

AValiação de Multiciclos de Explosão a Vapor no Enriquecimento no Teor de Celulose

Crisleine Perinazzo Draszewski¹, Francisco Dalcin Vezaro¹, Daniel da Rosa Taschetto¹, Flávio Dias Mayer¹, Fernanda de Castilhos¹

*¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
(cris.draszewski@ufsm.br)*

Resumo: Este trabalho avaliou o efeito de múltiplos ciclos de explosão a vapor (180 °C, 5 MPa, 5 ou 15 min) no enriquecimento de celulose da casca de arroz. Após três ciclos de 5 min, o teor de celulose passou de 38,25% para 62,34% (+63%), com remoção de 95% da hemicelulose e 17% da lignina. O índice de cristalinidade aumentou de 51,18% para até 71,12%. Ciclos curtos e sequenciais preservaram mais celulose que um tratamento contínuo prolongado, evidenciando o potencial do processo para biorrefinarias.

Palavras-chave: Explosão a vapor; Casca de arroz; Celulose; Cristalinidade; Pré-tratamento

INTRODUÇÃO

A produção mundial de arroz atingiu aproximadamente 541 milhões de toneladas na safra 2025/2026, sendo a casca responsável por cerca de 23% da massa do grão, ou seja, para cada quilograma de arroz beneficiado geram-se aproximadamente 230 g de casca, o que resulta em mais de 124 milhões de toneladas desse resíduo produzidas anualmente no mundo. No Brasil, a safra 2025/2026, de 11,1 milhões de toneladas de arroz, gerou cerca de 2,5 milhões de toneladas de casca de arroz, tendo o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Tocantins como os principais estados produtores (IBGE, 2026).

Atualmente, grande parte dessa casca é descartada ou queimada para geração de energia em termoeletricas, prática que, apesar de útil, libera gases poluentes (como CO₂ e material particulado) e subaproveita o potencial químico da biomassa. Aplicações alternativas, como incorporação em ração animal, produção de silício metálico e materiais de construção (tijolos e cimento), já foram exploradas, mas normalmente não aproveitam de forma eficiente a fração de açúcares presente na biomassa (Nzereogu et al., 2023).

A recalcitrância estrutural da casca de arroz, decorrente da cristalinidade da celulose e de sua associação com lignina e hemicelulose, dificulta sua conversão biológica, química ou termoquímica direta. Assim, o emprego de etapas de pré-tratamento eficientes é essencial para romper essa barreira estrutural e aumentar a acessibilidade dos polissacarídeos (Chavan et al., 2024). Nesse contexto, a explosão a vapor (EV) desponta como técnica promissora, combinando elevada temperatura (160–240 °C) e pressão (0,7–4,8 MPa) com

descompressão rápida, o que desorganiza a matriz lignocelulósica utilizando menos reagentes químicos que os métodos convencionais (Cavalaglio et al., 2021).

Diferentes estratégias de pré-tratamento vêm sendo estudadas para superar a recalcitrância lignocelulósica, incluindo métodos físicos (moagem, irradiação), químicos (hidrólise ácida ou alcalina, uso de solventes eutéticos) e biológicos (fungos e enzimas ligninolíticas), cada um com vantagens e limitações específicas quanto a custo, geração de inibidores e demanda energética. A explosão a vapor se destaca nesse cenário por dispensar a adição de catalisadores químicos em sua forma convencional, reduzir a geração de efluentes e ser compatível com escalonamento industrial utilizando equipamentos e conexões já consolidados no setor (de Azevedo et al., 2024).

Em uma perspectiva de biorrefinaria integrada, a etapa de explosão a vapor pode anteceder processos de hidrólise (enzimática ou com água subcrítica) para a produção de açúcares fermentescíveis, sendo executada na mesma unidade multipropósito e em sequência, o que otimiza tempo de processo e espaço físico. Nesse contexto, compreender como diferentes combinações de ciclos e tempos de reação afetam especificamente o enriquecimento de celulose e não apenas o rendimento global de açúcares é fundamental para o desenho de rotas de valorização de resíduos agroindustriais.

