

# ÁCIDOS ORGÂNICOS: PROPRIEDADES, MÉTODOS DE OBTENÇÃO E APLICAÇÕES EM INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SUSTENTÁVEIS

Organic acids: properties, methods of obtaining and applications in technological and sustainable innovations

Eduarda Campeol<sup>1</sup>, Fabiana De Oliveira Pereira<sup>1</sup>, Guilherme Antonio Mariga<sup>1</sup>, Marcos Luis Morgan<sup>1</sup>, Luiz Antônio Teixeira Pedott<sup>1</sup>, Laís Thomazoni<sup>2</sup>, Sabrina Duarte Camargo<sup>2</sup>, Jamile Zeni<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Discentes do Curso de Engenharia Química, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Brasil.

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Regional do Alto Uruguai e as Missões, Brasil. \*jamilenzi@uricer.edu.br

Data do recebimento: 08/03/2025 - Data do aceite: 06/05/2025

**RESUMO:** Os ácidos orgânicos são compostos químicos caracterizados pela presença de um ou mais grupos carboxila ( $-\text{COOH}$ ), desempenhando papéis fundamentais em processos biológicos e industriais. Esses compostos são amplamente utilizados em setores como alimentos, fármacos, biotecnologia e indústria química, com aplicações que vão desde conservantes e reguladores de pH até intermediários para a síntese de polímeros biodegradáveis. A produção de ácidos orgânicos pode ocorrer por rotas químicas convencionais ou por bioprocessos sustentáveis, como a fermentação microbiana, que se destaca pela utilização de substratos renováveis e menor impacto ambiental. Este artigo apresenta uma revisão abrangente sobre as propriedades, classificações, métodos de obtenção e aplicações dos principais ácidos orgânicos, abordando avanços tecnológicos e desafios na sua produção. Além disso, discute o potencial dessas substâncias para o desenvolvimento de novos produtos e processos sustentáveis, contribuindo para a inovação em diferentes setores industriais.

**Palavras-chave:** Ácidos Orgânicos. Fermentação Microbiana. Biotecnologia. Sustentabilidade. Indústria Química.

**ABSTRACT:** Organic acids are chemical compounds characterized by the presence of one or more carboxyl groups (-COOH), playing fundamental roles in biological and industrial processes. These compounds are widely used in sectors such as food, pharmaceuticals, biotechnology and the chemical industry, with applications ranging from preservatives and pH regulators to intermediates for the synthesis of biodegradable polymers. Organic acids can be produced by conventional chemical routes or by sustainable bioprocesses, such as microbial fermentation, which stands out for the use of renewable substrates and lower environmental impact. This article presents a comprehensive review of the properties, classification, methods of obtaining and applications of the main organic acids, addressing technological advances and challenges in their production. In addition, it discusses the potential of these substances for the development of new sustainable products and processes, contributing to innovation in different industrial sectors.

**Keywords:** Organic Acids. Microbial Fermentation. Biotechnology. Sustainability. Chemical Industry.

## Introdução

Os ácidos orgânicos são compostos químicos caracterizados pela presença de um ou mais grupos carboxila (-COOH) em sua estrutura, desempenhando papéis essenciais tanto em processos biológicos quanto industriais. Esses compostos estão amplamente distribuídos na natureza, encontrados em organismos vivos e em diversos substratos de origem vegetal e microbiana. Sua versatilidade permite aplicações em setores como indústria alimentícia, farmacêutica, química e biotecnológica, com usos que variam de conservantes e reguladores de pH a intermediários na síntese de polímeros biodegradáveis (Stavarache *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2023). Espera-se que a demanda por ácidos orgânicos cresça de forma constante a uma taxa de crescimento anual composta de 5,3%, com o mercado projetado para atingir US\$ 18,8 bilhões até 2032 (Tan *et al.*, 2025). Os ácidos orgânicos são altamente valorizados devido à sua solubilidade, biodegradabilidade,

de, higroscopicidade e capacidade de quelatar e tamponar, tornando-os adequados para várias aplicações industriais, como aditivos, intermediários farmacêuticos, produtos químicos finos e monômeros plásticos (Zhou *et al.*, 2023).

Dentre os principais ácidos orgânicos de interesse industrial, destacam-se o ácido cítrico, o ácido láctico, o ácido acético e o ácido succínico, que apresentam propriedades funcionais relevantes para a conservação de alimentos, síntese de bioplásticos e produção de solventes e intermediários químicos (Zhang *et al.*, 2023). Tradicionalmente, esses compostos são obtidos por processos químicos convencionais, a partir de derivados do petróleo, o que pode gerar impactos ambientais significativos. No entanto, o avanço da biotecnologia tem permitido a obtenção sustentável desses ácidos por fermentação microbiana, utilizando substratos renováveis e reduzindo a pegada de carbono da produção industrial (Muniz *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo revisar as principais propriedades, métodos de obtenção e aplicações dos

ácidos orgânicos, destacando seus impactos na inovação tecnológica e no desenvolvimento de processos sustentáveis. A crescente demanda por esses compostos, aliada ao avanço de metodologias biotecnológicas para sua produção, justifica a necessidade de um levantamento atualizado sobre suas potencialidades e desafios industriais. Além disso, esta revisão busca discutir o papel dos ácidos orgânicos na transição para uma economia mais sustentável, considerando alternativas para sua obtenção a partir de resíduos agroindustriais e fontes biológicas de baixo custo.

## Material e Métodos

O estudo consistiu em uma revisão bibliográfica realizada entre agosto e dezembro de 2024, visando analisar métodos de obtenção, propriedades e aplicações dos ácidos orgânicos. A pesquisa utilizou bases de dados, como Google Acadêmico, Scielo, Science Direct e ACS Publications. Os termos de busca incluíram processos e tecnologias de produção sustentável, fermentação microbiana e síntese química, com foco em ácidos como cítrico, láctico, acético e succínico.

## Resultados e Discussão

Os ácidos orgânicos constituem uma classe fundamental de compostos com ampla aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética, agrícola e energética. Este estudo aborda os principais tipos desses ácidos, suas propriedades, métodos de obtenção e aplicações industriais, destacando especialmente as rotas sustentáveis para sua produção a partir de biomassa. São comparados processos químicos convencionais e biotecnológicos, evidenciando avanços

tecnológicos voltados para a produção sustentável.

### Valorização da Biomassa na Produção de Ácidos Orgânicos

A crescente demanda por processos químicos mais sustentáveis tem direcionado esforços para a utilização da biomassa como fonte renovável e abundante de carbono na produção de ácidos orgânicos. Biomassa lignocelulósica, resíduos agroindustriais e subprodutos orgânicos representam matérias-primas promissoras para a síntese desses compostos por meio de métodos fermentativos, catalíticos e termoquímicos (Son *et al.*, 2022).

Em contraste com as rotas petroquímicas tradicionais, que dependem de recursos fósseis finitos e apresentam baixa eficiência atômica devido à complexidade das etapas químicas, como a clivagem seletiva de ligações C–C e C–H, a biomassa destaca-se por sua elevada razão oxigênio/carbono e pela diversidade de grupos funcionais. Essas características facilitam a conversão seletiva em ácidos orgânicos por processos mais limpos e economicamente viáveis (Liu *et al.*, 2023).

O desenvolvimento de estratégias catalíticas e biotecnológicas tem sido intensificado para otimizar a conversão da biomassa em ácidos de alto valor agregado, promovendo a química verde e contribuindo para a sustentabilidade industrial. Além disso, o uso de resíduos como insumos reduz custos e impactos ambientais, reforçando o potencial dessas rotas como alternativas competitivas frente aos métodos convencionais (Alves, 2020).

