VALORIZAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA POR MEIO DA CO-PRODUÇÃO DE 2,3-BUTANODIOL E XILITOL UTILIZANDO CO-CULTURA

Geovana Vargas[1], Márcio Daniel Nicodemos Ramos[1], Johan Thevelein[2], José Renato Guimarães[3], Thais Suzane Milessi[1].

[1]Universidade Federal de São Carlos/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Rodovia Washington Luís, km 235 (SP-310) – 13565-905 – São Carlos – SP, Brasil, geovanavargas@estudante.ufscar.br, marciodanielnicodemosramos@gmail.com, thais.milessi@ufscar.br.
[2]NovelYeast bv, Bio-Incubator BIO4, Gaston Geenslaan 3, Leuven-Heverlee, Bélgica, johan.thevelein@novelyeast.com.
[3]Universidade Federal de Itajubá/Instituto de Recursos Naturais, Avenida Benedito Pereira Santos, 1303 – 37500-903 – Itajubá – MG, Brasil, jrenatoguimaraes@unifei.edu.br.

Resumo
A busca por processos biotecnológicos integrados para a valorização de biomassa tem impulsionado o estudo de tecnologias capazes de gerar diferentes produtos de alto valor agregado simultaneamente. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou o desempenho das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* HGS37 e *Candida guilliermondii* FTI20037 em co-cultura para a produção de 2,3-butanodiol e xilitol, simultaneamente a partir de bagaço de cana. O bagaço foi pré-tratado hidrotermicamente e hidrolisado com o coquetel enzimático OpEn (45 FPU/$g_{celulose}$). O cultivo foi realizado em frascos utilizando hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar, com proporção de inóculo 1:1, densidade óptica inicial (DO_0) 50, *headspace* de 1:10, pH 5,5, 30 ºC e 240 rpm. Observou-se um rendimento de 0,36 g/g de 2,3-butanodiol e de 0,10 g/g de xilitol. Esses resultados demonstram que a produção conjunta é possível, mas exige maior investigação acerca do comportamento das cepas no meio utilizado e em conjunto, visando a integração da produção e a valorização da biomassa lignocelulósica.
Palavras-chave: Co-cultura. Bagaço de cana-de-açúcar. 2,3-butanodiol. Xilitol.

Área do Conhecimento: Engenharias: Engenharia Química.

Introdução

Atualmente, esforços vêm sendo desempenhados com o objetivo de diminuir a dependência de produtos derivados de petroquímicos, substituindo-os por alternativas sustentáveis de base biológica, almejando não só a redução dos combustíveis fósseis como fonte energética, mas também o abandono do petróleo como precursor de produtos químicos essenciais (Calvo-Flores; Martin-Martinez, 2022). O aproveitamento de biomassa residual consiste na aplicação de uma matéria-prima abundante e de baixo custo que facilita a gestão de resíduos e permite a formação de diferentes bioprodutos (Cuervo; Rosas; Romanelli, 2024). A biomassa lignocelulósica é uma matéria-prima promissora, podendo ser aplicada em diferentes bioprocessos industriais, uma vez que o Brasil apresenta alta disponibilidade desse subproduto devido à sua significativa produção agrícola, destacando-se a indústria sucroenergética (Cuervo; Rosas; Romanelli, 2024). O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto com geração anual de aproximadamente 90 milhões de toneladas apenas no Brasil (Milessi *et al*., 2021). É composto por 45-50% de celulose, 25-30% de hemicelulose e 25% de lignina, variando conforme sua origem (Barciela *et al*., 2023). Atualmente, parte do bagaço é queimado nas caldeiras para co-geração de energia, porém a parte sobressalente do bagaço gerado pode ser utilizada como substrato na obtenção de diferentes bioprodutos (Alokika *et al*., 2021).

O 2,3-butanodiol é um químico de plataforma, precursor de solventes industriais e com aplicações na formulação de polímeros e borrachas sintéticas, além de ser usado na fabricação de tintas, agentes amaciantes e aditivos para combustíveis (Cho *et al*., 2013). A forma de produção primária do 2,3-butanodiol se dá a partir de petroquímicos, no entanto, sua produção através da fermentação da glicose vem sendo amplamente estudada, permitindo que seja um possível produto a ser obtido a partir de biomassa (Kim *et al*., 2016). Adicionalmente, outro produto de grande interesse é o xilitol, um poliálcool de cinco carbonos, amplamente utilizado como adoçante de baixo valor energético em alimentos e

produtos de higiene, além do uso na síntese de químicos como o etilenoglicol, propilenoglicol e ácido láctico (Santos; Diel-Rambo; Scapin, 2024). O xilitol pode ser obtido a partir da fermentação da xilose disponível em biomassas lignocelulósicas (Vollmer *et al*., 2023).