Dentre os métodos físico-químicos de pré-tratamento, a EV se destaca por combinar autohidrólise térmica e descompressão instantânea, promovendo a solubilização da hemicelulose e a redistribuição da lignina, o que expõe a fração

celulósica e melhora sua acessibilidade para etapas hidrolíticas subsequentes. Embora a EV em ciclo único já seja amplamente estudada para diferentes biomassas, ainda há poucos estudos que avaliem sistematicamente o efeito de múltiplos ciclos sucessivos de explosão a vapor sobre o enriquecimento do teor de celulose da casca de arroz, especialmente considerando o compromisso entre o número de ciclos e o tempo de reação empregado em cada etapa (Cavalaglio et al., 2021).

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de 1, 2 e 3 ciclos sucessivos de explosão a vapor, em dois tempos de reação (5 e 15 min), sobre a composição lignocelulósica, o rendimento de sólido remanescente e o índice de cristalinidade da casca de arroz, identificando a condição mais adequada para o enriquecimento de celulose visando à sua aplicação em biorrefinarias.

MATERIAL E MÉTODOS

A casca de arroz utilizada como matéria-prima foi gentilmente cedida por uma agroindústria localizada na região Centro-Oeste do Rio Grande do Sul, sem separação granulométrica prévia, sendo armazenada sob refrigeração ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) até o início dos ensaios.

A caracterização físico-química da casca de arroz *in natura* seguiu os procedimentos analíticos padronizados pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2020), contemplando a determinação de umidade (NREL/TP-510-42620), extrativos (NREL/TP-510-42619), cinzas (NREL/TP-510-42622) e composição lignocelulósica, celulose, hemicelulose e lignina (NREL/TP-510-42618), todas em duplicata (NREL, 2020). A matéria-prima apresentou, em base seca, $38,25 \pm 1,73\%$ de celulose, $12,74 \pm 0,12\%$ de hemicelulose e $30,68 \pm 0,35\%$ de lignina.

O pré-tratamento por explosão a vapor (EV) foi conduzido em unidade experimental multipropósito (Figura 1) composta por reservatório de água, bomba de alta pressão, válvula de retenção, manômetro, pré-aquecedor tubular de aço inoxidável (10 m, 1/8"), reator encamisado de 45 mL equipado com dois filtros sinterizados (40 μm , 21 mm de diâmetro) para retenção dos sólidos após a descompressão, banho de gelo para resfriamento rápido do efluente líquido, válvula de controle de fluxo e frasco coletor. O equipamento foi construído com componentes industriais padronizados (conexões Swagelok e controladores Eurotherm), o que facilita seu escalonamento para volumes industriais preservando o controle preciso de temperatura e pressão observado em escala de bancada.

O rendimento de sólido remanescente (Y_s) após cada condição de explosão a vapor foi calculado pela razão percentual entre a massa seca do sólido

recuperado após o tratamento (m_{solix} , em g) e a massa seca de casca de arroz inicialmente carregada no reator (m_{rh} , em g), conforme a Equação 1: $Y_s (\%) = (m_{\text{solix}} / m_{\text{rh}}) \times 100$. Esse indicador permite avaliar, em conjunto com a composição lignocelulósica, a extensão da solubilização de material da fase sólida para o licor de explosão em cada condição testada.

Figura 2. Unidade multipropósito.



Fonte: a autora.

Para cada ensaio, o reator foi carregado com 10 g de casca de arroz e conectado à unidade multipropósito. A bomba foi acionada (20 mL/min) até o completo preenchimento da tubulação; o pré-aquecedor foi ajustado para $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a camisa do reator para $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ao registrar-se $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ no sensor em contato com o leito, a válvula de controle de fluxo foi fechada para pressurizar o sistema a 5 MPa, e a bomba foi desligada, iniciando-se a contagem do tempo de reação (5 ou 15 min). Decorrido esse tempo, a válvula foi aberta abruptamente, promovendo a vaporização instantânea do líquido e a descompressão explosiva da biomassa através da tubulação até o frasco coletor. Para as condições multiciclo, após a coleta do caldo, a bomba foi reativada por 3 min para limpeza da linha, e o sistema foi repressurizado (5 MPa, $180\text{ }^{\circ}\text{C}$) pelo mesmo tempo de reação, repetindo-se o procedimento por 1, 2 ou 3 ciclos sucessivos. Após cada explosão, os sólidos pré-tratados foram lavados e filtrados com 500 mL de água destilada para remoção de açúcares livres antes da caracterização.