Nas próximas seções, serão apresentados os principais ácidos orgânicos de interesse industrial, com ênfase nos métodos de obtenção, sobretudo aqueles que envolvem a valorização da biomassa, destacando avanços recentes e aplicações tecnológicas.

## Ácidos Orgânicos

Os ácidos orgânicos abrangem uma diversidade de compostos com aplicações relevantes nas áreas alimentícia, farmacêutica, cosmética, agrícola e energética. Neste estudo, destacam-se o ácido cítrico, amplamente utilizado como acidulante e conservante; o ácido láctico, essencial para a produção de bioplásticos e formulações cosméticas; o ácido acético, empregado na fabricação de solventes e conservantes; o ácido succínico, precursor de polímeros biodegradáveis; e o ácido propiônico, com aplicações como conservante e insumo na síntese de plásticos.

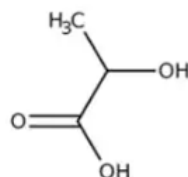
Outros ácidos abordados incluem o fumárico, butírico, húmico, xilônico e capróico, com usos diversos na química industrial, biotecnologia, produção de biocombustíveis e saúde. A variedade estrutural e funcional desses compostos impulsiona avanços em tecnologias limpas e estratégias voltadas à química verde.

### Ácido Láctico

A fórmula estrutural do ácido láctico ( $C_3H_6O_3$ ), ilustrada na Figura 1, mostra a disposição dos átomos que compõem essa substância. Em 2022, o mercado global de ácido láctico (LA) foi avaliado em US\$ 3,1 bilhões e esperava-se que se expandisse a um CAGR (taxa de crescimento anual composta) de 8,0% de 2023 a 2030 (Hu *et al.*, 2025). A produção industrial tradicional de LA é baseada principalmente em substratos ricos em carboidratos, como soro de leite, melão, resíduos de amido e sacarose, mas seu alto custo limita a expansão do setor (Song *et al.*, 2022). O ácido láctico (LA) é amplamente demandado para a produção de ácido polilático (PLA), um bioplástico sustentável que representa 25% do mercado (Lopez-Gómez; Pérez-Rivero; Venus, 2020; Thygesen *et al.*,

2021). A fermentação microbiana responde por 90% da produção, garantindo alta pureza enantiomérica. Fontes tradicionais como mandioca, cana-de-açúcar e milho são caras e competem com alimentos, incentivando o uso de biomassa lignocelulósica e resíduos alimentares. Microrganismos como *Lactobacillus* spp. são comumente empregados, possibilitando a produção sustentável de ácido láctico a partir desses substratos renováveis e abundantes (Chauhan *et al.*, 2024).

**Figura 1.** Fórmula estrutural do ácido láctico ( $C_3H_6O_3$ )



**Fonte:** Chemical Book (2025).

A produção envolve pré-tratamento, fermentação e purificação. O pré-tratamento remove inibidores e hidrolisa macromoléculas, enquanto a fermentação converte substratos em LA usando bactérias, leveduras e fungos (Lopez-Gómez; Pérez-Rivero; Venus, 2020). Vários microrganismos são utilizados, incluindo *Bacillus*, *Escherichia coli* e *Lactobacillus* (Abedi; Hashemi, 2020). A engenharia genética melhora a produtividade e a adaptação a substratos complexos (Din *et al.*, 2021; Kumar; Thakur; Panesar, 2019).

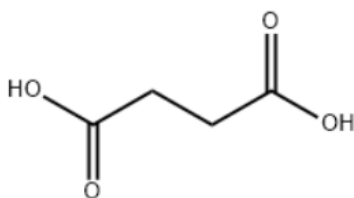
Reatores como Reatores de Leito Compactado (PBRs), Biorreatores de Leito Fibroso (FBBs) e Reatores de Membrana (MBRs) influenciam a fermentação. MBRs apresentam alta conversão, mas sofrem com incrustação, exigindo melhorias em materiais de membrana (Wang *et al.*, 2013). Diferentes modos de fermentação impactam a eficiência: processos contínuos são preferidos industrialmente, apesar de custos elevados (Zhang *et al.*, 2022a).

A separação e purificação do LA representam 40-60% dos custos. Métodos incluem extração, precipitação, eletrodialise e membranas, como nanofiltração (Papadopoulos *et al.*, 2023). A conversão de LA em ácidos graxos de cadeia média e sua aplicação no tratamento de águas residuais são estratégias promissoras (Tang *et al.*, 2024). A viabilização do PLA e dos poli-hidroxialcanoatos (PHAs) a partir de resíduos orgânicos pode reduzir custos e ampliar sua aplicação (Zhou *et al.*, 2023).

## Ácido Succínico

O ácido succínico ( $C_4H_6O_4$ ) é um ácido dicarboxílico amplamente utilizado nas indústrias agrícola, alimentícia e farmacêutica. Sua produção por fermentação microbiana remonta a 1546 (Zeikus *et al.*, 1999). Embora a maior parte da produção comercial seja realizada por processos químicos derivados do petróleo, a demanda por esse ácido tem crescido, especialmente devido ao seu uso na síntese de polímeros biodegradáveis (Willke; Vorlop, 2001). A estrutura química do ácido succínico é apresentada na Figura 2.

**Figura 2.** Fórmula estrutural do ácido succínico ( $C_4H_6O_4$ )



**Fonte:** Chemical Book (2025).

Atualmente, a produção fermentativa de ácido succínico tem ganhado destaque por utilizar açúcares provenientes da hidrólise de biomassa lignocelulósica, como resíduos agrícolas (bagaço de cana, palha de milho), oferecendo uma alternativa sustentável e

renovável frente às rotas petroquímicas tradicionais. Essa abordagem não só reduz o impacto ambiental, como também abre possibilidades para produção em escala industrial com menor custo e pegada de carbono (Zhong *et al.*, 2024).

Entre os microrganismos estudados para essa produção fermentativa, destacam-se *Anaerobiospirillum succiniciproducens* (Jabalquinto *et al.*, 2004), *Actinobacillus succinogenes* (Urbance *et al.*, 2004) e *Mannheimia succiniciproducens* MBEL55E (Lee; Upare; Chang, 2002). Além disso, há esforços para desenvolver cepas recombinantes de *Escherichia coli* com maior capacidade produtiva em condições aeróbicas e anaeróbicas (Zhou *et al.*, 2024). A produção fermentativa envolve etapas de cultivo, fermentação e purificação, sendo esta responsável por mais de 60% dos custos (Daniel, 1995). Técnicas como eletrodialise, precipitação de sais e proteção reativa com aminas hidrofóbicas têm sido utilizadas, sendo esta última a mais eficiente, alcançando pureza de 99,76% e rendimento de 73,09% (Hyohak; Lee, 2006).

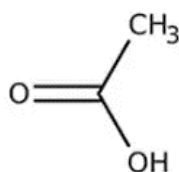
No futuro, a engenharia metabólica poderá aprimorar a produção por meio da manipulação genética, otimizando o metabolismo e minimizando a formação de subprodutos. Além disso, avanços nas condições de fermentação e purificação poderão reduzir custos, tornando a produção fermentativa do ácido succínico uma alternativa mais viável e sustentável, atendendo à crescente demanda e contribuindo para a redução das emissões de  $CO_2$  (Hyohak; Lee, 2006).

## Ácido acético

O ácido acético ( $CH_3COOH$ ) é um ácido carboxílico importante, amplamente utilizado em produtos como tintas, plásticos, adesivos e alimentos. Sua estrutura química é apresentada na Figura 3. A produção de ácido

acético ocorre, atualmente, principalmente por carbonilação do metanol (processo Cativa), que envolve a reação do metanol com monóxido de carbono na presença de um catalisador à base de metal (Cheung; Tanke; Torrence, 2012).

