



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

VINÍCIUS AZRAEL SINÉSIO ALEXANDRE DA SILVA

**PRÉ-TRATAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
APLICANDO SAIS ALCALINOS**

SUMÉ - PB

2025

VINÍCIUS AZRAEL SINÉSIO ALEXANDRE DA SILVA

**PRÉ-TRATAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
APLICANDO SAIS ALCALINOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

Orientador: Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.

SUMÉ - PB

2025



S586p Silva, Vinícius Azrael Sinésio Alexandre da.
Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar
aplicando sais alcalinos. / Vinícius Azrael Sinésio
Alexandre da Silva. - 2025.

34 f.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.
Monografia - Universidade Federal de Campina
Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do
Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e
Bioprocessos.

1. Biomassa lignocelulósica. 2. lignina. 3.
Bagaço da cana-de-açúcar. 4. Açúcares redutores. 5.
Bioprocessos. 6. Sais alcalinos. 7. Pré-tratamento
- bagaço de cana. 8. Resíduo - cana-de-açúcar. 9.
Subproduto bagaço - cana-de-açúcar. I. Nunes, Bruno
Rafael Pereira. II. Título.

CDU: 60 (043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

VINÍCIUS AZRAEL SINÉSIO ALEXANDRE DA SILVA

**PRÉ-TRATAMENTO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
APLICANDO SAIS ALCALINOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes
Orientador – UAEB/CDSA/UFCG

Professor Dr. Aldre Jorge Morais Barros
Examinador I – UAEB/CDSA/UFCG

Professora Dra. Maria José Herculano Macedo
Examinadora II – UATEC/CDSA/UFCG

Trabalho aprovado em: 14 de maio de 2025.

SUMÉ - PB

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Elenilda, Aristófanis e minha irmã Sophie, gostaria de expressar minha profunda gratidão. Por sempre estarem ao meu lado mesmo em situações adversas, me apoiando e me dando um norte com o que fazer e me incentivando a nunca desistir.

Ao meu orientador, professor Dr. Bruno Nunes pela sua incrível paciência, ensinamentos, dedicação e amizade, conseguindo aguentar minhas loucuras desde o período do projeto e pela sua postura concisa e caráter irrefutável.

Aos meus amigos Judieldo, Emanuelle, Joana, Otto, Igor, Edson, Larisse e Carla que estiveram comigo desde o início do curso, me ensinando, me auxiliando a ser uma pessoa melhor. Aos meus amigos que surgiram durante a graduação Adriel, Yasmin, Valdisia, Joyce, André, Luiza, Will, Karine, João Gabriel e Joel.

A Damares e Adriel pelas suas ajudas durante o curso e pelas suas ajudas no laboratório principalmente no período do estágio quase arrancando meus dedos com uma tesoura para podar.

Aos meus professores do CDSA/UFCG Aldre, Janduy, Ana Verônica, Jean, Bruno, Glauciane, Franklin, Ilza pelos ensinamentos, auxílio na resolução de problemas e contribuição na minha formação.

Aos técnicos dos laboratórios Agnes, Morgana de Vasconcellos, Cícero Dunes, Danielle Varela pelos seus auxílios laboratoriais e a Anderson, Novinha e João pelo auxílio dentro do CDSA e fora do campus também.

RESUMO

Uma das principais fontes de energia renovável no Brasil são as biomassa, sendo a lignocelulose, o principal componente da biomassa vegetal, formada basicamente por celulose, hemicelulose e lignina. O plantio e o processamento de diversos cultivares, como a cana-de-açúcar, geram uma quantidade considerável de resíduos que podem causar impactos ambientais, se não forem descartados corretamente. Grande parte deste resíduo, pode ser reaproveitado como matéria-prima na geração de energia e de produtos com alto valor agregado. A aplicação de uma etapa de pré-tratamento a este tipo de material permite promover a ruptura do complexo lignina-celulose-hemicelulose, tornando-o apto a aplicação em bioprocessos. Nesse contexto, alguns catalisadores têm sido estudados, devido aos benefícios como a geração de efluentes menos corrosivos e não poluentes. Com isso, o objetivo geral deste projeto foi avaliar a deslignificação do bagaço de cana, após a aplicação de um pré-tratamento usando sal alcalino. A biomassa lignocelulósica foi seca, moída e submetida ao processo para determinação da quantidade de lignina e açúcares redutores, sendo estas etapas realizadas antes e após o pré-tratamento. Os testes catalíticos foram conduzidos em autoclave a 120°C, na ausência e na presença de cada sal, sendo testados o carbonato de sódio e o fosfato de sódio. As condições foram definidas por meio da aplicação de um planejamento fatorial 2² com três repetições no ponto central para avaliar a influência da massa de sal e do tempo de processo sobre a quantidade de lignina e de açúcares redutores (AR), presentes no resíduo sólido e no meio reacional, respectivamente. Para o planejamento utilizando carbonato de sódio foi possível observar que a interação do sal com o tempo foi estatisticamente significativa para a remoção da lignina, entretanto, os fatores isolados não tiveram significância estatística. Aplicando este sal foi possível remover até 61% da massa de lignina presente no material *in natura*. Esse resultado foi alcançado aplicando 10 g de sal e 45 minutos de processo. O tratamento utilizando o fosfato de sódio não apresentou valores estatisticamente significativos tanto para a liberação de açúcares redutores como para lignina. O máximo de remoção de lignina alcançado foi de 42%, aplicando 10 g de sal em 15 minutos de processo. O pré-tratamento alcalino previsto nos objetivos foi concluído seguindo a metodologia explicitada neste trabalho, comprovando estatisticamente que houve a participação dos sais alcalinos no processo de remoção da lignina presente no bagaço de cana.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica, Bioprocessos, Pré-Tratamento, Lignina, Açúcares redutores.

ABSTRACT

One of the main sources of renewable energy in Brazil is biomass, with lignocellulose being the primary component of plant biomass, mainly composed of cellulose, hemicellulose, and lignin. The cultivation and processing of various crops, such as sugarcane, generate a considerable amount of waste that can cause environmental impacts if not properly disposed of. A significant portion of this waste can be reused as raw material for energy production and for obtaining high value-added products. Applying a pretreatment step to this type of material allows for the breakdown of the lignin–cellulose–hemicellulose complex, making it suitable for bioprocess applications. In this context, some catalysts have been studied due to their benefits, such as the generation of less corrosive and non-polluting effluents. Thus, the main objective of this project was to evaluate the delignification of sugarcane bagasse after the application of a pretreatment using alkaline salts. The lignocellulosic biomass was dried, milled, and subjected to processes to determine lignin content and reducing sugars, with these steps performed both before and after pretreatment. The catalytic tests were carried out in an autoclave at 120°C, in the absence and presence of each salt, specifically sodium carbonate and sodium phosphate. The conditions were defined through a 2² factorial design with three central point repetitions to evaluate the influence of salt mass and reaction time on the amount of lignin and reducing sugars (RS) present in the solid residue and in the reaction medium, respectively. For the design using sodium carbonate, the interaction between salt and time was statistically significant for lignin removal; however, the isolated factors were not statistically significant. Using this salt, it was possible to remove up to 61% of the lignin mass from the untreated material. This result was achieved by applying 10 g of salt for 45 minutes. The treatment using sodium phosphate did not show statistically significant values for either reducing sugar release or lignin removal. The maximum lignin removal achieved was 42%, using 10 g of salt for 15 minutes. The alkaline pretreatment proposed in the objectives was successfully completed following the methodology outlined in this work, statistically confirming the role of alkaline salts in the lignin removal process from sugarcane bagasse.

Keywords: Lignocellulosic biomass; Bioprocesses; Pretreatment; Lignin; Reducing sugars.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição e características dos polímeros celulose, lignina e hemicelulose	16
Tabela 02 - Dados de produção de cana-de-açúcar das regiões brasileiras entre 2023 à novembro de 2024.	25
Tabela 03 - Matriz de planejamento com níveis codificados e reais das variáveis independentes.	34
Tabela 04 - Condições aplicadas para as amostras utilizadas como controle.	22
Tabela 05 - Média das respostas, efeito dos fatores e da interação entre eles sobre o teor de lignina (%) e seus desvios-padrão.	44
Tabela 06 - Análise de Variância para o ajuste de um modelo linear aos dados do planejamento fatorial usando o carbonato de sódio considerando a resposta teor de lignina.	46
Tabela 07 - Média das respostas, efeito dos fatores e da interação entre eles sobre o teor de açúcares redutores (mg/mL) e seus desvios-padrão.	47
Tabela 08 - Análise de Variância para o ajuste de um modelo linear aos dados do planejamento fatorial usando o carbonato de sódio considerando a resposta quantidade de açúcares redutores	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Consumo global de energia a partir de fontes primárias.	15
Figura 02 – Formação da lignina através da Fenilalanina e Tirosina	17
Figura 03 - Processo de síntese da Hemicelulose no complexo de Golgi seguido do processo de exocitose para formação da parede celular vegetal.	19
Figura 04 - Diagrama do processo de formação da celulose.....	22
Figura 05 - Principais produtos da produção mundial de culturas.	23
Figura 06 - Principais países produtores de cultivos agrícolas.	24
Figura 07 - Teores de lignina (%) do bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com carbonato de sódio	40
Figura 08 - Teores de lignina (%) do bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com fosfato de sódio.....	42
Figura 09 - Açúcares redutores (%) no bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com carbonato e fosfato de sódio.	43
Figura 10 - Gráfico de Pareto com a interação dos efeitos para análise do teor de lignina (%).	45
Figura 11 - Gráfico de superfície relacionando o tempo (min), massa de sal (g) e quantidade de lignina (%).	46
Figura 12 - Gráfico de Pareto para o teor de açúcares redutores observado após o planejamento fatorial usando o carbonato de sódio	47
Figura 13 - Gráfico de superfície de resposta, relacionando o tempo (min), massa do sal (g) e a quantidade de açúcares redutores (mg/ml).	48
Figura 14 - Gráfico da quantidade de lignina com os ensaios utilizados.	49

LISTA DE IMAGENS

Imagem 01 - Secagem solar do bagaço da cana-de-açúcar úmido suspenso em telas de polietileno.....	32
Imagem 02 - Processo de secagem, processamento e armazenamento do material.	33
Imagem 03 - Misturas reacionais dos ensaios C1, C2, 03 e 04, antes dos testes de pré-tratamento.	33
Imagem 04 - Mistura Reacional após os testes de pré-tratamento com sal alcalino.	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
CDSA	Centro de desenvolvimento Sustentável do Semiárido
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
CO ₂	Dióxido de carbono
pH	Potencial hidrogeniônico
UV	Radiação ultravioleta
UDP-glicose	Uridina difosfato glicose
UDP-xilose	Difosfato de uridina-xilose
D-glicose	Dextrose
CeSA	Enzima celulose sintase
Kor	Enzima celulase Korrigan
SuSy	Enzima sacarose sintase
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
Na ₂ S	Sulfeto de sódio
NaClO	Hipoclorito de sódio
CH ₃ COONa	Acetato de sódio
Na ₃ PO ₄	Trifosfato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
AR	Açúcares Redutores
DMS	Diferença Mínima Significativa
HSD	Diferença Honestamente Significativa
PTFE	Politetrafluoretileno

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Biomassa como fonte alternativa para produção de energia.....	15
3.2 Estrutura lignocelulósica da biomassa e seus principais componentes	16
<i>3.2.1 Lignina.....</i>	<i>17</i>
<i>3.2.2 Hemicelulose</i>	<i>19</i>
<i>3.2.3 Celulose</i>	<i>20</i>
3.3 Cana-de-Açúcar	23
<i>3.3.1 Bagaço de Cana-de-açúcar</i>	<i>26</i>
3.4 Processamento da Biomassa	28
<i>3.4.1 Pré-tratamento com Sais Alcalinos</i>	<i>30</i>
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 Processamento da biomassa.....	32
4.2 Pré-tratamento da biomassa.....	33
4.3 Caracterização da biomassa	35
4.4 Teor de açúcares redutores (AR)	36
4.5 Análise Estatística dos Dados	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. Análise estatística para o planejamento fatorial.....	44
6 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, há uma preocupação cada vez maior com a degradação ambiental e com as mudanças climáticas, causadas, principalmente, pelo uso de combustíveis fósseis e por processos produtivos que geram a emissão de gases poluentes e grande quantidade de resíduos. Esses fatores, associados a questões econômicas e geopolíticas, têm comprovado a necessidade da adoção de fontes renováveis de energia e de novas matérias primas na obtenção de produtos químicos.

Dentre as várias fontes disponíveis, destaca-se a biomassa vegetal, principalmente, as oriundas de resíduos agroindustriais, devido a sua composição, a grande quantidade disponível, ao baixo custo, a não competitividade com gêneros alimentícios e a contribuição na redução das emissões de gás carbônico.

Por se tratar de um material lignocelulósico, o bagaço de cana pode ser classificado como biomassa e é composto, principalmente, por celulose, hemicelulose e lignina. Consequentemente, apresenta grande potencial de aproveitamento, uma vez que, através do processo de hidrólise é possível solubilizar grande parte dos açúcares presentes nas frações celulósica e hemicelulósica, sendo que, através de processos fermentativos ou catalíticos podem ser obtidos produtos de alto valor agregado.

Para isso, uma etapa de pré-tratamento é essencial, pois, se faz necessária a ruptura do complexo lignina-celulose-hemicelulose, além do aumento da porosidade e da área superficial do material, bem como o ataque à estrutura cristalina da fração celulósica. Existem vários métodos para este fim, dentre os quais os pré-tratamentos ácido, alcalino, hidrotérmico, biológico, utilizando líquidos iônicos ou uma combinação entre eles, sendo que cada um possui diferentes ações sobre o material lignocelulósico.

Novas formas de explorar eficazmente a biomassa e evitar os empecilhos relacionados com as tecnologias de pré-tratamento mais aplicadas têm sido desenvolvidas. Grande parte dos processos de despolimerização da lignina ocorre em altas temperaturas, tendo à presença ou ausência de catalisadores, entretanto, estes processos acarretam a formação de componentes voláteis que são de difícil separação em processos subsequentes (LI, C. *et al.*, 2015).

Desta forma, a utilização do pré-tratamento aplicando sais alcalinos, que são considerados bases fracas, como rota de produção de compostos orgânicos simples demonstra-se favorável pela clivagem de ligações fracas e atuação direta no processo de deslignificação sem a geração de componentes voláteis (LI, C. *et al.*, 2015; DING *et al.*, 2025; CHEN, X. *et al.*, 2025).

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Aplicar ao bagaço de cana-de-açúcar o processo de pré-tratamento usando sais alcalinos para redução do teor de lignina presente em sua composição.

2.2. Objetivos Específicos

Avaliar o teor de lignina insolúvel presente nas amostras do bagaço de cana, antes e após a etapa de pré-tratamento, visando identificar se houve atividade dos sais alcalinos no processo reativo;

Analisar o produto líquido da etapa de pré-tratamento, visando identificar se houve alteração no teor de açúcares redutores presentes nas amostras;

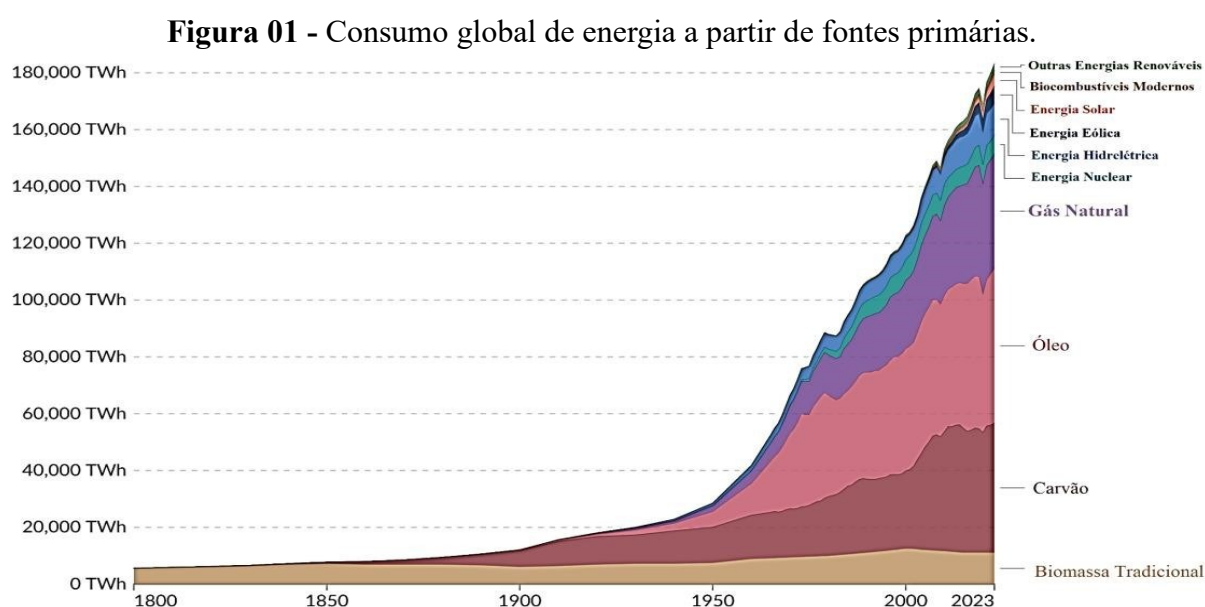
Verificar as melhores condições para o pré-tratamento e a influência das variáveis massa do sal e tempo de processo sobre as quantidades de açúcares redutores e lignina, observadas após a reação.