Os sólidos *in natura* e pré-tratados foram caracterizados quanto aos teores de celulose, hemicelulose e lignina pelo mesmo protocolo NREL descrito anteriormente. A cristalinidade das amostras foi avaliada por difração de raios X (Rigaku Miniflex® 300, radiação $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,54051\text{ \AA}$, 30 kV, 10 mA, 2θ de 5° a 100°), calculando-se o índice de cristalinidade (CrI) pelo método de Segal et al. (1959): $\text{CrI} (\%) = [(I_{202} - I_{\text{am}}) / I_{202}] \times 100$, em que I_{202} corresponde à intensidade do pico em $2\theta \approx 22^{\circ}$

(celulose cristalina) e I_{am} à intensidade na região amorfa em $2\theta \approx 18^\circ$ (hemicelulose, lignina e celulose amorfa).

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão de ensaios em duplicata e submetidos à análise de variância (ANOVA one-way) seguida do teste de Tukey (intervalo de confiança de 95%, $p \leq 0,05$), utilizando o software STATISTICA (v. 13.0, StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os tratamentos de explosão a vapor (EV) aumentaram significativamente ($p < 0,05$) o teor de celulose em relação à casca de arroz *in natura* (Tabela 1), demonstrando efetividade consistente no enriquecimento do polissacarídeo, embora a magnitude desse aumento tenha variado conforme o tempo de reação e o número de ciclos aplicados. Essa melhora generalizada indica solubilização da hemicelulose e/ou redistribuição da lignina em todas as condições testadas, sendo as variações específicas de remoção de hemicelulose e lignina responsáveis pelas diferenças observadas no enriquecimento final de celulose.

Tabela 1. Composição lignocelulósica e rendimento de sólido da casca de arroz *in natura* e pré-tratada por explosão a vapor.

Condição	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Sólido (%)
In natura	38,25	12,74	30,68	—
1 ciclo $\times$ 5 min	56,27	1,36	29,41	66,74
2 ciclos $\times$ 5 min	57,61	1,78	28,43	67,30
3 ciclos $\times$ 5 min	62,34	0,68	25,47	64,54
1 ciclo $\times$ 15 min	51,32	1,38	25,14	50,98
2 ciclos $\times$ 15 min	49,64	0,84	24,05	50,74
3 ciclos $\times$ 15 min	44,62	0,64	23,98	49,30

A condição de 3 ciclos de 5 min apresentou o melhor resultado, elevando o teor de celulose de 38,25% para 62,34% (aumento líquido de 63%), com remoção de 95% da hemicelulose (0,68% remanescente) e de 17% da lignina (25,47%), acompanhada de um rendimento de sólido remanescente de 64,54%. Já o tempo de reação prolongado (15 min) resultou em enriquecimento de celulose 28% inferior ao da condição ótima, revelando um compromisso crítico do processo: embora o contato mais longo com o vapor favoreça a solubilização da hemicelulose e a redistribuição da lignina, ele também promove degradação parcial da

celulose por despolimerização hidrotérmica (Zhu et al., 2022). Esse padrão está de acordo com o observado em outras biomassas, folhas de abacaxi submetidas a múltiplos ciclos (215 °C, 2 MPa, 5 min) apresentaram redução de 11% no teor de celulose por ciclo adicional (Tanpichai et al., 2019), enquanto fibras de casca de soja mostraram queda de 4% no enriquecimento de celulose com incrementos de apenas 1 min de exposição a 1,8 MPa (Zhu et al., 2022).

A comparação entre o tratamento sequencial (3 $\times$ 5 min) e o contínuo (15 min) revelou respostas distintas para cada componente: enquanto a remoção de hemicelulose ($95,2 \pm 0,8\%$) e de lignina ($22,4 \pm 1,1\%$) foi estatisticamente equivalente entre as duas estratégias ($p > 0,05$), o processamento sequencial preservou 15% a mais de celulose. Essa divergência demonstra que a despolimerização da celulose depende principalmente da exposição térmica contínua, ao passo que a remoção de hemicelulose e lignina segue uma cinética de severidade cumulativa. A superioridade do pré-tratamento pulsado (3 $\times$ 5 min) evidencia-se tanto pelo maior rendimento de sólido (64,54%, contra aproximadamente 50% no tratamento contínuo) quanto pela maior preservação de celulose, resultado de uma solubilização de hemicelulose facilitada pela ciclagem de pressão, de uma degradação mínima da celulose por conta do contato intermitente com o vapor e da manutenção da eficiência de deslignificação (Hoang et al., 2023). Tendência semelhante foi observada por (Tupciauskas et al., 2021), cuja palha de cânhamo apresentou variação de +4% a -4% no teor de celulose conforme a condição (200–220 °C, 3 min), enquanto o pré-tratamento prolongado (175 °C, 60 min) de palha de trigo causou perda de 31% de celulose apesar de remover 35% da hemicelulose (Zheng et al., 2018). O padrão consistente entre diferentes biomassas confirma que o pré-tratamento ideal deve equilibrar a intensidade de fracionamento com a conservação de carboidratos, favorecendo estratégias pulsadas em detrimento da exposição contínua.

