

DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MILHO E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Arthur Macedo de Camargo (IC); Prof. Dra. Milena Guedes Maniero Ferreira (Orientadora)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

A digestão anaeróbia de resíduos do processamento de milho representa uma alternativa sustentável para a produção de biogás, contribuindo para a valorização da biomassa e a geração de energia renovável. Esse processo permite a conversão de matéria orgânica em biogás, podendo ser utilizado como fonte de energia limpa. Além disso, reduz o impacto ambiental associado ao descarte inadequado de resíduos agrícolas. Nesse estudo é realizada uma revisão bibliográfica sobre os métodos de pré-tratamento aplicados à biomassa lignocelulósica do milho, além de uma análise bibliométrica das publicações científicas relacionadas à produção de biogás. Foram comparadas diferentes abordagens e metodologias empregadas na digestão anaeróbia, com ênfase nos rendimentos de biogás, na eficiência dos processos e nos desafios enfrentados na conversão da biomassa. Métodos térmicos e químicos, como explosão a vapor e solventes iônicos, apresentam maior eficiência na liberação de açúcares fermentáveis, essenciais para a conversão da biomassa em biogás. Já as abordagens biológicas e mecânicas, como ação microbiana e extrusão alcalina, oferecem vantagens ambientais e menor impacto químico, mas ainda enfrentam desafios quanto à velocidade do processo e à estabilidade dos rendimentos obtidos. A análise bibliométrica revelou um crescimento expressivo nas pesquisas sobre digestão anaeróbia de resíduos do milho nos últimos anos. Conclui-se que o aproveitamento desses resíduos para a produção de biogás é uma estratégia promissora. No entanto, ainda há desafios a serem superados, como o aprimoramento dos métodos de pré-tratamento e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e acessíveis para a produção em larga escala.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa; Palha de milho.

ABSTRACT

Anaerobic digestion of maize processing residues represents a sustainable alternative for biogas production, contributing to biomass valorization and renewable energy generation. This process allows for the conversion of organic matter into biogas, which can be used as a clean energy source. Additionally, it reduces the environmental impact associated with the improper disposal of agricultural waste. This study presents a literature review on pretreatment methods applied to maize lignocellulosic biomass, along with a bibliometric analysis of scientific publications related to biogas production. Different approaches and methodologies employed in anaerobic digestion were compared, with an emphasis on biogas yields, process efficiency, and challenges in biomass conversion. Thermal and chemical methods, such as steam explosion and ionic solvents, have demonstrated greater efficiency in the release of fermentable sugars, which are essential for biomass conversion into biogas. On the other hand, biological and mechanical approaches, such as microbial action and alkaline extrusion, offer environmental benefits and lower chemical impact, but still face challenges related to process speed and yield stability. The bibliometric analysis revealed a significant growth in research on anaerobic digestion of maize residues in recent years. It is concluded that utilizing these residues for biogas production is a promising strategy. However, challenges remain, such as the improvement of pretreatment methods and the development of more efficient and accessible technologies for large-scale production.

Keywords: Bioenergy; Biomass; Corn stover.

1. INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia é um processo biotecnológico que transforma matéria orgânica, como resíduos agrícolas e industriais, em biogás, uma fonte renovável de energia. Este processo é de grande interesse tanto para a gestão de resíduos quanto para a produção de energia sustentável. Dentre os resíduos agrícolas, o milho se destaca devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e à abundância de subprodutos gerados durante seu processamento.

Em 2019, o setor de alimentos representou 9,6% do Produto Interno Bruto Nacional (ABIA, 2020). O Brasil é o segundo maior exportador de alimentos processados no mundo, tais como suco de laranja, cerveja, milho, carne, laticínios e café (ABIA, 2020). Porém, a produção de alimentos também gera grandes quantidades de resíduos orgânicos sólidos e emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Ricciardi et al., 2020).

Uma possibilidade grandemente explorada em países desenvolvidos e em desenvolvimento é a aplicação de biorrefinarias, uma instalação que integra o processamento de biomassa em biocombustíveis, produtos químicos, materiais, alimentos e energia. Tem como objetivo otimizar o uso de recursos e minimizar a quantidade de resíduos, maximizando benefícios e lucros, sendo versátil seu potencial para aplicações industriais e econômicas. Assim, o desenvolvimento das biorrefinarias e a utilização eficiente da biomassa e dos resíduos agrícolas e agroindustriais (tais como palhas, bagaços e serragens) representam uma grande oportunidade econômica para o Brasil (Weber et al., 2020).

Embora o país já ocupe uma posição importante na produção de biocombustíveis e no agronegócio (ABIA, 2020), ainda há uma grande demanda tecnológica nos setores químicos e agroindustriais, visto o potencial econômico para o Brasil, mantendo competitivo com países desenvolvidos (Weber et al., 2020). Além disso, a diversificação de produtos pode ter um impacto positivo nas diversas cadeias produtivas, proporcionando benefícios à sociedade, como a geração de empregos e renda, a conquista de novos mercados externos e a redução de importações (EMBRAPA, 2011).