Diferentes cepas selvagens e recombinantes de microrganismos são capazes de produzir 2,3-butanodiol e, dentre elas, a cepa recombinante *Saccharomyces cerevisiae* HGS37 recebe destaque, visto que é uma levedura geneticamente modificada para superexpressar a via metabólica do composto de interesse, além de apresentar elevada robustez, facilidade de manipulação e um bom desempenho em comparação a outros microrganismos, sendo promissora para aplicação industrial (Huo; Foulquié-Moreno; Thevelein, 2022). Já para a obtenção do xilitol, as leveduras do gênero *Candida* destacam-se entre os microrganismos naturalmente capazes de converter xilose em xilitol, devido à presença e à atividade da enzima xilose redutase, que catalisa a redução da D-xilose a xilitol, utilizando NADPH e/ou NADH como cofatores (Hidayah; Adiandri; Rahayu, 2022). A espécie *Candida guilliermondii*, por exemplo, apresenta potencial para a produção de xilitol utilizando hidrolisados de resíduos agrícolas como fonte de xilose, demonstrando capacidade de tolerar compostos potencialmente inibidores presentes nesses substratos (López-Linares *et al*., 2018).

Diante disso, uma tecnologia que pode ser utilizada é a fermentação em co-cultura, a qual consiste na utilização simultânea de diferentes microrganismos em um mesmo sistema de cultivo, permitindo a combinação de características metabólicas complementares para a conversão de diferentes componentes da biomassa em produtos de interesse. Essa estratégia apresenta particular interesse para o aproveitamento de biomassas lignocelulósicas, que são constituídas principalmente por frações de celulose e hemicelulose, cujos produtos de hidrólise apresentam diferentes características e podem ser metabolizados por microrganismos com capacidades fisiológicas específicas (Jawad *et al*., 2024; Latif *et al*., 2024). Dessa forma, a associação de microrganismos capazes de utilizar diferentes açúcares pode favorecer o aproveitamento simultâneo das frações de hexoses e pentoses, possibilitando a obtenção de diferentes produtos em uma única etapa de bioprocessamento. Além disso, quando comparada a processos independentes para a produção de cada composto, a utilização de uma única etapa de cultivo pode reduzir a necessidade de operações separadas de preparo, esterilização, inóculo e controle dos sistemas fermentativos, contribuindo para a simplificação do processo e para a redução do consumo de recursos operacionais (Mittermeier *et al*., 2023). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho das cepas *S. cerevisiae* HGS37 e *C. guilliermondii* FTI20037 na produção de 2,3-butanodiol e xilitol, respectivamente, em sistema de co-cultivo, utilizando as frações de açúcares presentes no hidrolisado enzimático de bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado hidrotermicamente como substrato.

Metodologia

O pré-tratamento hidrotérmico do bagaço de cana foi conduzido a 185 ºC com 10% m/v de sólido por 10 min (Milessi *et al*., 2021). A hidrólise enzimática foi conduzida com o coquetel enzimático brasileiro OpEn (Fonseca; Parreiras; Murakami, 2020; De Lima et al., 2022) a 50 ºC e 150 rpm utilizando-se 10% m/v de carga de sólido com carga enzimática de 45 FPU/$g_{celulose}$, ampicilina (100 µg/mL) e polietilenoglicol (PEG: 0,05 g/$g_{biomassa}$) (Cebreiros; Ferrari; Lareo, 2019).