**Figura 3.** Fórmula estrutural do ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )



Fonte: ChemSpider (2025).

No entanto, esse processo possui um potencial de aquecimento global de 1 kg  $\text{CO}_2$  eq./kg de ácido acético, a produção global de ácido acético contribuiu com aproximadamente 13,45 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$  eq. em 2013. A produção de ácido acético a partir de biomassa poderia ser uma alternativa mais sustentável, caso seja economicamente viável (Morales-Vera *et al.*, 2020). Além das preocupações ambientais, a crescente demanda por ácido acético reforça a necessidade de rotas de produção mais sustentáveis. Estima-se que a demanda global por ácido acético aumentou consideravelmente nos últimos anos, passando de 6 milhões de toneladas em 2000 para 12 milhões de toneladas em 2014, com expectativa de alcançar 16 milhões de toneladas em 2020 e um crescimento anual médio de 4,9% (Gbi Research, 2020).

O mercado de ácido acético de base biológica deverá crescer acima de 4% ao ano nos próximos cinco anos, impulsionado pelo aumento nos preços do petróleo, pela demanda crescente no mercado de monômero de acetato de vinila (VAM) de base biológica e por regulamentações ambientais mais rigoro-

sas. O desenvolvimento de novas tecnologias de separação para aumentar a eficiência de produção pode abrir oportunidades para o mercado (Morales-Vera *et al.*, 2020).

Nesse contexto, estudos tecnoeconômicos (TEA) sobre biocombustíveis a partir de biomassa têm sido realizados nos últimos vinte anos (Pratto; Dos Santos-Rocha; Longati, 2020). Embora estudos sobre biocombustíveis tenham sido conduzidos nas últimas duas décadas, apenas recentemente análises similares foram aplicadas a produtos químicos de base, como o ácido acético (Yu; Tsai, 2020). No entanto, ainda não há estudos TEA publicados sobre a produção de ácido acético via bioconversão de biomassa celulósica (Morales-Vera *et al.*, 2020).

As aplicações industriais do ácido incluem a fabricação de tintas, plásticos, adesivos e produtos alimentícios, sendo o ácido acético bio-based uma alternativa sustentável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência do petróleo. Nos parâmetros operacionais, a extração líquido-líquido (LLE) é realizada com os solventes acetato de etila e alamina (diluída em querosene). A eficiência energética e a viabilidade econômica foram avaliadas considerando diferentes fontes de energia, como lignina e gás natural (Morales-Vera *et al.*, 2020).

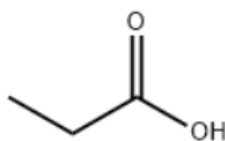
## Ácido propiônico

Entre os ácidos graxos de cadeia curta com aplicações industriais diversas, destaca-se o ácido propiônico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ ), conhecido por sua versatilidade e segurança para consumo humano (Kagliwal *et al.*, 2013). Sua estrutura química, apresentada na Figura 4, ilustra sua composição.

No setor alimentício, atua como conservante e inibidor de mofo, enquanto na indústria cosmética e de plásticos é usado em perfumes e materiais derivados de celulose.

Além disso, tem aplicações em medicamentos, herbicidas e produtos veterinários (Yang *et al.*, 2018). Dada a ampla gama de aplicações, a demanda global por ácido propiônico tem crescido continuamente, atingindo 470.000 toneladas em 2019, com previsão de alcançar 550.000 toneladas até 2026 (Atasoy; Cetecioglu, 2021). Entretanto, a produção tradicional baseada em rotas petroquímicas, como os processos de Reppe e Larson, levanta preocupações ambientais crescentes (Gonzalez-Garcia *et al.*, 2017), o que têm impulsionado a busca por métodos fermentativos (Wang; Jin; Yang, 2011). Essas questões têm impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis, como os métodos fermentativos, que utilizam microrganismos como *Propionibacterium*, *Clostridium* e *Fusobacterium*, sendo o primeiro o mais eficiente na conversão de substratos agrícolas em ácido propiônico (Sabra; Dietz; Zeng, 2013).

**Figura 4.** Fórmula estrutural ácido propiônico ( $C_3H_6O_2$ )



**Fonte:** Chemical Book (2025).

Nesse cenário, rotas fermentativas têm se destacado como alternativa sustentável, embora apresentem desafios técnicos significativos, como baixos rendimentos e altos custos de purificação (Gonzalez-Garcia *et al.*, 2017). Para superar essas limitações, diferentes estratégias vêm sendo exploradas, incluindo fermentações contínuas, semicontínuas e com células imobilizadas (Yang *et al.*, 1994). Abordagens inovadoras, como o uso de co-culturas e processos em duas etapas, nos quais *Lactobacillus plantarum* converte substratos em ácido láctico, posteriormente

transformado em ácido propiônico, também têm demonstrado potencial promissor em termos de sustentabilidade e eficiência (Zhao *et al.*, 2022).

Para superar esses obstáculos, diversas estratégias de otimização têm sido investigadas, incluindo pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos que visam aumentar os rendimentos na produção de ácido propiônico (Luo *et al.*, 2015). Métodos combinados, como ultrassom e enzimas, podem elevar a produtividade em até 700% (Li *et al.*, 2016). Contudo, a separação e purificação do ácido propiônico ainda representam desafios, indicando a necessidade de novas abordagens, incluindo sua aplicação direta em processos industriais e ambientais. Estudos futuros devem focar na sustentabilidade e viabilidade econômica do processo por meio de análises de ciclo de vida (LCA).

## Ácido Húmico

A compostagem é uma prática amplamente aceita na reciclagem de resíduos agrícolas, promovendo a transformação da matéria orgânica em um composto estabilizado, evitando os problemas da aplicação direta, como a fitotoxicidade (Guidoni *et al.*, 2013). Durante a compostagem, parte da matéria é convertida em  $CO_2$ , e outra parte em substâncias húmicas, compostas por huminas e ácidos húmicos e fúlvicos, que têm papel essencial em processos ambientais e na estrutura do solo (Soares *et al.*, 2017).

Diferentemente dos ácidos orgânicos clássicos, o ácido húmico e fúlvico não possuem fórmula estrutural ou molecular definida, pois tratam-se de misturas complexas de macromoléculas heterogêneas resultantes da degradação avançada da matéria orgânica durante o processo de humificação (Cardoso *et al.*, 2023).

Na agricultura, substâncias húmicas agem como bioestimulantes, auxiliando na

absorção de nutrientes e na melhoria das características físicas e químicas do solo, promovendo o crescimento das plantas (Baldotto; Baldotto, 2014; Caron *et al.*, 2015). Os bioestimulantes vegetais abrangem diversas substâncias e microrganismos e têm se consolidado no mercado de insumos agrícolas. Na Europa, bioestimulantes são definidos como substâncias aplicadas ao solo que melhoram a absorção de nutrientes e a resistência ao estresse, sem atuar como pesticidas (European Biostimulants Industry, 2012). Já na América do Norte, são descritos como substâncias naturais que promovem o desenvolvimento vegetal sem apresentar garantias nutricionais (Soares *et al.*, 2017).

