

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AÇÚCARES FERMENTESCÍVEIS ATRAVÉS DA HIDRÓLISE COM ÁGUA SUBCRÍTICA DA PALHA DE ARROZ

Daniel da Rosa Taschetto¹, Michel Brondani¹, Flávio Dias Mayer¹

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
(daniel.taschetto@acad.ufsm.br)

Resumo: Este trabalho avaliou a hidrólise com água subcrítica da palha de arroz para obtenção de açúcares fermentescíveis. Foram avaliadas as temperaturas de 230 e 260°C, mantendo pressão de 15 MPa, razão água:palha de arroz de 20:1 e tempo de reação de 30 min, com experimentos realizados em duplicata. A 230°C obteve-se 3,78 g de açúcares/100 g de biomassa, enquanto a 260°C houve redução de 7,4% nos açúcares e aumento de 50,4% nas plataformas químicas, indicando maior seletividade para açúcares a 230°C.

Palavras-chave: Palha de arroz; Hidrólise com água subcrítica; Açúcares fermentescíveis; Plataformas químicas.

INTRODUÇÃO

A produção mundial de arroz tem atingido produção anual entre 590-780 milhões de toneladas, gerando entre 700 e 900 milhões de toneladas de resíduos de palha de arroz (Sattlewal et al., 2018; Zaky et al., 2020). A palha de arroz é uma biomassa lignocelulósica abundante e de baixo custo. Estima-se que são gerados, aproximadamente, 1,0 a 1,5 kg de palha por kg de grão de arroz, dependendo do cultivar, das condições de cultivo e do sistema de colheita (Harun et al., 2022; Sharma et al., 2020), o que torna esse resíduo uma das biomassas lignocelulósicas agrícolas mais disponíveis no mundo.

No Brasil, cuja produção anual de arroz situa-se entre 10 e 12 milhões de toneladas, estima-se a geração de aproximadamente 10 a 15 milhões de toneladas de palha, concentradas principalmente na região Sul.

Embora parte desse resíduo seja incorporada ao solo para reciclagem de nutrientes, uma fração significativa ainda é deixada no campo ou queimada, ocasionando emissões de gases de efeito estufa e perda de matéria orgânica, ou seja, sendo subutilizado. Entretanto, a palha de arroz apresenta elevado potencial de valorização, podendo ser utilizada para produção de bioetanol, biogás, bio-óleo, hidrogênio, biochar, materiais adsorventes e insumos para biorrefinarias. Dessa forma, o aproveitamento sustentável desse resíduo contribui simultaneamente para a economia circular, redução dos impactos ambientais e diversificação da matriz energética renovável (Zaky et al., 2020; Behera et al., 2023).

A hidrólise com água subcrítica é um processo hidrotérmico que utiliza água líquida em temperaturas entre 100°C e 374°C, sob pressão suficiente para

mantê-la no estado líquido (geralmente 10-25 MPa), promovendo a hidrólise da biomassa sem a necessidade de catalisadores químicos. Nessas condições, a água apresenta redução da constante dielétrica e aumento do produto iônico, comportando-se simultaneamente como solvente e catalisador das reações de despolimerização da celulose e da hemicelulose (Möller et al., 2011; Cocero et al., 2018).

A hidrólise com água subcrítica baseia-se principalmente na alteração das propriedades da água em elevadas temperaturas e pressões. À medida que a temperatura aumenta, ocorre redução da constante dielétrica da água, tornando-a capaz de solubilizar compostos menos polares, enquanto o aumento do produto iônico favorece reações de hidrólise por meio da formação de íons H^+ e OH^- (Möller et al., 2011; Cocero et al., 2018). Essas alterações promovem a ruptura das ligações glicosídicas presentes nos polissacarídeos da biomassa, principalmente hemicelulose e, em condições mais severas, também da celulose, produzindo oligossacarídeos, monossacarídeos e outros compostos de interesse (Prado et al., 2016; Pattnaik et al., 2023). Entretanto, a seleção adequada das condições operacionais, como temperatura, pressão e tempo de residência, é essencial para maximizar o rendimento dos produtos desejados e minimizar a formação de compostos de degradação, denominados plataformas químicas, como furfural, 5-hidroximetilfurfural (HMF) e materiais carbonáceos (char), que podem reduzir a eficiência global do processo (Cocero et al., 2018; Dos Santos et al., 2020; Pattnaik et al., 2023).

