

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE *AGAVE SISALANA* PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM BIORREFINARIAS NO NORDESTE DO BRASIL

JEAN CONSTANTINO GOMES DA SILVA¹, GUSTAVO COLUCCI FERNANDES²,
JOÃO PEDRO DESTRO ALCÂNTARA², MARCELO FALSARELLA
CARAZZOLLE³, GONÇALO AMARANTE GUIMARÃES PEREIRA⁴, GUSTAVO
MOCKAITIS⁵

¹ Engenheiro Químico, Pós Doutorando, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas -SP, jean.constantino@cear.ufpb.br

² Estudante de Engenheiro Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas -SP

³ Físico, Prof. Doutor, Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas -SP

⁴ Engenheiro Agrônomo, Prof. Doutor, Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas -SP

⁵ Engenheiro Químico, Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas -SP

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: A produção de fibras de *Agave sisalana* no Brasil enfrenta desafios econômicos e sociais devido aos avanços tecnológicos na produção de polímeros e ao baixo nível de mecanização e plantio desordenado. No entanto, o processo de produção atual gera uma quantidade significativa de resíduos, oferecendo oportunidades para o estabelecimento de uma biorrefinaria de Agave. Este trabalho revisa a literatura para analisar o potencial do agave na produção de biocombustíveis, identificando tendências e desafios. O processo de produção de fibras de *Agave sisalana* gera resíduos consideráveis. A fração líquida resultante é adequada para a produção de etanol via fermentação, enquanto os outros resíduos podem ser convertidos em metano, hidrogênio, bio-óleo e biocarvão através de digestão anaeróbica e pirólise. A integração dessas tecnologias pode levar à criação de uma biorrefinaria. No entanto, a escassez de pesquisas sobre essa abordagem impede a otimização de recursos e o desenvolvimento de novos produtos e rotas.

PALAVRAS-CHAVE: agave; biorefinaria; valorização de resíduos

POTENTIAL FOR UTILIZATION OF *AGAVE SISALANA* RESIDUES FOR ENERGY PRODUCTION IN BIOREFINERIES IN NORTHEAST BRAZIL

ABSTRACT: The production of *Agave sisalana* fibers in Brazil faces economic and social challenges due to technological advancements in polymer production and the low level of mechanization and disordered planting. However, the current production process generates a significant amount of waste, offering opportunities for the establishment of an Agave biorefinery. This paper reviews the literature to analyze the potential of agave in biofuel production, identifying trends and challenges. The production process of *Agave sisalana* fibers generates considerable waste. The resulting liquid fraction is suitable for ethanol production via fermentation, while the other residues can be converted into methane, hydrogen, bio-oil, and biochar through anaerobic digestion and pyrolysis. The integration of these technologies can lead to the creation of a biorefinery. However, the scarcity of research

on this approach hinders resource optimization and the development of new products and routes.

KEYWORDS: agave, biorefinery, waste valorization

INTRODUÇÃO: Agave é um gênero de plantas nativas das regiões semiáridas da América Central e do Norte, com mais de 200 espécies conhecidas. O México abriga 70% das espécies de Agave e é considerado o centro de biodiversidade desse gênero. *Agave sisalana* foi introduzida no Brasil em 1903, na Bahia, e foi de grande importância econômica para a produção de fibras durante o período pós-guerra. Atualmente, o Brasil responde por 41,0% da produção mundial de fibra de sisal em 2020 (FAO, 2022), sendo a região Nordeste do Brasil responsável por toda a produção nacional em 2020 (86 mil toneladas de fibra) com um valor estimado de US\$53,2 milhões (IBGE, 2022). Por outro lado, os avanços tecnológicos na produção de polímeros a preços muito baixos desde os anos 1960-70 tornaram o cultivo, extração e processamento de *Agave sisalana* economicamente inviáveis no Brasil. Este trabalho tem por objetivo realizar um levantamento de informações da literatura sobre as diferentes rotas de conversão do *Agave sisalana* em bioprodutos.

