de arroz em 2025.

Rank	País	Produção 2024/25 (10 ⁶ t/ano)	Participação na produção mundial 2025 (%)
1	Índia	146,64	28,0%
2	China	141,41	27,0%
3	Bangladesh	36,66	7,0%
4	Indonésia	31,42	6,0%
5	Vietnã	26,19	5,0%
6	Tailândia	20,95	4,0%
7	Filipinas	10,47	2,0%
8	Birmânia	10,47	2,0%
9	Paquistão	10,47	2,0%
10	Camboja	10,47	2,0%
—	Outros	78,58	15,0%
Total		100%	100%

Fonte: United States Department of Agriculture (2025).

Papel do pré-tratamento na conversão da biomassa residual

A conversão da biomassa lignocelulósica, como a palha de arroz, em produtos de valor agregado (açúcares fermentescíveis, bioetanol, biogás e outros bioprodutos) depende diretamente da eficiência do pré-tratamento, devido à estrutura complexa e recalcitrante da biomassa vegetal, resultante da associação entre celulose, hemicelulose e lignina (Rody, 2023; Fan, 2025). Na palha de arroz, essa recalcitrância é intensificada pelo elevado teor de lignina (13,5% a 22,3%) e pela presença de sílica, que dificultam o acesso enzimático e a hidrólise dos polímeros estruturais (De Oliveira, 2021; El-Sayed, 2025). A casca do arroz corresponde a cerca de 23% do grão e é composta por 37–40% de celulose, 18–24% de hemicelulose, 12–22% de lignina e 17–33% de outros componentes (De Oliveira, 2021).

O pré-tratamento tem como função romper a barreira estrutural da biomassa lignocelulósica, promovendo a desorganização da matriz, redução da cristalinidade da celulose, solubilização da hemicelulose e remoção parcial ou total da lignina, aumentando a área superficial acessível às enzimas (Hoffman, 2021; Silva, 2023). Sem essa etapa, a conversão enzimática ou microbiológica

torna-se limitada, com baixos rendimentos de açúcares e bioproductos (Marecos, 2025), além de impactar a eficiência energética e econômica do processo, ao influenciar a hidrólise e a formação de inibidores como furfural, HMF e ácidos orgânicos, exigindo equilíbrio entre desestruturação e minimização de compostos tóxicos (Soares, 2018; Ethaib, 2020;).

Nesse contexto, diversos métodos de pré-tratamento são aplicáveis à palha de arroz, incluindo físicos, químicos, físico-químicos e biológicos. Diversos autores destacam-se o uso de água quente comprimida (140–240 °C), que solubiliza hemicelulose, mas pode gerar inibidores além de gastar muita energia (Liu *et al.*, 2009), a explosão a vapor, com aumento de até 62,7% na produção de metano (Zhou *et al.*, 2016), mas também demandando um alto custo energético, e processos termoalcalinos mecânicos, que também favorecem a hidrólise subsequente (Wang *et al.*, 2023), mas que gastam grandes quantidades de produtos químicos e podem gerar subprodutos muitas vezes inibidores dos processos fermentativos.

Os pré-tratamentos químicos e físico-químicos destacam-se pela elevada remoção de lignina e hemicelulose e pelo aumento da digestibilidade da biomassa. O uso de NaOH proporcionou conversão de celulose de até 91% e redução da lignina de 9,22% para 3,78% (Islam *et al.*, 2020; Hossain *et al.*, 2014), enquanto o tratamento com H₂SO₄ diluído elevou o teor de celulose para mais de 50% (Chakrabarty, 2013). Entre os métodos físico-químicos, a explosão a vapor catalisada por ácido alcançou rendimento de sacarificação de 73% (Liu *et al.*, 2012), e processos combinando amônia e ácido diluído atingiram digestibilidade enzimática de 96,9% com preservação de 97% da celulose (Kim *et al.*, 2011). Além disso, a combinação de amonificação e explosão a vapor promoveu aumento de cinco vezes no conteúdo de proteína verdadeira após fermentação (Li *et al.*, 2023).

Nos pré-tratamentos biológicos, fungos ligninolíticos permitem a degradação seletiva da lignina. Um consórcio fúngico foi capaz de degradar até 84% da lignocelulose da palha de arroz, superando tratamentos químicos (79%) e controle (61%) (Rahman *et al.*, 2022). Além disso, o uso de *Phanerochaete chrysosporium* proporcionou aumento de até 122% na produção de metano em digestão anaeróbia (Hassan *et al.*, 2019). Outros fungos celulolíticos e ligninolíticos, como *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Aspergillus niger* e *Trichoderma reesei*, também têm sido amplamente investigados por sua capacidade de produzir enzimas como lacases, celulasas e hemicelulasas, favorecendo a desestruturação da matriz lignocelulósica e ampliando a biodisponibilidade dos polissacarídeos para etapas subsequentes de conversão biológica (Rahman *et al.*, 2022).

Por fim, as abordagens combinadas destacam-se pela sinergia entre eficiência e seletividade, como o processo em duas etapas com uso de amônia e ácido diluído, que atingiu 87% do máximo teórico de glicose fermentável (13,9 g L⁻¹) e 83% de eficiência na produção de etanol (Kim *et al.*,

2011), permitindo maior eficiência e sustentabilidade no aproveitamento da palha de arroz.