Ao adotar tecnologias e análise mais eficientes a partir de um conceito de biorrefinaria que utilize o material residual da colheita do milho, a indústria de alimentos pode minimizar a carga de resíduos orgânicos produzidos resultantes da plantação de milho, e ainda contribuir para a produção de bioenergia, biocombustíveis e produtos de maior valor agregados. Isso trará benefícios como a redução dos custos de produção, garantindo maior eficiência e segurança ambiental (Dragone et al., 2020).

No aspecto econômico, pode-se destacar o conceito de economia circular, um conceito estratégico em que os resíduos são insumos para a produção de novos produtos (Ubando et al., 2020), propondo uma mudança na cadeia de produção, e buscando conciliar o

crescimento econômico, a sustentabilidade e o bem-estar da sociedade (Geng et al., 2019). Trata-se de um modelo que reconhece a importância da economia, porque considera o interesse de negócios e de indivíduos, das pequenas a grandes empresas, de atuação local ou global e, ao mesmo tempo, visa uma gestão consciente dos recursos naturais (Weber et al., 2020).

Sendo assim, no cenário nacional atual, a maioria destes resíduos não recebe o tratamento e destinação adequados, o que contribui para problemas ambientais (Margallo et al., 2019). A destinação incorreta dos resíduos orgânicos além de provocar a emissão de GEE, também resulta a proliferação de vetores de doenças e a produção de lixiviados, que podem contaminar o solo e as águas subterrâneas (Das et al., 2019). Várias biotecnologias emergentes visam melhorar a qualidade do biogás da codigestão, acelerando a taxa de absorção e capturando CO₂ (Luong et al., 2021). Para alcançar uma destinação final ecologicamente correta dos resíduos sólidos da indústria alimentícia, a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o uso de energia são algumas opções que podem ser implementadas pela indústria (Weber et al., 2020).

Diante do exposto, este trabalho visa revisar as metodologias e resultados de estudos recentes sobre a digestão anaeróbia de resíduos de milho, bem como analisar o panorama bibliométrico da produção de biogás a partir desses resíduos.

2. DESENVOLVIMENTO DO ARGUMENTO

A revisão da literatura revela que a digestão anaeróbia de resíduos de milho pode ser otimizada através de diferentes estratégias, incluindo o pré-tratamento dos resíduos, a co-digestão com outros materiais orgânicos e a utilização de inóculos específicos. Estudos demonstram que os rendimentos de biogás variam significativamente em função das condições operacionais e do tipo de resíduo utilizado no processo de digestão anaeróbia. Fatores como temperatura, tempo de retenção hidráulica, composição do substrato e presença de inibidores podem impactar diretamente a eficiência da conversão e a produção de metano (Angelidaki et al., 2019; Luong et al., 2021).

Além disso, a análise bibliométrica indica um crescimento expressivo no volume de publicações científicas sobre a produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais nas últimas décadas. Países como China e Estados Unidos têm se destacado como os principais centros de pesquisa na área, impulsionando avanços tecnológicos e estudos sobre a otimização dos processos de digestão anaeróbia (Margallo et al., 2019; Ricciardi et al., 2020). Esses dados evidenciam o interesse global no aproveitamento de biomassa residual para a geração sustentável de energia e a importância de aprimorar técnicas para maximizar a

eficiência dos sistemas biotecnológicos. As áreas de pesquisa mais abordadas incluem a otimização dos processos de digestão e a análise da viabilidade econômica da produção de biogás.

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma simplificado do processo integrado de uma biorrefinaria que converte resíduos de milho em biogás e subprodutos de valor agregado. O processo pode ser dividido em seis etapas principais, e comuns a todas as metodologias analisadas. Cada etapa é ilustrada destacando o fluxo de matéria-prima e subprodutos, o potencial do processo para a sustentabilidade e a economia circular no setor agrícola.



Figura 1- Esquema visual de uma biorrefinaria de biogás para milho

Caracterização Físico-Química da Biomassa

A caracterização físico-química da palha de milho é um aspecto fundamental para compreender suas propriedades estruturais e químicas, possibilitando a otimização de processos biotecnológicos voltados à produção de biocombustíveis, como o biogás. Estudos recentes indicam que a eficiência da digestão anaeróbia está diretamente relacionada à composição da biomassa, ao teor de umidade, à presença de inibidores e à acessibilidade dos polímeros estruturais, como celulose e hemicelulose (Chen et al., 2020; Fírvda et al., 2021; Sun et al., 2022).