Em comparação com os processos convencionais de hidrólise ácida ou enzimática, a tecnologia apresenta menor consumo de reagentes químicos, reduzida

geração de efluentes e tempos de reação significativamente menores, além de possibilitar a recuperação de açúcares fermentescíveis e compostos de alto valor agregado. Essas características tornam a hidrólise com água subcrítica uma alternativa promissora à hidrólise básica e ácida (Möller et al., 2011; Prado et al., 2016; Prado et al., 2017).

Por essas vantagens, a hidrólise com água subcrítica tem sido amplamente investigada como uma etapa de pré-tratamento e fracionamento de biomassas lignocelulósicas para a produção de precursores, biocombustíveis e bioprodutos em biorrefinarias sustentáveis (Möller et al., 2011; Sarker et al., 2021; Ruiz et al., 2016).

Estudos realizados demonstram a aplicação da tecnologia de hidrólise com água subcrítica em diferentes biomassas, como cascas de noz-pecã, casca de arroz, casca de soja, palha de soja, bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, entre outros, evidenciando elevados rendimentos de açúcares redutores e significativa modificação estrutural da biomassa após o tratamento hidrotérmico, aspectos fundamentais para aplicações em processos de produção de biocombustíveis e biorrefinarias (Dos Santos et al., 2020).

Tendo em vista a necessidade da obtenção de produtos de valor agregado oriundos de processos ambientalmente amigáveis e utilizando como matéria-prima resíduos descartados ou subutilizados, este estudo avaliou o uso da palha de arroz para produção de açúcares fermentescíveis utilizando o processo de hidrólise com água subcrítica, como alternativa para produção de precursores (açúcares fermentescíveis) para produção de biocombustíveis como o etanol.

MATERIAL E MÉTODOS

A palha de arroz utilizada foi obtida de lavouras localizadas na região central do estado do Rio Grande do Sul. O resíduo foi caracterizado seguindo a metodologia padronizada do National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-510-42620 (umidade), NREL/TP-510-42622 (cinzas), NREL/TP-510-42619 (extrativos) e NREL/TP-510-42618 (hemicelulose, celulose e lignina)). A análise por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para a caracterização química da palha de arroz, a fim de identificar qualitativamente os principais grupos funcionais presentes na biomassa associados à celulose, hemicelulose e lignina, além de confirmar a presença de grupos hidroxila, carbonila, metoxila, éteres e ligações aromáticas.

Para o experimento de hidrólise com água subcrítica, a palha de arroz foi previamente seca, moída e peneirada, utilizando as frações de granulometria entre 16 e 32 mesh (Tyler). A massa de palha de arroz

utilizada foi de 11,25 g, os quais foram acondicionados no interior do reator, formando um leito fixo para a passagem da água subcrítica. Os experimentos de hidrólise com água subcrítica foram realizados utilizando uma unidade de processamento multipropósito presente no Laboratório de Biomassa e Biocombustíveis (L2B) da Universidade Federal de Santa Maria, que opera em regime semi-contínuo (Figura 1), de modo que a biomassa fica acondicionada dentro do reator e a água passa através deste de maneira contínua, caracterizando um processo semi-contínuo.

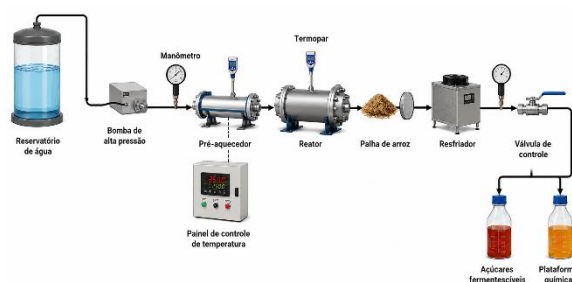


Figura 1. Esquema do processo de hidrólise com água subcrítica.