Ácidos orgânicos como agentes de pré-tratamento

O uso de ácidos orgânicos como agentes de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica tem se consolidado como alternativa aos ácidos minerais tradicionais devido à menor corrosividade, toxicidade e impacto ambiental, além de possibilitar condições operacionais mais brandas e menor consumo energético (Huang, 2025). Entre eles, destacam-se os ácidos cítrico e acético, pela eficiência na modificação estrutural da biomassa, baixo custo e compatibilidade com rotas biotecnológicas, especialmente para a palha de arroz (Zhao, 2010; Sheng, 2017). Devido à elevada recalcitrância desse resíduo, causada pelo alto teor de lignina, hemicelulose e sílica (Fan, 2025), esses ácidos promovem alterações estruturais que facilitam o acesso enzimático à celulose e à hemicelulose, além de apresentarem menor risco ecotoxicológico por serem biodegradáveis, contribuindo para a química sustentável e a bioeconomia circular (Mosier *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2009).

O ácido cítrico e o ácido acético destacam-se como agentes orgânicos de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, atuando na desestruturação da parede celular e na melhoria da acessibilidade à celulose. O ácido cítrico apresenta caráter quelante e multifuncional, promovendo a ruptura das ligações entre lignina e hemicelulose, a complexação de metais e sílica e o aumento da porosidade do material, favorecendo a deslignificação seletiva com baixa degradação da celulose e menor formação de inibidores, como furfural e HMF (5-hidroximetilfurfural), resultando em maior eficiência da hidrólise enzimática e da fermentação (Castro, 2019; Setiawan, 2021; Wang *et al.*, 2015). Já o ácido acético atua como agente de hidrólise suave, promovendo a solubilização parcial da hemicelulose, modificações na lignina e redução da cristalinidade da celulose, aumentando a permeabilidade da biomassa e a liberação de açúcares redutores, além de favorecer processos fermentativos e a integração com sistemas biotecnológicos (Huang *et al.*, 2021; Guo, 2021).

Ambos os ácidos operam sob condições relativamente brandas, geralmente em temperaturas entre 80 e 130 °C e em sistemas de baixa pressão ou mesmo à pressão atmosférica, possibilitando o uso de reatores mais simples e de menor custo. Ademais, a possibilidade de recuperação parcial dos ácidos após o processo contribui para a viabilidade econômica e ambiental do pré-tratamento. Em comparação aos ácidos minerais, a menor geração de inibidores e o pH mais equilibrado do meio após o tratamento representam ganhos expressivos na eficiência global da conversão da biomassa lignocelulósica (Nair, 2023; Huang, 2025).

METODOLOGIA

A coleta de dados para a pesquisa bibliométrica foi realizada no mês de agosto de 2025, a

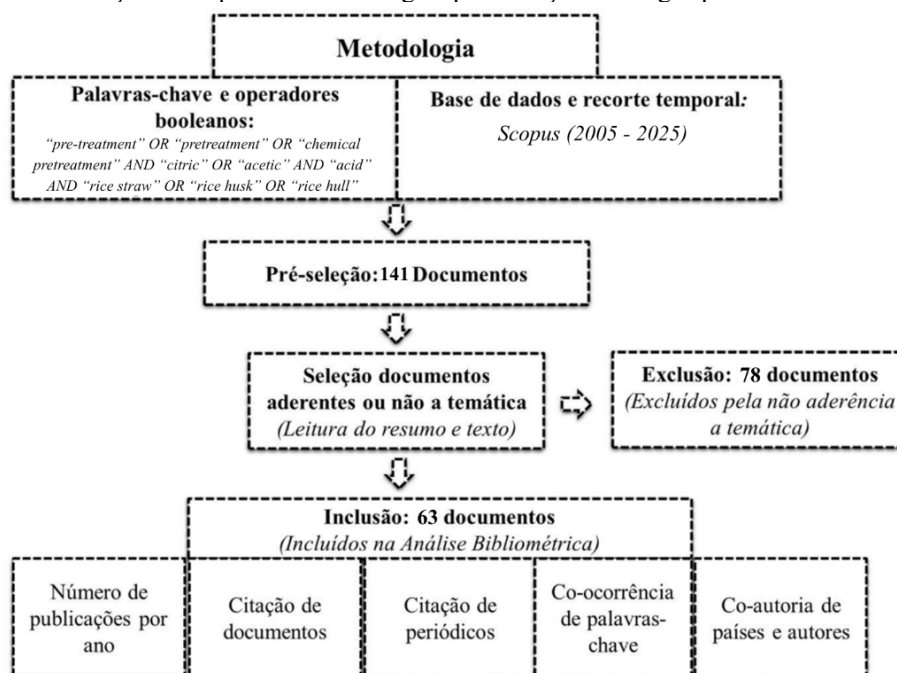
partir do Portal de Periódicos CAPES, que permite a utilização das principais bases de dados voltadas para o âmbito acadêmico e de pesquisa, buscando documentos científicos sobre a temática: “Aplicações de ácidos orgânicos no pré-tratamento da biomassa lignocelulósica de palha de arroz”.

Diante disso, dentre as bases disponíveis, a plataforma *Scopus* se mostrou mais promissora no que se refere ao número de publicações para as palavras-chave selecionadas, corroborando para a geração de um banco de dados mais amplo e preciso em relação à área temática pesquisada. Foram utilizadas palavras-chave, seus sinônimos e operadores booleanos ordenados para obtenção de relações que apontassem mais assertivamente para a temática especificada.