Entre as técnicas analíticas mais empregadas na caracterização da biomassa lignocelulósica, destacam-se a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), utilizada para avaliar alterações químicas na estrutura da biomassa após o pré-tratamento (Cheah et al., 2020), a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), essencial

para a quantificação de açúcares e ácidos orgânicos (Geng et al., 2019), e a termogravimetria (TGA), que permite a análise da estabilidade térmica dos componentes lignocelulósicos (Li et al., 2022). Além disso, a microscopia eletrônica de varredura (SEM) tem sido utilizada para investigar as modificações estruturais da biomassa após diferentes pré-tratamentos (Wu et al., 2021).

Os parâmetros analisados nos estudos revisados incluem:

- Distribuição granulométrica e diâmetro geométrico – Determinação do tamanho e uniformidade das partículas, o que influencia a eficiência dos processos de conversão (Chen et al., 2020).
- Teor de umidade – Influencia diretamente a biodegradabilidade da biomassa e a eficiência da digestão anaeróbia (Férvida et al., 2021).
- Teor de cinzas – Parâmetro relacionado à presença de impurezas minerais, impactando na eficiência energética e na estabilidade do processo (Ricciardi et al., 2020).
- Teor de proteínas – Informações relevantes para a avaliação da disponibilidade de nutrientes essenciais para os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia (Margallo et al., 2019).
- pH e alcalinidade – Influenciam a estabilidade do processo e a atividade microbiana (Weber et al., 2020).
- Demanda química de oxigênio (DQO) – Indicador da carga orgânica e potencial energético da biomassa (Das et al., 2019).
- Sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) – Representam a composição física da biomassa, sendo essenciais para avaliar a fração orgânica disponível para degradação microbiana (Luong et al., 2021).
- Determinação teórica do potencial de geração de biogás – Cálculo baseado na composição da biomassa, estimando a quantidade de metano que pode ser produzida a partir do substrato (Angelidaki et al., 2019).

Além dessas análises, a composição dos hidrolisados obtidos a partir da hidrólise subcrítica em água da palha de milho também tem sido amplamente estudada. A presença de açúcares fermentáveis, ácidos orgânicos e compostos inibidores, como furfural e ácido acético, impacta diretamente a conversão da biomassa e a eficiência dos microrganismos anaeróbios responsáveis pela digestão (Sun et al., 2022).

Abordagens Metodológicas e Principais Estudos sobre o Pré-Tratamento da Palha de Milho

O material residual do milho, assim como tipo e condições na qual foi colhido, podem influenciar nos resultados finais de cada estudo. De acordo com a revisão realizada, os diversos métodos de pré-tratamento analisados (físico-químicos, biológicos e combinados) apresentaram distintas abordagens e eficiências no processamento de biomassa lignocelulósica, especialmente no contexto da produção de açúcares fermentáveis e etanol. Os resultados demonstram variações significativas nos rendimentos de glicose, xilose e na remoção de lignina entre os diferentes métodos, que abordam diferentes estratégias de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, incluindo:

- Licor negro derivado de switchgrass com filtração antes da hidrólise enzimática.
- Explosão a vapor, com e sem desintoxicação do hidrolisado.
- Torrefação.
- Dissolução com líquidos iônicos e extração alcalina.
- Extrusão alcalina-mecânica em configurações de rosca dupla e refinação química.
- Pré-tratamento com permanganato de potássio assistido por organossolv.
- Pré-tratamento com cal para produção de bioetanol de segunda geração.
- Processo biológico com a cepa bacteriana *Bacillus* sp. P3.
- Pré-tratamento combinado com ácido diluído e sulfito de sódio alcalino.
- Pré-tratamento com ácido fosfotúngstico.

No pré-tratamento com licor negro, Xu et al. (2011) observaram que o rendimento de glicose atingiu até 73,2% do rendimento teórico, com rendimentos totais de açúcares redutores comparáveis com tratamentos realizados com NaOH. Embora eficiente, a principal limitação foi o baixo rendimento de xilose, o que pode reduzir a conversão total em açúcares fermentáveis utilizando filtração antes da hidrólise enzimática. Os resultados indicaram que o rendimento total de açúcares redutores, incluindo glicose e xilose, da palha de milho pré-tratada com NaOH foi equivalente ao da biomassa pré-tratada com licor negro, demonstrando a viabilidade desta nova tecnologia de pré-tratamento.

Por outro lado, Wang et al. (2014) obtiveram um rendimento de xilose de 77,5% utilizando a explosão a vapor com hidrólise sem detoxificação, superior ao observado em muitos outros métodos. A condição ideal de pré-tratamento para maximizar o rendimento de xilose envolvia 1% de impregnação com ácido sulfúrico (H₂SO₄) seguida de explosão de vapor

a 180°C por 9 minutos. Essa abordagem resultou na produção de 16,04 g de xilose a partir de 100 g de palha de milho. Esse resultado, alcançado com um risco ambiental menor, destaca a vantagem do uso de ácidos diluídos seguidos por explosão a vapor para otimizar a recuperação de hemicelulose.