O funcionamento da unidade baseia-se no bombeamento contínuo de água pressurizada para o interior do sistema, onde é aquecida até atingir condições subcríticas. Em seguida, a água atravessa o leito contendo a biomassa, promovendo a hidrólise dos componentes lignocelulósicos. Após o tempo de contato no reator, a corrente é resfriada e coletada para posteriores análises.

Os experimentos foram conduzidos em duas temperaturas de operação, 230°C e 260°C, mantendo constante a razão água:palha de arroz em 20:1, em massa. A pressão foi mantida constante em 15 MPa, garantindo que a água permanecesse no estado líquido durante todo o processo de hidrólise. O tempo de reação foi de 30 minutos.

Ao término de cada ensaio, o hidrolisado foi coletado e armazenado para posterior caracterização. As amostras hidrolisadas foram congeladas a -5°C até serem analisadas por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) para caracterização quanto ao teor de açúcares fermentescíveis (celobiose, glicose, xilose e arabinose) e plataformas químicas como ácidos orgânicos (ácido acético, ácido fórmico e ácido levulínico) e inibidores (furfural e 5 hidroximetilfurfural-HMF). Os açúcares fermentescíveis e os ácidos orgânicos foram determinados utilizando HPLC (Prominence UFLCXR, Shimadzu, Quioto, Kansai, Japão) com coluna cromatográfica Aminex HPX-87H (300 mm × 7,7 mm) (Agilent, Santa Clara, CA, EUA) e detector

de índice de refração (RID, Shimadzu, Quioto, Kansai, Japão). As concentrações dos inibidores foram determinadas utilizando uma coluna cromatográfica Shim-pack CLC-ODS(M) C18 (Shimadzu, Quioto, Kansai, Japão) e um detector de arranjo de fotodiodos (SPD-M20-A, Shimadzu, Japão).

A razão água:palha de arroz (R) foi calculada pela Equação (1).

$$R = \frac{V \cdot t}{m} \quad (1)$$

Onde t é o tempo (min), V é a vazão volumétrica (mL/min) e m é a massa de palha de arroz (g).

O rendimento (η) de açúcares e plataformas químicas, em gramas / 100 g de palha de arroz, foi calculado pela Equação (2).

$$\eta = \frac{m_p}{m} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde m_p é a massa do produto (açúcar fermentescível ou plataforma química) (g).

Os experimentos foram realizados em duplicata, visando assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da palha de arroz

A Tabela 1 apresenta a composição da palha de arroz in natura obtida neste estudo. Apesar da composição química de biomassas lignocelulósicas variar com a espécie vegetal, clima, solo, parte da planta (caule, folhas, casca, etc) e método analítico empregado, é possível considerar como um padrão médio valores entre 5-15% (umidade), 1-10% (cinzas), 30-50% (celulose), 15-30% (hemicelulose), 10-30% (lignina) e 2-15% (extrativos) (Saini et al., 2015; Isikgor et al., 2015; Kucharska et al., 2018; Reza et al., 2018).

A palha de arroz apresentou elevados teores de hemicelulose e celulose, polímeros que podem ser hidrolisados em açúcares fermentescíveis, principalmente xilose e glicose, respectivamente. Esses monossacarídeos constituem importantes plataformas para a produção de biocombustíveis, como o etanol, e de diversos produtos químicos de interesse industrial. Além disso, o baixo teor de cinzas indica uma elevada fração orgânica da biomassa, favorecendo seu aproveitamento em processos de conversão termoquímica e bioquímica.

Tabela 1. Caracterização da palha de arroz.