Realizar a análise estatística dos resultados como forma de comprovar a aplicabilidade do método de pré-tratamento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Biomassa como fonte alternativa para produção de energia

A energia tornou-se essencial para o desenvolvimento e sobrevivência do homem. Suas aplicações perpassam diversos setores, sendo o de transporte e o manufatureiro os maiores consumidores, utilizando o petróleo e o carvão como fonte primária (ERDIWANSYA *et al.* 2024, MOHAMED *et al.*, 2025). É possível visualizar este consumo na **Figura 01**.



O uso de fontes de carbono na produção de energia fornece elevados valores caloríficos, contudo seu consumo gera problemas ambientais e econômicos. Os problemas econômicos são causados pela escassez e demorado processo de reposição destes materiais (ERDIWANSYA *et al.*, 2024). A liberação de poluentes na atmosfera vem sendo um dos principais problemas relacionados à utilização de fontes de carbono na produção de energia, pois são gerados, após o processo de combustão, dióxido de enxofre, dióxido de carbono, óxido de nitrogênio e partículas causadoras da degradação da qualidade do ar (RAFID; ALI, 2022).

As chuvas ácidas, o aumento da temperatura e das doenças alérgicas decorrentes do aumento quantitativo destas substâncias na atmosfera, em conjunto com o aumento populacional, demonstram a necessidade de uma política mais sustentável e renovável (RAFID; ALI, 2022; HANA; KARI, 2023; ADEBAYO; KIRIKKAELI, 2021; ERDIWANSYA *et al.*, 2024).

A utilização da biomassa como alternativa para a descarbonização do sistema de geração de energia vem sendo amplamente estudada, devido ao seu potencial e às preocupações com a sustentabilidade (OSMAN *et al.*, 2023; WORKU *et al.*, 2024; KORBERG *et al.*, 2023). O potencial da biomassa lignocelulósica denota aspectos de mitigação de restrições energéticas e ambientais, proporcionando a síntese de biocombustíveis, criação de substâncias biodegradáveis e desenvolvimentos da biotecnologia e da química verde (NGUYEN-THI *et al.*, 2024). Entretanto, a produção de biocombustíveis derivados da biomassa apresenta problemas relacionados à recalcitrância da estrutura lignocelulósica (HUANG, C. *et al.* 2022).

3.2 Estrutura lignocelulósica da biomassa e seus principais componentes

O material lignocelulósico é composto principalmente por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, e sua distribuição desigual promove a formação do esqueleto, material de ligação e a dureza da lignocelulose (MANISHA *et al.*, 2024). As características de cada polímero foram trazidas por (BANU *et al.*, 2021) e estão dispostas na **Tabela 01**.

Tabela 01 - Composição e características dos polímeros celulose, lignina e hemicelulose

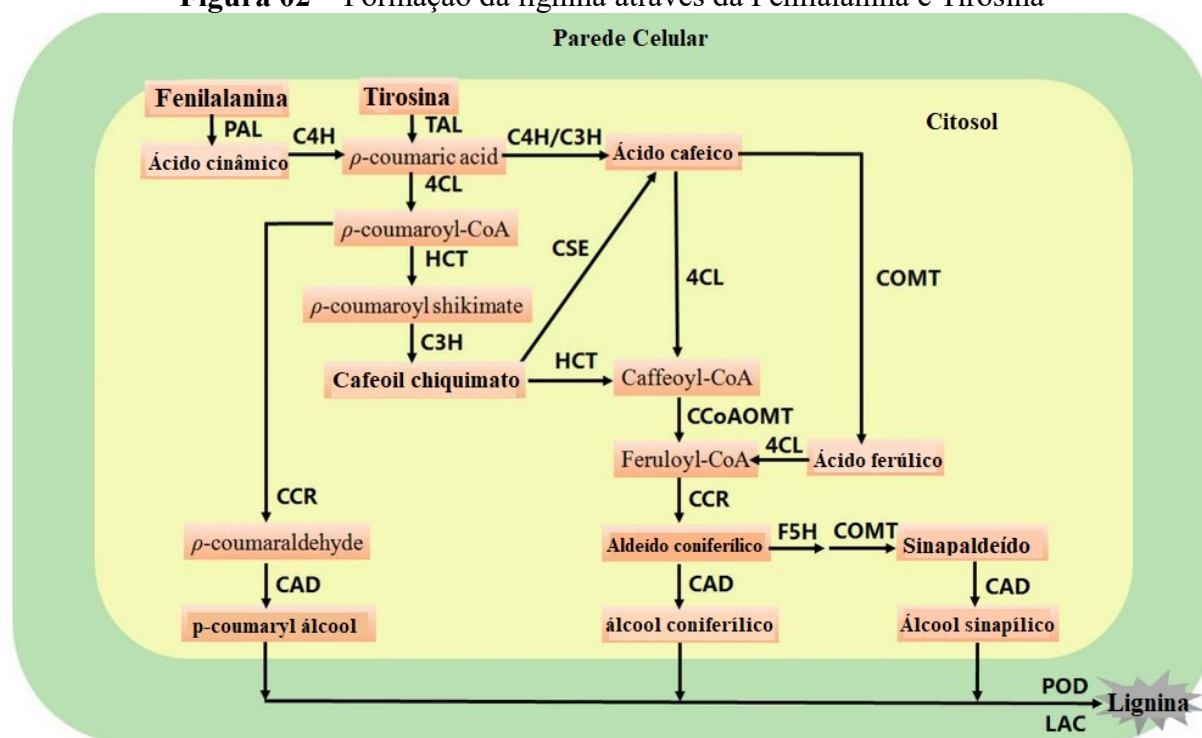
Estruturas	Hemicelulose	Lignina	Celulose
Formação	Menor grau de polimerização e sem cristalinidade	Polímero aromático reticulado, policristalino heterogêneo tridimensional	Cadeia Polimérica agrupada ordenadamente e alta cristalinidade
Composição do Polímero	Poli xilose, glucomanana, galactoglucomanana	GSH, GS e G Lignina	$\beta(1\rightarrow4)$ Glucano
Grau polimérico	<200	4000	100-1000
Unidade de Formação	D-xilose, manose, Larabinose, galactose, ácido glucurônico	Guaiacil propano, siringil propano, p-hidroxifenil propano	Unidade D-Glucopirranose
Ligação entre as unidades de formação	Ligações $\beta(1\rightarrow4)$ glicosídicas, Ligações $\beta(1\rightarrow2,3,6)$ -glicosídicas	Unidades estruturais de fenil propano via ligações éter e conexão de carbono	Ligações $\beta(1\rightarrow4)$ glicosídicas
Tipo de ligação entre os componentes	Química	Química	Hidrogênio

Fonte: BANU *et al.* 2021.

3.2.1 Lignina

A lignina é um polímero aromático heterogêneo, sendo o terceiro maior constituinte do bagaço da cana apresentando entre 18-25%, ficando atrás apenas da celulose e hemicelulose que correspondem respectivamente a 40-50% e 20-30% (CHAUHAN *et al.*, 2023; NGUYENTHI *et al.*, 2024). O processo de geração da lignina ocorre durante a biossíntese da parede celular vegetal por uma polimerização desidrogenativa aleatória de três precursores diferentes, sendo sintetizado sempre na presença de carboidratos e os 3 monômeros principais são álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico (CHAUHAN *et al.*, 2023; ZHANG, K. *et al.*, 2019; NGUYEN-THI *et al.*, 2024; LIU; LUO; ZHENG, 2018).

Figura 02 – Formação da lignina através da Fenilalanina e Tirosina



Fonte: LIU; LUO; ZHENG, 2018).

O arranjo dos monômeros criam diferentes formas estruturais, apresentando funções únicas, tornando as estruturas lignocelulósicas com boas responsividades na produção de biocombustíveis (FANGUEIRO *et al.*, 2023). A lignina era categorizada como poluente, entretanto, sua utilização na obtenção de polímeros industriais, em aplicações químicas e no campo de engenharia ambiental vem sendo aumentada (NGUYEN-THI *et al.*, 2024).

A abundância de grupos hidroxilas na estrutura da lignina e suas características físico-químicas a torna uma abundante fonte de compostos fenólicos, podendo apresentar bons

desempenhos na liberação de fármacos, agricultura, tratamento de poluentes, construção, saúde, nutrição humana e animal, em conjunto com boas características físico-químicas (CHIANI *et al.*, 2023; FANGUEIRO *et al.*, 2023; ALZAGAMEEM *et al.*, 2018).

A lignina, na produção energética, tem sido desenvolvida como precursor na formulação de materiais à base de carbono ativado comumente utilizados em dispositivos de armazenamento energético, entretanto sua baixa condutividade elétrica vem sendo um dos limitadores para a sua utilização como eletrodo. Diante disso, métodos de modificação estrutural vêm sendo empregados para melhorar suas características eletroquímicas (BEAUCAMP *et al.*, 2022; FANGUEIRO *et al.*, 2023).

A utilização deste material, não se limita apenas a baterias, suas características estruturais em conjunto com suas propriedades mecânicas, vem sendo empregadas em diversas áreas, como biorrefinarias, ciências dos materiais e no ramo da biotecnologia (FANGUEIRO *et al.*, 2023). A transformação de biomassa em materiais de alto valor agregado em biorrefinarias, está sendo amplamente estudada como uma alternativa viável para satisfazer as necessidades por combustíveis e ao mesmo tempo minimizar os impactos ambientais gerados (ROUSHUI; ZHANG; XU, 2014; FANGUEIRO *et al.*, 2023).

O setor de construção é responsável por cerca de 40% dos gases CO₂ emitidos, com o crescimento exponencial da população é de suma importância a produção de materiais que consigam reduzir o impacto ambiental gerado na indústria de construção, e a flexibilidade da lignina fornece ao material propriedades mecânicas e térmicas ajustáveis fornecendo uma melhor durabilidade (JĘDRZEJCZAK *et al.*, 2020; FANGUEIRO *et al.*, 2023).

Além disso, as características físico-químicas da lignina, permitem aplicações no ramo da biomedicina e biotecnologia, sendo sua baixa solubilidade, sensibilidade ao pH, efeito bloqueador de UV e alta estabilidade, características essenciais para administração de fármacos e aplicações médicas (CHIANI *et al.*, 2023; FANGUEIRO *et al.*, 2023).

Dentro da nutrição animal, a lignina é utilizada como aditivo probiótico, apesar das barreiras digestivas que sua forma nativa apresenta no processo de digestão dos animais monogástricos, sua versão purificada apresenta diversos monômeros fenólicos de baixa massa molecular que possibilitam efeitos divergentes da lignina nativa, podendo ser utilizada não apenas no processo de peletização das rações animais, mas desempenhando processos inibitórios de crescimento microbiano em conjunto com suas características antioxidantes, contribuindo para melhor desempenho da produção em decorrência da suspensão de antibióticos

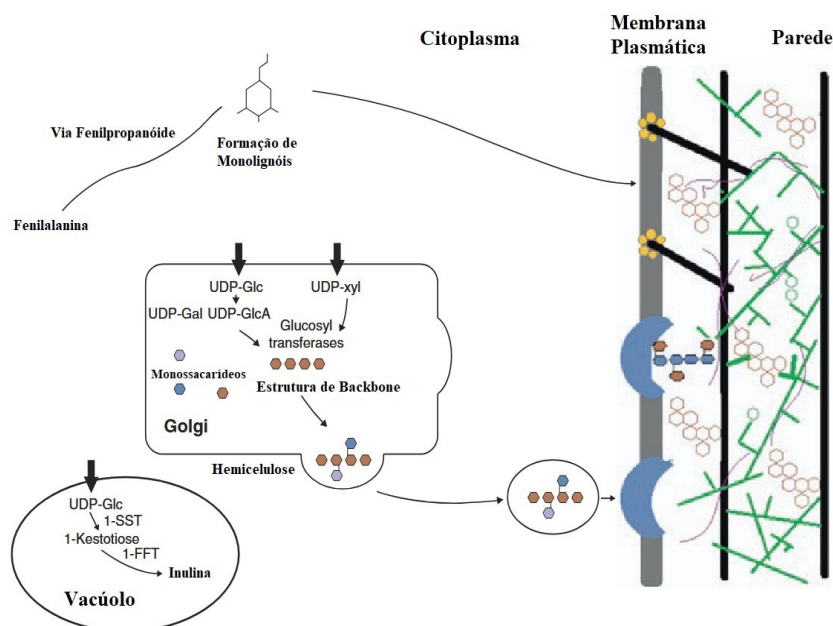
na ração alimentar (FANGUEIRO *et al.*, 2023; JARDIM; HART; LUCIA; JAMEEL, 2020; BAURHOO; RUIZ-FERIA; ZHAO, 2008).

Com as características apresentadas, a lignina, apresenta-se como fonte renovável de compostos aromáticos a granel ou modificados, sendo um possível substituto de compostos tolueno, benzeno e xileno derivados do petróleo (NGUYEN-THI *et al.*, 2024).

3.2.2 Hemicelulose

A hemicelulose é pertencente ao grupo de polissacarídeos heterolíneares ou ramificados não cristalinos que se liga de forma covalente a lignina envolvendo a celulose, sendo o material matriz para a estrutura lignocelulósica que é comumente encontrado nas paredes celulares vegetais que apresentam ligações β -(1-4) com configuração equatorial (ABRAHAM, *et al.*, 2020; WANG, Z. *et al.*, 2025; WANG, Q. *et al.*, 2025; LI, F. *et al.*, 2025; SOTO; SALDÍVAR, 2020). A síntese da hemicelulose ocorre no complexo de Golgi, sendo exportadas posteriormente para a parede celular através do processo de exocitose, sendo inseridas entre as microfibrilas de celulose que são sintetizadas na membrana plasmática e armazenadas na parede celular formando uma parede composta (SANDHU; RANDHAWA; DHUGGA, 2009).

Figura 03 - Processo de síntese da Hemicelulose no complexo de Golgi seguido do processo de exocitose para formação da parede celular vegetal.



Fonte: Serna SOTO; SALDÍVAR, p. 26, 2020.

O processo de síntese no complexo de Golgi ocorre através das glicosiltransferases que tem como precursores a UDP-glicose e UDP-xilose como substratos principais para a formação do polímero, podendo ser convertido em açúcares redutores como xilose, arabinose, galactose, manose, glicose, ácido glucurônico e ácido galacturônico e em conjunto com a presença de grupos hidroxila e carboxila na sua cadeia é possível fazer modificações mantendo sua estrutura nativa, biodegradabilidade e biocompatibilidade favorecendo diversas aplicações industriais (CHEN, J. *et al.*, 2025; SOTO; SALDÍVAR, 2020; LI, F. *et al.*, 2025).

Uma das aplicações da hemicelulose no ramo da saúde é através do sistema de liberação sustentada, uma vez que a hemicelulose do tipo xilana pode ser digerido por bactérias do tipo anaeróbicas presentes no cólon, porém o sistema gastrointestinal não dispõe de enzimas necessárias para a digestão deste material, tornando um bom administrador de medicamentos orais no trato gastrointestinal (LI, F. *et al.*, 2025).

Com o aumento exponencial na demanda alimentar, a necessidade de detecção de patógenos prejudiciais torna-se maior, para isto, a utilização de pontos de carbono está sendo empregada, a capacidade fluorescente na presença de microrganismos e sua biocompatibilidade o qualifica como bom indicador microbiológico, entretanto, sua pequena área de atuação faz necessário a incorporação destes pontos de carbono em hidrogéis facilitando a dispersão e detecção de patógenos, a produção de hidrogéis a base de polímeros como hemicelulose auxilia incorporando ao material capacidades inibidoras de crescimento bacteriano e alertando de forma precoce potenciais contaminações microbiológicas (TOHAMY, 2025).

A hemicelulose no campo de materiais biodegradáveis tem se destacado como substituta de produtos derivadas de petróleo, como sacolas plásticas e filmes biodegradáveis, por meio de suas propriedades biodegradáveis, atóxico e abundância, contudo, para ser utilizado como matéria prima é necessário etapas de pré-tratamento como a acetilação fornecendo grupos acetil ao composto orgânico, concedendo resistência mecânica, hidrofobicidade, permeabilidade ao oxigênio, processabilidade, estabilidade térmica e permeabilidade ao oxigênio e ao vapor de água ao material (MARTINS *et al.*, 2024; PENG *et al.*, 2023).

3.2.3 Celulose

A celulose constitui cerca de 15 a 30% dos componentes da parede celular sendo o biopolímero mais abundante do planeta. É possível encontrá-la nas paredes celulares de cianobactérias, fungos e algas verdes, entretanto, em plantas, a parede celular é constituída de outros componentes como hemicelulose, lignina e pectinas (SOTO; SALDÍVAR, 2020).

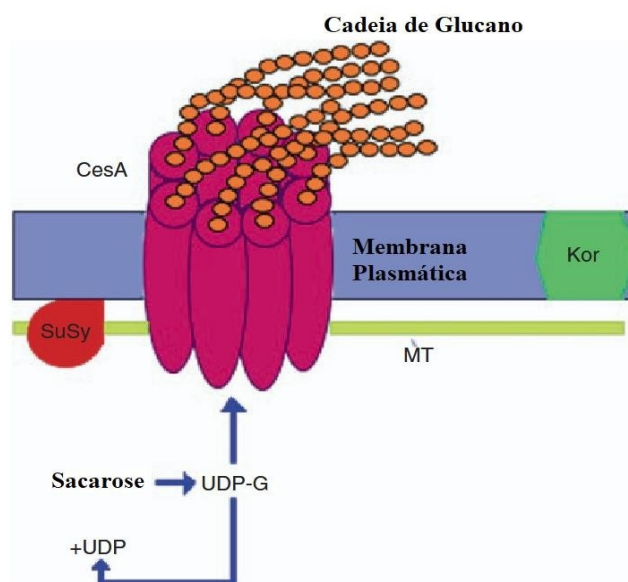
Do ponto de vista químico, a celulose cristalina é um polímero linear sindiotático inflexível composto de unidades estruturais de D-glicose associadas por ligações β -1,4glicosídicas lineares. Sua característica cristalina é derivada das ligações de hidrogênio que ocorrem entre os grupos hidroxilas com unidades de glicosil adjacentes, em conjunto com as forças de Van der Waals. É possível que as cadeias de glucano acumulem de forma paralela microfibrilas formando a celulose cristalina responsável pela insolubilidade em água, rigidez e força à estrutura (WANG, Z. *et al.*, 2025; WANG, Q. *et al.*, 2025; BANU *et al.* 2021; YADAV *et al.* 2024; SOTO; SALDÍVAR, 2020).