Assim, a busca dos documentos foi realizada na plataforma Scopus, no idioma inglês, utilizando critérios de seleção baseados nas palavras-chave presentes no Título - *Abstract*- Palavras-chave. Para a pesquisa, foram utilizados três buscadores: um utilizando “pre-treatment” ligado pelo operador booleano “OR” com “pretreatment” e “chemical pretreatment”; o segundo buscador é destacado por “citric” seguido de “OR” com “acetic” e outro operador booleano “AND” ligado a “acid”; por fim, o último buscador com “rice straw” com o operador booleano “OR” com “rice husk” e “rice hull” a fim de direcionar a pesquisa para o âmbito aplicável do pré-tratamento com resultados consolidados.

Foi definido o recorte temporal entre os anos de 2005 e 2025, resultando em 20 anos de pesquisa. Assim, a Figura 01 apresenta as etapas da coleta de dados na base *Scopus* e análise bibliométrica.

Figura 01: Descrição da sequência metodológica para seleção de artigos para a análise bibliométrica.



Fonte: Própria (2025).

Durante a triagem, foram excluídos 78 documentos que, embora relacionados à biomassa lignocelulósica ou à palha de arroz, abordavam principalmente ácidos minerais, tratamentos térmicos ou outras estratégias fora do foco do estudo. Essa exclusão garantiu maior aderência à proposta, centrada no uso de ácidos orgânicos e abordagens biológicas, assegurando coerência temática e rigor na delimitação do corpus analisado.

Para a análise bibliométrica, foram utilizados o software VOSviewer® e planilha do Microsoft Excel®, empregados na construção das redes bibliométricas, gráficos e tabelas, possibilitando a organização, compilação e classificação dos estudos quanto às palavras-chave, autores, organizações, periódicos, número de citações e países mais produtivos.

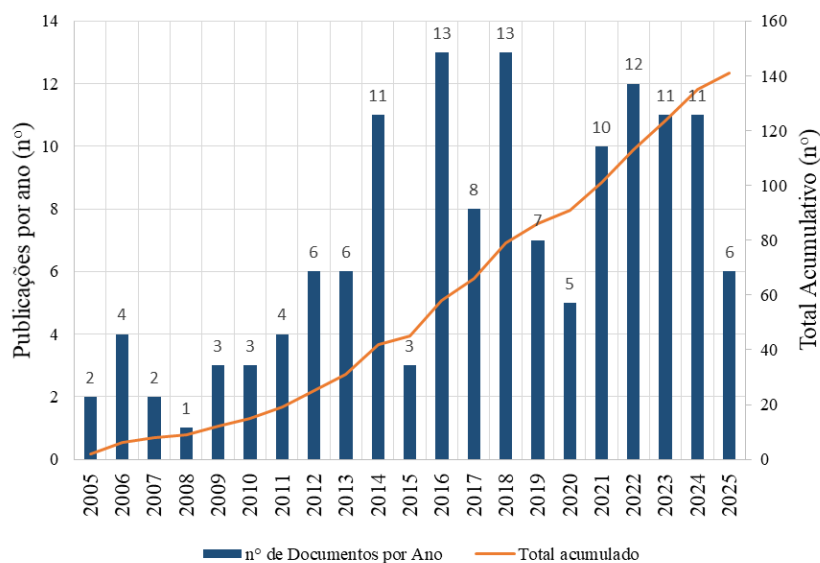
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Publicações selecionadas e totais acumulados

Após a aplicação metodológica descrita na Figura 01, foram obtidos 63 documentos adequados para a elaboração da análise bibliométrica com relevância para a temática. A Figura 3, apresenta a evolução no número das publicações por ano e dos totais acumulados, que estão em concordância com a aplicação de pré-tratamento ácido na palha de arroz.

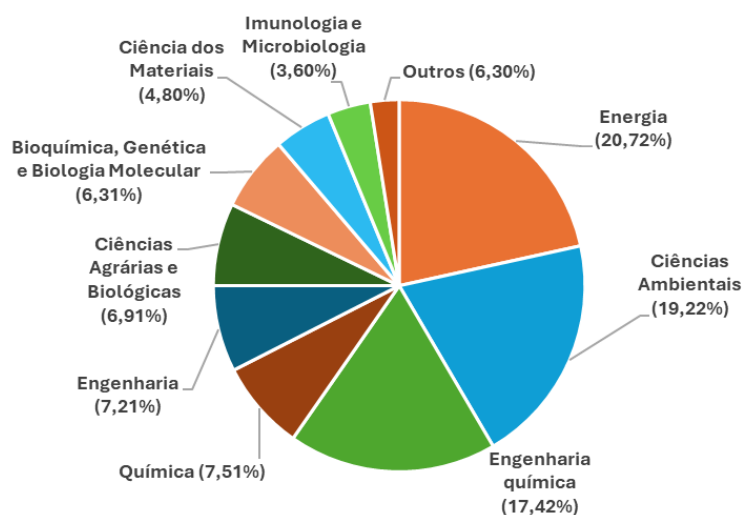
A evolução temporal das publicações evidencia um crescimento gradual do interesse científico pela temática ao longo do período de 2005 a 2025. Nos primeiros anos (2005–2011), o número de documentos publicados foi baixo, variando entre 1 e 4 publicações. A partir de 2012, observou-se um aumento mais expressivo no número de estudos publicados, com seis publicações em 2012 e 2013, seguido por um crescimento para 11 publicações em 2014. Apesar das oscilações verificadas nos anos subsequentes, a tendência geral permaneceu ascendente. Os maiores picos de publicações foram entre 2016 e 2018, ambos com 13 publicações. O aumento expressivo de estudos pode estar associado ao avanço das pesquisas voltadas à substituição de ácidos minerais por alternativas biodegradáveis, como o ácido cítrico e o ácido acético, que demonstraram elevada eficiência na remoção seletiva de lignina e melhoria da digestibilidade enzimática da biomassa (Zhang *et al.*, 2017; Karp *et al.*, 2013).