Quanto ao rendimento de sólido, as explosões de 1 e 2 ciclos de 5 min mantiveram valores estatisticamente semelhantes ($\approx 67\%$ da biomassa inicial), indicando fracionamento estável; já 3 ciclos sucessivos de 5 min reduziram o rendimento para 64,54%, sinalizando maior solubilização de componentes estruturais. Por sua vez, os tratamentos contínuos de 15 min resultaram em rendimentos substancialmente menores ($\approx 50\%$), correlacionando diretamente a exposição prolongada ao vapor com a degradação acelerada da biomassa. Esses resultados confirmam que ciclos curtos e sucessivos preservam melhor os sólidos ricos em celulose para etapas posteriores de hidrólise, enquanto tratamentos

contínuos e prolongados favorecem a despolimerização excessiva da celulose.

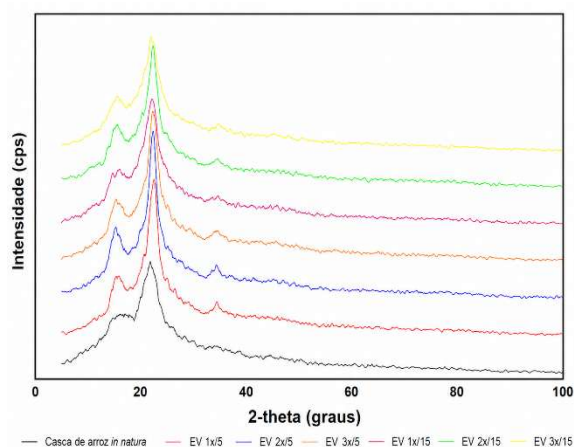
O índice de cristalinidade (CrI) da casca de arroz in natura foi de 51,18% (Tabela 2).

Tabela 2. Índice de cristalinidade (CrI) da casca de arroz in natura e pré-tratada por explosão a vapor.

Condição	CrI (%)
<i>In natura</i>	51,18
1 ciclo × 5 min	70,42
2 ciclos × 5 min	71,12
3 ciclos × 5 min	66,67
1 ciclo × 15 min	64,77
2 ciclos × 15 min	66,82
3 ciclos × 15 min	61,71

Os difratogramas de todas as amostras (Figura 2) apresentaram um pico largo em 15°, atribuído à sílica (SiO₂), e um pico distinto em 22°, referente à celulose cristalina, utilizado como base para o cálculo do CrI. Na série de 5 min, o CrI aumentou para 70,42% após um ciclo, atingindo 71,12% após dois ciclos consecutivos; entretanto, essa tendência se inverteu com um terceiro ciclo, reduzindo o CrI para 66,67%. A série de 15 min seguiu padrão semelhante, porém com valores absolutos inferiores: 64,77% após um ciclo, 66,82% após dois ciclos e 61,71% após três ciclos. Essas observações estão alinhadas com a literatura, que associa tempos de reação prolongados à degradação da estrutura da celulose e à consequente redução da cristalinidade (Chen et al., 2011)

Figura 2. Difratogramas (DRX) para a casca de arroz *in natura*, e para as submetidas a EV em diferentes ciclos (1, 2 ou 3) por 5 ou 15 min.



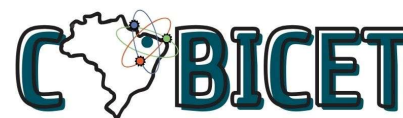
Fonte: a autora.