Na natureza, é possível encontrar a celulose cristalina de quatro formas diferentes, a celulose I pode ser convertida de forma irreversível para a celulose tipo II, apresentando melhor estabilidade. Mesmo sendo metaestável a celulose tipo I detém duas formas holomorfas, sendo tipo I- α e I- β , cada uma destas formas é produzida por organismos diferentes. A celulose I- α é formada por bactérias e algas, enquanto a celulose I- β é produzido por plantas superiores. Os grupos III e IV são adquiridos através de tratamentos químicos (SOTO; SALDÍVAR, 2020).

O processo de formação da celulose inicia-se por ação da enzima celulose sintase (CeSA) presente na membrana plasmática de todos os organismos sintetizadores de celulose e em plantas superiores. Este complexo proteico está estruturado em matrizes denominadas rosetas, que desempenham duas funções, a realização da polimerização intracelular de cadeias de glucano e a estruturação das cadeias extracelulares formando microfibrilas cristalinas. Para isto, é necessário utilizar a sacarose como principal substrato para formação da celulose cristalina, sendo que o processo de constituição da celulose inicia-se com a celulose sintase (CeSA) glucosiltransferase gastando um primer esteroide, sitosterol-beta-glicosídeo em conjunto com a UDP-Glicose para formação da cadeia de celulose. A partir deste processo de polimerização, as cadeias vizinhas ligam-se por meio de ligações de hidrogênio podendo haver até 36 cadeias de β -glucano conectadas, formando as microfibrilas parcialmente cristalinas (SOTO; SALDÍVAR, 2020).

A Figura é uma ilustração da estruturação da cadeia de celulose a partir da junção das cadeias de β -glucano, sendo monitoradas pelos microtúbulos e pela enzima celulase Korrigan (Kor), também é possível observar a formação das rosetas a partir do substrato de uridina difosfatoglicose (UDP-G) e reutilização do +UDP na enzima sacarose sintase (SuSy) sendo uma enzima glucosiltransferase responsável no processo de metabolização da sacarose.

Figura 04 - Diagrama do processo de formação da celulose.



Fonte: SOTO; SALDÍVAR, p. 18, 2020.

A estrutura celulósica do bagaço pode ser quebrada com aplicações de ácidos ou enzimas celulolíticas, obtendo-se um produto rico em glicose, ácidos orgânicos, derivados de furano e compostos fenólicos. Após o processo de hidrólise, os açúcares são utilizados em bioprocessos produzindo biocombustíveis, sendo fundamentais na fermentação microbiana e permitindo a obtenção de produtos como etanol e xilitol (YAMAKAWA *et al.*, 2023).

Atualmente, o processo de adsorção é conduzido utilizando carvão ativado, zeólitas, grafeno, nanotubos e resinas de troca iônica, entretanto, a celulose como compósito polimérico vem se destacando devido a sua alta flexibilidade, eficiência, facilidade operacional e sustentabilidade ambiental. Com isso, a sua aplicação na construção de hidrogéis tem demonstrado boa capacidade de adsorção de íons pesados, sendo a integração da celulose em redes baseadas em hidrogéis uma estratégia eficaz na sustentabilidade, porém, sua fabricação em escala industrial ainda é um fator limitante (KHIEWSAWAI; RATTANAWONGWIBOON; UMMARTYOTIN, 2024).

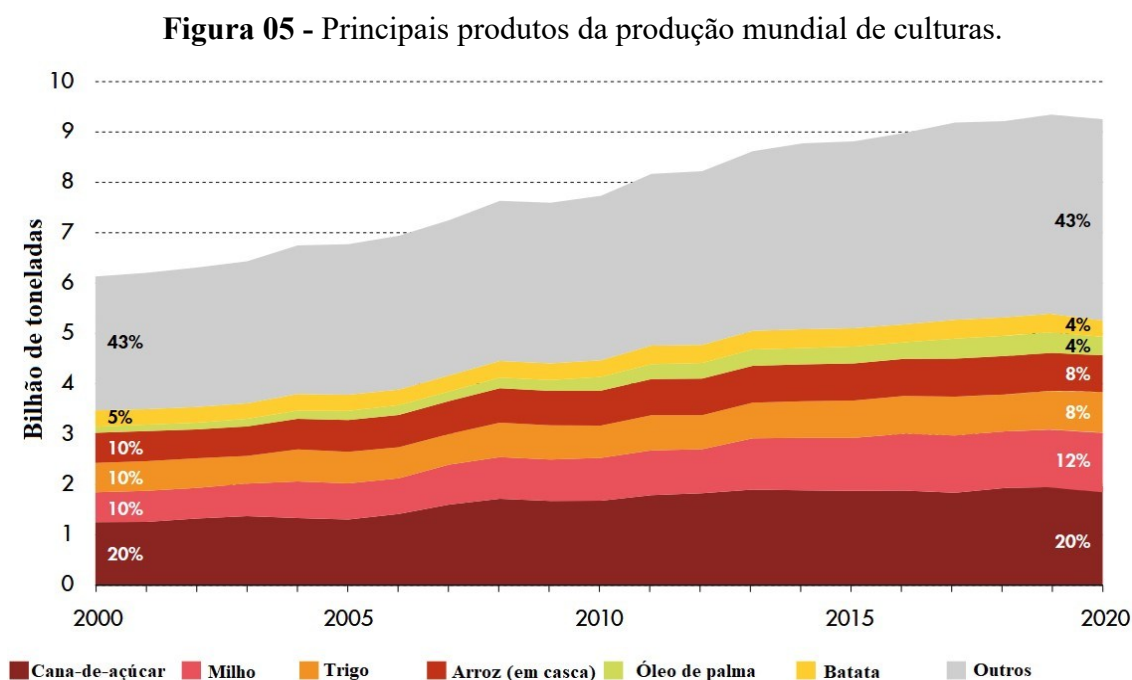
O desenvolvimento de embalagens que causam o mínimo de impacto ambiental, detenham controle de temperatura e umidade em conjunto com atividades antibacterianas ainda é um desafio. Nesse contexto, a celulose extraída do bagaço da cana-de-açúcar tem sido aplicada, proporcionando ao material alterado uma superfície assimétrica, molhabilidade, dissipação de calor, atividade antibacteriana e resistência a UV melhorando as condições de conservação de alimentos, o que a torna potencial matéria-prima para esse tipo de aplicação (HUANG, S. *et al.*, 2025).

3.3 Cana-de-Açúcar

A *Saccharum officinarum*, popularmente conhecida como cana-de-açúcar, é uma planta herbácea da família *Poaceae* e pertencente ao gênero *Saccharum*. Natural da Nova Guiné, tem sido cultivada em países subtropicais e tropicais, detendo alto teor de açúcar e baixo teor de fibras, características imprescindíveis para o ramo industrial transformando-a em uma das culturas mais importantes do mundo (WANI *et al.*, 2023; CHOUGALA *et al.*, 2025).

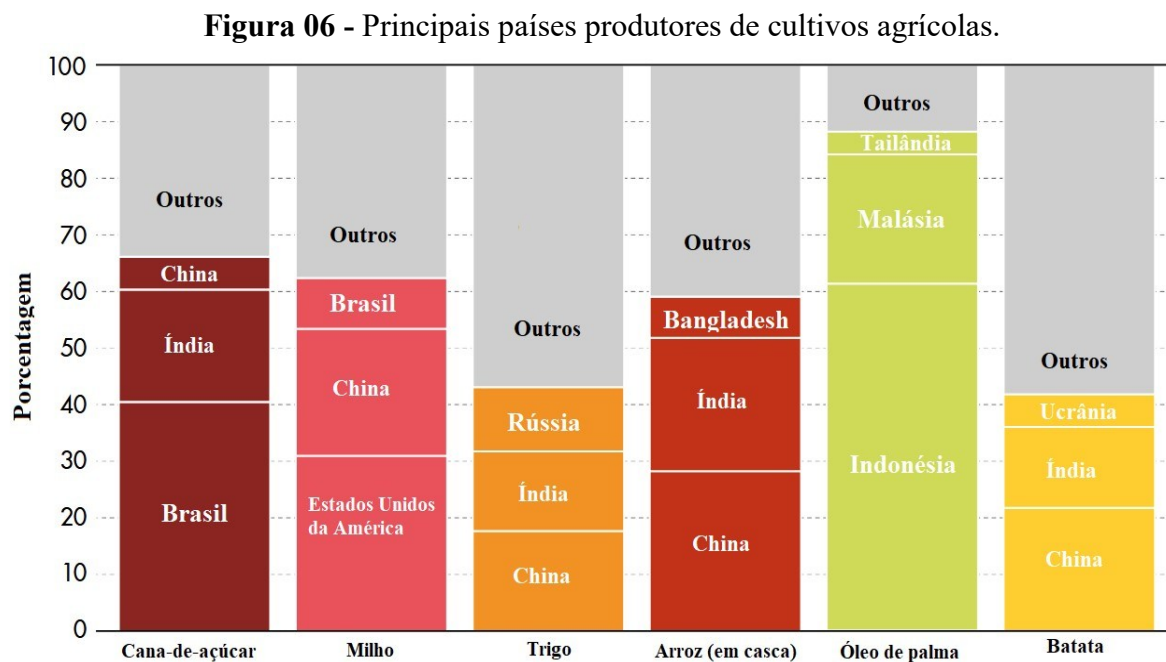
A sua estrutura é composta por conjuntos formados de cinco a vinte caules eretos denominados perfilhos. Podendo atingir de 2 a 5 metros de altura e com 2 a 4 centímetros de diâmetro, cada caule tem em suas estruturas diversos nós e entrenós. Estes nós apresentam faixas de primórdios de raiz e brotos, sendo que os primórdios de raiz quando em contato com o solo úmido ativam-se e dão origem às raízes. O teor de açúcar é encontrado no bagacilho conhecido também como medula da cana-de-açúcar, estando localizado abaixo da casca dura e da cobertura cerosa denominada cutícula da planta (CHOUGALA *et al.*, 2025).

Segundo a FAO (2022), a cana-de-açúcar corresponde a 20% do total das culturas produzidas ao redor do mundo, seguida do milho com 12% e trigo e arroz com 8% cada, como consta na **Figura 05**.



Fonte: FAO, p.14, 2022.

Considerando a porcentagem de 20%, demonstrada na **Figura 04**, o Brasil é responsável por produzir 40% de toda a cana-de-açúcar no mundo, seguido pela Índia com 20% e China com 10%, como apresentado na **Figura 06**, abaixo (FAO, 2022; AHUJA; CHINNAM; BHATT, 2024).



Fonte: FAO, p. 14, 2022.

No Brasil, o acompanhamento e detalhamento das safras é realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Na Tabela 02 encontram-se os dados referentes à cana-de-açúcar para a safra 23/24 e as projeções para safra 24/25.

A partir do terceiro boletim de safra da CONAB de 2024, presente na **Tabela 02**, é possível observar que no período de 2023 a novembro de 2024, as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar foram o Sudeste, o Centro-Oeste, com o Nordeste na terceira colocação (CONAB, 2024). A capacidade produtiva da cana-de-açúcar depende de vários fatores, como: presença de cultivos antigos, capacidade estrutural, conhecimentos anteriores de cultivo, infraestrutura, solo, isto reflete na forma de barreiras entre os produtores de cana-de-açúcar nas regiões brasileiras (COELHO & BRAGAGNOLO, 2024).

Tabela 02 - Dados de produção de cana-de-açúcar das regiões brasileiras entre 2023 à novembro de 2024.

REGIÃO	Área (Em mil ha)			Produtividade (Em kg/ha)			Produção (Em mil t)		
	Safra 23/24	Safra 24/25	VAR. %	Safra 23/24	Safra 24/25	VAR. %	Safra 23/24	Safra 24/25	VAR. %
NORTE	48,9	49,6	1,5	80.608	82.437	2,3	3.943,0	4.092,0	3,8
NORDESTE	883,0	919,9	4,2	63.959	62.746	(1,9)	56.477,8	57.717,7	2,2
CENTRO-OESTE	1.778,8	1.847,4	3,9	81.537	80.451	(1,3)	145.035,7	148.622,2	(2,5)
SUDESTE	5.098,8	5387,2	5,7	91.987	80.650	(12,3)	469.026,8	434.477,2	(7,4)
SUL	524,4	491,5	(6,3)	73.860	68.693	(7,0)	38.730,9	33.759,1	(12,8)
BRASIL	8.333,9	8695,5	4,3	85.580	78.048	(8,8)	713.214,1	678.668,2	(4,8)

Fonte: CONAB, 2024.

O processo de extração da cana-de-açúcar ocorre com ferramentas abrasivas, seguidas do processo de extração do caldo, obtendo-se o bagaço e o melaço que são utilizados para produção de produtos como açúcar, rapadura, etanol, xaropes, melaço, rum, biogás, papel, fermento, ácidos cítricos e acetato (WANI *et al.*, 2023; MANRIQUE *et al.*, 2025; AHUJA; CHINNAM; BHATT, 2024).

A casca da cana-de-açúcar apresenta propriedades antimicrobianas derivadas da luteolina em sua composição, ao mesmo tempo que garantem características antioxidantes e viabilizam a eliminação de radicais livres, enquanto a sacarose que é extraída pode ser aplicada em processos fermentativos (WANI *et al.*, 2023).

A aplicação mais requerida da cana-de-açúcar é voltada para a produção de etanol, entretanto, existem outros processos que podem ser incorporados ao processamento. Uma vez que o bagaço corresponde a um percentual entre 30 e 40% da massa processada, após a extração do melaço, parte desse resíduo tem sido destinado para geração de eletricidade, sendo responsável por 9% da energia gerada no Brasil. Processos de hidrólise do bagaço também são frequentes, podendo gerar de 40 à 50% de glicose e de 20 à 30% de xilose. A biomassa residuária pode ser reaproveitada na produção de produtos químicos como plásticos e combustíveis alternativos (ROSSI *et al.*, 2021).

Com avanços nas biorrefinarias, outros produtos também vêm se destacando como ácidos levulínico na produção de fármacos, γ -valerolactona na produção de perfumes e solventes (ROSSI *et al.*, 2021).

A cana-de-açúcar possui alcaloides, proteínas, fenólicos, taninos, flavonoides, açúcares redutores e resinas em sua composição. Estes constituintes possuem diversas aplicações industriais, as xilanas podem ser utilizadas na produção de adoçantes, os β -glucanos são utilizados na fabricação de cosméticos e como antidiabético e a celulose pode ser utilizada pela indústria de papel ou como aditivo alimentar (AHUJA; CHINNAM; BHATT, 2024; WANI *et al.*, 2023; (ROSSI *et al.*, 2021).

Com o crescimento da demanda de fontes de energia limpa, a cana-de-açúcar apresenta-se como uma alternativa viável reduzindo a dependência do consumo do petróleo e ao mesmo tempo reduzindo a emissão de carbono. Assim processos de automação e melhoramento nos plantios de cana-de-açúcar também vem contribuindo para este avanço, tendo como perspectiva a regeneração das florestas em conjunto com a produção de bioenergia (ROSSI *et al.*, 2021; COELHO & BRAGAGNOLO, 2024)

3.3.1 Bagaço de Cana-de-açúcar

O bagaço é um subproduto gerado no decorrer dos processos de limpeza, preparação e retirada de sacarose e constitui de 25% à 30% da cana-de-açúcar em base úmida, este material apresenta características fibrosas, resistência mecânica e biodegradabilidade, propiciando alternativas sustentáveis, sendo ideal para melhoramento de compósitos poliméricos (CHOUGALA *et al.*, 2025; WANI *et al.*, 2023; HAKIM *et al.*, 2025; MUNAGALA *et al.*, 2021; ELSAYED *et al.*, 2025).

A composição do bagaço de cana-de-açúcar é formada principalmente por componentes carbonáceos, sendo, 32 a 45% de celulose, 17 a 32% de lignina e 20 a 32% de hemicelulose, 1 a 9% de cinzas e alguns componentes adicionais, devido a uma farta porosidade, o material detém uma ampla área superficial (MOHAMED *et al.*, 2025; HAKIM *et al.*, 2025; QURAISHI *et al.*, 2025).

O bagaço da cana-de-açúcar é um dos materiais mais utilizados no processamento de materiais lignocelulósicos, fato que, em grande parte, se deve à sua viabilidade econômica e disponibilidade quando comparado com outros resíduos agrícolas como palha de trigo, sorgo, arroz e milho. Por este motivo, anualmente, tem-se uma produção de 1,0448 bilhão de toneladas de bagaço de cana (QURAISHI *et al.*, 2025).

O Brasil, como maior produtor de cana-de-açúcar mundial, também gera grandes quantidades de bagaço durante o processamento industrial, com uma média de 280 - 500 kg de

bagaço por tonelada de cana-de-açúcar moída (QURAISHI *et al.*, 2025; ELSAYED *et al.*, 2025; MOREIRA *et al.*, 2024; MORÁN-AGUILAR *et al.*, 2024).