Dentre os ácidos orgânicos aplicados na agricultura, o ácido húmico destaca-se como um importante componente bioativo entre os ácidos orgânicos aplicados na agricultura, devido à sua capacidade de melhorar a qualidade e produtividade do solo. Derivado da degradação da matéria orgânica, ele desempenha um papel significativo na estruturação do solo ao promover a formação de agregados, que aumenta a porosidade e a capacidade de retenção de água, o que é essencial para o crescimento saudável das plantas (Caron *et al.*, 2015). Além disso, o ácido húmico aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, facilitando a disponibilidade e a absorção de nutrientes essenciais, como cálcio, fósforo e potássio, pelas plantas (Baldotto; Baldotto, 2014). Sua aplicação como bioestimulante natural promove o desenvolvimento radicular e a absorção de micronutrientes, ajudando as plantas a tolerar estresses abióticos, como seca e salinidade, e contribuindo para a sustentabilidade agrícola ao reduzir a necessidade de fertilizantes sintéticos (Calvo; Nelson; Kloepper, 2014). Esses efeitos positivos fazem do ácido húmico uma alternativa eficiente para práticas agrícolas mais sustentáveis. (Soares *et al.*, 2017)

Atualmente, os ácidos húmicos comerciais são extraídos de fontes de carbono não

renováveis, como turfa e carvão. No entanto, resíduos sólidos da agricultura, ricos em nutrientes, podem ser convertidos em produtos comerciais por fermentação. Fungos filamentosos, como os do gênero *Trichoderma*, têm capacidade de crescer em condições de baixa umidade, tornando a fermentação em estado sólido (SSF) uma alternativa promissora (Couto; Sanromán, 2006).

A compostagem também é uma solução ambientalmente amigável para reutilizar a palha de arroz, convertendo seus materiais celulósicos em substâncias húmicas por meio da ação de microrganismos, resultando em fertilizantes orgânicos ricos em ácido húmico e microrganismos benéficos (Lv *et al.*, 2013). Esses biofertilizantes não apenas melhoram a fertilidade do solo e promovem o crescimento das plantas, mas também desempenham papéis importantes na biorremediação do solo e na captura de carbono, ajudando a combater a erosão e a melhorar o teor de nutrientes do solo (Zhang; He, 2024). Apesar da ampla adoção da compostagem, ainda há lacunas no conhecimento sobre a relação entre microrganismos e a biossíntese do ácido húmico (Qian *et al.*, 2014).

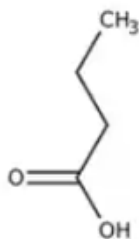
Além disso, a busca por rotas biotecnológicas para a produção de ácidos húmicos a partir de biomassa renovável tem ganhado destaque, combinando avanços em fermentação sólida, engenharia metabólica e bioprocessos para viabilizar produtos mais sustentáveis e economicamente competitivos. O desenvolvimento dessas tecnologias representa um importante avanço para a bioeconomia, ao transformar resíduos agrícolas em insumos de alto valor agregado, reduzindo a dependência de fontes fósseis e promovendo a circularidade dos recursos na agricultura.

## Ácido Butírico

O ácido butírico ( $C_4H_8O_2$ ) é um ácido graxo volátil de cadeia curta, cuja estrutura

química é apresentada na Figura 5. Ele possui diversas aplicações industriais, abrangendo os setores químico, têxtil, alimentício e farmacêutico (Zhang *et al.*, 2009). Além disso, apresenta potencial para a produção de plásticos biodegradáveis (Albuquerque *et al.*, 2011), biocombustíveis e butanol (Lee *et al.*, 2014).

**Figura 5.** Fórmula estrutural ácido butírico ( $C_4H_8O_2$ )



**Fonte:** Fisher Scientific (2025).

Atualmente, a produção industrial de ácido butírico é predominantemente realizada por processos petroquímicos (Dwidar *et al.*, 2012; Ai *et al.*, 2016). Esse método baseia-se na síntese química, que envolve a oxidação do butiraldeído, obtido a partir do propileno derivado do petróleo via oxossíntese (Cascone, 2008). O ácido resultante é utilizado, por exemplo, na produção de acetato de celulose butirato, cujo mercado global está estimado em 80.000 toneladas por ano, com preço aproximado de US\$1,8/kg (Jiang *et al.*, 2018). A preferência por essa rota deve-se ao baixo custo e à ampla disponibilidade das matérias-primas petroquímicas (Dwidar *et al.*, 2012).

Outra via de obtenção do ácido butírico é a extração a partir da manteiga, que contém entre 2% e 4% desse composto. Contudo, devido à complexidade e aos custos elevados desse processo, ele é inviável em comparação com a síntese química (Zigova; Šturdík, 2000).

Nesse contexto, a fermentação surge como uma alternativa promissora, apesar de ainda mais dispendiosa. Essa rota vem ganhando interesse frente à demanda crescente por produtos naturais e orgânicos, além do aumento contínuo dos preços do petróleo, insumo essencial para a síntese química (Dwidar *et al.*, 2012).

A fermentação para produção de ácido butírico pode ser realizada por diferentes gêneros bacterianos, com destaque para as cepas do gênero *Clostridium*, que são preferidas em aplicações industriais devido à sua alta produtividade e capacidade de alcançar concentrações elevadas do ácido. Entre as cepas mais estudadas para produção em escala industrial estão *C. butyricum* (He *et al.*, 2005), *C. tyrobutyricum* (Jiang *et al.*, 2010) e *C. thermobutyricum* (Canganella; Wiegel, 2000).

Dessas, *C. tyrobutyricum* é considerada a mais promissora por sua alta seletividade na produção de ácido butírico e tolerância a concentrações elevadas do composto. No entanto, sua capacidade fermentativa é limitada a poucos substratos, como glicose, xilose, frutose e lactato, e sua eficiência com manitol e glicerol ainda é incerta (Dwidar *et al.*, 2012).

Por outro lado, *C. butyricum* consegue metabolizar uma ampla variedade de fontes de carbono, incluindo hexoses, pentoses, glicerol, lignocelulose, melaço, amido de batata e permeado de soro de queijo (He *et al.*, 2005), embora seus rendimentos de ácido butírico sejam inferiores aos de *C. tyrobutyricum* (Dwidar *et al.*, 2012). Já *C. thermobutyricum* apresenta um perfil intermediário, fermentando glicose, frutose, maltose, xilose, ribose, celobiose e alguns açúcares oligoméricos e poliméricos, embora não utilize sacarose ou amido (Wiegel; Kuk; Kohring, 1989; Dwidar *et al.*, 2012).

É importante destacar que a fermentação com biomassa lignocelulósica ou resíduos

agrícolas representa uma rota sustentável para a produção de ácido butírico, alinhando-se com as tendências atuais de bioeconomia e economia circular. O desenvolvimento de processos fermentativos que utilizem substratos renováveis, como resíduos agroindustriais, é um campo em expansão que pode reduzir custos e impactos ambientais (Fu *et al.*, 2017).

Além disso, o ácido butírico tem ganhado atenção pelos seus benefícios à saúde humana e animal, o que incentiva pesquisas para aumentar sua produção natural no cólon por microrganismos endógenos ou introduzidos (Borycka-Kiciak; Banasiewicz; Rydzewska, 2017). Ele possui propriedades anticancerígenas e já é amplamente utilizado como suplemento alimentar para melhorar a saúde animal (Wang *et al.*, 2019).

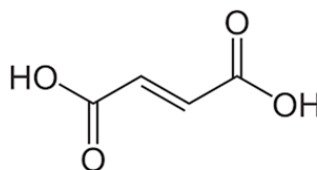
Dessa forma, a produção fermentativa do ácido butírico a partir de biomassa e resíduos orgânicos não só contribui para a sustentabilidade do processo industrial, como também atende a uma crescente demanda por compostos bioativos naturais, tornando-se uma estratégia promissora para o futuro da indústria química e de biotecnologia.