A combinação de explosão a vapor com tratamento alcalino foi avaliada por Guo et al. (2013), a qual mostrou ser uma abordagem eficaz para a degradação da biomassa, especialmente com a redução de celulose e lignina. O tratamento combinado de explosão de vapor, hidróxido de sódio e fermentação microbiana apresentou o melhor efeito na degradação da palha de milho após a análise dos resultados experimentais. Esse método destacou-se ao considerar a integração com fermentação microbiana, mostrando-se promissor na quebra estrutural da palha de milho.

Os métodos envolvendo torrefação (Li et al., 2022) e extração com solventes iônicos (Geng et al., 2021) demonstraram melhorias significativas no rendimento de açúcares redutores e na capacidade de dissolução das fibras. O pré-tratamento térmico elevou o rendimento de bio-hidrogênio em 70,79%, enquanto o tratamento com solventes iônicos facilitou a remoção de lignina e aumentou a acessibilidade da celulose. O rendimento de açúcares redutores e hidrogênio aumentou significativamente, em 46,41% e 70,79%, respectivamente. Embora a dissolução em líquido iônico com extração alcalina seja considerada cara, ela oferece uma economia geral favorável ao processo de conversão. Esse processo pode permitir a conversão eficiente da biomassa em açúcar, reduzindo significativamente a carga enzimática (Geng et al., 2021).

Liu et al. (2018) avaliaram o método de extrusão alcalina e verificaram que o mesmo apresentou um aumento expressivo no teor de glucana, chegando a 50,44%, superando o teor de amostras não tratadas e o teor obtido por outras técnicas de pré-processamento. Este resultado sugere que a remoção eficaz de lignina é um fator crítico para a obtenção de altas concentrações de celulose em biomassa pré-tratada. A extrusão alcalina (ATSE) proporcionou um maior rendimento total de açúcar em comparação com o pré tratamento alcalino (APR), demonstrando a eficácia do pré-tratamento mecânico-químico sinérgico.

Chen et al. (2020) utilizaram o pré-tratamento com permanganato de potássio assistido por organossolv e observaram que o enriquecimento de celulose foi considerável, especialmente com o aumento da temperatura, evidenciando que altas temperaturas de pré-tratamento são necessárias para a deslignificação eficiente e a conversão de celulose em glicose. No entanto, essa abordagem também resultou em uma diminuição dos rendimentos de sólidos e perda de xilana, o que pode afetar negativamente a recuperação total de açúcares e indica uma eficiência elevada na concentração de glucana nas frações sólidas.

No pré-tratamento com cal, Fírvida et al. (2021) obtiveram uma recuperação de glucana de até 97,7%, com um aumento de 22% em relação à biomassa crua. Destacaram que o uso adequado de cal no processamento pode melhorar significativamente a sacarificação enzimática da celulose da palha de milho. Sob condições otimizadas, foi possível atingir uma conversão de etanol de 72,4% por fermentação simultânea de sacarificação. A estabilidade dos teores de glucana e xilana após o pré-tratamento com cal demonstra a robustez desse método para a produção de etanol de segunda geração.

Com o uso de uma cepa bacteriana, *Bacillus* sp. P3, Wu et al. (2021) obtiveram uma recuperação de 66% de sólidos e uma liberação de açúcares redutores 57% maior em comparação com a palha não tratada. Além disso, o método foi eficiente na degradação da lignina. Dessa forma, concluíram que essa cepa e suas enzimas podem não apenas pré tratar a biomassa, mas também serem combinadas com métodos mais severos para otimização de custos e a sustentabilidade das produções industriais de bioenergia. Isso demonstra o potencial da biocatálise microbiana em processos de pré-tratamento biológico.

No trabalho de Sun et al. (2022), foi verificado que a combinação de ácido diluído e sulfito de sódio, a qual mostrou ser altamente eficiente na recuperação de xilose (93,0%) e remoção de lignina (85,0%), além de uma conversão de celulose de 85,4% em 72 horas, resultando em 48,5 g/L de etanol. Verificaram que o processo pode efetivamente separar a lignina, ao mesmo tempo em que obtém alta recuperação de glucano e xilana, melhorando significativamente a digestibilidade enzimática da palha de milho pré-tratada. Esses resultados indicam uma abordagem promissora para processos integrados de sacarificação e fermentação.

O pré-tratamento da palha de milho é uma etapa fundamental para a viabilização de sua aplicação em processos biotecnológicos, especialmente na produção de biogás, biocombustíveis e bioprodutos. Diversos estudos têm investigado métodos eficientes para a remoção de barreiras estruturais e o aumento da disponibilidade de açúcares fermentescíveis, considerando diferentes abordagens físico-químicas, biológicas e combinadas.

Na Tabela 1 é apresentada uma síntese das principais pesquisas analisadas sobre o pré-tratamento da palha de milho, destacando os métodos utilizados, os compostos obtidos e os principais resultados observados, a fim de fornecer uma visão consolidada das tendências e avanços nesse campo.