Os ensaios fermentativos foram realizados utilizando a cepa recombinante de levedura *Saccharomyces cerevisiae* HGS37 (Huo; Foulquié-Moreno; Thevelein, 2022) e a levedura nativa *Candida guilliermondii* FTI20037. A etapa de propagação celular da *S. cerevisiae* HGS37 consistiu no crescimento em placa de Petri por 48 horas, usando meio YPD(E)-ágar 0,5% (20 g/L de peptona; 20 g/L de glicose; 15 g/L de ágar; 10 g/L de extrato de levedura e 5 g/L de etanol), seguido do preparo do pré-inóculo onde uma colônia da placa foi transferida para 5 mL de meio YPD(E) 0,5% (20 g/L de peptona; 20 g/L de glicose; 10 g/L de extrato de levedura e 5 g/L de etanol) e mantida a 200 rpm e 30 ºC por 24 horas. Em seguida, o inóculo foi preparado pela transferência total do pré-inóculo para 300 mL de meio YPD(E) 0,5% (Huo; Foulquié-Moreno; Thevelein, 2022). Já a etapa de propagação da *C. guilliermondii* FTI20037 consistiu nas mesmas etapas, mas usando o meio YPDX-ágar (20 g/L de peptona; 20 g/L de glicose; 20 g/L de xilose; 15 g/L de ágar e 10 g/L de extrato de levedura) para o crescimento em placa e o meio YPDX (20 g/L de peptona; 20 g/L de glicose; 20 g/L de xilose e 10 g/L de extrato de levedura) para as etapas líquidas. As células foram recuperadas por centrifugação durante 10 minutos a 4000 rpm para aplicação nos ensaios de co-produção.

O ensaio de co-cultura das leveduras foi realizado em frasco érlenmeyer aletado de 250 mL utilizando densidade óptica (DO) inicial de 50 e proporção 1:1 das cepas, usando um *headspace* de 1:10 (em uma relação entre volume de meio para volume disponível) contendo 25 mL de hidrolisado suplementado com 5 g/L de glicerol e pH 5,5, a 30 ºC e 240 rpm por 48 horas. Foram coletadas amostras ao longo do cultivo, as quais foram centrifugadas e filtradas em filtro PVDF de 0,22 µm para remoção total dos sólidos.

Os açúcares do meio, 2,3-butanodiol e xilitol produzidos foram quantificados por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE), utilizando uma coluna Rezex ROA-Organic acid H+ de exclusão iônica, aplicando H_2SO_4 a 5 mM como efluente, a uma vazão de 0,5 mL/min e 65 ºC (Ramos *et al*., 2026). O fator de rendimento substrato-produto ($Y_{P/S}$) foi calculado separadamente para o 2,3-butanodiol e para o xilitol, de acordo com a Equação 1 (Borzani, 1986), em que C_{Pf} é a concentração final de produto, C_{P0} é a concentração inicial de produto, C_{S0} é a concentração inicial de substrato e C_{Sf} é a concentração final do substrato.

$$Y_{P/S}\ [g/g] = \frac{C_{Pf} - C_{P0}}{C_{S0} - C_{Sf}} \quad (1)$$

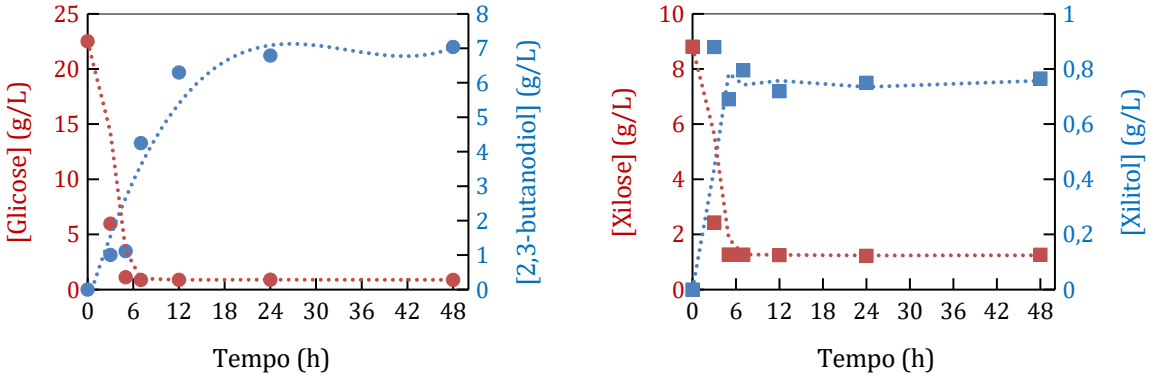
A produtividade volumétrica (Q_P) do 2,3-butanodiol e do xilitol, em g/L/h, foi calculada de acordo com a Equação 2 (Borzani, 1986), em que C_{Pf} é a concentração final de produto, C_{P0} é a concentração inicial de produto e Δt é o tempo de duração do processo.