## Ácido Fumárico

O ácido fumárico ( $C_4H_4O_4$ ) é um ácido dicarboxílico (conforme Figura 06), amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, química, agrícola e farmacêutica devido à sua estrutura multifuncional, permitindo aplicações em resinas, plastificantes e como acidulante alimentar (Maris *et al.*, 2004). A demanda global por ácido fumárico ultrapassou 300 kt em 2020 (Papadaki *et al.*, 2017). Sua produção ocorre predominantemente por isomerização do ácido maleico, embora a fermentação microbiana seja uma alternativa sustentável (Ilica *et al.*, 2019).

Metabolicamente, o ácido fumárico é sintetizado por três vias principais: (i) o ramo redutivo do ciclo do TCA, que apresenta rendimento teórico de 2 mol/mol de glicose (Song; Lee, 2006); (ii) o ciclo oxidativo do TCA, com rendimento de 1 mol/mol de glicose, mas suscetível à conversão indesejada em ácido L-málico (Huan *et al.*, 2018); e (iii) a rota do glioxilato, com potencial metabólico curto, mas inibição em meios ricos em glicose (Li *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015). Além disso, o metabolismo de aminoácidos e ácidos graxos influencia a produção (Yu *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2015).

Figura 6. Fórmula estrutural ácido fumárico ( $C_4H_4O_4$ )



Fonte: ChemicalBook (2025).

O transporte do ácido fumárico ocorre por difusão passiva e transportadores específicos, como o gene *Spmae1* em *Schizosaccharomyces pombe* (Chen; Zhu; Liu, 2016). O controle morfológico dos fungos, como *Rhizopus arrhizus*, é essencial para otimizar a produção industrial (Papadaki *et al.*, 2017). Agentes neutralizantes, como  $Na_2CO_3$  e  $(NH_4)_2CO_3$ , são investigados para controle de pH e separação de biomassa (Riscaldati *et al.*, 2000).

Parâmetros como temperatura, íons metálicos, oxigênio dissolvido e pH são críticos para a fermentação. Íons como  $Mg^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  promovem a síntese de ácido fumárico, enquanto estratégias de controle de oxigênio dissolvido aumentam a produção, apesar da formação de subprodutos (Mondala, 2015). O pH ideal gira em torno de 6, e estratégias como fermentação a pH baixo ou remoção

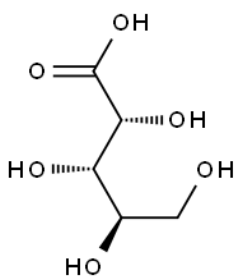
*in situ* são adotadas (Riscaldati *et al.*, 2000; Cao *et al.*, 1996; Maris *et al.*, 2004).

A crescente demanda por soluções ecológicas tem impulsionado o desenvolvimento de processos biotecnológicos para a produção de ácido fumárico, utilizando matérias-primas renováveis, como resíduos agrícolas e materiais ricos em celulose, hemicelulose e lignina. Técnicas inovadoras de engenharia metabólica e otimização de processos fermentativos, tanto em estado sólido (SSF) quanto líquido, têm mostrado grande potencial para substituir rotas petroquímicas tradicionais, reduzindo custos e impactos ambientais (Liu *et al.*, 2019).

## Ácido Xilônico

O ácido xilônico, também conhecido como ácido xilárico, é um ácido orgânico de cinco carbonos com a fórmula química  $C_5H_{10}O_6$ , cuja fórmula estrutural é demonstrada na Figura 07.

**Figura 7.** Fórmula estrutural ácido fumárico ( $C_4H_4O_4$ )



**Fonte:** ChemicalBook (2025).

Ele é obtido a partir da oxidação da xilose, um monossacarídeo presente em biomassa lignocelulósica, como o bagaço de cana-de-açúcar. A produção de ácido xilônico pode ser realizada por meio de processos enzimáticos utilizando glicose oxidase, uma enzima derivada de *Aspergillus niger*. Este processo

é considerado uma alternativa promissora para a obtenção de compostos de alto valor agregado a partir de biomassa lignocelulósica (Cunha *et al.*, 2020).

Além disso, linhagens de leveduras recombinantes como *Komagataella phaffii* (*Pichia pastoris*) e *Saccharomyces cerevisiae* podem ser utilizadas para a produção de ácido xilônico a partir de xilose presente em hidrolisados de biomassa de cana-de-açúcar (Embrapa, 2022).

O ácido xilônico possui diversas aplicações industriais, incluindo seu uso como dispersante em cimento, agente complexante de íons metálicos, clarificante de poliolefinas, antibiótico, aditivo para melhorar a absorção de vitamina C, e na redução de acrilamida em alimentos cozidos (Embrapa, 2022).

Ele também pode ser utilizado como substituto do ácido glucônico em produtos não alimentícios, como fabricação de biopesticidas e branqueamento de têxteis (Embrapa, 2022). Além disso, o ácido xilônico pode ser um precursor para a produção de ácido lático por meio de processos de fermentação utilizando microrganismos como *Weizmannia* sp. (Instituto de Biociências, 2023).

A xilose é uma pentose abundante nas paredes celulares das plantas, especialmente na hemicelulose. Ela é extraída de materiais lignocelulósicos como madeira, palha de cereais e resíduos agrícolas. A xilose também pode ser obtida através de hidrólises. Na hidrólise ácida, os materiais lignocelulósicos são tratados com ácidos fortes, como ácido sulfúrico, resultando na quebra da hemicelulose e liberação de xilose (Jin *et al.*, 2022).

Após a hidrólise, a solução ácida é neutralizada e purificada. A hidrólise enzimática utiliza enzimas, como xilanases, para degradar a hemicelulose em condições moderadas, resultando na liberação de xilose (Jin *et al.*, 2022).

O ácido xilônico, resultante da oxidação biológica da xilose extraída de biomassas lignocelulósicas, tem se destacado como um composto plataforma promissor, com aplicações equivalentes às do ácido glucônico. Avanços recentes exploram o uso do próprio ácido xilônico como catalisador no pré-tratamento da biomassa, integrando-o em processos biorrefinários sustentáveis (Zhou; Xu, 2019). Além disso, métodos inovadores de cristalização direta a partir de caldos fermentativos têm aprimorado sua purificação, representando um avanço significativo para sua viabilização industrial (Lv *et al.*, 2024).

## Ácido Capróico

A fermentação anaeróbica pode ser aplicada para criar produtos de valor agregado a partir de biomassas, como resíduos orgânicos, especialmente usando fontes de carbono ricas em proteínas, lipídios e carboidratos (Agler *et al.*, 2011).

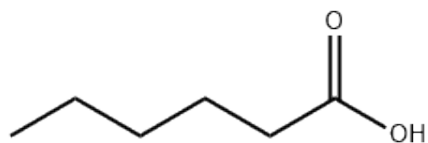
Um produto de destaque é o ácido n-caproico ( $C_6H_{12}O_2$ ), um ácido carboxílico de cadeia média com seis carbonos (conforme Figura 8), que pode substituir sua produção petroquímica tradicional por meio de fermentação anaeróbica de substratos biodegradáveis (Ge *et al.*, 2015). Esse ácido é usado como antimicrobiano (Wasewar, 2012), aditivo alimentar (Serhan; Mattar; Debs, 2016) e precursor de biocombustíveis (Cavalcante *et al.*, 2017).

Para a produção de ácido n-caproico via fermentação anaeróbica, o etanol sozinho não fornece energia suficiente na forma de ATP, exigindo uma fonte externa de energia para iniciar o processo de alongamento da cadeia de ácido carboxílico (Thauer *et al.*, 1968). Parte do etanol é oxidada em ácido acético para fornecer essa energia inicial (Ge *et al.*, 2015). Além disso, a produção de ácido n-caproico é possível utilizando apenas o etanol como fonte de carbono, pois o processo de oxidação libera aceptores de elétrons essenciais para o alongamento da cadeia (Angenent *et al.*, 2016; Cavalcante *et al.*, 2017).