Análise	Palha de arroz
Umidade (base úmida)	$6,07 \pm 0,16$
Celulose	$42,36 \pm 3,20$
Hemicelulose	$23,83 \pm 1,59$
Lignina	$11,21 \pm 1,92$
Extrativos	$16,12 \pm 1,41$
Cinzas	$8,43 \pm 0,10$

A Figura 2 apresenta o espectro de FTIR da palha de arroz in natura. O FTIR evidencia os grupos funcionais característicos de uma biomassa lignocelulósica. A banda larga e intensa entre 3600–3200 cm^{-1} é atribuída ao estiramento das ligações O–H, provenientes dos grupos hidroxila da celulose, hemicelulose, lignina e da água adsorvida, refletindo o elevado caráter hidrofílico do material. As bandas observadas em aproximadamente 2920–2850 cm^{-1} correspondem ao estiramento assimétrico e simétrico das ligações C–H de grupos alifáticos presentes nos polissacarídeos. Na região de 1650–1600 cm^{-1} observa-se uma banda relacionada às vibrações do esqueleto aromático da lignina e/ou à deformação angular da água adsorvida, enquanto as bandas entre 1510–1420 cm^{-1} são atribuídas às vibrações dos anéis aromáticos da lignina e às deformações do grupo CH_2 da celulose.

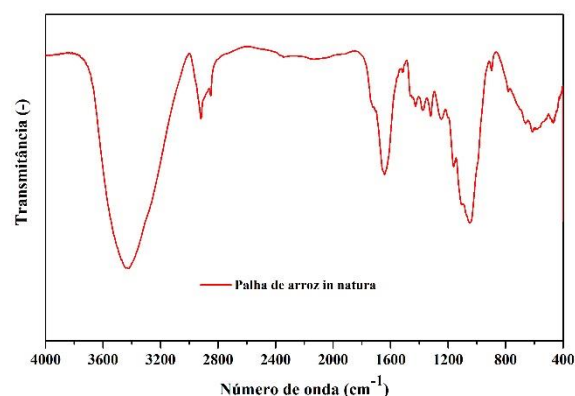


Figura 2. FTIR da palha de arroz

Na região 1200–800 cm^{-1} destacam-se bandas intensas associadas às vibrações das ligações C–O, C–O–C e das ligações glicosídicas β -(1→4), características da celulose e da hemicelulose, confirmando a elevada concentração desses polissacarídeos na palha de arroz. Essas bandas indicam que a biomassa apresenta potencial para a produção de açúcares fermentescíveis por meio da hidrólise com água subcrítica, uma vez que esse processo promove a clivagem das ligações glicosídicas e a solubilização preferencial da hemicelulose, seguida da hidrólise parcial da celulose em condições mais severas. Além disso, a presença

das bandas aromáticas da lignina evidencia a natureza recalcitrante da biomassa, indicando que temperaturas mais elevadas podem ser necessárias para promover alterações estruturais que aumentem a acessibilidade dos carboidratos e favoreçam a formação de açúcares e plataformas químicas de interesse para biorrefinarias.

Hidrólise com água subcrítica

A evolução do rendimento acumulado de açúcares fermentescíveis durante a hidrólise com água subcrítica é apresentada na Figura 3. Observa-se que, até aproximadamente 20 min de reação, a condição de 260°C apresentou uma maior taxa de formação de açúcares. Entretanto, após esse período, o aumento do rendimento tornou-se menos pronunciado, enquanto a condição de 230°C continuou apresentando incremento na produção, inicialmente mais modesto, porém resultando em maior rendimento acumulado ao final do processo. Esse comportamento sugere que, embora temperaturas mais elevadas acelerem a hidrólise inicial da biomassa, também podem favorecer reações consecutivas de degradação dos açúcares formados.

Esse fenômeno pode ser visto pela Figura 4, que apresenta a evolução da formação acumulada de plataformas químicas. Diferentemente do observado para os açúcares fermentescíveis, a condição de 260°C promoveu maior formação desses compostos durante praticamente todo o período experimental. Esse comportamento aponta que a severidade do processo intensifica reações secundárias de desidratação, fragmentação e oxidação dos carboidratos, reduzindo a seletividade para açúcares fermentescíveis em detrimento das plataformas químicas.