Além disso, o pico de publicações observado entre 2016 e 2018 coincide com a implementação de marcos políticos e regulatórios globais e nacionais, como o Acordo de Paris (2015) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Agenda 2030), que impulsionaram a pesquisa em fontes renováveis de energia. No Brasil, embora não esteja entre os países de maior destaque nas pesquisas, ressalta-se a criação do RenovaBio (Lei nº 13.576/2017), voltado ao incentivo da produção de biocombustíveis, o que contribuiu para o aumento das investigações sobre o aproveitamento da palha de arroz como matéria-prima em processos biotecnológicos sustentáveis.

Figura 02: Total de publicações por ano e total acumulado no período de 2005 a 2025.

Fonte: Própria (2025).

Essas considerações podem ser corroboradas quando se observa a Figura 03, que representa a divisão das áreas temáticas em foco dos artigos publicados nesse período. Os artigos aderentes ao tema estiveram voltados prioritariamente para as áreas Energia (20,72%), Ciências Ambientais (19,22%) e Engenharia Química (17,42%), somando conjuntamente 57,36% do total de publicações observadas.

Figura 03: Divisão das áreas temáticas observadas nos artigos avaliados no período de 2005 a 2025.

Fonte: Própria (2025)

Citação de documentos

Dos 63 documentos analisados, foi possível destacar 18 documentos com no mínimo 50 citações. Diante disso, observando a rede bibliométrica, ocorreu a formação de 18 clusters que não apresentam ligação de citações entre eles, representando áreas de trabalho isoladas na produção

científica. Assim, dentre os 18 documentos, foram selecionados os 5 trabalhos mais citados no período de 2005 a 2025, procurando destacar a abordagem destes em relação à temática principal (Tabela 02).

Tabela 02. Top 5 documentos mais citados no período de 2005 a 2025.

Ranking	Título	Autor/Ano	Número de citações	Periódico	Referência
1º	<i>Synthesis and characterization of cellulose acetate from rice husk: Eco-friendly condition</i>	Das (2014)	186	Carbohydrate Polymers	Das <i>et al.</i> (2014)
2º	<i>Enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production from rice straw by pretreatment with organic acids</i>	Amnuaycheewa (2016)	171	Industrial Crops and Products	Amnuaycheewa <i>et al.</i> (2016)
3º	<i>Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica</i>	Chandrasekhar (2005)	161	Journal of Materials Science	Chandrasekhar <i>et al.</i> (2005)
4º	<i>Novel dihydrogen-bonding deep eutectic solvents: Pretreatment of rice straw for butanol fermentation featuring enzyme recycling and high solvent yield</i>	Xing (2018)	130	Chemical Engineering Journal	Xing <i>et al.</i> (2018)
5º	<i>Process for obtaining cellulose acetate from agricultural by-products</i>	Biswas (2006)	129	Carbohydrate Polymers	Biswas <i>et al.</i> (2006)

Fonte: Própria (2025)

O artigo mais citado (186 citações) foi o de Das *et al.* (2014), “Synthesis and characterization of cellulose acetate from rice husk: Eco-friendly condition”, publicado na revista *Carbohydrate Polymers* (v. 112). O estudo apresenta uma rota sustentável para obtenção de acetato de celulose a partir da casca de arroz, envolvendo a purificação química da biomassa e a acetilação da celulose com anidrido acético. As análises de FTIR, DRX e TGA confirmaram a eficiência da conversão e a alta pureza do biopolímero obtido.

O segundo artigo mais citado (171 citações) foi o de Amnuaycheewa *et al.* (2016), publicado na revista *Industrial Crops and Products*. O estudo avaliou o pré-tratamento da palha de arroz com ácido cítrico para aumentar a hidrólise enzimática e a produção de biogás. O tratamento promoveu a remoção parcial de lignina e hemicelulose, aumentando a acessibilidade da celulose e a eficiência da digestão anaeróbia. Como resultado, a biomassa tratada alcançou rendimento máximo de 322,1 mL de biogás por grama de palha seca, cerca de 7,4 vezes superior ao da biomassa não tratada, evidenciando a eficácia do ácido cítrico na desestruturação da parede celular vegetal.

Na terceira posição (161 citações), destaca-se o artigo “Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica”, de Chandrasekhar *et al.* (2005), publicado na revista *Journal of Materials Science* (v. 40). O estudo avaliou o pré-tratamento da casca de arroz com ácidos acético e oxálico para remover impurezas metálicas e obter sílica de alta pureza. Após o tratamento, o teor de

SiO₂ aumentou para 98,2–99,7%, acompanhado do aumento da área superficial e do volume de poros. Esses resultados demonstram que o uso de ácidos orgânicos é uma estratégia eficaz para a obtenção de sílica reativa a partir da casca de arroz.

Em quarta posição está o artigo “Novel dihydrogen-bonding deep eutectic solvents: Pretreatment of rice straw for butanol fermentation featuring enzyme recycling and high solvent yield”, de Xing *et al.* (2018), publicado na revista *Chemical Engineering Journal* (v. 333). O estudo avaliou o pré-tratamento da palha de arroz com solventes eutéticos profundos à base de ácido acético e ácido fórmico. A formulação “foraceline” promoveu maior modificação da estrutura lignocelulósica, alcançando rendimento de açúcares redutores de 42,8 g/L após hidrólise enzimática, além de elevadas remoções de hemicelulose (~66%) e lignina (~24%).