Diversos microrganismos, além de *Clostridium kluyveri*, como *Clostridium sp.* (Jeon *et al.*, 2010) e *Megasphaera elsdenii* (Choi *et al.*, 2013), também produzem ácido n-caproico. O uso de culturas abertas em vez de culturas puras traz vantagens, pois permitem substratos não esterilizados e produzem mais metabólitos devido à diversidade bacteriana (Spirito *et al.*, 2014).

Para otimizar a produção de ácido n-caproico, é necessário controlar o pH e o substrato no biorreator. Estudos com etanol e ácido acético em filtros anaeróbicos (AF) encontraram boas taxas de produção em pH neutro, enquanto outros usaram pH ácido, exigindo sistemas de extração contínuos devido ao acúmulo de ácidos carboxílicos de cadeia média, que podem inibir o processo (Ge *et al.*, 2015). Alternativamente, o ácido láctico pode ser um doador de elétrons no lugar do etanol (Cavalcante *et al.*, 2017).

**Figura 8.** Fórmula estrutural ácido n-caproico ( $C_6H_{12}O_2$ )



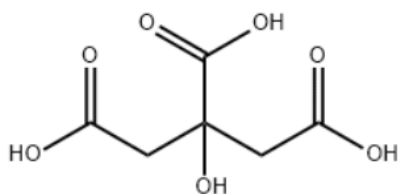
Fonte: ChemicalBook (2025).

## Ácido Cítrico

O ácido cítrico ( $C_6H_8O_7$ ) é um ácido fraco tricarboxílico natural presente em frutas cítricas, especialmente no limão, e amplamente utilizado na indústria alimentícia devido às suas propriedades antioxidantes, acidulantes e reguladoras de acidez. Sua fórmula estru-

tural, apresentada na Figura 09, ilustra sua composição molecular. Embora descoberto no século VIII e isolado em 1784 a partir do citrato de cálcio do limão, atualmente mais de 90% do ácido cítrico é produzido por fermentação microbiana utilizando *Aspergillus niger*, o que representa uma rota sustentável e economicamente viável (Scopel *et al.*, 2017).

**Figura 9.** Fórmula estrutural ácido cítrico ( $C_6H_8O_7$ )



**Fonte:** ChemicalBook (2025).

O desenvolvimento de processos fermentativos que utilizam resíduos agroindustriais e biomassas lignocelulósicas como substratos, incluindo melaço, cascas de frutas e glicerina bruta, tem se mostrado promissor para aumentar a sustentabilidade da produção, além de reduzir custos e impactos ambientais (Camargo *et al.*, 2019). Em particular, linhagens fúngicas adaptadas podem fermentar esses resíduos com bom rendimento, como demonstrado pelo uso de glicerina de dendê e soja para produção de até 17,5 g/L de ácido cítrico (Carmo *et al.*, 2023).

Na indústria alimentícia, o ácido cítrico atua como conservante e regulador de pH, sendo eficaz na preservação da coloração e frescor de produtos como linguiças refrigeradas, embora com limitações na prevenção da oxidação lipídica (Carmo *et al.*, 2023).

Além de seu papel consolidado em alimentos, o ácido cítrico é fundamental na agricultura para melhorar a absorção de micronutrientes e o manejo da alcalinidade do solo (Pérez-Labrada *et al.*, 2016), assim como em formulações de pesticidas e herbicidas,

atuando como dispersante ecologicamente correto (Muñoz-Villa *et al.*, 2014).

No setor industrial, os sais de ácido cítrico, os citratos, são largamente empregados em detergentes biodegradáveis, produtos cosméticos e farmacêuticos, além de estarem ganhando destaque na nanotecnologia para a modificação ambientalmente amigável de nanotubos de carbono (Muñoz-Villa *et al.*, 2014).

O crescimento anual da produção global, superior a 5%, e a demanda crescente por processos mais econômicos e sustentáveis impulsionam pesquisas focadas na otimização de bioprocessos e no uso de matérias-primas renováveis, reafirmando o ácido cítrico como um insumo estratégico de alta relevância científica e tecnológica (Magalhães *et al.*, 2019; Show *et al.*, 2015).

## Ácido Oxálico

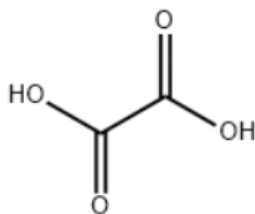
O ácido oxálico, com fórmula química  $C_2H_2O_4$ , é amplamente encontrado em plantas, microrganismos e animais, desempenhando papéis fundamentais tanto no metabolismo quanto em processos industriais. Sua fórmula estrutural é apresentada na Figura 10.

O ácido oxálico desempenha papéis essenciais em diferentes organismos. Em plantas, regula o cálcio e promove a detoxificação de metais pesados, além de participar da defesa contra patógenos (Li *et al.*, 2022). Nos microrganismos, é utilizado para captação de nutrientes e resistência a metais, componente essencial na degradação de madeira e intemperismo mineral (Grąz *et al.*, 2023). Em animais, contribui para a fagocitose e absorção de íons metálicos, reforçando sua relevância biológica (Amenaghawon *et al.*, 2024).

A produção global de ácido oxálico é significativa, com previsão de crescimento constante devido à sua demanda em setores como

farmacêutico, têxtil e metalúrgico. Estima-se que o mercado global atinja US\$1,55 bilhão até 2033, com a Ásia liderando o consumo, especialmente China, Índia e Japão (Kaitwade, 2023). As aplicações industriais incluem seu uso como agente quelante, tamponante e esterilizante em medicamentos (Schuler *et al.*, 2021), na recuperação de metais como ferro e alumínio (Cam; Turan, 2023), e na indústria química para formulações e limpeza (Rouquette; Petranikova; Vieceli, 2023). A produção tradicional de ácido oxálico envolve a oxidação de carboidratos, olefinas e monóxido de carbono, processos que utilizam reagentes como ácido nítrico e ácido sulfúrico em condições severas de alta temperatura e pressão (Sobus; Czekaj, 2023). Embora eficientes, esses métodos apresentam desvantagens relacionadas ao impacto ambiental e altos custos operacionais (Amenaghawon *et al.*, 2024).

**Figura 10.** Fórmula estrutural ácido oxálico ( $C_2H_2O_4$ )



Fonte: ChemicalBook (2025).

Os avanços recentes incluem rotas bioquímicas mais sustentáveis, como fermentação microbiana. Microrganismos como *Aspergillus niger*, *Penicillium oxalicum* e *Sclerotium rolfsii* têm sido utilizados para produzir ácido oxálico a partir de substratos renováveis, como resíduos lignocelulósicos, melaço de beterraba e cascas de abacaxi (Zhang *et al.*, 2020). Esses processos são favorecidos por sua compatibilidade ambiental e menor consumo de energia (Amenaghawon *et al.*, 2024).

A recuperação do ácido oxálico é um dos principais desafios, representando até 70% do custo operacional devido à natureza diluída e à baixa volatilidade do ácido (Demmelmayr *et al.*, 2023). Métodos como precipitação química, extração líquido-líquido e separação por membranas são utilizados. A precipitação com cálcio é amplamente aplicada devido à alta pureza do produto obtido (Varriale; Ulber, 2023). Solventes sustentáveis, como tmDES, mostram-se promissores para extração líquido-líquido, devido à eficiência e ao menor impacto ambiental (Lopez-Porfiri; Gonzalez-Miquel, 2020; Amenaghawon *et al.*, 2024). A separação por membranas, como osmose reversa e eletrodialise, apresentam vantagens em seletividade e adaptabilidade, mas enfrenta desafios técnicos, como incrustações e altos custos de manutenção (Hülber-Beyer; Bélafi-Bako; Nemestothy, 2021). Diltz *et al.* (2007), demonstraram que a osmose reversa pode alcançar mais de 95% de remoção de carbono orgânico de caldos fermentativos, destacando seu potencial em sistemas integrados.