$$Q_P[g/L/h] = \frac{C_{Pf} - C_{P0}}{\Delta t} \quad (2)$$

Resultados

O hidrolisado utilizado continha 22,5 g/L de glicose e 8,8 g/L de xilose disponíveis para fermentação. O perfil de consumo de glicose e de formação de 2,3-butanodiol está apresentado na Figura 1a, onde observa-se o consumo progressivo de glicose e a formação de 2,3-butanodiol ao longo das 48 horas de cultivo. Ao final do processo, foi atingida uma concentração de 7,04 g/L de 2,3-butanodiol. A formação do produto ocorreu principalmente nas primeiras horas de cultivo, sendo observada uma estabilização de sua concentração a partir de aproximadamente 12 horas de processo. Após esse período, a concentração de 2,3-butanodiol apresentou pouca variação até o final do cultivo, permanecendo próxima ao valor máximo obtido. Para o xilitol, observou-se formação do produto ao longo do cultivo, com concentração aumentando nas primeiras horas do processo e atingindo o valor máximo de 0,88 g/L após 3 horas de cultivo. O perfil de consumo de xilose e de formação de xilitol está apresentado na Figura 1b, permitindo acompanhar a variação das concentrações de substrato e produto durante o período experimental.

Figura 1 - Produção de 2,3-butanodiol por *S. cerevisiae* HGS37 pelo consumo de glicose como substrato (a) e xilitol por *C. guilliermondii* FTI20037 pelo consumo de xilose (b) durante o cultivo de 48 horas, a 30 ºC e agitado a 240 rpm.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os parâmetros fermentativos referentes à produção de 2,3-butanodiol e xilitol são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros fermentativos referentes à produtividade volumétrica (Q_P) e rendimento de produto por substrato ($Y_{P/S}$) obtidos em co-cultura para 2,3-butanodiol e xilitol.

Produto	$Y_{P/S}$ (g/g)	Q_P (g/L/h)
2,3-butanodiol	0,36 ± 0,003	0,53 ± 0,005
Xilitol	0,10 ± 0,000	0,29 ± 0,003

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussão

Na co-cultura, foi obtido rendimento de 0,36 g/g para a produção de 2,3-butanodiol, correspondente a aproximadamente 67% do rendimento máximo teórico. Esse resultado é comparável aos valores reportados na literatura para sistemas conduzidos com microrganismos em cultivo isolado, mesmo considerando as diferenças entre os microrganismos, a composição dos meios e as condições de fermentação empregadas. Sugimura *et al.* (2023), por exemplo, desenvolveram geneticamente a levedura *S. cerevisiae* YMS101 e avaliaram sua capacidade de produção de 2,3-butanodiol em meio SD contendo 2% de glicose e 0,67% de base nitrogenada, obtendo rendimento máximo de 0,35 g/g. De forma semelhante, Tinôco *et al.* (2023) avaliaram a produção de 2,3-butanodiol pela bactéria *Paenibacillus peoriae* NRRL BD-62 e obtiveram rendimento de 0,33 g/g após a otimização das condições de cultivo, conduzida a 35 °C e 225 rpm, em meio sintético contendo glicose, extrato de levedura e sais minerais. É importante destacar, entretanto, que esses resultados foram alcançados em sistemas de cultivo isolado e sob condições específicas de otimização, enquanto o presente trabalho empregou uma co-cultura, na qual diferentes microrganismos compartilham o mesmo ambiente fermentativo e os recursos disponíveis. Nesse sentido, o rendimento obtido demonstra que a presença simultânea das linhagens não comprometeu significativamente a conversão do substrato em 2,3-butanodiol, indicando um desempenho fermentativo satisfatório da *S. cerevisiae* HGS37 mesmo em um sistema metabólico mais complexo.