Por fim, com 129 citações, destaca-se o estudo de Biswas *et al.* (2006), publicado na revista *Carbohydrate Polymers* (v. 64). O trabalho avaliou o efeito do ácido acético sobre a bactéria redutora de sulfato *Desulfovibrio alaskensis* G20 utilizando palha de arroz como substrato. Os resultados mostraram que o aumento da concentração de ácido acético reduziu significativamente o crescimento bacteriano e a atividade de redução de sulfato. Assim, o estudo conclui que, embora o ácido acético possa ser gerado durante o pré-tratamento da palha de arroz, suas concentrações devem ser controladas e neutralizadas para evitar prejuízos à eficiência dos processos biológicos de tratamento de resíduos.

De modo geral, os estudos indicaram que o uso de ácidos orgânicos no pré-tratamento da palha e casca de arroz vem sendo amplamente explorado em escala laboratorial, com resultados promissores na produção de biopolímeros, na digestão anaeróbia e na purificação de sílica. As publicações se distribuem de forma relativamente equilibrada ao longo dos anos, refletindo o interesse crescente na valorização de resíduos agrícolas e em rotas sustentáveis. O alto número de citações reforça a eficiência dos ácidos orgânicos, especialmente o acético e o cítrico, como alternativas ambientalmente seguras e tecnicamente viáveis para o aproveitamento da biomassa do arroz.

Periódicos de destaque

A pesquisa bibliométrica realizada, evidenciou a predominância de publicações em periódicos com alto fator de impacto e relevância científica, diretamente relacionados às áreas de biotecnologia, engenharia química e aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. O levantamento permitiu identificar os 5 (Top 5) periódicos com maior número de publicações, concentrando 19 (30,15%) das 63 publicações selecionadas. No Tabela 03 apresenta-se o ranking das 5 revistas com o maior número de publicações e citações.

Tabela 03. Top 5 periódicos com maior número de publicações e citações.

Ranking	Periódicos	Documentos	Citações
1º	<i>Bioresource Technology</i>	10	491
2º	<i>Carbohydrate Polymers</i>	3	442
3º	<i>Biomass and Bioenergy</i>	2	59
4º	<i>Chemical Engineering Journal</i>	2	157
5º	<i>Industrial crops and products</i>	2	181

Fonte: Própria (2025)

O periódico “*Bioresource Technology*”, com 10 documentos e 491 citações, destacou-se como o mais representativo da amostra. Trata-se de uma das revistas mais reconhecidas no campo da bioenergia e biotecnologia aplicada, sendo um importante canal de divulgação de pesquisas sobre conversão de biomassa em biocombustíveis e biopolímeros. De modo geral, os estudos publicados nesse periódico abordam rotas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos agroindustriais, evidenciando sua pertinência direta ao tema do pré-tratamento da palha de arroz.

A revista “*Carbohydrate Polymers*”, com 3 documentos e 442 citações, ocupa a segunda posição no ranking. Sua linha editorial está fortemente voltada para o estudo de polímeros naturais, como celulose, hemicelulose e lignina, e suas transformações em materiais de alto valor tecnológico. Nesse contexto, os estudos sobre pré-tratamento ácido da palha de arroz com ácidos cítrico e acético se encaixam perfeitamente, uma vez que buscam modificar a estrutura lignocelulósica para aumentar a acessibilidade dos carboidratos e promover a síntese de biopolímeros e bioprodutos sustentáveis.

Em terceiro lugar, o periódico “*Biomass and Bioenergy*”, com 2 documentos e 59 citações, apresenta menor volume de citações entre os principais periódicos. No entanto, sua relevância científica permanece significativa, pois o *VOSviewer*® considera também a força de ligação e a relevância temática na rede bibliométrica. Assim, mesmo com menor representatividade numérica, o periódico se destaca por sua forte conexão com estudos de bioenergia e valorização de biomassa residual, especialmente no contexto do uso de resíduos agrícolas para geração de energia limpa e no papel dos ácidos orgânicos no rompimento da lignina, favorecendo a conversão bioquímica e o aumento do rendimento energético.

O “*Chemical Engineering Journal*”, com 2 documentos e 157 citações, apresenta um perfil interdisciplinar, englobando processos químicos, biotecnológicos e ambientais. Assim, os estudos sobre o uso de ácidos fracos, como o cítrico e o acético, para desestruturar a lignina e facilitar o aproveitamento da fração celulósica da palha de arroz são de grande interesse para este periódico, pois envolvem otimização de processos e desenvolvimento de tecnologias limpas. A relevância dessa revista se evidencia pela abordagem de temas relacionados à engenharia de reações, eficiência de

processos e sustentabilidade industrial.

Por fim, o periódico *“Industrial Crops and Products”*, com 2 documentos e 181 citações, concentra-se na utilização de culturas e resíduos agrícolas para obtenção de produtos industriais e bioenergéticos. Nesse contexto, sua linha editorial está diretamente relacionada à valorização da palha de arroz, especialmente por meio de pré-tratamentos químicos que aumentam a disponibilidade de açúcares fermentáveis. As publicações na revista reforçam a importância de estratégias sustentáveis e de baixo impacto ambiental para o aproveitamento da biomassa, destacando o papel dos ácidos orgânicos como alternativas ecológicas a reagentes mais agressivos.