O bagaço, subproduto do processamento industrial, é comumente utilizado como combustível em caldeiras para a formação de vapor e calor, o qual é realocado ao processo produtivo (RAMACHANDRAN e GNANASAGARAN, 2024; HIRANOBE *et al.*, 2024; QURAISHI *et al.*, 2025). Entretanto, esta prática implica em custos ambientais significativos, sobretudo devido a liberação de CO₂ e outros gases de efeito estufa, durante o processo de combustão. Diante deste cenário, alternativas sustentáveis estão sendo formuladas como formas de remediar a superprodução do bagaço de cana-de-açúcar (RAMACHANDRAN e GNANASAGARAN, 2024; HIRANOBE *et al.*, 2024; QURAISHI *et al.*, 2025).

O programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente enfatiza a necessidade de estratégias eficientes para a gestão de resíduos, tendo a finalidade de atenuar os efeitos ambientais gerados. Para isto, a incorporação dos princípios da economia circular é necessária, minimizando os resíduos através da reutilização contínua de recursos (GHAMARI *et al.*, 2025). Atualmente, 40% do bagaço produzido é destinado para a produção de biocombustíveis, em contrapartida, o excedente carece de aplicações sustentáveis, sendo descartado (HIRANOBE *et al.*, 2024; QURAISHI *et al.*, 2025).

Das aplicações envolvendo o bagaço da cana, é possível utilizá-lo como biossorventes na remoção de metais e corantes de efluentes evitando a bioacumulação e toxicidade no meio e as cinzas geradas no processo de formação de energia podem ser reaproveitadas (HIRANOBE *et al.*, 2024; QURAISHI *et al.*, 2025; BARVE e KHAIRNAR, 2025).

Além disso, após a geração de energia, as cinzas do bagaço da cana podem ser utilizadas como substitutas de materiais da construção civil, devido à presença de nanopartículas de sílica em sua composição, o que favorece também sua utilização em pastilhas de freio, que normalmente utilizam alumina e sílica como abrasivos primários, entretanto, após a incorporação das cinzas de bagaço de cana, observou-se um aprimoramento nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos, sendo uma alternativa viável para reaproveitar resíduos industriais (HIRANOBE *et al.*, 2024; BARVE e KHAIRNAR, 2025).

A fabricação de produtos com valor agregado em larga escala é viabilizada pela formação carbonácea do bagaço da cana-de-açúcar, porém a presença da lignina em sua estrutura inibe o processo de sacarificação, sendo necessário um pré-tratamento para reduzir a recalcitrância da biomassa, principalmente o processo de lignificação, a complexidade estrutural da parede celular e a cristalinidade da celulose (QURAISHI *et al.*, 2025).

3.4 Processamento da Biomassa

A conversão de materiais lignocelulósicos em produtos de valor agregado ocorre em três etapas: pré-tratamento, hidrólise química/enzimática e fermentação (AZAD *et al.*, 2025). O pré-tratamento da biomassa implica em alterações das propriedades físicas e químicas do material mediante métodos físicos, químicos ou biológicos (ZHANG, Y. *et al.*, 2025; CANÇÃO *et al.*, 2025).

Dentre os métodos de conversão da biomassa, a hidrólise enzimática de celulose é comumente utilizada na produção de etanol, tendo como principal processo a degradação enzimática da estrutura lignocelulose em monossacarídeos, utilizados posteriormente pelas leveduras (CANÇÃO *et al.*, 2025; WOŹNIAK *et al.*, 2025). Este método se destaca pela seletividade da hidrólise, pelo fato que as enzimas celulolíticas interagem apenas nas ligações da celulose, possibilitando que as outras estruturas do material permaneçam intactas e minimizando a produção de subprodutos que podem agir como inibidores no processo de fermentação (WOŹNIAK *et al.*, 2025).

A utilização de enzimas celulolíticas produzidas por microrganismos como fungos dos gêneros *Trichoderma reesei* e *Aspergillus niger*, tem a função de catalisar a quebra das ligações glicosídicas β -1,4 na celulose gerando a liberação de glicose no processo. Para esta reação acontecer são necessárias algumas etapas, inicialmente o material deve ser submetido a um pré-tratamento mecânico ou termoquímico, posteriormente, as enzimas são introduzidas ao material, quando as condições favoráveis de temperatura e pH estiverem entre 50°C e 4,8 respectivamente, têm-se a decomposição da celulose em oligossacarídeos mais curtos, os quais são posteriormente convertidos em glicose, utilizada pelas leveduras (WOŹNIAK *et al.*, 2025).

A hidrólise ácida é um dos métodos mais antigos de pré-tratamento e consistem em utilizar ácidos concentrados ou diluídos para decompor a estrutura da hemicelulose e celulose em açúcares simples, convertendo a hemicelulose em pentoses e a celulose em hexoses (WOŹNIAK *et al.*, 2025). A utilização da hidrólise ácida pelo método de ácidos diluídos penetra efetivamente na estrutura celular enfraquecendo as ligações glicosídicas do complexo lignocelulósico aumentando a porosidade da parede celular. Mesmo sendo um método comumente barato e mais rápido do que a hidrólise enzimática é necessário realizar outros processos posteriormente à hidrólise. Para a metodologia utilizando ácidos concentrados é necessário a neutralização e recuperação dos reagentes, encarecendo o processo. Utilizando ácidos diluídos têm-se menor eficiência quando comparado com o concentrado e são

necessárias etapas de remoção de subprodutos gerados antes da aplicação no processo de fermentação (LV *et al.*, 2024; (WOŻNIAK *et al.*, 2025).

Os métodos de pré-tratamento reduzem a polimerização e a cristalinidade da celulose, rompendo as camadas de ligação e hemicelulose, aumentando a área superficial específica efetiva, ajustando a composição do material e facilitando a liberação de açúcares após o processo de hidrólise enzimática (AZAD *et al.*, 2025; ZHANG, Y. *et al.*, 2025; CANÇÃO *et al.*, 2025).

A utilidade de um método de pré-tratamento está relacionada com à necessidade de ampliar o acesso à celulose, minimizar a formação de compostos inibitórios nas etapas enzimáticas de hidrólise e fermentativa e reduzir a cristalinidade da celulose. Os compostos inibitórios que podem ser formados durante estes processos são ácido acético, 2-furfuraldeído e o 5-hidroximetil-2-furfuraldeído, produzidos principalmente na etapa de hidrólise ácida ou na degradação da hemicelulose, interferindo no processo de fermentação das leveduras (BARRETO *et al.*, 2025).

O pré-tratamento físico tem como principal método o esmagamento mecânico e o aquecimento. Este método reduz o tamanho da partícula, o grau de polimerização e a área superficial específica do material, alterando sua estrutura. A sua aplicação é simples, porém, requer um alto consumo de energia sendo uma das barreiras para aplicação desta tecnologia (SONG *et al.*, 2025; ZHANG, Y. *et al.*, 2025).

O pré-tratamento químico envolve a decomposição das ligações químicas do material lignocelulósico por meio da utilização de reagentes químicos, visando a redução do grau de polimerização e da cristalinidade do material, o que promove a sua degradação. As formas mais comuns desta etapa são os métodos ácidos e métodos alcalinos (SONG *et al.*, 2025; ZHANG, Y. *et al.*, 2025).

O pré-tratamento biológico utiliza o metabolismo ou enzimas dos microrganismos na alteração da estrutura físico-química da biomassa, para isto, os locais de contato do microrganismo com o material promovem a sacarificação enzimática, entretanto, este método necessita de um método de processamento mais longo e a taxa de hidrólise é baixa quando comparada com outros pré-tratamento (SONG *et al.*, 2025; ZHANG, Y. *et al.*, 2025).

O pré-tratamento utilizando métodos físico-químicos consiste na utilização de altas temperaturas e pressões relacionadas com reagentes químicos aumentando a eficiência no pré-tratamento do material, este método facilita as modificações nas estruturas químicas e nas

propriedades físicas do material, quebrando as ligações e as interações intermoleculares (ZHANG, Y. *et al.*, 2025).

Dentro das estruturas do complexo carbonáceo, a lignina detém uma estrutura complexa e heterogeneidade que se mostram como barreiras à sua despolimerização e conversão em produtos de valor agregado. Para isto, métodos de pré-tratamento se destacam no processo de deslignificação, porém, em alguns casos a recuperação da fração da lignina tem sido negligenciada, principalmente em condições ácidas, condensando a lignina reduzindo seu potencial de extratividade e valorização (TANIS *et al.*, 2024).

Portanto, o pré-tratamento alcalino vem sendo amplamente utilizado no fracionamento de materiais lignocelulósicos, conseguindo remover a lignina e quebrar as ligações destes materiais lignocelulósicos. Contudo, altas dosagens de base favorecem a degradação significativa do açúcar durante o processo de pré-tratamento (AZAD *et al.*, 2025).

3.4.1 Pré-tratamento com Sais Alcalinos

A maioria dos processos de despolimerização da lignina é realizada em altas temperaturas, com ou sem catalisadores. Como resultado, obtém-se uma mistura fenólica de compostos alquilados e poli-hidroxilados formando também componentes voláteis e carvão (LI, C. *et al.*, 2015).

Tendo em vista a dificuldade de separação destes componentes em processos posteriores, a hidrólise da lignina por catalisadores alcalinos se demonstrou uma excelente rota na produção de compostos aromáticos simples. A clivagem das estruturas mais fracas da lignina como, aril-alquil éter e ligações β -O-4 ocorrem pelo processo de solvólise das ligações éter no processo de deslignificação alcalina (LI, C. *et al.*, 2015).

Recentemente, sais alcalinos, como bases fracas, incluindo o carbonato de sódio (Na_2CO_3), sulfeto de sódio (Na_2S), hipoclorito de sódio (NaClO), acetato de sódio (CH_3COONa) e trifosfato de sódio (Na_3PO_4) foram usados no pré-tratamento de materiais lignocelulósicos, sendo substitutos viáveis para pré-tratamentos caros baseados em reagentes alcalinos, como o hidróxido de sódio (NaOH). Os mecanismos de reação química quando se aplicam os sais alcalinos são semelhantes aos métodos baseados em bases fortes, como o hidróxido de sódio. As bases fracas podem causar o inchaço das fibras da biomassa e aumentar a porosidade, o que facilita a difusão de enzimas hidrolíticas, aumentando assim a recuperação de açúcares. Além disso, causam dissolução e ruptura de estruturas de lignina e hemicelulose,

desesterificação de ligações éster intermoleculares, rearranjo e modificação de fragmentos de lignina e da cristalinidade da celulose. O trifosfato de sódio mostra uma capacidade de remover a lignina da biomassa lignocelulósica sob condições mais brandas de pré-tratamento com menores temperatura e carga alcalina, em comparação ao carbonato de sódio. Além disso, o trifosfato exibe excelente capacidade tamponante que promove a formação de compostos ácidos, incluindo ácidos orgânicos da lignina e ácidos acéticos das hemiceluloses (QING *et al.*, 2016; SEWSYNKER-SUKAI, SUINYUY e KANA, 2018; HUANG, X. *et al.*, 2018; SEWSYNKER-SUKAI e KANA, 2017).

Altas temperaturas em conjunto com longo tempo de reação, são fatores que auxiliam na geração de monômeros, entretanto, a formação de produtos indesejados pela reação de condensação compete com o processo de despolimerização, sendo um dos principais problemas na produção de monômeros (LI, C. *et al.*, 2015).

A ação dos reagentes alcalinos foi comprovada pelos estudos de Ding *et al.*, (2025), utilizando pré-tratamento alcalino assistido por ultrassom, lavagem de ácido acético e tratamento de branqueamento na palha de algodão, sendo que a concentração do sal e o tempo de reação influenciaram diretamente na taxa de perda de massa do material durante o processo de pré-tratamento, comprovando a remoção da hemicelulose e da lignina do material.

4 METODOLOGIA

As etapas de processamento da biomassa, os testes catalíticos e a caracterização do produto sólido e líquido do pré-tratamento foram realizados nos Laboratórios de pesquisa da Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, em Sumé-PB, onde encontravam-se disponíveis todos os equipamentos e reagentes necessários para o desenvolvimento dessas etapas.

4.1 Processamento da biomassa

O bagaço de cana-de-açúcar foi obtido e processado em forrageira com produtores no Sítio Tamanduá, zona rural do município de Monteiro - PB. O material úmido foi suspenso em telas de polietileno, para lavagem em água corrente, e, posteriormente, secagem solar a temperatura ambiente, durante um período de 1 semana, conforme apresentado na **Imagem 01**.

Imagem 01 - Secagem solar do bagaço da cana-de-açúcar úmido suspenso em telas de polietileno.



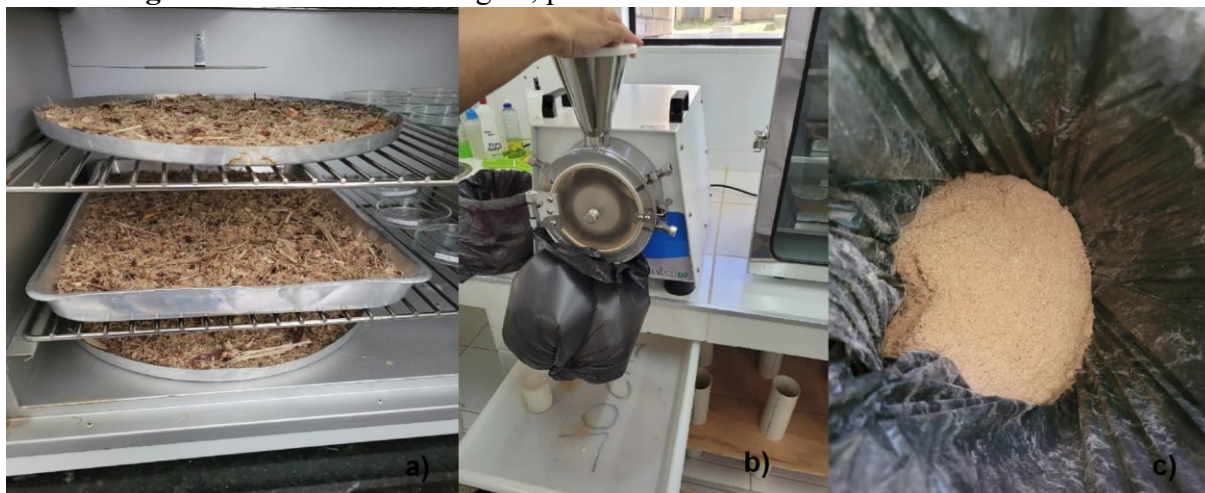
Fonte: Autor, 2025.

A umidade restante foi removida utilizando estufas (SOLAB – SL 100/81) do Laboratório de autoclavagem da Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, em Sumé-PB, **Imagem 02 (a)**, a uma temperatura de 60°C durante um período de 72 horas.

Após a secagem na estufa, o material foi processado em moinho de facas (Willye - STAR FT50 com peneira), **Imagem 02 (b)**, no Laboratório de Física e Morfologia do Solo da

Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, em Sumé-PB. A quantidade de material coletado após esta etapa foi de 2 Kg, sendo reservados 200g para os ensaios deste trabalho, **Imagem 02 (c)**.

Imagem 02- Processo de secagem, processamento e armazenamento do material.



Fonte: Autor, 2025.

4.2 Pré-tratamento da biomassa

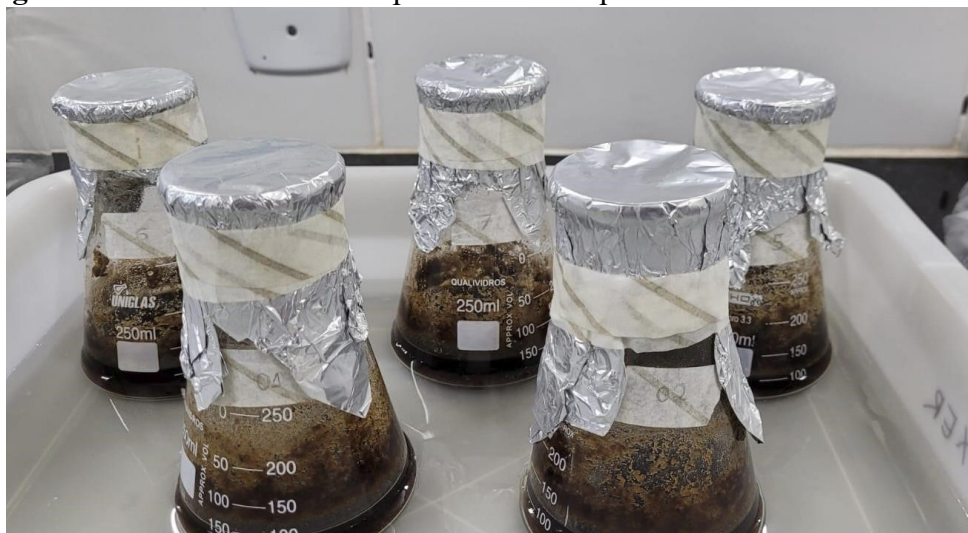
Os testes de pré-tratamento foram conduzidos em batelada, sendo utilizados como reatores Erlenmeyers de 250 mL, como apresentado na **Imagem 03**. As condições de operação e o controle da temperatura foram alcançados utilizando autoclave (PRISMATEC – CS300), sendo aplicado o planejamento fatorial para verificar a influência das variáveis de entrada massa de sal alcalino e tempo de processamento, sobre a quantidade de lignina, no produto sólido, e a quantidade de açúcares redutores, no produto líquido.

Imagem 03 – Misturas reacionais dos ensaios C1, C2, 03 e 04, antes dos testes de pré-tratamento.



Fonte: Autor, 2025.

Imagem 04 - Mistura Reacional após os testes de pré-tratamento com sal alcalino.



Fonte: Autor, 2025.