As tendências de cristalinidade acompanham as variações composicionais da Tabela 1: os tratamentos de 5 min proporcionaram maior enriquecimento de celulose que seus equivalentes de 15 min, sugerindo que a EV atua preferencialmente sobre os componentes amorfos da biomassa (hemicelulose e lignina), preservando a fração cristalina da celulose. Esse mecanismo de remoção seletiva explica o aumento do CrI e sugere maior estabilidade térmica e acessibilidade enzimática do material processado (Nasir et al., 2020). Resultados semelhantes já foram relatados para outras biomassas lignocelulósicas: fibras de folha de abacaxi tiveram o CrI elevado de 82,2% (fibra nativa) para 86,7% após um único ciclo de explosão a vapor, alcançando aproximadamente 87,8% após cinco ciclos (Tanpichai et al., 2019). O aumento de cristalinidade observado em diferentes tipos de biomassa confirma que a explosão a vapor atua predominantemente sobre os componentes amorfos da matriz, concentrando relativamente a fração cristalina da celulose.

Do ponto de vista de processo, o enriquecimento de celulose obtido pela explosão a vapor multiciclo tem implicações diretas sobre etapas subsequentes de valorização da biomassa: sólidos com maior teor relativo de celulose e menor teor de hemicelulose e lignina tendem a apresentar maior acessibilidade para enzimas celulolíticas e maior eficiência em processos hidrolíticos, reduzindo a carga enzimática necessária para a produção de açúcares fermentescíveis. Além disso, o menor rendimento de sólido observado nos tratamentos contínuos de 15 min, associado à perda de celulose, indica que o ganho aparente de tempo de processo em um único ciclo prolongado não compensa a perda de substrato aproveitável, reforçando a preferência por esquemas de múltiplos ciclos curtos também do ponto de vista de rendimento global do processo.

Outro aspecto relevante é o elevado teor de cinzas (essencialmente sílica) característico da casca de arroz, responsável pelo pico de difração em 15° observado em todos os difratogramas. Como a explosão a vapor atua predominantemente sobre as frações orgânicas amorfas da biomassa, a fração inorgânica tende a se concentrar relativamente nos sólidos pré-tratados, o que deve ser considerado no balanço de massa de processos subsequentes e pode, inclusive, representar uma oportunidade de coprodução de sílica de origem biogênica a partir do mesmo resíduo, agregando valor adicional à rota de valorização da casca de arroz proposta neste trabalho.

A redução do CrI após ciclos ou tempos de reação excessivos sugere a existência de uma janela ótima de processamento para o enriquecimento de cristalinidade, decorrente de mecanismos concorrentes: a remoção inicial de componentes amorfos aumenta a cristalinidade relativa, enquanto o



processamento prolongado ou repetido em excesso passa a degradar a própria estrutura cristalina da celulose (Draszewski et al., 2025). De modo geral, os resultados mostram que ciclos múltiplos e curtos de explosão a vapor constituem uma estratégia eficiente para o enriquecimento de celulose da casca de arroz, sendo capazes de proporcionar até 38% de maior acessibilidade da celulose em comparação a abordagens de ciclo único, o que reforça o potencial do processo como etapa de pré-tratamento em biorrefinarias de resíduos agroindustriais de elevado teor de cinzas, como a casca de arroz.

CONCLUSÃO

A explosão a vapor multiciclo mostrou-se uma estratégia eficaz para o enriquecimento de celulose da casca de arroz. A condição de 3 ciclos de 5 min proporcionou o melhor desempenho, elevando o teor de celulose de 38,25% para 62,34% (+63%), com remoção de 95% da hemicelulose e de 17% da lignina, além de aumentar em até 38% a acessibilidade da celulose em relação a abordagens de ciclo único.

O índice de cristalinidade acompanhou essa tendência, aumentando de 51,18% (in natura) para até 71,12% nas condições intermediárias, confirmando a remoção preferencial das regiões amorfas da biomassa. Ciclos curtos e sucessivos preservaram mais celulose do que um único tratamento contínuo e prolongado, o que evidencia o potencial da explosão a vapor multiciclo como etapa de pré-tratamento para biorrefinarias baseadas em resíduos agroindustriais de elevado teor de cinzas, como a casca de arroz.