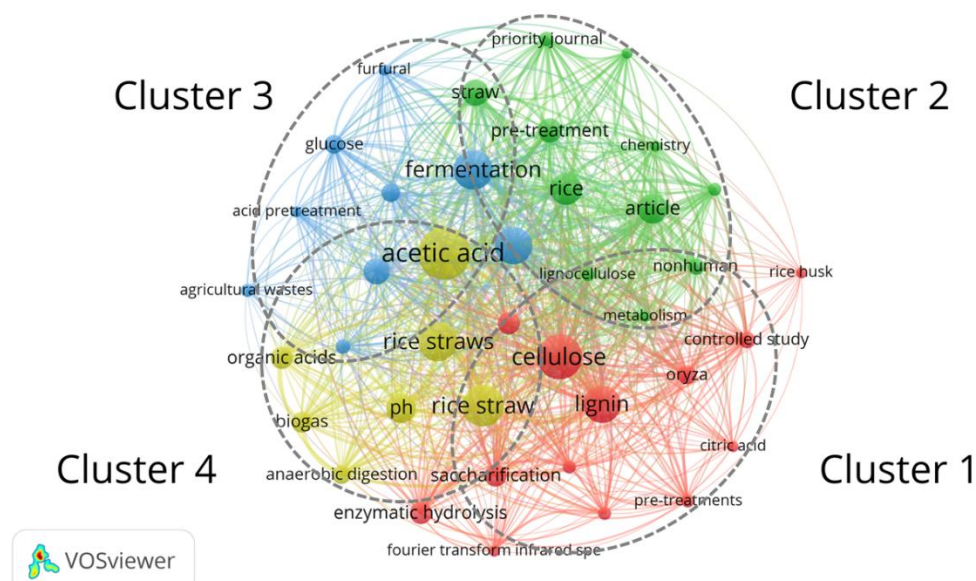
Esses resultados indicam que os principais periódicos identificados possuem alta relevância científica e convergem para o avanço das pesquisas em biotecnologia de resíduos lignocelulósicos, valorização da palha de arroz e aplicação de ácidos orgânicos no pré-tratamento de biomassa, consolidando o tema como uma área de grande interesse e potencial tecnológico.

Co-ocorrência das palavras-chave

Observou-se que, as palavras-chave com maior número de ocorrências foram: “acetic acid” (28 ocorrências), “cellulose” (24 ocorrências), “rice straw” (22 ocorrências), “rice straws” (21 ocorrências), “fermentation” (21 ocorrências) e “hydrolysis” (20 ocorrências). A partir da análise realizada pelo software *VOSviewer*®, foi possível elaborar uma rede bibliométrica de coocorrência de palavras-chave, que agrupou os termos em quatro clusters principais (Figura 04), representando diferentes eixos temáticos dentro da pesquisa sobre o pré-tratamento da palha de arroz com ácidos orgânicos.

O Cluster 1 (vermelho) concentrou estudos sobre a estrutura lignocelulósica e deslignificação, com destaque para “cellulose”, associado a “lignin”, “citric acid” e “pretreatment”, abordando a desestruturação da biomassa e aumento da acessibilidade aos carboidratos. O Cluster 2 (verde) agrupou termos relacionados à biomassa e condições experimentais, como “rice”, “straw” e “temperature”, representando características da palha de arroz e parâmetros de pré-tratamento. O Cluster 3 (azul) reuniu “acid pretreatment”, “hydrolysis”, “fermentation” e “ethanol”, voltado à conversão bioquímica e produção de biocombustíveis. Já o Cluster 4 (amarelo), centrado em “acetic acid” e “organic acids”, representa estudos sobre aplicação de ácidos orgânicos no pré-tratamento, com foco em eficiência, pH e sustentabilidade do processo.

Figura 04: Rede bibliométrica das palavras-chave de maior co-ocorrência nos artigos selecionados no período de 2005 a 2025.



Fonte: Própria (2025)

O Cluster 1 (vermelho) concentrou estudos sobre a estrutura lignocelulósica e deslignificação, com destaque para “cellulose”, associado a “lignin”, “citric acid” e “pretreatment”, abordando a desestruturação da biomassa e aumento da acessibilidade aos carboidratos. O Cluster 2 (verde) agrupou termos relacionados à biomassa e condições experimentais, como “rice”, “straw” e “temperature”, representando características da palha de arroz e parâmetros de pré-tratamento. O Cluster 3 (azul) reuniu “acid pretreatment”, “hydrolysis”, “fermentation” e “ethanol”, voltado à conversão bioquímica e produção de biocombustíveis. Já o Cluster 4 (amarelo), centrado em “acetic acid” e “organic acids”, representa estudos sobre aplicação de ácidos orgânicos no pré-tratamento, com foco em eficiência, pH e sustentabilidade do processo.