Para os ensaios de pré-tratamento com sal alcalino, foram fixados os valores das variáveis temperatura, em 120 °C, volume de água destilada no meio reacional, em 100 mL, e a massa de biomassa em 10 g. Na **Tabela 03** é apresentada a matriz de planejamento fatorial completo. Os níveis codificados e reais das variáveis de entrada foram definidos de acordo com a estrutura disponível, e com as condições aplicadas por Neves (2019), Pereira (2022) e Sewsynker-sukai, Suinyuy e Kana (2018). O planejamento fatorial foi aplicado para os sais carbonato de sódio (Na_2CO_3) e fosfato de sódio monobásico ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Tabela 03 - Matriz de planejamento com níveis codificados e reais das variáveis independentes.

Ensaio	Massa de sal	Tempo
1	- 1 (5,0 g)	- 1 (15 min)
2	+ 1 (10,0 g)	- 1 (15 min)
3	- 1 (5,0 g)	+ 1 (45 min)
4	+ 1 (10,0 g)	+ 1 (45 min)
5	0 (7,5 g)	0 (30 min)
6	0 (7,5 g)	0 (30 min)
7	0 (7,5 g)	0 (30 min)

Fonte: Autor, 2025.

Algumas amostras foram utilizadas como controle, sendo mantido um tempo de 45 minutos, replicando o mesmo período aplicado no ensaio 4 do planejamento fatorial, conforme

apresentado na **Tabela 04**. Os resultados obtidos nesta etapa foram utilizados para comparação com os obtidos nas condições estabelecidas para reação na presença dos catalisadores.

Tabela 04 - Condições aplicadas para as amostras utilizadas como controle.

Amostra	Condições
Controle 1 (C1)	bagaço + água + 45 min
Controle 2 (C2)	bagaço + água + 120 °C + 45 min

Fonte: Autor, 2025.

Após cada ensaio, foi realizada a filtração a vácuo do material, sendo separado o produto sólido do líquido. O líquido foi armazenado em garrafas de plástico, para posterior quantificação dos açúcares redutores, e o produto sólido retido no papel filtro, foi submetido à secagem em estufa por 24 horas a 50°C, seguida da quantificação do componente lignina.

Antes e após cada ensaio, foram verificados os teores de °brix e pH no meio reacional, utilizando refratômetro portátil e pHmetro digital, respectivamente.

4.3 Caracterização da biomassa

A caracterização foi realizada antes e após o pré-tratamento, sendo quantificado o teor de lignina, adaptando a metodologia utilizada por Lopes (2015). As amostras a serem analisadas continham entre 5 e 10% de umidade. A preparação destas amostras para a determinação de lignina (insolúvel) envolveu as etapas de hidrólise ácida. Para isso, foram reservados aproximadamente 1,0 g da amostra. O valor da massa foi anotado e transferido para um becker de 10 mL. Foram adicionados 10 mL de ácido sulfúrico a 72% em cada becker, que em seguida foram acomodados em um banho térmico regulado a 30 °C e com a amostra sendo mantida nessas condições por 60 minutos, sob agitação com bastão de vidro a cada 10 minutos, sem remoção da amostra do banho.

Após a realização da hidrólise ácida concentrada, foram removidos os recipientes do banho térmico e o ácido foi diluído a uma concentração de 4% pela adição de 200,00 mL de água destilada, sendo transferido o conteúdo para um frasco Erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, os frascos Erlenmeyer foram selados com folhas de alumínio e autoclavados a 121 °C por 1h, para completa hidrólise dos oligômeros restantes.

Na sequência, os frascos esfriaram lentamente para retirada da folha de alumínio. A mistura reacional de cada frasco Erlenmeyer, que continha o resíduo sólido (lignina insolúvel e

cinzas) foi filtrada em filtro de papel (UNIFIL – FAIXA BRANCA, 9cm Ø) previamente seco em estufa a 105 °C e tarado. Todo o sólido do Erlenmeyer foi coletado pela lavagem com água destilada. Os sólidos coletados foram direcionados para a determinação de lignina insolúvel, determinada através da Equação (1):

$$Lignina (\%) = \frac{massa\ do\ papel + amostra - massa\ do\ papel}{massa\ inicial\ da\ amostra} \cdot 100$$

(1)

4.4 Teor de açúcares redutores (AR)

O teor de açúcares redutores no produto líquido do pré-tratamento foi avaliado pelo método do ADNS (ácido 3,5-dinitro salicílico), utilizando espectrofotômetro (INSTRUTHERM UV – 1000A) a 540 nm, conforme procedimento descrito por Vasconcelos (2013).

Foram separados tubos de ensaios, que foram identificados de acordo com o ensaio realizado, sendo os do planejamento realizados com o carbonato de sódio identificados como PC e os com fosfato de sódio identificados como PF. As amostras avaliadas foram C1, C2, PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6, PC7, PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6 e PF7, contra a amostra de referência, denominada branco.

Foram adicionados 0,5 mL de cada amostra aos tubos identificados, sendo o conteúdo do branco 0,5 mL de água destilada. Em seguida, foram adicionados 0,5 mL de ADNS em cada tubo que continha as amostras, que foram homogeneizadas com o auxílio de um agitador. Após a agitação, os tubos foram levados para banho-maria com água em ebulição (100 °C) pelo tempo de 12 minutos.

Após o tempo de 12 minutos, foram adicionados 2,5 mL de água destilada aos tubos de ensaio e novamente realizou-se a homogeneização da mistura com auxílio de um agitador. Por fim, foi realizada a leitura da intensidade da cor em espectrofotômetro a 540 nm, contra a amostra de calibração, identificada como branco.

4.5 Análise Estatística dos Dados

Os testes catalíticos foram conduzidos utilizando o planejamento fatorial com adição de pontos centrais, visando verificar a influência das variáveis de entrada massa de sal e tempo sobre a quantidade de lignina, no produto sólido, e a quantidade de açúcares redutores, no

produto líquido. Após a condução dos ensaios foi realizado o cálculo dos efeitos para cada fator e para interação entre eles, seguido da análise de significância estatística e análise de variância.

Visando avaliar a diferença entre os valores médios de lignina presentes nas amostras do bagaço de cana, após o processo foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) utilizando o software Statistica®, para os ensaios com réplicas (C2 e pontos centrais). A análise de variância (ANOVA), foi aplicada na comparação da distribuição dos três grupos, com amostras independentes. O objetivo foi testar a hipótese estatística referente à existência de diferenças significativas na distribuição de uma variável de interesse entre os grupos analisados (OLIVEIRA; LIMA, 2019). Formalmente, foram definidas as hipóteses do teste como:

- Hipótese Nula: Não há diferenças estatisticamente significativas entre os teores médios de lignina obtidos nos ensaios de pré-tratamento, sem e com a aplicação de um sal alcalino.
- Hipótese Alternativa: Pelo menos um grupo apresenta um teor médio distinto.

O conceito de diferença entre distribuições está diretamente relacionado à variabilidade das amostras. Quando os grupos apresentam variabilidade interna homogênea e médias estatisticamente equivalentes, as distribuições tendem a se sobrepor, sustentando a hipótese nula. No entanto, se as médias diferem significativamente, as distribuições se afastam proporcionalmente à magnitude da diferença entre as médias (OLIVEIRA; LIMA, 2019).

Para aplicação da análise de variância, foi necessário verificar algumas suposições, sendo elas:

1. As observações são independentes,
2. Os erros são independentes e provenientes de uma distribuição normal
3. Os grupos comparados apresentam homogeneidade de variância;

Os ensaios de pré-tratamento foram realizados de forma a garantir a independência dos resultados, considerando as amostras C2 e os pontos centrais dos planejamentos fatoriais desenvolvidos na presença de carbonato de sódio e de fosfato de sódio, respectivamente.

A normalidade dos dados foi avaliada aplicando-se o teste de Shapiro-Wilk, uma vez que o número de dados avaliados foi inferior a 50. O teste de Shapiro-Wilk teve como objetivo avaliar se a distribuição dos dados se aproxima de uma distribuição normal, possuindo as seguintes hipóteses nula e alternativa:

- Hipótese Nula: A variável de interesse é oriunda de uma população com distribuição normal;

- Hipótese Alternativa: A variável de interesse não é oriunda de uma população com distribuição normal.

O teste produziu a estatística W , com um valor de p a ela associado. Se o valor de p fosse menor que o nível de significância escolhido (0,05), então a hipótese nula seria rejeitada. Com isso, foi possível afirmar se os dados se afastam significativamente ou não de uma distribuição normal (LIMA, 2021).

Para avaliar a homogeneidade das variâncias, foi aplicado o teste de Levene, uma metodologia estatística que compara a variabilidade das amostras com a variância geral. O teste de Levene estabeleceu as seguintes hipóteses estatísticas:

- Hipótese Nula: As variâncias dos grupos são estatisticamente iguais.
- Hipótese Alternativa: As variâncias dos grupos são estatisticamente diferentes.

A estatística de teste gerada pelo método corresponde a um valor de F , acompanhado do respectivo valor de p , utilizado para tomada de decisão. Considerando um nível de significância de 0,05, as interpretações possíveis foram:

- Se $p < 0,05$, rejeita-se a hipótese nula, indicando que há diferença significativa entre as variâncias dos grupos;
- Se $p > 0,05$, não há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula, o que sugere que as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

É importante destacar que esse critério de interpretação difere da abordagem convencional da estatística clássica. Normalmente, ao avaliar o impacto de um tratamento na distinção entre grupos, um valor de p inferior a 0,05 é desejado para indicar diferenças significativas. No entanto, no contexto da verificação da homogeneidade das variâncias, um valor de p superior a 0,05 sustenta a premissa de igualdade das variabilidades entre os grupos (LIMA, 2023).

Após a realização da ANOVA, foi confirmado que pelo menos um grupo era diferente dos demais, mas foi necessário identificar entre quais grupos a diferença foi significativa. Para isso, foi aplicado o Teste de Tukey.

O Teste de Tukey, denominado Teste de Tukey para Diferenças Honestamente Significativas (HSD – Honestly Significant Difference), é um procedimento estatístico de comparações múltiplas utilizado para identificar diferenças significativas entre as médias de

grupos distintos. Essa metodologia fundamenta-se na Diferença Mínima Significativa (DMS), um limiar crítico determinado pelos percentis da distribuição do grupo.

O cálculo da DMS considerou a distribuição estatística para um intervalo padronizado, o quadrado médio dos resíduos extraído da análise de variância (ANOVA) e o tamanho amostral dos grupos. Esse método é amplamente empregado em experimentos onde se busca verificar quais grupos apresentam médias estatisticamente distintas após a detecção de um efeito significativo na ANOVA (OLIVEIRA, 2019).

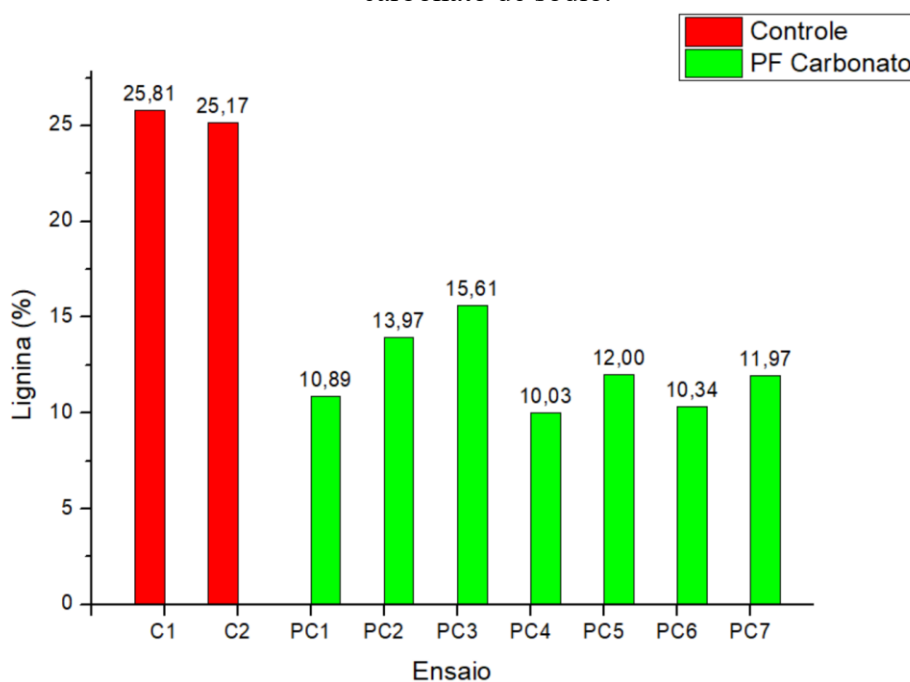
Como a amostra C2 foi realizada em duplicata e os pontos centrais em triplicata, foi necessário aplicar o **Teste de Tukey-Kramer**, uma versão ajustada do Teste de Tukey que permite comparações múltiplas, garantindo uma melhor adequação estatística. Nesse caso, o cálculo da Diferença Mínima Significativa (DMS) foi modificado para incorporar os diferentes tamanhos amostrais, tornando a abordagem uma aproximação, em vez de um teste exato. O Teste de Tukey-Kramer mantém o princípio da amplitude estudentizada, mas ajusta o erro padrão das diferenças entre médias, ponderando a variabilidade conforme o número de observações em cada grupo (OLIVEIRA, 2019). Essa adaptação foi essencial para evitar inflar artificialmente a significância estatística, pois os grupos possuíam tamanhos distintos.

Todos os testes mencionados neste tópico foram realizados com o auxílio do software Statistica®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do teor de lignina presente no bagaço de cana foi realizada para as amostras *in natura* e após a etapa de pré-tratamento, visto que o objetivo do processo era a redução deste componente. Com isso, os resultados para essas análises permitiram realizar a comparação dessas quantidades presentes no bagaço de cana e avaliar a eficiência do processo estudado. Os resultados obtidos para os controles C1 e C2 e ao aplicar como catalisador o carbonato de sódio (Na_2CO_3), ensaios indicados como PC, encontram-se na **Figura 07**.

Figura 07 - Teores de lignina (%) do bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com carbonato de sódio.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos demonstram que a aplicação do carbonato de sódio promoveu à redução dos teores de lignina para todas as condições estudadas, sendo o menor teor residual de lignina, 10,03%, observado no ensaio 4. Comparado ao controle *in natura* (C1), esse resultado indica que a aplicação de 10 gramas de carbonato, em conjunto a um tempo de 45 minutos, resultou na remoção de 61,00 % da quantidade inicial de lignina. Esse resultado, se aproxima do obtido nos ensaios 6 e 1, com remoções de 59 e 58%, respectivamente. Destaca-se o ensaio 1, no qual foram utilizados apenas 5 gramas de sal e um tempo de processo reduzido, de 15 minutos.

A pesquisa realizada por Zhu e colaboradores (2025) utilizando 0,4 g de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 4%, em uma mistura de 10 ml de politetrafluoretileno (PTFE), para avaliar a

remoção da lignina na palha de trigo, gerou uma taxa de remoção de 63,6%, aplicando 90°C em uma duração de 120 minutos.

Estudos realizados por Steffen e colaboradores (2024) aplicando o pré-tratamento alcalino de palha de trigo com carbonato de sódio (Na_2CO_3), variando sua concentração de 12% à 24%, a uma temperatura de 150°C e um período de 30 minutos, geraram uma taxa de remoção de 75%, demonstrando que o aumento na quantidade do sal pode influenciar no processo de deslignificação, sendo observada uma maior remoção para uma maior concentração de sal.

O estudo realizado por Chen e colaboradores (2021) fixou um tempo de reação de 60 minutos utilizando diferentes cargas de álcali titulável total (TTA), sendo sua variação iniciando de 4% e chegando a 20% e variando a temperatura de 110 a 120°C. Foi observado que quanto maior a (TTA) maior será a taxa de remoção da lignina, sendo que para 20% obteve-se uma remoção de 56,9% da lignina utilizando o carbonato de sódio.

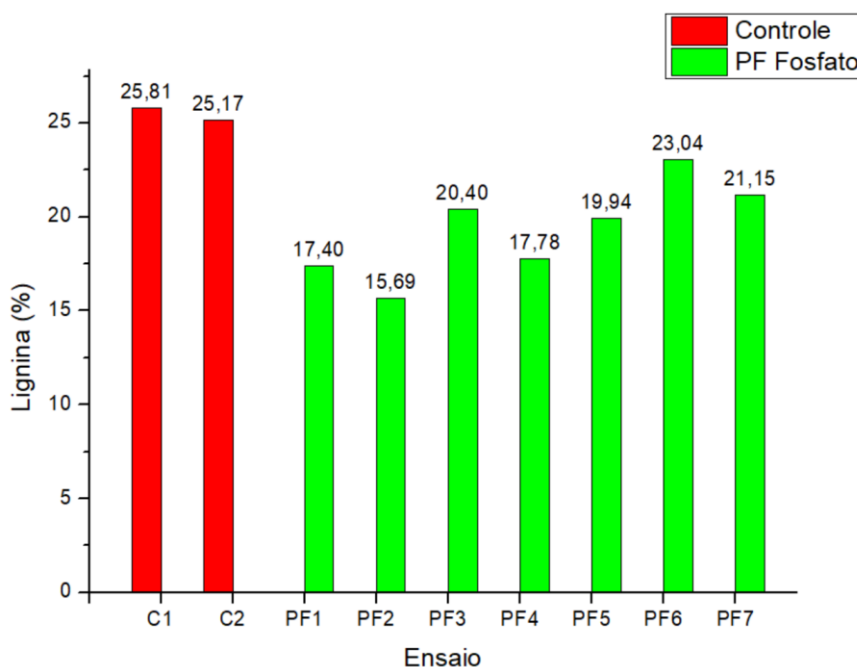
Nguyen-Thi e colaboradores (2024), alcançaram 61,4% de remoção da lignina presente no bagaço de cana, aplicando concentração de hidróxido de sódio (NaOH) em 10%, temperatura de reação de 90 °C e tempo de 90 min. Com relação a temperatura do processo, o aumento dessa variável proporcionou o aumento na remoção de lignina, sendo aplicada por eles a temperatura de 90°C, pois foi observada uma pequena diferença na capacidade de recuperação de lignina versus uma grande diferença na energia fornecida pela temperatura, quando comparada à temperatura de 120°C. Além disso, 120 °C pode afetar a estrutura da lignina. Ficou comprovado que tempos maiores que 90 minutos favorecem a reação de condensação e consequentemente o aparecimento de grumos na solução, levando a uma diminuição na eficiência do processo. Sobre a concentração de hidróxido, os pesquisadores concluíram que maiores valores geram maior remoção de lignina, até o limite de 14%, pois a partir deste ponto a lignina intumescceu, causando reação de condensação, gerando dificuldades na operação e reduzindo o desempenho.