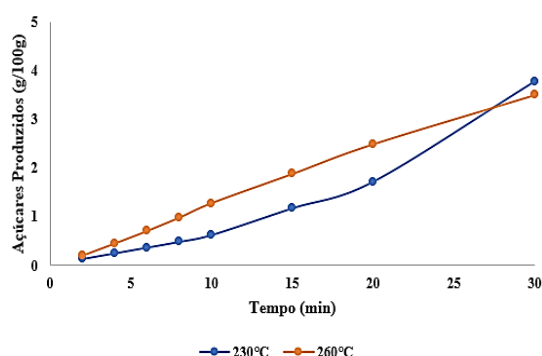


Figura 3. Rendimento acumulado da produção de açúcares fermentescíveis durante a hidrólise com água subcrítica

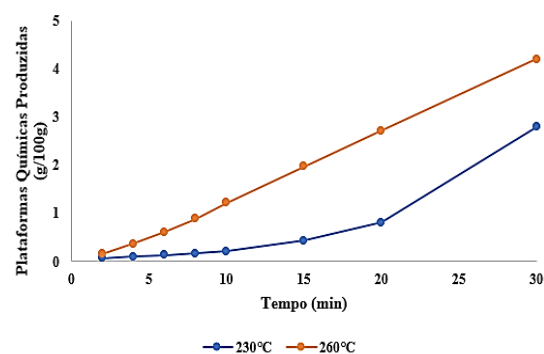


Figura 4. Rendimento acumulado da produção de plataformas químicas durante a hidrólise com água subcrítica

A Tabela 2 apresenta o rendimento de açúcares fermentescíveis e plataformas químicas obtidos em cada temperatura de reação.

	230°C/R20	260°C/R20
Açúcares fermentescíveis	3,78 ± 0,13	3,50 ± 1,13
Plataformas químicas	2,80 ± 0,84	4,21 ± 1,82

Os resultados indicam que o aumento da temperatura de 230°C para 260°C, mantendo constante a razão água:palha de arroz (R20), promoveu uma redução discreta 7,41% no rendimento de açúcares fermentescíveis e um aumento expressivo de 50,36% na formação de plataformas químicas. Essa tendência sugere que, em temperaturas mais elevadas, parte dos monossacarídeos inicialmente produzidos pela hidrólise da hemicelulose e da celulose sofre reações secundárias de degradação. Durante a hidrólise com água subcrítica, o aumento da temperatura reduz a constante dielétrica da água e eleva sua constante de ionização, favorecendo a clivagem das ligações glicosídicas e a solubilização dos polissacarídeos. Entretanto, a partir de determinadas condições de severidade, os açúcares tornam-se instáveis e são convertidos em compostos de maior valor agregado, como furfural, proveniente principalmente da desidratação da xilose, e 5-hidroxi metilfurfural (5-HMF), originado da desidratação da glicose, além de ácidos orgânicos como ácido acético, ácido fórmico e ácido levulínico. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura para biomassas lignocelulósicas submetidas à água subcrítica. Além disso, a Tabela 3 apresenta os resultados de rendimento de acordo com o tipo de açúcar e plataforma química, demonstrando relação direta com os dados da literatura.

O aumento da produção de plataformas químicas a 260°C evidencia que essa temperatura favorece as reações consecutivas de desidratação, isomerização e fragmentação dos carboidratos solubilizados, deslocando o equilíbrio do processo da produção de açúcares para a formação de intermediários químicos. Esse comportamento é particularmente esperado para a palha de arroz, cuja elevada fração de hemicelulose é rapidamente hidrolisada e convertida em pentoses, as quais apresentam menor estabilidade térmica que a glicose. Estudos conduzidos por Toor et al. (2011) demonstraram que o aumento da severidade da água subcrítica intensifica a degradação dos açúcares e favorece a geração de compostos plataforma. Pedersen e Meyer (2010) relataram que temperaturas superiores a aproximadamente 240°C aceleram as reações de desidratação dos monossacarídeos, reduzindo sua concentração no hidrolisado. Zabed et al. (2019) e Möller e Nilges (2012), que verificaram aumento da produção de furfural, 5-HMF e ácidos orgânicos com a elevação da temperatura em processos de hidrólise hidrotérmica de resíduos lignocelulósicos. Esta observação pode ser corroborada pelos resultados experimentais apresentados na Tabela 3. Assim, os resultados obtidos indicam que 230°C é uma condição ligeiramente mais favorável para preservar açúcares fermentescíveis, enquanto 260°C direciona o processo para a obtenção de plataformas químicas, evidenciando a influência decisiva da temperatura na seletividade da hidrólise com água subcrítica.