Em relação à produção de xilitol, a produtividade volumétrica de 0,29 g/L/h obtida neste trabalho, utilizando hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar não detoxificado, mostrou-se superior aos valores reportados por López-Linares *et al*. (2018) em hidrolisados de palha de colza (0,10 a 0,14 g/L/h) e próxima ao valor de 0,24 g/L/h obtido por Bianchini *et al*. (2022). No entanto, observando a Figura 1b, nota-se que a síntese do xilitol se concentrou no início do processo, desacelerando ao longo do cultivo. Esse comportamento pode ser explicado pela existência de possíveis inibidores no hidrolisado gerados durante a etapa de pré-tratamento, dos quais diversos microrganismos, como a *Candida* sp., apresentam certa sensibilidade, comprometendo a eficiência de conversão do substrato (Santos *et al*., 2024). Nesse sentido, a xilose residual pode ter sido destinada para o crescimento celular, ao invés de consumida para a formação do produto de interesse. Adicionalmente, a *Candida* é uma cepa mais sensível às condições de processo do que a *S. cerevisiae*, necessitando de otimização das condições

de processo para obter um desempenho satisfatório. Porém, obteve-se a prova de conceito de que a co-cultura para a co-produção de 2,3-butanodiol e xilitol é uma estratégia possível.

Diante disso, vale ressaltar que grande parte das publicações disponíveis foi conduzida utilizando substratos sintéticos contendo uma única fonte de carbono, como glicose para a produção de 2,3-butanodiol e xilose para a produção de xilitol, além de condições experimentais previamente otimizadas para maximizar a obtenção de cada bioproduto individualmente. Nesse contexto, ainda não foram encontrados estudos que avaliem a co-produção de 2,3-butanodiol e xilitol em um mesmo sistema fermentativo, especialmente empregando co-culturas de microrganismos com capacidades metabólicas complementares. Dessa forma, não há dados previamente publicados que permitam estabelecer uma comparação direta quanto ao comportamento das linhagens em co-cultivo ou quanto aos parâmetros fermentativos associados à produção simultânea desses dois bioprodutos. Essa lacuna torna a avaliação do sistema de co-cultura particularmente relevante, uma vez que a produção concomitante de 2,3-butanodiol e xilitol pode representar uma estratégia interessante para o aproveitamento integrado de diferentes açúcares presentes em matérias-primas lignocelulósicas.

Dessa forma, os resultados sugerem que o uso das linhagens em co-cultura não apenas possibilitou a produção simultânea dos dois bioprodutos, mas também permitiu alcançar parâmetros fermentativos comparáveis aos descritos para sistemas de cultivo isolado, evidenciando o potencial dessa estratégia para o aproveitamento integrado das frações de hexose e pentose de biomassas lignocelulósicas.

Conclusão

No presente trabalho comprovou-se a possibilidade de se utilizar a co-cultura de *S. cerevisiae* HGS37 e *C. guilliermondii* para a produção de 2,3-butanodiol e xilitol em um mesmo reator. Não foram observados prejuízos expressivos na produção de 2,3-butanodiol, entretanto cabe investigar possíveis causas para a produtividade baixa do xilitol, principalmente em relação à presença de inibidores no hidrolisado. Ademais, por se tratar de uma avaliação inicial, estudos futuros devem investigar o efeito de diferentes hidrolisados, diferentes proporções entre as cepas utilizadas e condições de cultivo, visando melhorar a produtividade do sistema. Dessa forma, a co-cultura dessas linhagens tem potencial para se tornar uma estratégia interessante de integração, capaz de favorecer o aproveitamento simultâneo das frações de açúcares presentes em biomassas lignocelulósicas e ampliar as possibilidades de valorização dessa matéria-prima para a produção de bioprodutos de maior valor agregado.

Referências

ALOKIKA, A. *et al*. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **Int. J. Biol. Macromol.,** v. 169, p. 564-582, 2021.

BARCIELA, P. *et al*. Utility Aspects of Sugarcane Bagasse as a Feedstock for Bioethanol Production: Leading Role of Steam Explosion as a Pretreatment Technique. **Processes,** v. 11, 2023.

BIANCHINI, I. D. *et al*. Short-term Adaptation Strategy Improved Xylitol Production by *Candida guilliermondii* on Sugarcane Bagasse Hemicellulosic Hydrolysate. **Bioenerg. Res.**, v. 15, p. 1182-1194, 2022.

BORZANI, W. Cinética de processos fermentativos. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 3, p. 61, 1986.

CALVO-FLORES, F. G.; MARTIN-MARTINEZ, F. J. Biorefineries: Achievements and challenges for a bio-based economy. **Front. Chem.,** v. 10, 2022.

CEBREIROS, F.; FERRARI, M. D.; LAREO, C. Cellulose hydrolysis and IBE fermentation of Eucalyptus sawdust for enhanced biobutanol production by *Clostridium beijerinckii* DSM 6423. **Ind. Crops Prod.**, v. 134, p. 50-61, 2019.

