

USO DE UMA MISTURA DE RESÍDUOS DE FRUTAS PARA OBTENÇÃO DE ETANOL

JÚLIA PIEPER NERLING^{1,2}, VITÓRIA DASSOLER LONGO^{2,3}, HELEN TREICHEL^{2,4}

1 Introdução:

O crescimento populacional tem levado a um aumento marcante na demanda de alimentos, gerando quantidades significativas de resíduos (PANAHI et al., 2022). Estima-se que aproximadamente um terço dos alimentos gerados globalmente seja perdido, o que acarreta prejuízos financeiros e sérios danos ao meio ambiente, como o uso ineficiente de recursos naturais e o aumento de resíduos orgânicos (ROUKAS et al., 2022).

Os resíduos provenientes de frutas, como as cascas, possuem abundância de polissacarídeos estruturais (como celulose, hemicelulose e pectina), lignina, açúcares solúveis e compostos bioativos, que podem ser atribuídos a diferentes aplicações (SCAPINI et al., 2023), como o uso em biorefinarias, com o objetivo de obter bioetanol, biogás, biomoléculas e outros compostos de interesse para a indústria (FAO, 2014; TREICHEL et al., 2020; ZHU et al., 2023).

Entre os compostos de maior relevância encontrados nas cascas de frutas cítricas estão os óleos essenciais, com alto valor agregado, como o D-limoneno, que é utilizado nas indústrias alimentícia, de cosméticos e farmacêutica (MANHONGO et al., 2022; PATSALOU et al., 2020). A recuperação desses compostos, através de matérias primas consideradas ociosas, juntamente com a produção de biocombustíveis como o bioetanol, é uma solução promissora para agregar valor aos resíduos gerados pela agroindústria. (MAK et al., 2020; HALDAR et al., 2022). Indo de encontro e em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, o presente trabalho é particularmente relacionado à diminuição de desperdícios alimentares, mudança na matriz energética e inovação tecnológica, buscando uma destinação correta e viabilidade econômica (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

2 Objetivos

O objetivo deste estudo foi implementar uma abordagem de biorrefinaria integrada, com três metas principais: investigar o aproveitamento de uma combinação de resíduos de frutas

¹ Discente de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus Erechim*, contato: 098967@aluno.uricer.edu.br.

² Grupo de Pesquisa: Laboratório de Microbiologia e Bioprocessos.

³ Discente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS - *campus Erechim*.

⁴ Doutora em Engenharia de Alimentos, UFFS, *campus Erechim*.

(laranja, banana, manga, abacaxi e limão) como uma fonte rica em compostos bioativos e açúcares fermentáveis; conduzir a extração de D-limoneno através da técnica de Soxhlet, simultaneamente, realizar a produção de bioetanol utilizando os açúcares liberados por hidrólise enzimática seguida de fermentação alcoólica; e estudar o processo de hidrólise enzimática.

3 Metodologia

A biomassa foi coletada de resíduos de cascas de frutas em um restaurante universitário da Universidade Federal da Fronteira Sul – *Campus* Erechim, os quais foram lavados, congelados a -60 °C, desidratados a 40 °C por 48 horas, posteriormente moídos e peneirados em uma malha de 20 mesh (TREICHEL et al., 2020). Posteriormente foi caracterizada seguindo os protocolos do National Renewable Energy Laboratory (NREL), determinando a umidade, cinzas e sólidos totais.

A extração de D-limoneno foi realizada utilizando 8 g de biomassa em um sistema Soxhlet por um período de 4 horas com hexano na proporção de 1:25 (m/v), seguida pela remoção do solvente e ressuspensão para a quantificação cromatográfica (LOPRESTO et al., 2014). A biomassa foi submetida também ao processo de remoção de açúcares livres com o uso de água destilada a 30 °C, a lavagem pré-hidrólise, evidenciando os formados pela atividade enzimática (BONATTO et al., 2021; MILLER, 1959). Já a hidrólise enzimática, foi realizado com celulase Cellic CTec2 (Sigma-Aldrich, Brasil) em um tampão citrato com pH 4,8, sob agitação contínua (150 RPM) e temperatura de 50 °C por um total de 120 horas. O desenho experimental Delineamento Rotacional Composto Central (CCRD) 2² variou a quantidade de biomassa e a concentração enzimática (GABHANE et al., 2014).