Tabela 3. Rendimento específico de açúcares fermentescíveis e plataformas químicas, em g/100g.

	230°C/R20	260°C/R20
Açúcares fermentescíveis		
Celobiose	0,39 ± 0,36	0,44 ± 0,00
Glicose	1,24 ± 0,54	1,12 ± 0,09
Xilose	1,39 ± 0,91	0,85 ± 0,94
Arabinose	0,77 ± 0,13	1,10 ± 0,10
Plataformas químicas		
Ácido fórmico	0,75 ± 0,10	1,31 ± 0,62
Ácido acético	0,44 ± 0,41	0,62 ± 0,55
Ácido levulínico	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
Furfural	1,15 ± 0,21	1,70 ± 0,11
HMF	0,45 ± 0,54	0,58 ± 0,55

A análise individual dos compostos (Tabela 3) mostrou que a celobiose apresentou um pequeno aumento de 12,8%, indicando que parte da celulose sofreu hidrólise parcial sem conversão completa em

glicose. A glicose apresentou uma redução de 9,7%, enquanto a xilose sofreu a maior diminuição, de aproximadamente 38,8%. Em contrapartida, a arabinose aumentou 42,9%, sugerindo que a maior severidade do processo favoreceu a solubilização de arabinoxilanas presentes na hemicelulose da palha de arroz. A redução mais acentuada da xilose em relação à glicose está de acordo com a literatura, uma vez que as pentoses apresentam menor estabilidade térmica em água subcrítica e são rapidamente convertidas em produtos de degradação, principalmente furfural, enquanto as hexoses tendem a permanecer estáveis por intervalos de tempo ligeiramente maiores (Pedersen e Meyer, 2010; Toor et al., 2011).

O aumento da temperatura também promoveu maior formação de plataformas químicas, corroborando a ocorrência de reações secundárias de degradação dos carboidratos solubilizados. O ácido fórmico apresentou o maior incremento, de 74,7%, seguido pelo furfural, cujo rendimento aumentou 47,8%. O ácido acético apresentou aumento de 40,9%, refletindo a desacetilação da hemicelulose, enquanto o HMF aumentou 28,9%, indicando maior degradação das hexoses. A ausência de ácido levulínico demonstra que, embora a formação de HMF tenha sido favorecida, as condições empregadas ainda não foram suficientemente severas para promover sua reidratação em ácido levulínico. Esses resultados indicam que, a 260°C, a hidrólise com água subcrítica passa a favorecer as reações de desidratação, fragmentação e oxidação dos açúcares, reduzindo a seletividade para monossacarídeos e aumentando a produção de compostos plataforma, comportamento amplamente relatado para biomassas lignocelulósicas submetidas a condições hidrotérmicas severas (Möller e Nilges, 2012; Kruse e Dinjus, 2007; Pedersen e Meyer, 2010).

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstraram que a hidrólise com água subcrítica constitui uma alternativa promissora para a valorização da palha de arroz, possibilitando a obtenção de açúcares fermentescíveis a partir de uma biomassa com elevados teores de celulose e hemicelulose, por meio de um processo relativamente rápido e utilização de um solvente ambientalmente amigável. A temperatura exerceu influência sobre a seletividade do processo, sendo que a condição de 230°C resultou em um maior rendimento médio de açúcares fermentescíveis, enquanto a elevação para 260°C intensificou a formação de plataformas químicas em decorrência da degradação dos carboidratos. Assim, nas condições avaliadas, 230°C mostrou-se mais adequada quando o objetivo é maximizar a recuperação de açúcares fermentescíveis em equilíbrio com uma menor produção de plataformas químicas, potencialmente inibidoras de



processos fermentativos. Por fim, a partir dos resultados apresentados, demonstra-se o potencial da hidrólise com água subcrítica como etapa com bastante promissora para a conversão de resíduos lignocelulósicos em açúcares, podendo futuramente ser avaliada o seu uso em escala industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Fortalecimento e Redução de Assimetria da Pós-Graduação da UFSM.