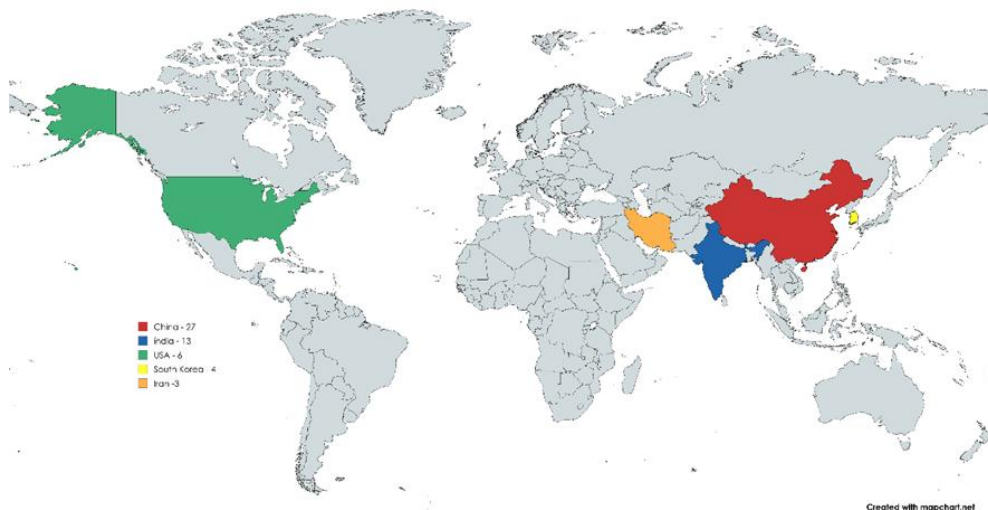
Esses resultados indicam predominância de estudos com ácidos orgânicos, especialmente o ácido acético, voltados à deslignificação da palha de arroz e à melhoria da hidrólise. Apesar da relevância do tema, observa-se pouca diversificação temática, sugerindo a exploração de novas rotas químicas, biológicas e tecnológicas agrícola.

Distribuição geográfica da produção científica no período de 2005 a 2025

A análise da distribuição geográfica (Figura 05) das publicações evidencia uma clara concentração de pesquisas na Ásia, com destaque para a China (27 documentos) e a Índia (13 documentos), seguidas pelos Estados Unidos (6 documentos), Coreia do Sul (4 documentos) e Irã (3 documentos). Esse panorama reflete o protagonismo asiático na investigação sobre valorização de resíduos agrícolas, especialmente da palha de arroz, devido à abundância dessa biomassa e à pressão

ambiental por destinação sustentável.

Figura 05: Distribuição do número de publicações por país no período analisado, destacando os principais polos de produção científica.



Fonte: Própria (2025)

A China, principal produtora mundial de arroz, enfrenta desafios relacionados ao acúmulo e à queima de resíduos, o que impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de conversão e reaproveitamento energético. Na Índia, observou-se um cenário semelhante, com políticas voltadas à bioeconomia rural e à mitigação da poluição atmosférica associada à queima de resíduos agrícolas. Os Estados Unidos, embora com menor volume de publicações, destacam-se pelo avanço tecnológico e pela aplicação de biorreatores e bioprocessos otimizados para produção de biocombustíveis e bioprodutos.

A Coreia do Sul e o Irã apresentaram participações mais modestas, porém relevantes, voltadas ao aproveitamento de resíduos lignocelulósicos e ao desenvolvimento de processos alternativos de pré-tratamento. De modo geral, observa-se concentração da pesquisa em poucos polos científicos, com predominância asiática, indicando potencial de expansão e internacionalização dos estudos para outras regiões produtoras de arroz, como a América Latina.

CONCLUSÕES

A análise bibliométrica evidenciou que o uso de ácidos orgânicos, especialmente os ácidos acético e cítrico, no pré-tratamento da palha de arroz é uma linha de pesquisa em expansão, impulsionada pela busca por alternativas sustentáveis alinhadas ao Acordo de Paris e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A consolidação da temática em periódicos de relevância evidencia seu potencial para a valorização de resíduos agroindustriais e o fortalecimento da bioeconomia.

A literatura indica que esses ácidos promovem modificações estruturais na biomassa,

favorecendo sua conversão biotecnológica, embora ainda existam desafios relacionados à ampliação de escala, à integração dos processos e à viabilidade técnico-econômica. Nesse contexto, reforça-se a necessidade de ampliar as pesquisas sobre o emprego de ácidos orgânicos no pré-tratamento da palha de arroz, visando otimizar sua aplicação e viabilizar sua adoção em escala industrial.

Assim, essa estratégia apresenta elevado potencial para a geração de energia renovável, a mitigação dos impactos ambientais e o avanço da transição energética e da bioeconomia.

REFERÊNCIAS

AMNUAYCHEEWA, Plaimein et al. Enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production from rice straw by pretreatment with organic acids. **Industrial Crops and Products**, v. 87, p. 247-254, 2016.

BISWAS, Atanu et al. Process for obtaining cellulose acetate from agricultural by-products. **Carbohydrate polymers**, v. 64, n. 1, p. 134-137, 2006.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

CASTRO, Letícia Teixeira de. Efeito do ácido sulfúrico e acético no pré-tratamento de biomassa lignocelulósica. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – **Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas**, São José do Rio Preto, 2019.

CHANDRASEKHAR, S.; PRAMADA, P. N.; PRAVEEN, L. Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica. **Journal of Materials Science**, v. 40, n. 24, p. 6535-6544, 2005.

DAS, Archana M.; ALI, Abdul A.; HAZARIKA, Manash P. Synthesis and characterization of cellulose acetate from rice husk: Eco-friendly condition. **Carbohydrate polymers**, v. 112, p. 342-349, 2014.

DE OLIVEIRA, Maurício; AMATO, Gilberto Wageck. Arroz: tecnologia, processos e usos. **São Paulo: Editora Blucher**, 2021.