A fermentação alcoólica foi conduzida com a levedura *Wickerhamomyces* sp. UFFSCE-3.1.2 (BAZOTI et al., 2017; ZANIVAN et al., 2022), a uma temperatura de 30 °C e 120 rpm, alíquotas foram coletadas em 0, 12, 24 e 48 h para quantificar o perfil de produção de açúcares, ácidos e etanol.

Análises: Os açúcares redutores foram medidos pelo método de Estabilização Neuromuscular Dinâmica (DNS) (MILLER, 1959), a glicose, celobiose, frutose, arabinose, etanol e ácidos orgânicos foram analisados via Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) (BAZOTI et al., 2017). O D-limoneno foi quantificado utilizando Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM) (LOPRESTO et al., 2014). Os dados foram submetidos à ANOVA com significância de 95% ($p < 0,05$), utilizando o software Protimiza.

4 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos conforme as metodologias acima, foram organizados em uma tabela constando os resultados atingidos:

TABELA 1 – Rendimento de açúcares redutores em diferentes condições experimentais.

Ensaio	Massa (g)	Concentração de enzima (FPU/g)	Açúcares redutores totais (g/L)
1	2 (-1)	15 (1)	16,9
2	8 (1)	15 (1)	65,0
3	0,76 (-1,41)	9 (0)	8,0
4	9,24 (+1,41)5	9 (0)	63,9
5	(0) 5	0,51 (-1,41)	39,8
6	0	17,49 (+1,41)	43,5

Fonte: Autora, 2025.

De acordo com a tabela acima, podemos evidenciar que, a extração de D-limoneno, resultou em um rendimento de aproximadamente 6,41 mg/g, superando os métodos tradicionais que usam cascas de frutas cítricas, como a extração assistida por ultrassom (TEKE et al., 2023). Além de ser um produto de alto valor econômico, sua remoção também previne a inibição da fermentação alcoólica, conforme evidenciado em pesquisas anteriores (VLYSIDIS et al., 2017).

Já na hidrólise enzimática, os experimentos 2 e 4 produziram quantidades de açúcares redutores totais elevados, sendo de 65,0 g/L e 63,9 g/L, respectivamente, desta forma podemos considerar que o experimento 4 foi o mais eficiente por utilizar 40% menos enzima e ainda apresentar uma alta taxa de eficiência (BAZOTI et al., 2017).

Na fermentação, o maior rendimento de bioetanol foi de 7,14 g/L em apenas 12 h, com 96,87% de conversão da glicose. Esse tempo de fermentação é significativamente menor que os 72 h comumente relatados para resíduos de frutas (ZANIVAN et al., 2022).

As leveduras que metabolizaram de forma eficaz a glicose, frutose e celobiose, enquanto a arabinose não foi metabolizada, o que podemos levar como um comportamento que é comum entre leveduras do gênero *Wickerhamomyces* (BAZOTI et al., 2017; BONATTO et al., 2020). A frutose, embora estivesse presente, foi consumida a uma taxa mais lenta em comparação à glicose, possivelmente devido a variações na afinidade dos transportadores (HXT) (BERTHELIS et al., 2004).

A presença de ácido acético foi reduzida ao longo da fermentação, possivelmente metabolizada pelas células. Já o ácido cítrico, reconhecidamente inibidor de fermentações alcoólicas, permaneceu no meio, dificultando o desempenho fermentativo em concentrações

elevadas (TADIOOTO et al., 2023; WILKINS et al., 2007).

5 Conclusão

A pesquisa demonstrou a viabilidade de empregar uma mistura de cascas de frutas como matéria-prima para a produção integrada de bioetanol e D-limoneno, utilizando uma estratégia de biorrefinaria integrada. Sendo assim, concluindo que o procedimento oferece vantagens financeiras, tecnológicas e ecológicas, incentivando a valorização de materiais orgânicos e a minimização de efeitos negativos ao meio ambiente, além de estar em conformidade com os conceitos de bioeconomia e sustentabilidade.