Os métodos bioquímicos e a valorização de resíduos como substratos têm se mostrado fundamentais para a produção sustentável de ácido oxálico. Além disso, a integração de tecnologias, como nanofiltração e tmDES, pode promover uma recuperação mais eficiente e econômica, favorecendo a competitividade do ácido oxálico no mercado global (Amenaghawon *et al.*, 2024).

## Ácido Fúlvico

O ácido fúlvico (FvA) é uma subclasse das substâncias húmicas formadas pela degradação da matéria orgânica por microrganismos (Senesi; Loffredo, 1999). Ele apresenta menor peso molecular, maior solubilidade e mais grupos carboxílicos em comparação com outras substâncias húmicas (Winkler; Ghosh, 2018). Sua estrutura, composta por

compostos fenólicos, quinonas e benzeno carboxílico (Wershaw; Pinckney; Booker, 1977), pode variar conforme a localização geográfica, influenciada por elementos como oxigênio, nitrogênio e carbono (Gerahdt *et al.*, 2022).

Assim como o ácido húmico, o ácido fúlvico não possui fórmula química ou estrutural definida, pois ambos são constituídos por misturas complexas de macromoléculas orgânicas formadas durante o processo de humificação. Essas substâncias apresentam ampla variedade de grupos funcionais como carboxilas, fenóis e quinonas, e sua composição varia de acordo com a origem do material e as condições ambientais. Por essa razão, são considerados componentes polidispersos das substâncias húmicas, sem estrutura química única representável (Cardoso *et al.*, 2023).

A obtenção do ácido fúlvico ocorre, principalmente, por meio da extração e purificação das substâncias húmicas presentes em solos, turfas e resíduos agrícolas, utilizando processos de solventes aquosos e técnicas de precipitação (Anielak *et al.*, 2025). A degradação microbiana da biomassa orgânica é essencial para a formação natural do ácido fúlvico, o que tem incentivado o desenvolvimento de métodos biotecnológicos para acelerar e otimizar sua produção em escala industrial, promovendo uma abordagem mais sustentável e ambientalmente amigável (Rasool; Irfan, 2024).

Os ácidos fúlvicos possuem peso molecular entre 500 e 2000 Da e apresentam grupos funcionais como carboxila, hidroxila e carbonila (Gaffney; Marley; Clark, 1996). Suas propriedades impactam diretamente o desenvolvimento das plantas, promovendo crescimento e aumentando a produtividade agrícola (Du Jardin, 2015). Eles atuam como bioestimulantes, melhoram a absorção de nutrientes e reduzem a fixação de fosfatos

no solo (Claudino, 2021). Aplicações foliares de FvA demonstraram efeitos positivos no crescimento de plantas e na germinação de sementes (Katkat *et al.*, 2009).

Estudos comparativos entre solos israelenses e italianos revelaram semelhanças nas características químicas do FvA, mas diferenças no teor de nitrogênio e carbono (Souza *et al.*, 2022). Apesar de seu potencial para a saúde cardiovascular, ainda não há reconhecimento amplo pela comunidade médica, sendo necessário mais embasamento científico (Shikalgar; Naikwade, 2018). O FvA tem demonstrado propriedades antioxidantes protetoras contra isquemia e cardiotoxicidade por doxorrubicina, preservando antioxidantes celulares e reduzindo o estresse oxidativo (Gerahdt *et al.*, 2022).

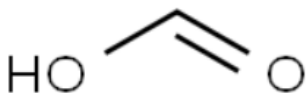
Além disso, o FvA possui ação anti-inflamatória, podendo aliviar sintomas de alergias e doenças respiratórias (Winkler; Ghosh, 2018). Ele também é reconhecido por suas propriedades antivirais, com potencial aplicação em pacientes com SARS-CoV-2, embora mais estudos sejam necessários para confirmar esse efeito (Souza *et al.*, 2022).

## Ácido fórmico

O ácido fórmico ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ) é uma alternativa sustentável às fontes fósseis devido à sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e segurança no armazenamento (Supronowicz *et al.*, 2015). Sua aplicação inclui a produção de compostos químicos, solventes e aditivos para rações (Bulushev; Ross, 2018).

Sua volatilidade permite usos na indústria têxtil, de couro e borracha (Chen *et al.*, 2023). Além disso, é empregado na preservação de rações, coagulação de látex e tratamento de gases residuais (Oswald *et al.*, 2018). A Figura 11 ilustra sua estrutura química simples e funcional, representativa de compostos monocarboxílicos de cadeia curta.

**Figura 11.** Fórmula estrutural ácido fórmico ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ )



Fonte: ChemicalBook (2025).

Como transportador de energia, o ácido fórmico apresenta alta densidade energética e potencial para substituir o metanol em células de combustível diretas (Jiang; Wieckowski, 2012). Seu mercado global atingiu US\$ 620 milhões em 2019, com projeções de crescimento contínuo (Chen; Liu; Wu, 2020).

A produção tradicional envolve a hidrólise do formato de metila, mas depende de combustíveis fósseis, levantando desafios ambientais (Chen *et al.*, 2023). Por isso, a utilização de biomassa como matéria-prima tem ganhado destaque, reduzindo a dependência de catalisadores metálicos e aumentando a sustentabilidade do processo. Inicialmente, o interesse concentrou-se na conversão de carboidratos simples, mas expandiu-se para a lignocelulose e microalgas, com avanços significativos em processos hidrotermais, eletrocatalise e fotocatalise para maximizar a eficiência da conversão (Chen *et al.*, 2023).

A fermentação microbiana surge como alternativa sustentável, com bactérias como *Clostridium ljungdahlii* e fungos *Aspergillus* spp. demonstrando eficiência na conversão de  $\text{CO}_2$  e resíduos lignocelulósicos em ácido fórmico (Chen; Santoso; Lin, 2022).

No entanto, a recuperação do ácido fórmico ainda apresenta desafios técnicos e econômicos. Os métodos convencionais, embora eficazes, são dispendiosos e ambientalmente impactantes. Novas abordagens como o uso de solventes eutéticos profundos (DES) têm mostrado maior eficiência na extração e purificação, reduzindo o impacto ambiental

do processo. Além disso, melhorias na engenharia de processos e a diversificação das matérias-primas, incluindo algas e resíduos agrícolas, podem impulsionar a viabilidade econômica da produção sustentável de ácido fórmico (Ojo, 2023).

## Aplicações industriais dos ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos se destacam na indústria por suas múltiplas propriedades e aplicações. Suas principais utilizações estão nos setores de alimentos, agricultura, energia e cosméticos.

Os ácidos orgânicos também podem ser empregados na nutrição animal; por exemplo, Calaça *et al.* (2019), 2019 avaliaram um composto comercial de ácidos orgânicos adicionado à ração de frangos de corte para o controle de *Salmonella*. Após alguns testes, os autores verificaram que os ácidos orgânicos misturados à ração ajudaram no controle das bactérias e na saúde intestinal dos animais.

No trabalho desenvolvido por Freire *et al.* (2021), é ressaltada a importância dos biofertilizantes aplicados em lavouras, que auxiliam no crescimento das plantas, resultando em maior produtividade e menor uso de defensivos agrícolas. Além disso, os biofertilizantes contribuem para a redução de custos das lavouras, permitindo o uso reduzido de fertilizantes químicos.