REFERÊNCIAS

- BEHERA, S.; ET AL. Exploring rice straw as substrate for hydrogen production: critical challenges and opportunities. *Environmental Technology & Innovation*, v. 31, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103153>.
- COCERO, M. J. ET AL. Understanding biomass fractionation in subcritical & supercritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 133, p. 550-565, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.08.012>.
- DOS SANTOS, M. S. N. ET AL. Optimization of subcritical water hydrolysis of pecan wastes biomasses in a semi-continuous mode. *Bioresource Technology*, v. 306, p. 123129, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123129>.
- ISIKGOR, F. H., & BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, 6(25), 4497-4559, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>.
- Kruse, A.; Dinjus, E. Hot compressed water as reaction medium and reactant: Properties and synthesis reactions. *The Journal of Supercritical Fluids*, 39(3), p. 362-380, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.03.016>
- KUCHARSKA, K., RYBARCZYK, P., HOŁOWACZ, I., ŁUKAJTIS, R., GLINKA, M., & KAMIŃSKI, M. Pretreatment of lignocellulosic materials as substrates for fermentation processes. *Molecules*, 23(11), 2937, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23112937>.
- MÖLLER, M.; NILGES, P.; HARNISCH, F.; SCHRÖDER, U. Subcritical water as reaction environment: fundamentals of hydrothermal biomass transformation. *ChemSusChem*, v. 4, n. 5, p. 566-579, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201000341>.
- MÖLLER, M.; NILGES, P. Subcritical water as reaction environment: Fundamentals and applications. *ChemSusChem*, 5(7), p. 1286-1294, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201100341>.
- PATTNAIK, F.; NANDA, S.; KUMAR, V.; NAIK, S.; DALAI, A. K. Subcritical water hydrolysis of Phragmites for sugar extraction and catalytic conversion to platform chemicals. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, n. 18, p. 16435-16447, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02741-5>.
- PEDERSEN, M.; MEYER, A. S. Lignocellulose pretreatment severity – relating chemistry to biomass recalcitrance. *Biotechnology Advances*, 28(6), p. 739-750, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.05.003>
- RUIZ, H. A.; RODRÍGUEZ-JASSO, R. M.; FERNANDES, B. D.; VICENTE, A. A.; TEIXEIRA, J. A. Sub- and supercritical water hydrolysis of agricultural and food industry residues for the production of fermentable sugars: A review. *Food and Bioprocess Processing*, v. 98, p. 95-123, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.11.004>.
- SAINI, J. K., SAINI, R., & TEWARI, L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: Concepts and recent developments. *3 Biotech*, 5(4), 337-353, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>.
- SARKER, T. R.; PATTNAIK, F.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; ET AL. Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*, v. 284, 131372, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>.
- SATLEWAL, A.; AGRAWAL, R.; BHAGIA, S.; ET AL. Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties. *Biofuels, Bioprocess and Biorefining*, v. 12, p. 83-107, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.1818>.
- TOOR, S. S.; ROSENDAHL, L.; RUDOLF, A. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*, 36(5), p. 2328-2342, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.013>.
- ZABED, H., SAHU, J. N., BOYCE, A. N., & FARUQ, G. Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: An overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, p. 751-774, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.038>.
- ZAKY, A. A.; ET AL. UTILIZATION OF WASTE STRAW AND HUSKS FROM RICE PRODUCTION: A REVIEW. *Journal of Bioresources and Bioprocess*, v. 5, n. 3, p. 143-162, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>.