MATERIAL E MÉTODOS: O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura com o propósito de sintetizar e analisar as informações disponíveis sobre potencial do agave para a produção de biocombustíveis e identificar as principais tendências, avanços e desafios na área. Para a elaboração desta revisão, foram realizadas buscas em bases de dados eletrônicas, incluindo *ScienceDirect*, *Scopus* e *Google Scholar*. A estratégia de busca foi desenvolvida com base nos termos-chave relacionados ao tema em questão, seguindo o código: ("*Agave*" and "*Anaerobic digestion*") or ("*Agave*" and "*pyrolysis*") or ("*Agave*" and "*fermentation*"). Um total de 90 trabalhos foram analisados, estes que variam entre os anos de 1981-2023. É importante ressaltar que esta revisão se baseia exclusivamente em dados secundários disponíveis na literatura. A ausência de dados experimentais próprios pode limitar algumas conclusões, e os resultados apresentados devem ser interpretados considerando essa restrição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O processo atual de produção de fibras de *Agave sisalana* gera cerca de 95% de resíduos na forma de uma mistura heterogênea de líquidos e biomassa sólida. Além disso, a extração das fibras requer mão de obra humana, uma vez que não existem máquinas para uma extração segura e eficiente. Esses fatores têm impactado não apenas a economia, mas também o aspecto social em algumas regiões do Brasil. Por outro lado, a fração líquida resultante da extração das fibras possui um alto teor de inulina presente nas folhas, o que a torna adequada para a produção de etanol por meio de processo de fermentação, após o pré-tratamento para conversão em açúcares redutores. Os outros resíduos podem ser tratados em processos de digestão anaeróbica para a produção de metano e hidrogênio, enquanto o digestato e os sólidos resultantes do processo podem ser utilizados para a produção de bio-óleo e biocarvão. Portanto, é possível criar uma biorrefinaria com base no Agave como matéria-prima (Figura 1), explorando os diversos produtos derivados da planta e aumentando a eficiência e sustentabilidade do processo de produção.

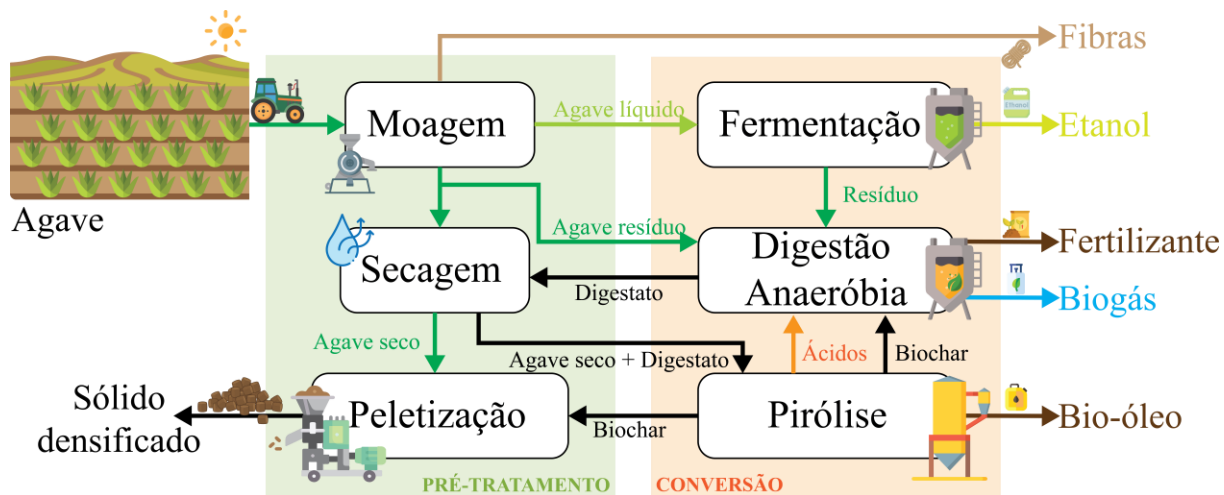


Figura 1 – Diagrama simplificado e conceitual para desenvolvimento de uma biorrefinaria utilizando o agave como matéria-prima