CHO, S. *et al*. Selective production os 2,3-butanediol and acetoin by a newly isolated bacterium *Klebsiella oxytoca* M1. **Appl. Biochem. Biotechnol**., v. 170, n. 8, p. 1922-1933, 2013.

CUERVO, O. H. P.; ROSAS, C. A.; ROMANELLI, G. P. Valorization of residual lignocellulosic biomass in South America: a review. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.,** v. 31, n. 32, p. 44575-44607, 2024.

DE LIMA E. A. *et al*. Development of an economically competitive Trichoderma-based platform for enzyme production: Bioprocess optimization, pilot plant scale-up, techno-economic analysis and life cycle assessment. **Bioresour. Technol.,** v. 364, n. 128019, 2022.

FONSECA, L. M.; PARREIRAS, L. S.; MURAKAMI, M. T. Rational engineering of the *Trichoderma reesei* RUT-C30 strain into na industrially relevant platform for celulase production. **Biotechnol. Biofuels,** v. 13, n. 93, 2020.

HIDAYAH, N.; ADIANDRI, R.; RAHAYU, E. Microbial xylitol production from corn cob using Candida guilliermondii. **IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci**., v. 1024, 2022.

HUO, G.; FOULQUIÉ-MORENO, M. R.; THEVELEIN, J. M. Development of na industrial yeast strain for efficient production of 2,3-butanediol. **Microb. Cell Fact**., v. 21, n. 199, 2022.

JAWAD, M. *et al*. Lignocellulosic ethanol and butanol production by *Saccharomyces cerevisiae* and *Clostridium beijerinckii* co-culture using non-detoxified corn stover hydrolysate. **J. Biotechnol**., v. 379, p. 1-5, 2024.

KIM, J. W. *et al*. Enhanced production of 2,3-butanediol by engineered *Saccharomyces cerevisiae* through fine-tuning of pyruvate decarboxylase and NADH oxidase activities. **Biotechnol. Biofuels**, v. 9, n. 265, 2016.

LATIF, M. *et al*. Microbial Co-Culturing Technique for the Production of Novel Bioactive Compounds in Drug Discovery. **Int. J. Soc. Health**, v. 3, n. 10, 2024.

LÓPEZ-LINARES, J. C. *et al*. Xylitol production by *Debaryomyces hansenii* and *Candida guilliermondii* from rapeseed straw hemicellulosic hydrolysate. **Bioresour. Technol.,** v. 247, p. 736-743, 2018.

MILESSI, T. S. *et al*. Xylooligosaccharides production chain in sugarcane biorefineries: From the selection of pretreatment conditions to the evaluation of nutritional properties. **Ind. Crops Prod**., v. 172, 2021.

MITTERMEIER, F. *et al*. Artificial microbial consortia for bioproduction processes. **Eng. Life Sci.**, v. 23, 2023.

RAMOS, M. D. N. *et al*. Magnetic Immobilization as a Tool for Efficient Recycling of Biocatalysts in Solid-Rich Medium During Consolidated Bioprocessing of Sugarcane Bagasse. **Biomass**, v. 6, n. 2, 2026.

SANTOS, J. R.; DIEL-RAMBO, M. K.; SCAPIN, E. Recent advances in xylitol production in biorefineries from lignocellulosic biomass: a review study. **Braz. J. Environ. Sci**., v. 59, n. e1814, 2024.

SUGIMURA, M. *et al*. Improved 2,3-butanediol Production Rate of Metabolically Engineered *Saccharomyces cerevisiae* by Deletion of RIM15 and Activation of Pyruvate Consumptiom Pathway. **Int. J. Mol. Sci.**, v. 24, n. 16378, 2023.

TINÔCO, D. Optimization of fermentation conditions as a metabolic strategy for the high-yield and high-selectivity bio-based 2,3-butanediol production. **J. Ind. Eng. Chem.**, v. 125, p. 345-359, 2023.

VOLLMER, N. I. *et al.* Life cycle assessment of na integrated xyliton biorefinery with value-added co-products. **Int. J. Life Cycle Assess.**, v. 28, p. 1155-1168, 2023.

Agradecimentos

O coquetel enzimático utilizado neste trabalho foi gentilmente cedido pelo CNPEM – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Número de Processos 2025/09424-5 e 2026/04269-4, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo 310753/2025-2 e 140340/2024-6.