Tabela 1 Síntese de pesquisas sobre o pré-tratamento da palha de milho.

Compostos obtidos	Referências	Metodologia	Informações adicionais
Glicose, xilose, lignina e outros	Xu et al. (2012)	Produção com licor negro derivado de switchgrass, usando filtração, antes da hidrólise enzimática.	Os rendimentos totais de açúcar redutor, glicose e xilose da palha de milho indicam a viabilidade desta nova tecnologia de pré-tratamento. Na melhor carga de HTec (endoxylanase) celular, o rendimento total de açúcares redutores da palha de milho pré-tratada com NaOH foi de 430,2 mg/g de biomassa bruta, que foi o mesmo da biomassa pré-tratada com licor negro.
Xilose, Glicose, Arabinose, Ácido fórmico, Ácido acético, Furfural, 5-HMF, compostos fenólicos, Xilitol	Wang et al. (2014)	Explosão de vapor usando hidrolisado sem desintoxicação.	A condição ideal de pré-tratamento para obter o maior rendimento de xilose foi 1% de impregnação com H ₂ SO ₄ seguida de explosão de vapor a 180 °C por 9 min. Obteve-se uma produtividade de 16,04 g de xilose a partir de 100 g de palha de milho.
Glucana, Xilana, Lignina	Guo et al. (2013)	Explosão de vapor	Os tratamentos combinados de explosão de vapor, hidróxido de sódio e fermentação microbiana são um bom método para a degradação da palha e pode-se concluir que os tratamentos combinados com hidróxido de sódio e fermentação microbiana tiveram o melhor efeito na degradação da palha de milho após considerar os resultados experimentais totais.
Glucana, Xilana, Lignina	Li et al. (2022)	Torrefação	O rendimento de açúcares redutores e hidrogênio aumentou 46,41% e 70,79%.
Glucano Xilana, Manano, Arabinano, Galactano, Glucano/xilana, Lignina, Cinza	Geng et al. (2021)	Dissolução de líquido iônico com extração alcalina	As etapas são consideradas caras, mas é importante considerar a economia geral do processo de conversão. O transporte e a moagem da biomassa também são caros e o processo de pré-tratamento alcalino/IL demonstrado neste estudo pode permitir a conversão eficiente da biomassa em açúcar. Em contraste com outros esquemas publicados, as etapas de Extração alcalina e água desionizada são facilmente escaláveis. Além disso, esse processo pode diminuir significativamente a carga enzimática, outro componente caro da conversão de biomassa industrial.
Glucana, Xilana, Lignina Klason,	Liu et al. (2018)	Extrusão de dupla rosca alcalina-mecânica	O pré-tratamento com ATSE resulta em maior rendimento total de açúcar do que o pré-tratamento com APR em uma condição de pré-tratamento leve (99 °C) e alta proporção de

Lignina solúvel em ácido		alcalina (ATSE) e refino de pré-tratamento alcalino (APR)	biomassa/líquido (1:2). Isso demonstra que o pré-tratamento mecânico-químico sinérgico de ATSE tem maior eficiência de pré-tratamento do que o pré-tratamento de refino sequencial de APR. ATSE é um método promissor para o pré-tratamento de lignocelulose.
Glucano, Xilana, Lignina, Extrativos	Chen et al. (2020)	Pré-tratamento com organosolv assistido por permanganato de potássio	Para o pré-tratamento etanol-água da palha de milho, é necessária uma alta temperatura de pré-tratamento para a deslignificação de alta eficiência e obtenção da conversão de celulose em glicose de >80% com 72 h de hidrólise enzimática. O pré-tratamento também resultou na diminuição e maior perda de xilana, o que diminui a recuperação total de açúcares. Como um oxidante extremamente forte, o permanganato tem sido usado no pré-tratamento antes da deslignificação com oxigênio ou branqueamento com peróxido de hidrogênio para aumentar o grau de deslignificação ou a eficiência de branqueamento do peróxido de hidrogênio.
grupos Glucana, Xilana, Lignina Klason, Arabinana, Acetil	Fírvida et al. (2021)	Pré-tratamento alternativo de cal para produção de bioetanol de segunda geração	Sob condições selecionadas (121 °C, 1 h e 0,1 g de cal/g de palha de milho), etanol celulósico foi produzido com sucesso, atingindo uma conversão de etanol de 72,4% por sacarificação e fermentação.
Glucano, Xilana, Lignina	Wu et al. (2021)	Pré-tratamento usando uma cepa bacteriana <i>Bacillus</i> sp. P3	A cepa P3 e suas enzimas não só podem ser utilizadas para pré-tratar apenas a biomassa, mas também podem ser combinadas com outros métodos mais severos para melhorar a eficiência de custos e respeito ao meio ambiente das produções industriais de bioenergia.
Sólidos: Glucano, Xilana, Lignina. Líquidos: Recuperação de Xilana, Furfural, HMF	Sun et al. (2022)	Processo de pré-tratamento combinando ácido diluído (DA) e sulfito de sódio alcalino (ASS)	O processo ASS pode efetivamente separar a lignina enquanto obtém alta recuperação de glucano e xilana. Após o pré-tratamento usando os dois processos, a digestibilidade enzimática da palha de milho pré-tratada foi efetivamente melhorada. Usando um processo sacarificação semi-simultânea e fermentação em batelada alimentada, a concentração final de etanol no líquido de fermentação atingiu 48,5 g/L e 50 g/L a um teor de substrato de 18% com a palha de milho pré-tratada.
Glucana, Xilana, Lignina	Chen et al. (2021)	Pré-tratamento com ácido fosfotúngstico	O experimento demonstra o uso bem-sucedido de uma técnica potencial que combina PTA e celulase para sacarificação de palha de milho sob condições relativamente leves. Os resultados mostram que o pré-tratamento com PTA teve uma influência significativa na microestrutura da palha de milho. Além disso, o PTA resolve os problemas