Yang e colaboradores (2024) estudaram o pré-tratamento de resíduos do álamo com fosfato de sódio monossódico ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) 3%, a 180°C e por 90 minutos, alcançando 52% de remoção de lignina, demonstrando que condições mais severas de processo, como tempo e concentrações de sal mais elevados podem reduzir o percentual de remoção, além de aumentar os custos com a energia requerida. Ao usar uma maior quantidade de sal, o íon PO_4^{3-} pode promover a remoção de lignina, por meio da quebra da ligação fenol- β -aril éter da lignina. No entanto, com o aumento da concentração de álcali de 3 para 9% em peso, a remoção de lignina caiu de 52% para 43%. Com isso, é possível deduzir que quanto menor a massa ativa por mol, mais tempo de reação é necessário para conseguir atingir a mesma quantidade de remoção de

lignina, da mesma forma aumentar a quantidade do reagente, também acarreta menor tempo de reação.

Os resultados obtidos para o teor de lignina (%) ao aplicar o pré-tratamento com fosfato de sódio, nos ensaios indicados como PF, em comparação com os controles C1 e C2, encontram-se na **Figura 08**.

Figura 08 - Teores de lignina (%) do bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com fosfato de sódio.

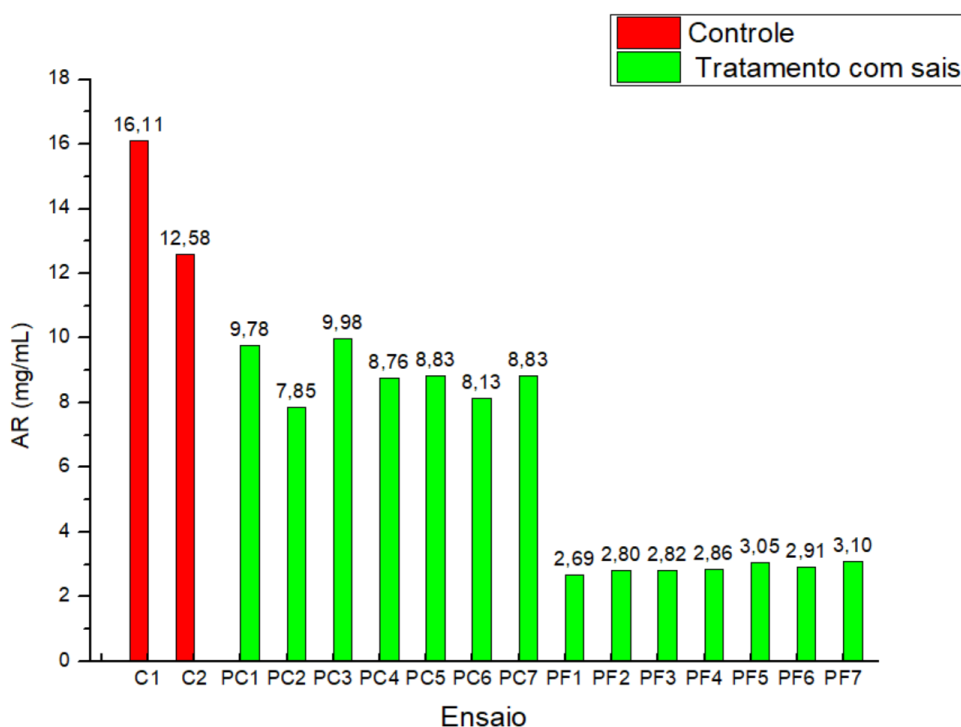


Fonte: Autor, 2025.

Ao aplicar o planejamento fatorial utilizando fosfato de sódio, foi possível alcançar o teor mínimo de lignina de 15,69%, representando uma remoção máxima de 42%, comparando o resultado da amostra C1 com o do ensaio PF2, em que foram aplicados 10 gramas de sal e 15 minutos de reação. Portanto, o percentual de remoção nos ensaios com fosfato foi inferior ao alcançado no planejamento utilizando carbonato de sódio.

Ao avaliar a quantidade de açúcares redutores, é possível verificar que houve redução após aplicação do pré-tratamento, nos dois planejamentos, quando se compara os resultados obtidos para as amostras *in natura* C1 e C2 e os ensaios conduzidos na presença do carbonato de sódio (PC) e do fosfato de sódio (PF), sendo as menores quantidades de açúcares observadas nos ensaios PF1 e PF2. Esses resultados encontram-se na **Figura 09**.

Figura 09 - Açúcares redutores (%) no bagaço de cana antes e após o pré-tratamento com carbonato e fosfato de sódio.



Fonte: Autor, 2025.

A redução no teor de açúcares não era esperada, uma vez que quando submetida a reação, nas condições de temperatura aplicadas nesse estudo, após o tempo de processo a biomassa geralmente apresenta concentração de açúcares redutores no meio reacional maiores que as iniciais, devido a degradação das frações celulose e hemicelulose.

Laltha e colaboradores (2021) também observaram uma redução na concentração de açúcares redutores ao estudarem o pré-tratamento alcalino do bambu e sabugo de milho, aplicando fosfato de sódio monossódico e hidróxido de sódio em microondas, e justificaram essa redução pelo fato que em tempos de pré-tratamento mais longos, o calor abundante promove a desidratação dos componentes da mistura reacional, dificultando a expansão dos grânulos, levando ao estresse entre os biopolímeros, causando inevitavelmente o colapso e a ruptura de suas estruturas, podendo ser responsáveis pelo menor teor de açúcares redutores.

5.1. Análise estatística para o planejamento fatorial

A análise estatística foi realizada com o objetivo de comprovar a significância dos fatores massa de sal e tempo de reação sobre as respostas teor de lignina (%) e quantidade de açúcares redutores (mg/mL). Os valores dos efeitos calculados para o planejamento aplicando o carbonato de sódio encontram-se na **Tabela 05**.

Tabela 05 - Média das respostas, efeito dos fatores e da interação entre eles sobre o teor de lignina (%) e seus desvios-padrão.

Média Global (%)		Desvio Padrão (%)
12,11		0,45
Efeitos principais (%)		Desvio Padrão (%)
Massa do sal (g)	-1,25	1,19
Tempo (min)	0,39	1,19
Efeito da interação (%)		Desvio Padrão (%)
Massa x Tempo	-4,33	1,19

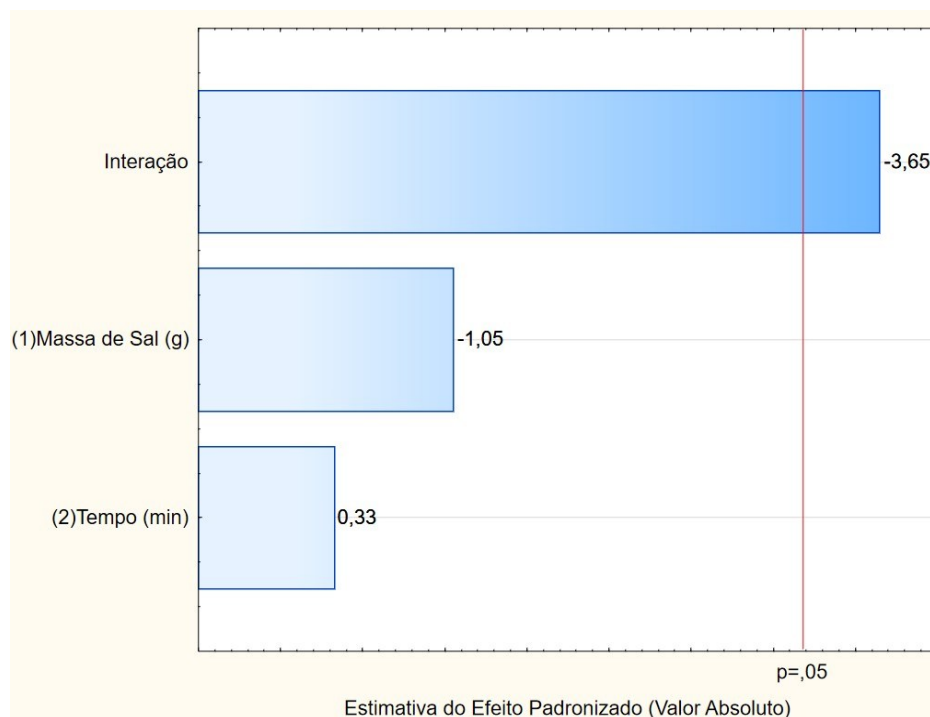
Fonte: Autor, 2025.

O efeito da massa de sal sobre o percentual de lignina foi negativo, indicando que se mantivermos o tempo constante, ao realizar a mudança na quantidade do carbonato de sódio de 5 para 10 gramas, foi observada uma redução média no teor de lignina de 1,25%. Ao avaliar o fator tempo, foi possível verificar um efeito positivo, o que indica que um aumento no tempo, mantendo fixa a massa de sal, gera um aumento médio de 0,39% no teor de lignina.

Esses valores para os efeitos principais são considerados baixos, indicando que os níveis aplicados provavelmente não apresentam diferença estatística entre si, o que pôde ser confirmado pela análise da significância dos efeitos para cada fator, a um nível de confiança de 95%. Além disso, é possível observar que o efeito que apresentou o maior valor absoluto foi o da interação entre os fatores, sendo esse efeito negativo, indicando que a alteração dos níveis para a interação entre o tempo e a massa de catalisador, passando de uma combinação de sinais negativa para positiva, pode gerar uma redução média de 4,33% no teor de lignina.

A significância estatística pode ser facilmente observada utilizando o gráfico de Pareto, **Figura 10**.

Figura 10 - Gráfico de Pareto com a interação dos efeitos para análise do teor de lignina (%).



Fonte: Autor, 2025.

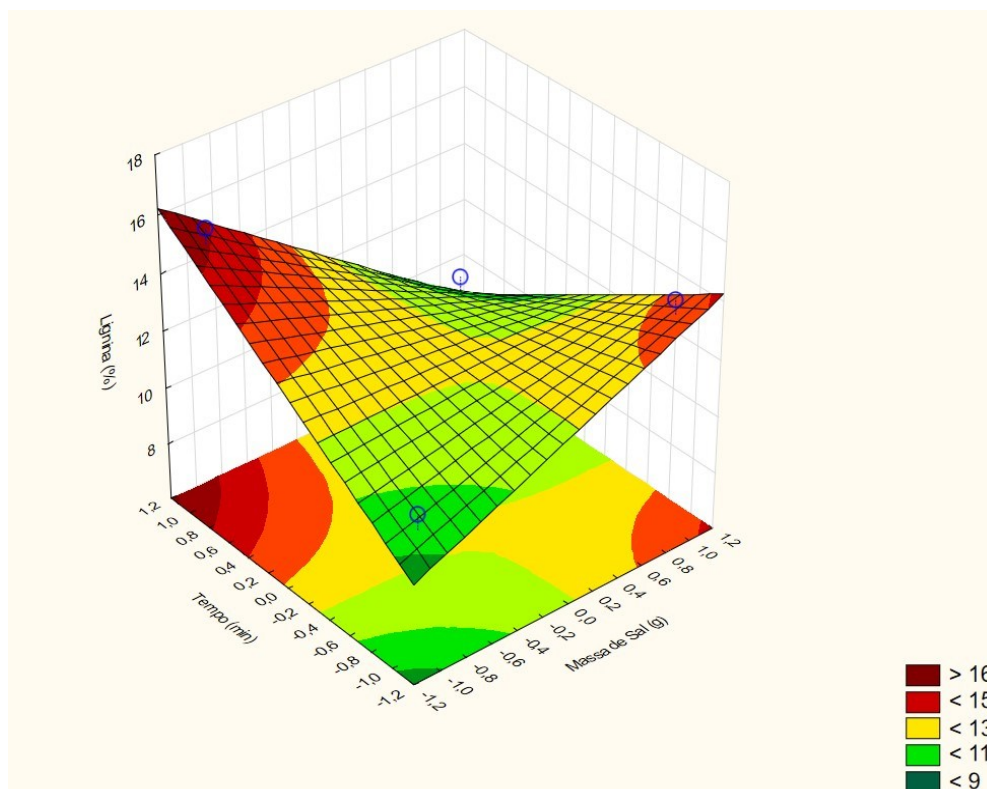
A análise do Gráfico de Pareto para o teor de lignina (%) no planejamento fatorial aplicando o carbonato de sódio confirma que os efeitos principais não apresentaram significância estatística, para os níveis aplicados, entretanto, a interação entre os fatores foi significativa, confirmando que quando passamos a usar uma combinação entre os fatores que gera um sinal positivo, como nos ensaios 1 e 4, é possível gerar uma redução média de 4,33% no teor de lignina, ao comparar os resultados com os obtidos nos ensaios 2 e 3.

Como o pré-tratamento usando sais alcalinos possui como objetivo principal a redução na quantidade de lignina presente na biomassa, a análise da superfície de resposta permite definir em quais níveis dos fatores foram observados os menores teores e consequentemente as condições que devem ser aplicadas para a obtenção dos melhores resultados.

Verifica-se que os menores percentuais de lignina foram alcançados nas condições aplicadas nos ensaios 1, com massa de sal em 5,0 gramas e tempo de 15 minutos, e 4, com massa de sal em 10 gramas e tempo de 45 minutos.

Nos ensaios estudados não é possível afirmar se há uma diferença entre os resultados, porém visando a otimização do processo de deslignificação, seria recomendado utilizar as condições presentes no ensaio 1, sendo aplicada menor quantidade do sal e menor tempo de reação, como pode ser observado no gráfico de superfície de resposta, presente na **Figura 11**.

Figura 11 - Gráfico de superfície relacionando o tempo (min), massa de sal (g) e quantidade de lignina (%).



Fonte: Autor, 2025.

Outra conclusão que pode ser obtida observando o gráfico de superfície de resposta, é que na região estudada a relação das variáveis de entrada e o teor de lignina não aparenta ser linear. Com isso, foi realizada uma análise de variância, presente na **Tabela 06**, confirmando a significância estatística da interação entre os fatores, sendo possível confirmar também que não houve o ajuste dos resultados ao modelo linear, pelo fato do F calculado ser menor que o tabelado, de 10,13, mesmo o valor do coeficiente de determinação sendo de 82,90%.

Tabela 06 - Análise de Variância para o ajuste de um modelo linear aos dados do planejamento fatorial usando o carbonato de sódio considerando a resposta teor de lignina.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	20,47	3	6,82	4,83
Resíduo	4,22	3	1,41	F tabelado
Total	24,69	6		10,13
R²	82,90%			

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados dos efeitos calculados para a quantidade de açúcares obtida no planejamento com carbonato de sódio, encontram-se na **Tabela 07**.

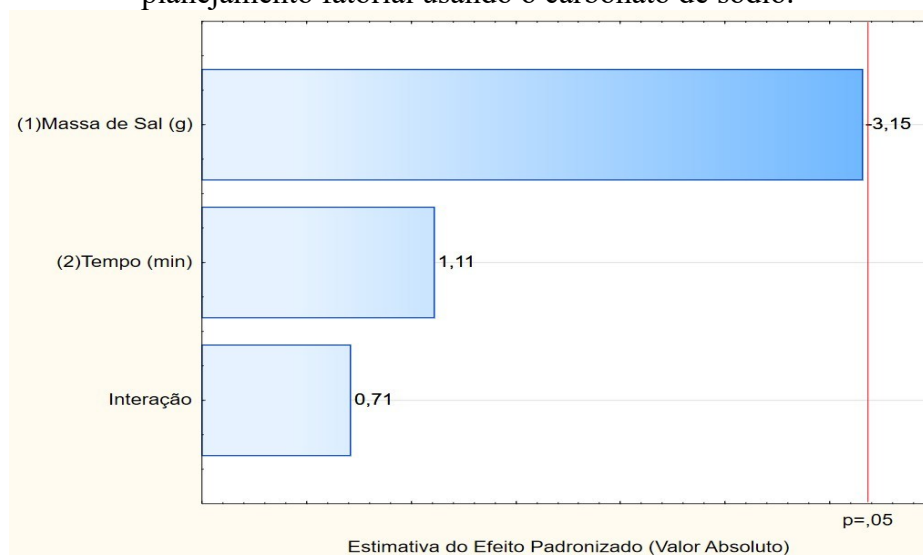
Tabela 07 - Média das respostas, efeito dos fatores e da interação entre eles sobre o teor de açúcares redutores (mg/mL) e seus desvios-padrão.

Média Global (mg/mL)		Desvio Padrão (mg/mL)
8,88		0,18
Efeitos principais (mg/mL)		Desvio Padrão (mg/mL)
Massa do sal (g)	-1,57	0,50
Tempo (min)	0,55	0,50
Efeito da interação (mg/mL)		Desvio Padrão (mg/mL)
Massa x Tempo	0,35	0,50

Fonte: Autor, 2025.