EL-SAYED, Saad A. Chemical products yielded from different pyrolysis processes of rice waste residues: a comprehensive review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1–41, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: **Ministério de Minas e Energia (MME) / EPE**, 2020.

ETHAIB, Saleem et al. Toward sustainable processes of pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for enzymatic production of biofuels and chemicals: a review. **BioResources**, v. 15, n. 4, p. 10063–10093, 2020.

FAN, Jiamei et al. Pretreatment Technologies for Lignocellulosic Biomass: Research Progress, Mechanisms, and Prospects. **BioResources**, v. 20, n. 2, 2025.

- GUO, Jianming et al. Aliphatic extractive effects on acetic acid catalysis of typical agricultural residues. **Biotechnology for Biofuels**, v. 14, n. 1, p. 97, 2021.
- HOFFMANN, Luane Pauline Maciel et al. Comportamento térmico de lignina residual. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 4, 2021.
- HOSSAIN, M. F. et al. Effect of alkaline pretreatment on rice straw composition. **BMC Biotechnology**, 2014.
- HUANG, Kaixuan et al. Integration of acetic acid catalysis. **Green Chemistry**, v. 23, 2021.
- HUANG, Kaixuan et al. Research progress on organic acid pretreatment of lignocellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2025.
- ISLAM, M. S. et al. Alkaline pretreatment of rice straw for ethanol production. **Renewable Energy**, v. 147, 2020.
- KARP, E. M. et al. Renewable acids for biomass deconstruction. **Green Chemistry**, 2013.
- KIM, T. H. et al. Two-step aqueous ammonia and dilute acid pretreatment. **Biotechnology for Biofuels**, 2011.
- KOBAYASHI, Kaori; WANG, Xiaohui; WANG, Weiqun. Genetically modified rice. **Foods**, v. 12, n. 14, 2023.
- KUMAR, P. et al. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2009.
- LI, Y. et al. Ammonification–steam explosion pretreatment of rice straw. **Sustainability**, 2023.
- LIU, C. et al. Hot-compressed water treatment for fractionation of rice straw. **Bioresource Technology**, 2009.
- LIU, Z. H. et al. Acid-catalyzed steam explosion of rice straw. **Bioresource Technology**, 2012.
- MANDAL, A.; CHAKRABARTY, D. Studies on the effect of acid pretreatment. **Cellulose Chemistry and Technology**, 2013.
- MARECOS, Laura Ivonne Nuñez. Bioetanol de casca de arroz: avaliação da eficiência de leveduras na fermentação do hidrolisado proveniente de pré-tratamentos químicos. 2025. Dissertação (Mestrado em Biociências) – **Universidade Federal da Integração Latino-Americana**, Foz do Iguaçu, 2025.
- MENDES, Krisley. Efeitos de mudanças na política comercial brasileira para a cadeia produtiva do arroz. Brasília, DF: **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, 2024.
- MIRANDA, Evaristo Eduardo de. Não faltará arroz na mesa. **Revista Oeste**, ed. 67, 2 jul. 2021.
- MOSIER, Nathan et al. Features of promising technologies. **Bioresource Technology**, 2005.
- NAIR, Lakshana G.; AGRAWAL, Komal; VERMA, Pradeep. Organosolv pretreatment. **Bioresources and Bioprocessing**, 2023.

RAHMAN, M. A. et al. Fungal consortium pretreatment improves lignocellulosic degradation. **Environmental Technology & Innovation**, 2022.

RODY, Jéssica dos Santos Crouchoud; LEITE, Maria Clara Rodrigues. Caracterização físico-química da casca de arroz proveniente do sul do Espírito Santo para utilização em processos fermentativos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – **Instituto Federal do Espírito Santo**, Campus de Alegre, Alegre, 2023.

SANTOS, Elizeu Rodrigues dos. **Capacidade tecnológica de uma agroindústria de beneficiamento de arroz**. 2021.

SATO, Leandro Kenji Inagaki et al. A evolução das exportações de arroz brasileiro. **Research, Society and Development**, 2021.

SETIAWAN, Wahyu Kamal; CHIANG, Kung-Yuh. Eco-friendly rice husk pre-treatment. **Chemosphere**, 2021.

SHENG, Tao et al. Fenton pre-treatment of rice straw. **RSC Advances**, 2017.

SILVA, Giovanni H.; MIRANDA, Lina Marcela Duran; ROBERTO, Inês Conceição. **Efeito da combinação enzimática**. 2023.

SOARES, Lauren Bergmann. **O efeito de inibidores**. 2018.

UNITED NATIONS. Paris Agreement. **Paris: UNFCCC**, 2015.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 **Agenda for Sustainable Development**. 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Production, Supply and Distribution (PSD)** Online. 2024.

WANG, Dianlong et al. Comparing the hydrolysis and biogas production. **Biosystems Engineering**, 2015.

WANG, Y. et al. Thermoalkali mechanical pretreatment of rice straw. **Industrial Crops & Products**, 2023.

XING, Wanru et al. Novel dihydrogen-bonding deep eutectic solvents: Pretreatment of rice straw for butanol fermentation featuring enzyme recycling and high solvent yield. **Chemical engineering journal**, v. 333, p. 712-720, 2018.

ZHANG, X. et al. Citric acid chelated Fenton pretreatment. **Bioresource Technology**, 2017.

ZHAO, Rui et al. Methane production from rice straw pretreated. **Bioresource Technology**, 2010.

ZHOU, Y. et al. Steam explosion pretreatment of rice straw. **Bioresource Technology**, 2016.