			de outros ácidos, como irrecuperabilidade e corrosividade e, ao mesmo tempo, é mais substancial para a natureza em comparação com os métodos tradicionais.
--	--	--	--

Métodos como a explosão a vapor são amplamente reconhecidos por sua eficácia na despolimerização da lignina, um componente estrutural resistente da biomassa que impede o acesso das enzimas às fibras de celulose (Wang et al., 2015; Sun et al., 2022). A remoção eficiente da lignina é crucial para aumentar os rendimentos de açúcares fermentáveis, fundamentais para a produção de bioetanol e biogás. No entanto, esses métodos muitas vezes requerem altas temperaturas e pressões, o que pode resultar em custos operacionais elevados e na necessidade de equipamentos robustos e especializados (Guo et al., 2013).

Por outro lado, métodos químicos, com uso de solventes iônicos ou ácidos diluídos, oferecem uma alternativa viável para a conversão de biomassa, facilitando a quebra das ligações lignocelulósicas e aumentando a solubilidade dos componentes desejados (Geng et al., 2019; Chen et al., 2021). A eficiência desses processos é bem documentada, especialmente em termos de aumento da acessibilidade da celulose e hemicelulose para posterior hidrólise enzimática (Xu et al., 2012). No entanto, a aplicação desses métodos em larga escala enfrenta desafios significativos, como a necessidade de recuperação e reciclagem dos solventes, além de questões relacionadas à corrosão de equipamentos e ao manejo de resíduos tóxicos (Keijer et al., 2019).

Métodos biológicos, que utilizam microrganismos ou enzimas para degradar a biomassa, apresentam uma abordagem mais ambientalmente amigável, com menor consumo de energia e a produção de subprodutos menos nocivos. Esses métodos têm mostrado potencial na melhoria da acessibilidade da celulose, ao mesmo tempo em que preservam a estrutura dos açúcares fermentáveis (Wu et al., 2021). No entanto, sua aplicação em processos industriais ainda é limitada pela lentidão do processo e pela variabilidade na eficiência de degradação, que pode ser influenciada por fatores como a composição específica da biomassa e as condições ambientais (Luong et al., 2021).

A extrusão, uma técnica mecânica combinada com tratamento químico, emerge como uma solução promissora para superar as limitações de outros métodos. Este processo, que envolve a aplicação de pressão e calor simultaneamente, pode desestruturar a biomassa de forma eficiente, aumentando a área de superfície disponível para reações subsequentes e facilitando a conversão dos componentes lignocelulósicos (Liu et al., 2018). A extrusão tem o benefício adicional de ser um processo contínuo, o que pode ser mais facilmente integrado em operações industriais em larga escala, oferecendo uma combinação de alta eficiência e viabilidade econômica (Fírvida et al., 2021).

A conversão de celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis depende do método de pré-tratamento aplicado à biomassa. Na Tabela 2 é apresentada uma comparação entre diferentes estudos que analisaram o rendimento de glicose e xilose na palha de milho.

Tabela 2 Comparação dos rendimentos de glicose e xilose obtidos a partir de diferentes métodos de pré-tratamento da palha de milho.

Estudo	Método	Rendimento Glicose (%)	Rendimento Xilose (%)
Xu et al. (2011)	Licor negro	73,2	
Wang et al. (2014)	Explosão a vapor		77,5
Sun et al. (2022)	Ácido diluído + sulfito	85,4	93,0
Liu et al. (2018)	Extrusão alcalina		
Chen et al. (2020)	Organossolv + permanganato	80,0	
Fírvida et al. (2021)	Cal	97,7	

Entre os métodos analisados, a explosão a vapor (Wang et al., 2014), o uso de licor negro (Xu et al., 2011) e o tratamento com cal (Fírvida et al., 2021), demonstraram maior eficiência na conversão de açúcares, enquanto processos como extrusão alcalina (Liu et al., 2018) e solventes iônicos (Geng et al., 2021) apresentaram resultados mais moderados. A escolha do pré-tratamento ideal deve considerar tanto a remoção de lignina quanto a preservação da celulose, visando otimizar a produção de biocombustíveis e bioprodutos.