Os fatores principais e a interação entre eles não apresentaram significância estatística, para os níveis estudados, o que pode ser comprovado ao avaliar o gráfico de Pareto, presente na Figura 12.

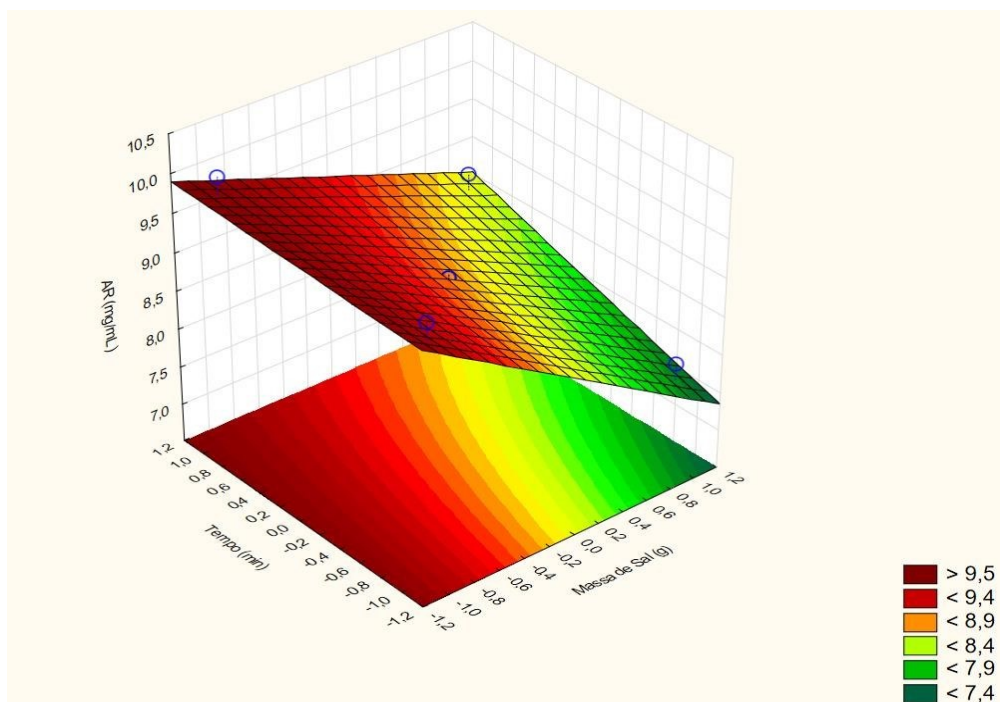
Figura 12 - Gráfico de Pareto para o teor de açúcares redutores observado após o planejamento fatorial usando o carbonato de sódio.



Fonte: Autor, 2025.

Outra conclusão que pode ser obtida observando o gráfico de superfície de resposta, presente na **Figura 13**, é que na região estudada a relação entre as variáveis de entrada e o teor de açúcares não aparenta ser linear.

Figura 13 - Gráfico de superfície de resposta, relacionando o tempo (min), massa do sal (g) e a quantidade de açúcares redutores (mg/ml).



Fonte: Autor, 2025.

Com isso, foi realizada uma análise de variância, presente na **Tabela 08**, confirmando a não significância estatística dos fatores e da interação entre eles, sendo possível confirmar também que não houve o ajuste dos resultados ao modelo linear, pelo baixo valor do coeficiente de determinação, 59,83%, e pelo fato do F calculado ser menor que o tabelado, de 10,13.

Tabela 08 - Análise de Variância para o ajuste de um modelo linear aos dados do planejamento fatorial usando o carbonato de sódio considerando a resposta quantidade de açúcares redutores.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	2,91	3	0,97	3,88
Resíduo	0,75	3	0,25	F tabelado
Total	3,66	6		10,13
R²	59,83%			

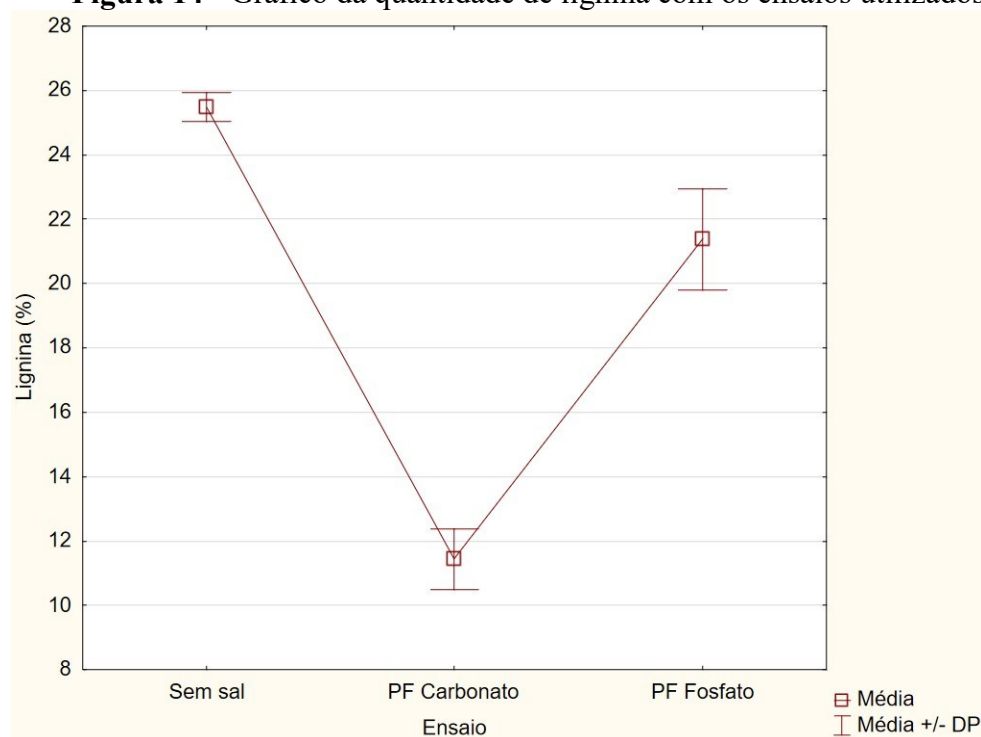
Fonte: Autor, 2025.

A análise estatística do planejamento fatorial aplicado com o fosfato de sódio também foi realizada, mas nenhum efeito foi estatisticamente significativo, tanto para o teor de lignina no bagaço, quanto para a quantidade de açúcares redutores no produto líquido. Além disso, a análise de variância permitiu concluir que o modelo linear também não é adequado para relacionar os fatores com as respostas, considerando os níveis aplicados no planejamento.

Como forma de comprovar que o tratamento com sais alcalinos promove a remoção de lignina presente no bagaço, foi realizada uma comparação entre as médias obtidas para essa

variável. A comparação foi realizada entre os valores médios observados nos pontos centrais dos planejamentos com carbonato e fosfato de sódio e a média observada para as amostras tratadas na ausência dos sais. Os valores médios obtidos, e seus respectivos desvios-padrão, encontram-se na **Figura 14**.

Figura 14 - Gráfico da quantidade de lignina com os ensaios utilizados.



Fonte: Autor, 2025.

Para isso, inicialmente foram realizados os testes de Shapiro-Wilk, para avaliar a normalidade dos dados e de Levene, para confirmar a homogeneidade das variâncias. Em seguida, foi realizada a análise de variância considerando o fator presença de sal, para confirmar que havia diferença entre as médias, seguida do teste de Tukey para identificar entre quais médias houve a diferença estatisticamente significativa.

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk confirmou a normalidade dos dados de teor de lignina (%), sendo observado um valor de p igual a 0,1367. Com isso, como o valor de p foi maior que o nível de significância escolhido (0,05), a hipótese nula pôde ser aceita e assim afirmar que os dados se aproximam significativamente de uma distribuição normal (LIMA, 2021).

O teste de Levene, para comprovar a homogeneidade das variâncias, se baseia no valor de F , acompanhado do respectivo valor de p , utilizado para tomada de decisão. Considerando que o valor de p obtido para os dados de teor de lignina foi de 0,339, maior que o nível de

significância (0,05), não há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula, o que sugere que as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Como ficou comprovada a normalidade dos dados e homogeneidade de variâncias, foi realizada a análise de variância, ficando comprovado que pelo menos um grupo era diferente dos demais, uma vez que o valor de p para os dados de teor de lignina (%) foi de 0,000096, bem inferior ao nível de significância (0,05).

Para identificar entre quais médias há a diferença foi aplicado o **Teste de Tukey-Kramer**, uma versão ajustada do Teste de Tukey que permite comparações múltiplas. Os resultados obtidos, demonstraram que houve diferença estatisticamente significativa entre todas as médias, o que indica que os teores de lignina (%) presentes no bagaço tratado na ausência dos sais é diferente dos valores observados na biomassa tratada com sais alcalinos.

O conceito de diferença entre distribuições está diretamente relacionado à variabilidade das amostras. Quando os grupos apresentam variabilidade interna homogênea e médias estatisticamente equivalentes, as distribuições tendem a se sobrepor, sustentando a hipótese nula. No entanto, se as médias diferem significativamente, as distribuições se afastam proporcionalmente à magnitude da diferença entre as médias (OLIVEIRA; FARIA, 2021).

Com isso, por haver diferença entre todas as médias avaliadas, fica comprovado que o uso dos sais alcalinos proporciona a redução do teor de lignina, bem como a obtenção de melhores resultados ao aplicar o carbonato de sódio, quando comparado com os resultados obtidos para o fosfato de sódio.

6 CONCLUSÃO

O pré-tratamento alcalino previsto nos objetivos foi concluído seguindo a metodologia explicitada neste trabalho. Após aplicação dos planejamentos fatoriais utilizando o carbonato

de sódio e o fosfato de sódio, ficou comprovada pela análise estatística dos resultados, a um nível de confiança de 95%, que houve atividade dos sais alcalinos na remoção de parte da lignina presente no bagaço de cana.

Com a aplicação do teste de Tukey-Kramer, foi possível verificar, para as condições empregadas nos ensaios, que o carbonato de sódio gerou uma maior deslignificação do material quando comparado com o fosfato de sódio, apresentando um percentual de remoção de lignina de 61%, enquanto o fosfato gerou uma remoção máxima de 42%.

Os efeitos para os fatores isolados não apresentaram significância estatística, contudo a interação entre os fatores tempo e massa de sal foi estatisticamente significativa para a remoção da lignina no planejamento fatorial utilizando carbonato de sódio, gerando redução média de 4,33%, quando comparados os resultados entre os ensaios. Através do gráfico de superfície de resposta, foi possível definir que os ensaios 1 e 4 apresentaram os melhores valores de remoção de lignina perante os demais ensaios.

Para os planejamentos utilizando fosfato de sódio, nenhum dos fatores não apresentou significância estatística sobre o teor de lignina e concentração de açúcares redutores no produto líquido.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; PARK, H.; CHOI, O.; SINDHU, R.; PARAMESWARAN, B.; PANDEY, A.; PARK, H. J.; SANG, B. I. Pretreatment strategies for enhanced biogas

production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**. 2020. v.301. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>>. Acesso em: 20/01/2025.

ADEBAYO, T. S; KIRIKKALLELI, D. Impact of Renewable Energy Consumption, Globalization, And Technological Innovation on Environmental Degradation in Japan: Application of Wavelet Tools. **Environment, Development and Sustainability**. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-02101322-2>. Acesso em: 20/08/2024.

ALZAGAMEEM, A. HANSEN, B. K.; BÜCHNER, D.; LARKINS, M.; KAMM, B.; WITZLEBEN, S.; SCHULZE, M. Lignocellulosic biomass as source for lignin-based environmentally benign antioxidants. **Molecules**. 2018. v23. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/molecules23102664>>. Acesso em: 04/12/2024.

AHUJA, V.; CHINNAM, S.; BHATT, K. A. Yeast based biorefinery for xylitol and ethanol production from sugarcane bagasse. **Process Safety and Environmental Protection**. 2024. v. 191. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.08.122>>. Acesso em: 08/02/2025.

AZAD, S. A.; MADADI, M.; RAHMAN, A.; SUN, C.; SUN, F. Machine learning-driven optimization of pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse: Analytical insights for industrial scale-up. **Fuel**. v.15. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134682>>. Acesso em: 29/04/2025.

BANU, R.J.; PREETHI.; KAVITHA, S.; TYAGI, K. V.; GUNASEKARAN, M.; KARTHIKEYAN, O. P.; KUMAR, G. **Lignocellulosic Biomass Based Biorefinery: A Successful Platform Towards Circular Bioeconomy**. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121086>>. Acesso em: 22/08/24.

BARRETO, S. E.; FONSECA, A. F.; ADARME, O. F. H.; SILVA, F. D.; BRANDÃO, L. R.; BAÊTA, B. E. L.; GUIMARÃES, V. M.; GURGEL, L. V. A. Optimization of 2G ethanol production from sugarcane bagasse: Upscaling of soda pretreatment with redox mediator followed by fed-batch enzymatic hydrolysis and co-fermentation. **Energy Conversion and Management**. 2025. v.332. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119225>>. Acesso em: 30/04/2025.

BARVE, S. S.; KHAIRNAR, H. P. Use of rice Husk and Sugarcane Bagasse Ash for Development of Automotive Brake Pad Friction Material. **Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy**. v.12. Disponível em: <<https://doi.org/10.5109/7342436>>. Acesso em: 29/04/2025.

BAURHOO, B; Ruiz-Feria, C.A; Zhao, X. Purified lignin: nutritional and health impacts on farm animals - a review. **Animal Feed Science and Technology**. 2008. v.144. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2007.10.016>>. Acesso em: 04/12/2024.

BEAUCAMP A.; MUDDASAR, M.; CRAWFORD, T.; COLLINS, M. N.; CULEBRAS, M. Sustainable lignin precursors for tailored porous carbon-based supercapacitor electrodes, **Int. J. Biol. Macromol.** v.221. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.097>>. Acesso em: 29/11/2024.

CHAUHAN, K.; KUMAR, A.; GOSWAMI, K.; NEGI, L.; CHAUHAN, A.; MADAN, K.; JAIN, S. Lignin Extraction from Lignocellulosic Biomass (Sugarcane Bagasse) and Its Potential Application as a Feedstock for Fuel Production. **Materials Today: Proceedings**. v. 78. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.190>>. Acesso em: 09/11/2024.

CHEN, H.; MAO, J.; JIANG, B.; WU, W.; JIN, Y. Carbonate-oxygen pretreatment of waste wheat straw for enhancing enzymatic saccharification. **Process Biochemistry**. 2021. v.104. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.016>>. Acesso em: 08/05/2025.

CHEN, J.; LI, M.; CAO, L.; CHEN, H.; LEE, J. K.; KALIA, V. C.; GONG, C. The bifunctional enzymatic catalysis of maize waste for simultaneous production of arabinose and xylose. **Process Biochemistry**. 2025. v.150. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.01.008>>. Acesso em: 20/01/2025.

CHEN, X.; WANG, X.; GU, S.; HUANG, A.; CHENG, H. Effects of alkali treatment on the bending and fracture behavior of biomaterial bamboo. **Polymer Testing**. 2025. v. 143. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108715>>. Acesso em: 06/05/2025.

CHIANI, E.; BEAUCAMP, A.; HAMZEH, Y.; AZADFALLAH, M.; THANUSHA, A. V.; COLLINS, M. N. Synthesis and characterization of gelatin/lignin hydrogels as quick release drug carriers for ribavirin. **Int. J. Biol. Macromol.** 2023. v.224. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.205>>. Acesso em: 04/12/2024.

CHOUGALA, V.; GOWDA, A. C.; NAGARAJA, S.; AMMARULLAH, M. I. Effect of Chemical Treatments on Mechanical Properties of Sugarcane Bagasse (Gramineae Saccharum Officinarum L) Fiber Based Biocomposites: A Review. **Journal of Natural Fibers**. 2025. v. 22. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2445571>>. Acesso em: 07/02/2025.

COELHO, L. F.; BRAGAGNOLO, C. Fatores determinantes da eficiência técnica da cana-de-açúcar nos polos de produção do sudeste e centro-oeste brasileiros. **Estudos Econômicos**. 2024. v. 54. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1980-53575416lccb>>. Acesso em: 07/02/2025.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da Safra de Cana-de-açúcar**. Terceiro levantamento, novembro de 2024 - safra 24/25.: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 07/02/2025.

DING, K.; YAO, Z.; YIMAMU, N.; AYDAN, T.; GUAN, Q. Optimization and characterization of cellulose extraction from cotton straw using alkali pretreatment. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13399-025-06774-4>>. Acesso em: 06/05/2025.

ELSAIED, E. E.; RAGHE, S. R.; YOUSSEF, A. M.; BANY, M. S.; AGWA, I. S. Enhancing the performance of rigid pavement slabs using sugarcane bagasse ash and macro synthetic

fibers. **Innovative Infrastructure Solutions**. 2025. v 10. Disponível em: <[10.1007/s41062-025-01871-9](https://doi.org/10.1007/s41062-025-01871-9)>. Acesso em: 25/04/2025.

ERDIWANSYA, E.; GANI, A.; MAMAT, R.; BAHAGIA; NIZAR, M.; YANA, S.; YASIN. M. H. M.; MUHIBBUDDIN; ROSDI, S. M. **Prospects for Renewable Energy Sources From Biomass Waste In Indonesia**. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100880>>. Acesso em: 20/08/2024.

FANGUEIRO, J.F.; CARVALHO, N. M.; ANTUNES, F.; MOTA, I. F.; PINTADO, M. E.; MADUREIRA, A. R.; COSTA, P. C. Lignin From Sugarcane Bagasse As A Prebiotic Additive For Poultry Feed. **International Journal of Biological Macromolecules**. v. 239. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124262>>. Acesso em: 13/11/2024.