Referências Bibliográficas

- BAZOTI, S. F.; GOLUNSKI, S.; PEREIRA SIQUEIRA, D. et al. Second-generation ethanol from non-detoxified sugarcane hydrolysate by a rotting wood isolated yeast strain. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 582-587, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.007>.
- BERTHELIS, N.; CORDERO OTERO, R.; BAUER, F. et al. Discrepancy in glucose and fructose utilisation during fermentation by wine yeast strains. **FEMS Yeast Research**, v. 4, n. 7, p. 683-689, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.femsyr.2004.02.005>.
- BONATTO, C.; SCAPINI, T.; ZANIVAN, J. et al. Utilization of seawater and wastewater from shrimp production in the fermentation of papaya residues to ethanol. **Bioresource Technology**, v. 321, p. 124501, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124501>.
- BONATTO, C.; VENTURIN, B.; MAYER, D. A. et al. Experimental data and modelling of 2G ethanol production by *Wickerhamomyces* sp. UFFS-CE-3.1.2. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2445-2450, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.010>.
- FAO. **Definitional framework of food loss**. Rome: FAO, 2014.
- GABHANE, J.; PRINCE WILLIAM, S. P. M.; GADHE, A. et al. Pre-treatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: individual and interactive effects of acid and alkali pre-treatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 498-503, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.013>.
- HALDAR, D.; SHABBIRAHMED, A. M.; SINGHANIA, R. R. et al. Understanding the management of household food waste and its engineering for sustainable valorization - A state-of-the-art review. **Bioresource Technology**, v. 358, p. 127390, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127390>.
- LOPRESTO, C. G.; PETRILLO, F.; CASAZZA, A. A. et al. A non-conventional method to extract D-limonene from waste lemon peels and comparison with traditional Soxhlet extraction. **Separation and Purification Technology**, v. 137, p. 13-20, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.015>.
- MAK, T. M. W.; XIONG, X.; TSANG, D. C. W. et al. Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: policy review, limitations and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122497, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122497>.
- MANHONGO, T. T.; CHIMPHANGO, A. F. A.; THORNLEY, P.; RÖDER, M. Current status and opportunities for fruit processing waste biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, p. 111823, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111823>.
- MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.

NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PANAHI, H. K. S.; DEHHAGHI, M.; GUILLEMIN, G. J. et al. Bioethanol production from food wastes rich in carbohydrates. **Current Opinion in Food Science**, v. 43, p. 71-81, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.11.001>.

PATSAOU, M.; CHRYSARGYRIS, A.; TZORTZAKIS, N.; KOUTINAS, M. A biorefinery for conversion of citrus peel waste into essential oils, pectin, fertilizer and succinic acid via different fermentation strategies. **Waste Management**, v. 113, p. 469-477, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.020>.

ROUKAS, T.; KOTZEKIDOU, P. From food industry wastes to second generation bioethanol: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, p. 299-329, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09606-9>.

SCAPINI, T.; BONATTO, C.; DALASTRA, C. et al. Bioethanol and biomethane production from watermelon waste: a circular economy strategy. **Biomass and Bioenergy**, v. 170, p. 106719, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106719>.

TADIOOTO, V.; DEOTI, J. R.; MÜLLER, C. et al. Prospecting and engineering yeasts for ethanol production under inhibitory conditions: an experimental design analysis. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 46, p. 1133-1145, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02812-x>.

TEKE, G. M.; DE VOS, L.; SMITH, I. et al. Development of an ultrasound-assisted pre-treatment strategy for the extraction of D-limonene toward the production of bioethanol from citrus peel waste (CPW). **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 46, p. 1627-1637, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02924-y>.

TREICHEL, H.; FONGARO, G.; SCAPINI, T. et al. **Utilising biomass in biotechnology**. Cham: Springer, 2020.

VLYSIDIS, A.; KOUTINAS, A.; KOOKOS, I. Techno-Economic evaluation of refining of Food Supply Chain Wastes for the production of Chemicals and Biopolymers. **Food Waste Reduction and Valorisation**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 147-164.

WILKINS, M. R.; WIDMER, W. W.; GROHMANN, K. Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. **Process Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 1614-1619, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.09.006>.

ZANIVAN, J.; BONATTO, C.; SCAPINI, T. et al. Evaluation of bioethanol production from a mixed fruit waste by *Wickerhamomyces* sp. UFFS-CE-3.1.2. **Bioenergy Research**, v. 15, p. 175-182, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10273-5>.

ZHU, Y.; LUAN, Y.; ZHAO, Y. et al. Current technologies and uses for fruit and vegetable wastes in a sustainable system: a review. **Foods**, v. 12, n. 10, p. 1949, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12101949>.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais; Fermentação alcoólica; Hidrólise enzimática.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES 2024 0107-1

Financiamento