Assim a digestão anaeróbia de resíduos do processamento de milho se destaca como uma alternativa viável e sustentável para a produção de biogás, um combustível renovável que pode contribuir significativamente para a matriz energética global. A análise bibliométrica realizada no estudo demonstra o crescente interesse e avanço científico na área, especialmente em países com forte produção agrícola. As tendências de pesquisa indicam um foco particular em otimizar os rendimentos de biogás, seja por meio da codigestão com outros resíduos orgânicos ou pela melhoria das condições operacionais, como temperatura, pH e tempo de retenção. Isso inclui a melhoria das técnicas de pré-tratamento, que podem aumentar a biodegradabilidade dos resíduos e, assim, maximizar a produção de biogás. A

produção de biogás está fortemente relacionada com a melhoria da acessibilidade dos polímeros estruturais da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina principalmente). O biogás é produzido principalmente a partir da degradação de açúcares fermentáveis e da conversão de matéria orgânica. Além disso, a integração de sistemas de digestão anaeróbia em biorrefinarias multifuncionais, que utilizem múltiplas fontes de biomassa e produzam diversos produtos finais, pode ser uma estratégia para aumentar a viabilidade econômica desses processos.

Conclusões

Com base na revisão dos estudos analisados, observa-se que a eficiência do pré-tratamento da palha de milho está diretamente relacionada à capacidade de remoção da lignina e preservação da celulose, fatores essenciais para a obtenção de açúcares fermentáveis e, conseqüentemente, para a maximização da produção de biogás e bioetanol. Métodos térmicos e químicos, como a explosão a vapor combinada com impregnação ácida e o tratamento com solventes iônicos, demonstraram maior eficácia na conversão total de açúcares, promovendo a degradação da lignina e aumentando a acessibilidade da celulose para hidrólise enzimática.

Por outro lado, os métodos biológicos e mecânicos, como a extrusão alcalina e o uso de microrganismos degradadores de lignina, têm se mostrado alternativas promissoras por reduzirem a necessidade de insumos químicos e custos energéticos, embora ainda apresentem desafios quanto à velocidade do processo e à variabilidade nos rendimentos obtidos.

Portanto, a seleção do método de pré-tratamento mais adequado depende da composição específica da biomassa, dos custos operacionais e dos objetivos do processo de conversão. Estudos futuros devem focar na integração de abordagens híbridas, combinando tratamentos físico-químicos e biológicos para otimizar o rendimento de açúcares e a viabilidade econômica do processo, garantindo maior eficiência e sustentabilidade na conversão da biomassa lignocelulósica.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos analisados possuem suas próprias vantagens e desafios. Métodos térmicos e químicos demonstram alta eficiência na conversão de açúcares e remoção de lignina, enquanto métodos biológicos e de extrusão oferecem benefícios adicionais na melhoria da acessibilidade da celulose e na produção de açúcares fermentáveis. A escolha

do método ideal deve considerar a composição da biomassa e os objetivos específicos do processo de conversão.

Futuras pesquisas devem concentrar-se na inovação tecnológica, explorando novos materiais e métodos que possam reduzir os custos e aumentar a eficiência da digestão anaeróbia. Além disso, é fundamental promover a integração desses sistemas em processos industriais de maior escala, aproveitando sinergias com outras tecnologias de bioenergia e produção de bioprodutos. Será crucial para superar os desafios técnicos e econômicos, garantindo que a digestão anaeróbia de resíduos agrícolas se torne uma solução robusta e amplamente adotada para a produção sustentável de energia.

A digestão anaeróbia de resíduos do processamento de milho se mostra uma alternativa viável e sustentável para a produção de biogás. A análise bibliométrica confirma o crescente interesse e avanço científico na área, com um foco particular em otimizar os rendimentos e melhorar a eficiência dos processos. No entanto, ainda há desafios a serem superados, como a necessidade de tecnologias mais eficientes e economicamente viáveis para o tratamento dos resíduos e a produção de energia em larga escala. Futuras pesquisas devem concentrar-se na inovação tecnológica e na integração desses sistemas em processos industriais de maior escala.