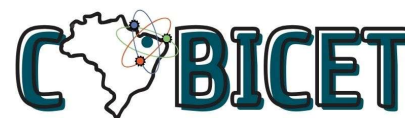
Esses resultados reforçam que a etapa de explosão a vapor deve ser cuidadosamente otimizada quanto ao número de ciclos e ao tempo de reação, uma vez que tratamentos excessivamente longos comprometem a própria celulose que se deseja enriquecer. A condição de 3 ciclos de 5 min mostrou-se a mais vantajosa entre as testadas, sendo recomendada como etapa de pré-tratamento para processos subsequentes de hidrólise voltados à produção de açúcares fermentescíveis a partir da casca de arroz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos (PRH) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Cavalaglio, G., Gelosia, M., Giannoni, T., Barros Lovate Temporim, R., Nicolini, A., Cotana, F., Bertini, A., 2021. Acid-catalyzed steam explosion for high enzymatic saccharification and low inhibitor release from lignocellulosic cardoon stalks. *Biochem. Eng. J.* 174, 108121. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108121>
- Chavan, S., Mitra, D., Ray, A., 2024. Harnessing rice husks: Bioethanol production for sustainable future. *Curr. Res. Microb. Sci.* 7, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100298>
- Chen, X., Yu, J., Zhang, Z., Lu, C., 2011. Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw. *Carbohydr. Polym.* 85, 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.02.022>
- de Azevedo, A.R., dos Santos, M.S.N., Wancura, J.H.C., Oro, C.E.D., Pfeifernberg, R., Zabot, G.L., Tres, M. V., 2024. Semi-continuous subcritical hydrolysis of orange waste biomasses for integrated production of fermentable sugars and platform chemicals. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 197, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109719>
- Draszewski, C.P., Witter, B.C., Assini, P.A., Mayer, F.D., Abaide, E.R., de Castilhos, F., 2025. Subcritical water hydrolysis of soybean hulls pretreated by steam explosion: High pressure integrated process strategy. *J. Supercrit. Fluids* 216, 106448. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2024.106448>
- Hoang, A.T., Nguyen, X.P., Duong, X.Q., Ağbulut, Ü., Len, C., Nguyen, P.Q.P., Kchaou, M., Chen, W.-H., 2023. Steam explosion as sustainable biomass pretreatment technique for biofuel production: Characteristics and challenges. *Bioresour. Technol.* 385, 129398. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129398>
- IBGE, I.B. de G. e E., 2026. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola- maio 2026. [WWW Document]. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7832>.
- Nasir, A., Chen, H.Z., Wang, L., 2020. Novel Single-step Pretreatment of Steam Explosion and Choline Chloride to De-lignify Corn Stover for Enhancing Enzymatic Edibility. *Process Biochemistry* 94, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.04.036>
- NREL, 2020. National Renewable Energy Laboratory [WWW Document]. URL <https://www.nrel.gov/bioenergy/biomass-compositional-analysis.html>
- Nzereogu, P.U., Omah, A.D., Ezema, F.I., Iwuoha, E.I., Nwanya, A.C., 2023. Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and



- applications. Hybrid Advances 4, 100111.
<https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- Tanpichai, S., Witayakran, S., Boonmahitthisud, A.,
2019. Study on structural and thermal
properties of cellulose microfibrils isolated
from pineapple leaves using steam explosion. J.
Environ. Chem. Eng. 7, 102836.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102836>
- Tupciauskas, R., Rizhikovs, J., Brazdauskas, P.,
Fridrihsone, V., Andzs, M., 2021. Influence of
steam explosion pre-treatment conditions on
binder-less boards from hemp shives and wheat
straw. Ind. Crops Prod. 170, 113717.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113717>
- Zheng, Q., Zhou, T., Wang, Y., Cao, X., Wu, S.,
Zhao, M., Wang, H., Xu, M., Zheng, B.,
Zheng, J., Guan, X., 2018. Pretreatment of
wheat straw leads to structural changes and
improved enzymatic hydrolysis. Sci. Rep. 8,
1321. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19517-5>
- Zhu, L., Yu, B., Chen, H., Yu, J., Yan, H., Luo, Y.,
He, J., Huang, Z., Zheng, P., Mao, X., Luo, J.,
Chen, D., 2022. Comparisons of the
micronization, steam explosion, and gamma
irradiation treatment on chemical composition,
structure, physicochemical properties, and in
vitro digestibility of dietary fiber from soybean
hulls. Food Chem. 366, 130618.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130618>