FARHANA, I. A. A.; MAN, H. C.; HAMZAH, M. H.; JAMALI, N. S.; OMAR, R. Novel Pre-treatment for Lignocellulosic Biomass Delignification Using Alkaline-Assisted Ohmic Heating. **Pertanika Science & Technology**. 2023.v. 31. Disponível em: <<https://doi.org/10.47836/pjst.31.6.22>>. Acesso em: 08/05/2025.

FAO. Crops and Livestock Products, Statistics Division, Food and Agriculture. **Organization of the United Nations**. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/cc2211en>>. Acesso em: 07/02/2025.

GHAMARI, M.; SUVISH; SEE, H. C.; YU, H.; ANITHA, T.; BALAMURAGAN, T. V.; VELUSAMY, S.; HUGHES, D.; SUNDARAM, S. Nanocellulose Extraction from Biomass Waste: Unlocking Sustainable Pathways for Biomedical Applications. **The Chemical Record**. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/tcr.202400249>>. Acesso em: 29/04/2025.

HAKIM, R. H.; SADHUKHAN, J.; KUMAR, V.; MAITY, S. K.; GADKARI, S. A comparative techno-economic feasibility of hydrogen production from sugarcane bagasse and bread waste. **Fuel**. 2025. v. 388. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134469>>. Acesso em: 14/04/2025.

HANA, S. M. S; KARI, N. **Factors by Which Global Warming Worsens Allergic Disease**. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.anai.2023.08.610>>. Acesso em: 20/08/2024.

HUANG, X., DING, Y., LIAO, X., PENG, B., HE, Y., & MA, C. Microbial lipid production from enzymatic hydrolysate of corn stover pretreated by combining with biological pretreatment and alkalic salt soaking. **Industrial Crops and Products**. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.030>>. Acesso em: 05/05/2025.

HUANG, C.; JIANG, X.; SHEN, X.; HU, J.; TANG, W.; WU, X.; RAGASKAS, A.; JAMEEL, H.; MENG, X.; YONG, Q. **Lignin-Enzyme Interaction: A Roadblock for Efficient Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosics**. (2022). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111822>>. Acesso em: 20/08/2024.

HUANG, S.; DENG, C.; ZHANG, H.; YUE, X.; QIU, F.; ZHANG, T. Antibacterial cellulose-based membrane with heat dissipation and liquid transportation for food packaging applications. **Food and Bioproducts Processing**. 2025. v. 149. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.11.029>>. Acesso em: 02/02/2025.

- JARDIM, J.M; Hart, P.W; Lucia, L; Jameel, H. Insights into the potential of hardwood kraft lignin to be a green platform material for emergence of the biorefinery. **Polymers**. 2020. v.12. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym12081795>>. Acesso em: 04/12/2024.
- JĘDRZEJCZAK, P.; COLLINS, M. N.; JESIONOWSKI, T.; KLAPISZEWSKI, Ł. The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction – a comprehensive review. **Int. J. Biol. Macromol.** v.187. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.125>>. Acesso em: 29/11/2024.
- KHIEWSAWAI, N; RATTANAWONGWIBOON, T; UMMARTYOTIN, S. Cellulose fiber derived from sugarcane bagasse and polyethylene glycol/acrylic acid/ branched polyethylenimine-based hydrogel composite prepared by gamma irradiation: A platform for mercury (II) ions adsorption. **Environmental Advances**. 2024. v. 17. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100561>>. Acesso em: 02/02/2025.
- KORBERG, A. D.; THELLUFSEN, J. Z.; SKOV, I. R.; CHANG, M.; PAARDEKOOPEL, S.; LUND, H.; MATHIESSEN, B. V. On the Feasibility of Direct Hydrogen Utilisation in a Fossil-Free Europe. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2023. v.8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.170>>. Acesso em: 21/05/2025.
- LI, C.; ZHAO, X.; HUBBER, G. W.; ZHANG, T. Catalytic Transformation of Lignin for the Production of Chemicals and Fuels. **Chemical Reviews**. 2015. v.115. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.5b00155>>. Acesso em: 05/05/2025.
- LI, F.; ZHANG, Z.; WANG, X.; YIN, X.; FU, M. QIN, T.; JI, X.; YANG, G.; SUN, S. A physical crosslinked pH-sensitive hydrogel based on hemicellulose/graphene oxide for controlled oral drug delivery. **International Journal of Biological Macromolecules**. 2025. v.289. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138875>>. Acesso em: 20/01/2025.
- LIU, Q.; LUO, L.; ZHENG, L.; Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants. **Internacional Journal of Molecular Sciences**. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijms19020335>>. Acesso em: 21/05/2025.
- LIMA, M. Teste de Levene. **Blog Psicometria Online**. 2023. Disponível em: <<https://www.blog.psicometriaonline.com.br/teste-de-levene/>>. Acesso em: 30/04/2025.
- LIMA, M. O que é o teste de Shapiro-Wilk? **Blog Psicometria Online**. 2021. Disponível em: <<https://www.blog.psicometriaonline.com.br/o-que-e-o-teste-de-shapiro-wilk/>>. Acesso em: 30/04/2025.
- LV, Y.; ZHANG, Y.; XU, Y. Understanding and technological approach of acid hydrolysis processing for lignocellulose biorefinery: Panorama and perspectives. **Biomass and Bioenergy**. 2024. v183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107133>>. Acesso em: 02/05/2025.

MANISHA, Y.; SINGH, N.; ANNU; KHAN, S. A.; RAORANE, C. J.; SHIN, D. K. Recent Advances in Utilizing Lignocellulosic Biomass Materials as Adsorbents for Textile Dye Removal: A Comprehensive Review. **Polymers**. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym16172417>>. Acesso em: 20/05/2025.

MANRIQUE, A.; CLARKE, K.; BISESI, S.; AROSEMENA, F. A.; COKER, E. S.; ATTWOOD, T S. The Adverse Health Effects of Air Pollution from Sugarcane Burning: A Scoping Review of Observational and Experimental Evidence. **Environmental Health Perspectives**. 2025. v. 133. Disponível em: <<https://doi.org/10.1289/EHP14456>>. Acesso em: 07/02/2025.

MARTINS, J. R.; LLANOS, J. H. R.; BOTARO, V.; GONÇALVES, A. R.; BRIENZO, M. Hemicellulose Biomass Degree of Acetylation (Natural Versus Chemical Acetylation) as a Strategy for Based Packaging Materials. **BioEnergy Research**. 2024. v.17. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12155-024-10734-7>>. Acesso em: 22/01/2025.

MOHAMED, R. F.; AFIFI, A. A.; EL-LIETHY, M. A.; NASSAR, H. F. Nano-engineered magnesium-enriched sugarcane bagasse for dual decontamination of heavy metals and E. coli in sewage water. **Nano-Structures & NanoObjects**. 2025. v.42. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2025.101475>>. Acesso em: 10/04/2025.

MOREIRA, L. C.; JÚNIOR, S. P. E.; SILVA, C. F. F.; OLIVEIRA, H. C.; DANTAS, J. B. C.; REIS, J. V.; SCHRAMM, V.; SCHRAMM, E.; CARVALHO, M. Supply of bioelectricity from sugarcane bagasse in Brazil: a space–time analysis. **Sustainable Environment Research**. 2024. v. 34. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s42834-024-00223-z>>. Acesso em: 25/04/2025.

MORÁN-AGUILAR, M. G.; TRIGO, I. C.; AGUILAR-USCANGA, M. G.; PAZ, A.; DOMÍNGUEZ, J. M. Development of sustainable sugarcane bagasse biorefinery using a greener deep eutectic solvent from hemicellulose-derived acids. **Biomass and Bioenergy**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107256>>. Acesso em: 26/04/2025.

MUGALA, M.; SHATRI, Y.; NALAWADE, K.; KONDE, K.; PATIL, S. Patil Life cycle and economic assessment of sugarcane bagasse valorization to lactic acid. **Waste Manag**. 2021. v.126. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.052>>. Acesso em: 14/04/2025.

NGUYEN-THI, N. Y.; NGUYEN, C. Q.; DANG, Q. L.; TRAN, Q. D.; DO-THI, T. N.; THANH, L. H. V. Extracting Lignin from Sugarcane Bagasse for Methylene Blue and Hexavalent Chromium Adsorption in Textile Wastewater: a Facile, Green, and Sustainable Approach. **Royal Society of Chemistry**. v. 14. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/d3ra08007b>>. Acesso em: 09/11/2024.

OLIVEIRA, B. Como interpretar uma Análise de Variância (ANOVA)? **Blog Statplace**. 2019. Disponível em: <<https://statplace.com.br/blog/como-interpretar-analise-de-variancia-anova/>>. Acesso em: 30/04/2025.

- OLIVEIRA, B. Teste de Tukey para Comparações Múltiplas. **Blog Statplace**. 2019. Disponível em: <<https://statplace.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>>. Acesso em: 30/04/2025.
- OSMAN, A.I.; CHEN, L.; YANG, M.; MSIGWA, G.; FARGHALI, M.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; YAP, P S. Cost, Environmental Impact, and Resilience of Renewable Energy Under a Changing Climate: A Review. **Environ Chem Lett**. 2023. v.21. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>>. Acesso em: 20/08/2024.
- PRAVEEN, A.; MAJI, M. R.; SHUKLA, P. Unlocking Bioethanol Potential through Novel Combination: Rice Straw Transformation using Alkali Pre-treatment and Subsequent Cellulosic Treatment. **303 Environment and Ecology**. 2025. v. 43. Disponível em: <<https://doi.org/10.60151/envec/BIMF6696>>. Acesso em 06/05/2025.
- PENG, Q.; CHEN, Y.; FAN, G.; SONG, G.; CHENG, Q. Acetylation of wheat straw holocellulose for a biodegradable film. **Cellulose**. 2023. v.30. Disponível em: <[10.1007/s10570-023-05418-y](https://doi.org/10.1007/s10570-023-05418-y)>. Acesso em: 22/01/2025.
- QING, Q.; ZHOU, L.; GUO, Q.; HUANG, M. H. E.; Y. WANG, L. ZHANG, Y. A combined sodium phosphate and sodium sulphide pretreatment for enhanced enzymatic digestibility and delignification of corn stover. **Bioresource Technology**. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.063>>. Acesso em: 05/05/2025.
- QURAISHI, R.; SHABBIRAHMED, A. M.; JOEL, S.; COMEZ, A.; HALDAR, D. A review on the impact of choline chloride-based DES on sugarcane bagasse. **Chemical Engineering Communications**. 2025. v. 212. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00986445.2024.2444589>>. Acesso em: 14/04/2025.
- RAFID, M. H.; ALI, H. A. R. Air Pollution Resulted from Coal, Oil and Gas Firing in Thermal Power Plants and Treatment: A Review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 2022. Disponível em: <[10.1088/17551315/1002/1/012008](https://doi.org/10.1088/17551315/1002/1/012008)>. Acesso em: 20/08/2024.
- RITCHIE, H.; ROSADO, P. **Energy Mix**. 2024. **OUR WOLD IN DATA**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-mix?ref=hologchain-blog>>. Acesso em: 20/08/2024.
- ROUSHUI, M.; ZHANG, Y.; XU, X. Catalytic oxidation of biorefinery lignin to value-added chemicals to support sustainable biofuel production. **ChemSusChem**. v.8. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cssc.201402503>>. Acesso em: 29/11/2024.
- ROSSEI, L. M.; GALIO, J. M. R.; MATTOSO, L. H. C.; BUCKERIDGE, M. S.; LICENSE, P.; ALLEN, D. T. Ethanol from sugarcane and the Brazilian biomass-based energy and chemicals sector. **ACS Sustainable Chem Eng**. 2021. v. 9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01678>>. Acesso em: 07/02/2025.
- SANDHU, A. P. S.; RANDHAWA, G. S.; DHUGGA, K. S. Plant Cell Wall Matrix Polysaccharide Biosynthesis. **Molecular Plant**. 2009. v.5. Disponível em: <[doi:10.1093/mp/ssp056](https://doi.org/10.1093/mp/ssp056)>. Acesso em: 20/01/2025.

STEFFEN, F.; KORDSACHIA, T.; HEIZMAN, T.; ECKARDT, M. P.; CHEN, Y.; SAAKE, B. Sodium Carbonate Pulping of Wheat Straw—An Alternative Fiber Source for Various Paper Applications. **Agronomy**. 2024. v.14. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010162>>. Acesso em: 08/05/2025.

SONG, L.; YANG, Y.; LEI, T.; LI, Y.; SHEN, Y.; WANG, G.; YANG, M.; WANG, Y.; ZHENG, H. Regulation of biomass physicochemical properties for fuel quality improvement by pretreatment technology: A review. **Energy** **360**. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.100015>> Acesso em: 01/05/2025.

SOTO, F. E. A., SALDÍVAR, S. O. S. Architecture, Structure and Chemistry of Plant Cell Walls and Their Constituents. **Science and Technology of Fibers in Food Systems**. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38654-2_1>. Acesso em: 21/05/2025.

SEWSYNKER-SUKAI, Y. KANA, E. B. G. Optimization of a novel sequential alkalic and metal salt pretreatment for enhanced delignification and enzymatic saccharification of corn cobs. **Bioresource Technology**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.175>>. Acesso em: 05/05/2025.

SEWSYNKER-SUKAI, Y. SUINYUY, T. N. KANA, E. B. G. Development of a sequential alkalic salt and dilute acid pretreatment for enhanced sugar recovery from corn cobs. **Energy Conversion and Management**. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.024>>. Acesso em: 05/05/2025.

TANIS, M.H.; WALLBERG, O.; GALGE, M.; AL-RUDAINY, B. Extração de lignina usando fracionamento em duas etapas: uma revisão. **Moléculas**. 2024. v.29. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules29010098>>. Acesso em: 02/05/2025.

TOHAMY, H.A.S. Carboxymethyl hemicellulose hydrogel as a fluorescent biosensor for bacterial and fungal detection with DFT and molecular docking studies. **Scientific Reports**. 2025. v.15. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83157-1>>. Acesso em: 21/01/2025.

WANI, K. A.; RAHAYU, F.; FAUZIAH, L.; SUHARA, C. Advances in safe processing of sugarcane and bagasse for the generation of biofuels and bioactive compounds. **Journal of Agriculture and Food Research**. 2023. v12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100549>>. Acesso em: 10/04/2025.

WANG, Q.; JIANG, Y.; ZHANG, J.; YAN, Z.; WANG, Z.; PENG, W.; OUYANG, Q.; JIN, H.; TIAN, E. Lignocellulosic fibers in leaves and stems of Brassica juncea: Natural variation, functional differentiation and allocation mechanisms. **Industrial Crops and Products**. 2025. v.224. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120359>>. Acesso em: 20/01/2025.

WANG, Z.; WU, F.; WANG, R.; CAO, N.; WANG, Y.; WANG, X. The design of bidirectional selective hydrolases for lignin, cellulose and hemicellulose through in silico methods. **Industrial Crops & Products**. 2025. v.223. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120158>>. Acesso em: 20/01/2025.

WELTI-CHANES, J; SERNA-SOTO; SALDÍVAR, S. O; CAMPANELLA, O; TEJADAORTIGOZA, V. Science and Technology of Fibers in Food Systems. **Food Engineering Series**. (2020). v. 1. Disponível em: <doi:10.1007/978-3-030-38654-2>. Acesso em: 20/01/2025.

WORKU, L.A.; BACHHETI, R. K.; BACHHETI, A.; MILESSI, T. S.; CHANDEL, A. K. **Understanding the Biochemical Changes at Molecular Level During Biomass Pretreatment: A Comprehensive Analysis. Cellulose**. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10570-024-06081-7>>. Acesso em: 20/08/2024.

WOŹNIAK, A.; KULIGOWSKI, K.; ŚWIERCZEK, L.; CENIAN, A. Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production. **Sustainability**. 2025. v.17. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su17010287>>. Acesso em: 02/05/2025.

YAMAKAWA, C. K.; ROJAS, S. T.; HERRERA, W. E.; ROSSELL, C. E. V.; MARCIAL, M. R. W.; FILHO, R. M. Recovery and characterization of cellulosic ethanol from fermentation of sugarcane bagasse. **Chemical Engineering Research and Design**. 2023. v. 196. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.053>>. Acesso em: 02/02/2025.

YADAV, A.; RANI, P.; YADAV, D. K.; MITTAL, R.; GUPTA, A.; BISHNOI, N. R. Comparative study for enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse using free and nanoparticle immobilized holocellulolytic enzyme cocktail. **Waste Management Bulletin**. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.01.007>>. Acesso em: 20/05/2025.

ZHANG, K.; XU, R.; ABOMOHRA, A. E.; XIE, S.; YU, Z.; GUO, Q.; LIU, P.; PENG, L.; LI, X. A Sustainable Approach for Efficient Conversion of Lignin into Biodiesel Accompanied by Biological Pretreatment of Corn Straw. **Energy Conversion and Management**. v. 199, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111928>>. Acesso em: 09/11/2024.

ZHANG, Y.; HAO, D.; SUN, X.; ZHU, X.; YAN, B.; CHEN, G. Different pretreatment of biomass for gasification: A critical review. **Journal of the Energy Institute**. 2025. v.119. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.101992>>. Acesso em: 30/04/2025.

ZHU, R.; YANG, M.; YIN, J.; WU, Z.; LI, M.; ZHAO, L.; WANG, X.; REN, J. Mild sodium carbonate pretreatment of wheat straw for improving cellulose and xylan enzymatic hydrolysis. **Industrial Crops and Products**. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120728>>. Acesso em: 08/05/2025.