A integração de duas ou mais tecnologias de conversão tem como objetivo alcançar uma maior recuperação de energia a partir de compostos intermediários e subprodutos gerados durante um processo, minimizando assim o custo e os impactos ambientais de processos isolados, e sendo capaz de gerar um fluxo contínuo de diferentes tipos de produtos de valor agregado, criando uma economia circular. Portanto, ao combinar processos de conversão conhecidos, como fermentação, digestão anaeróbica, pirólise e combustão, é possível criar um fluxo contínuo de produtos para melhor utilização química e energética, resultando na criação de uma biorrefinaria de Agave. As regiões nordeste do Brasil, que possuem vastas áreas com características climáticas favoráveis, têm um grande potencial para se beneficiar do desenvolvimento econômico e social proporcionado pelo uso do Agave. A pirólise e a digestão anaeróbica são processos amplamente utilizados em diversos setores da economia devido às suas baixas emissões de gases de efeito estufa e ao tratamento e estabilização de resíduos. O processo de pirólise para geração de bio-óleo também gera uma mistura de água e ácidos (ácido acético, propiônico e butírico) como principal subproduto, comumente chamado de ácido pirolenhoso, que afeta negativamente o processo (corrosão de componentes e geração de volume devido à não recuperação) (Larionov et al., 2021). Nesse contexto, a digestão anaeróbica para produção de biogás pode ser uma alternativa viável para o gerenciamento desse subproduto da pirólise devido à sua composição favorável a reações bioquímicas. Por outro lado, no processo de digestão anaeróbica, o substrato (matéria orgânica) geralmente não é completamente estabilizado, resultando na produção de um resíduo sólido, chamado de digestato. Nesse sentido, a pirólise pode ser utilizada para converter o digestato em biocarvão e outros produtos, que podem ter diferentes aplicações, incluindo a melhoria da produção e qualidade do biogás, redução de instabilidades e inibições no processo de digestão, bem como purificação do biogás. Recentemente, estudos têm relatado o uso do ácido pirolenhoso como fonte de carbono para a produção de biogás e do digestato como matéria-prima para a pirólise, o que demonstra uma nova possibilidade de uso desses subprodutos (Fan et al., 2022; Rios-Del Toro et al., 2021). A literatura mostra o potencial sustentável de energia alcançado pela integração de processos de valorização de biomassa, seja ela bruta ou proveniente de seus resíduos. No entanto, a maioria dos artigos de pesquisa não detalha a integração desses processos, mesmo que sejam intitulados "biorrefinaria". Muitos estudos realizados em escala laboratorial envolvem apenas pequenas escalas (analisadores termogravimétricos) e avaliam apenas características específicas dentro da integração, como o uso do líquido pirolenhoso na digestão anaeróbica ou a pirólise de

sólidos estabilizados pela digestão anaeróbica. Em relação aos resíduos de agave, a literatura atual se limita a um único estudo (Rios-Del Toro et al., 2021) que visava recuperar energia do bagaço de *Agave tequilana* (resíduo da indústria de tequila) utilizando processos biológicos e termoquímicos. No entanto, esse estudo realizou a hidrólise ácida do bagaço e separou a fase líquida da fase sólida, convertendo-as separadamente por meio de processos bioquímicos e termoquímicos, sem reutilizar os subprodutos gerados por ambos os processos. Portanto, não existem estudos que tenham aplicado sinergicamente os subprodutos do processo entre os processos, em um conceito que possa ser verdadeiramente considerado uma "biorrefinaria". Assim, ainda há escassez de investigações científicas sobre o assunto, o que limita o conhecimento sobre a utilização dessa alternativa em processos e reatores reais. Além disso, a falta de consideração para a integração de processos impede a otimização da utilização de recursos e a maximização da produção de produtos de valor agregado, bem como o desenvolvimento de novas rotas e produtos.

CONCLUSÃO: Em resumo, a produção de fibras de *Agave sisalana* no Brasil enfrenta desafios econômicos e sociais devido aos avanços tecnológicos na produção de polímeros. No entanto, o processo de produção atual gera uma grande quantidade de resíduos, oferecendo oportunidades para a criação de uma biorrefinaria de Agave. A integração de tecnologias de conversão, como fermentação, digestão anaeróbica, pirólise e combustão, pode maximizar a recuperação de energia e a produção de produtos de valor agregado. A região Nordeste do Brasil, com suas características climáticas favoráveis, apresenta um grande potencial para se beneficiar do desenvolvimento econômico e social proporcionado pelo uso do Agave. No entanto, há uma escassez de investigações científicas sobre o assunto, limitando o conhecimento sobre o uso dessas tecnologias em escala real e a otimização do processo.

AGRADECIMENTOS: Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos as Shell, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e a Fundação de Desenvolvimento da Unicamp (FUNCAMP).

REFERÊNCIAS: Fan, Q., Fan, X., Fu, P., Li, Y., Zhao, Y., & Hua, D. (2022). Anaerobic digestion of wood vinegar wastewater using domesticated sludge: Focusing on the relationship between organic degradation and microbial communities (archaea, bacteria, and fungi). *Bioresource Technology*, 347, 126384

FAO. (2022). Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

IBGE. (2022). Área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras permanentes.

Larionov, K. B., Gvozdyakov, D. V., Zenkov, A. V., Kaltaev, A. Z., Ulko, A. A., & Gubin, V. E. (2021). Energy recycling of pyrolysis water as a part of coal-water fuel. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 14895–14909

Rios-Del Toro, E. E., Chi, H., González-Álvarez, V., Méndez-Acosta, H. O., Arreola-Vargas, J., & Liu, H. (2021). Coupling the biochemical and thermochemical biorefinery platforms to enhance energy and product recovery from *Agave tequilana* bagasse. *Applied Energy*, 299, 117293.