4. REFERÊNCIAS

- ABIA, Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (2020). Números do Setor de Alimentos. Available at: <https://www.abia.org.br/>. Acessado em Março 2023.
- Angelidaki, I., Xie, L., Luo, G., et al. Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (Second Edition), Academic Press, 817-843, 2019.
- Cheah, W. Y., Sankaran, R., Show, P. L., et al. Pretreatment methods for lignocellulosic biofuels production: current advances, challenges and future prospects. *Biofuel Research Journal*, 7, 1115-1127, 2020.
- Chen, B. H., Wang, Z. Q., Jin, Z.C., et al. Optimized phosphotungstic acid pretreatment for enhancing cellulase adsorption and biomass saccharification in corn stover. *Conversion and Biorefinery* 13, 9249–9264, 2023.
- Chen, H., Li, X., Yu, S., et al. Potassium permanganate assisted organosolv pretreatment enhances enzymatic hydrolysis of corn stover. *GCB Bioenergy*, 13, 665-678, 2021.
- CNI. ECONOMIA CIRCULAR Oportunidades e Desafios Para A Indústria Brasileira. 2018.

Conab. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA, Boletim da safra de grãos 2019/2020, Info-Agro, 2020.

Das, S., Lee, S. H., Kumar, P., et al. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 228, 658-678, 2019.

Dragone, G., Kerssemakers, A. A. J., Driessen, J. L. S. P., et al. Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries. *Bioresource Technology*, 302, 122847, 2020.

Embrapa Agroenergia. ISSN 2177-4439 Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. CNPTIA, 2012.

Embrapa Agroenergia. O conceito de biorrefinaria, CNPTIA at: www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/908142/1/biorrefinariamodificadoweb.pdf. 2011.

Fírvida, I.; del Río, P. G.; Gullón, P.; et al. Alternative Lime Pretreatment of Corn Stover for Second-Generation Bioethanol Production. *Agronomy*, 11, 2021.

Geng, X., Henderson, W. A. Pretreatment of corn stover by combining ionic liquid dissolution with alkali extraction. *Biotechnology and Bioengineering*, 109: 84-91, 2012.

Geng, Y., Sarkis, J., Bleischwitz, J. How to globalize the circular economy. *Nature*, 565, 153-155, 2019.

Guo, H., Chang, J., Yin, Q., et al. Effect of the combined physical and chemical treatments with microbial fermentation on corn straw degradation. *Bioresource Technology*. 148, 361-365, 0960-8524, 2013.

Keijer, T., Bakker, V., Slootweg, J. C. Circular chemistry to enable a circular economy. *Nature Chemistry*, 11, 3, 190-195, 2019.

Li, Y., Fan, X., Zhang, H, et al. Pretreatment of corn stover by torrefaction for improving reducing sugar and biohydrogen production. *Bioresource Technology*. 351, 126905, 0960-8524, 2022.

Liu, H., Pang, B., Zhao, Y., et al. Comparative study of two different alkali-mechanical pretreatments of corn stover for bioethanol production, *Fuel*. 221, 21-27, 0016-2361, 2018.

Margallo, M., Ziegler-Rodriguez, K., Vázquez-Rowe, I., et al. Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Science of The Total Environment*, 689, 1255-1275, 2019.

Nguyen, L. N., Kumar, J., Vu, M. T., et al. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques, *Science of The Total Environment*, 765, 142753, 0048-9697, 2021.

Ramesh, M., Abinaya, S., Khan, A., et al. Current and future trends in food waste valorization for the production of chemicals, materials, and fuels by advanced technology to convert food wastes into fuels and chemicals, *Woodhead Publishing*, 135-147, 2021.

Ricciardi, P., Cillari, G., Carnevale Miino, M., et al. Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector: A review. *Waste Management & Research*, 38, 5, 487-513, 2020.

Srisowmeya, G., Chakravarthy, M., Devi, G. N. Sustainable energy production from food waste—advanced production strategies and management in the anaerobic digestion process, *Woodhead Publishing*, 123-149, 2021.

Sun, W., Li, X., Zhao, J., et al. Pretreatment Strategies to Enhance Enzymatic Hydrolysis and Cellulosic Ethanol Production for Biorefinery of Corn Stover. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 13163, 2022.

Toor, M., Kumar, S. S., Malyan, S. K., et al. An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere*, 242, 125080, 2020.

Ubando, A. T., Felix, C. B., Chen, W. H. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299, 122585, 2020.

Xu, J., Zhang, X., Cheng, J. J. Pretreatment of corn stover for sugar production with switchgrass-derived black liquor, *Bioresource Technology*, 111, 255-260, 0960-8524, 2012.

Wang, W., Ling, H., Zhao, H. Steam explosion pretreatment of corn straw on xylose recovery and xylitol production using hydrolysate without detoxification. *Process Biochemistry*. 50, 1623-1628, 1359-5113, 2015.

Weber, C. T., Trierweiler, L. F., Trierweiler, J. O. Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato. *Journal of Cleaner Production*, 268, 21788, 2020.

Wu, Y., Guo, H., Rahman, M. S, et al. Biological pretreatment of corn stover for enhancing enzymatic hydrolysis using *Bacillus* sp. P3. *Bioresources and Bioprocessing* 8, 92, 2021.

Contatos: arthurmaccamargo@gmail.com; milena.ferreira@mackenzie.br