Outra aplicação relevante dos ácidos orgânicos na agricultura é seu uso como bioestimulantes, substâncias naturais que promovem o crescimento vegetal, aumentam a eficiência do uso de nutrientes e melhoram a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos. Compostos como o ácido húmico, cítrico, málico e derivados de resíduos agroindustriais vêm sendo amplamente estudados por seus efeitos positivos no desenvolvimento de culturas agrícolas, atuando

de forma análoga a fitormônios em diversos processos fisiológicos (Canellas *et al.*, 2022; Hadavi; Ghazijahani, 2022).

Esses bioestimulantes também são formulados a partir de resíduos da indústria alimentícia e agrícola, o que favorece a circularidade e a redução do uso de insumos químicos convencionais (Thakur; Shyam; Ramawat, 2022). Além disso, a aplicação de bioestimulantes à base de substâncias húmicas demonstrou incrementos de até 200% na produção de biomassa em cultivos como mandioca e quiabo, mesmo em solos de baixa fertilidade (Canellas *et al.*, 2022).

Na indústria alimentícia, os ácidos orgânicos também exercem funções fundamentais como conservantes naturais, regulando o pH dos produtos e inibindo o crescimento microbiano. Compostos como o ácido acético, láctico e cítrico são amplamente utilizados para prolongar a vida útil de alimentos e intensificar seu sabor, sendo reconhecidos por sua eficácia e segurança. Freiburger (2016) avaliou o efeito de uma mistura comercial de ácidos orgânicos em linguiças curadas, cozidas e embaladas a vácuo por 90 dias. Comparando amostras tratadas e não tratadas, analisou-se pH e bactérias lácticas para medir a qualidade. Após o período, 41,3% das linguiças tratadas ainda estavam próprias para consumo, contra apenas 7,6% das não tratadas.

## Avanços Tecnológicos e Sustentabilidade

A utilização de diferentes ácidos orgânicos, substituindo produtos derivados de compostos finitos, está ganhando visibilidade entre os mais diversos consumidores. A conscientização sobre esse tema torna a busca por produtos com selo verde mais procurada, e a preocupação com o planeta e o cuidado com suas reservas torna-se mais evidente.

Assim, os ácidos orgânicos são utilizados como matéria-prima para a produção de novos materiais e produtos já conhecidos, promovendo alternativas sustentáveis para diversos setores industriais. A utilização desses ácidos possibilita o desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais, contribuindo para uma economia mais verde e circular (Martínez-Burgos *et al.*, 2025).

Outra importante função dos ácidos orgânicos está relacionada à sua capacidade de mitigação de incrustações. Muitos ácidos orgânicos possuem propriedades quelantes, ou seja, a capacidade de se ligar a metais presentes em tubulações e outros sistemas, formando compostos solúveis que evitam ou reduzem o acúmulo de resíduos (Liu *et al.*, 2024).

Esse efeito é particularmente importante em sistemas industriais e domésticos que utilizam água rica em sais minerais, como sistemas de caldeiras e tubulações de água. A quelação evita bloqueios e corrosões, prolongando a vida útil dos equipamentos e reduzindo custos de manutenção (Deyab; Mohsen, 2025).

Além disso, os ácidos orgânicos desempenham um papel significativo na biodegradação de compostos petroquímicos. A biodegradação do petróleo está relacionada às condições geoquímicas e geológicas, em que microrganismos utilizam os hidrogênios dos hidrocarbonetos para produzir ácidos orgânicos (Ajjam, 2025).

Sob condições específicas, como a presença de água e oxigênio, essa transformação pode ser acelerada, resultando em compostos menos poluentes e mais facilmente degradáveis no ambiente. Entretanto, se o processo ocorrer de forma descontrolada, pode impactar negativamente o refino, reduzindo a eficiência e aumentando os custos de processamento do petróleo (Nissar *et al.*, 2025).

Os ácidos orgânicos desempenham papéis essenciais em biotecnologia e química verde, sendo utilizados como precursores na produção de bioplásticos, solventes ecológicos e produtos farmacêuticos. Exemplos incluem o ácido láctico na produção de ácido polilático (PLA) e o ácido succínico, empregados na fabricação de polímeros e produtos químicos de alto valor agregado. Essas aplicações representam um avanço no desenvolvimento de materiais biodegradáveis e sustentáveis, contribuindo para a redução da dependência de recursos não renováveis (García *et al.*, 2022).

Em um contexto mais amplo, o uso de ácidos orgânicos em processos industriais e ambientais ressalta sua versatilidade e importância para a transição rumo a práticas mais sustentáveis. Desde o tratamento de águas residuais, passando pela agricultura, até a produção de energia limpa, os ácidos

orgânicos oferecem soluções inovadoras para os desafios globais de sustentabilidade (Luukkonen *et al.*, 2015; Sindhu; Sehrawat; Glick, 2022).

A Tabela I exemplifica como diferentes ácidos orgânicos podem ser aplicados na criação de materiais inovadores, contribuindo para a sustentabilidade e reduzindo a dependência de recursos não renováveis.

Considerações Finais

Os ácidos orgânicos configuram-se como compostos estratégicos na transição para uma economia de base bio-renovável, devido à sua versatilidade funcional e à crescente possibilidade de produção sustentável. Além de sua ampla aplicabilidade em setores como alimentos, biopolímeros, agricultura e farmacêutica, esses metabólitos apresentam

Tabela I- Exemplos de alguns ácidos orgânicos utilizados como matéria-prima para a produção de novos materiais e produtos

| Ácido Orgânico   | Novos Materiais/Produtos                                  | Setores de Aplicação                | Benefícios Sustentáveis                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Ácido Láctico    | Ácido Polilático (PLA), bioplásticos, solventes verdes    | Embalagens biodegradáveis, medicina | Biodegradabilidade, redução de resíduos plásticos                             |
| Ácido Succínico  | Resinas, poliésteres, solventes, polímeros biodegradáveis | Indústria química, plásticos        | Substituição de derivados do petróleo                                         |
| Ácido Acético    | Acetato de vinila, adesivos, solventes                    | Químico, construção, alimentício    | Redução do impacto ambiental na produção industrial                           |
| Ácido Cítrico    | Detergentes, aditivos alimentares, cosméticos             | Alimentício, farmacêutico, limpeza  | Uso de fontes renováveis e biodegradabilidade                                 |
| Ácido Fumárico   | Resinas alquídicas, plastificantes, acidulantes           | Alimentos, químico                  | Produção a partir de biomassa lignocelulósica                                 |
| Ácido Propiônico | Conservantes, plásticos derivados de celulose             | Alimentício, químico                | Redução do uso de conservantes sintéticos                                     |
| Ácido Butírico   | Biocombustíveis, bioplásticos                             | Energia, indústria química          | Alternativa sustentável aos combustíveis fósseis                              |
| Ácido Húmico     | Biofertilizantes, condicionadores de solo                 | Agricultura                         | Redução no uso de fertilizantes sintéticos e aumento da produtividade do solo |
| Ácido Capróico   | Aditivos alimentares, biocombustíveis                     | Alimentício, energia                | Uso de resíduos orgânicos como matéria-prima                                  |

alto valor agregado e podem ser obtidos por meio de processos biotecnológicos ambientalmente mais compatíveis que as rotas químicas convencionais baseadas em derivados fósseis.

A produção de ácidos orgânicos a partir de substratos residuais agroindustriais, como lignocelulose, efluentes da indústria sucroalcooleira, resíduos da fruticultura, laticínios e outros subprodutos orgânicos, tem sido amplamente estudada como uma alternativa viável para reduzir custos operacionais e impactos ambientais. As tecnologias biotecnológicas, como a fermentação microbiana, a acidogênese anaeróbia e a utilização de consórcios microbianos adaptativos, demonstram elevada eficiência na conversão desses resíduos em ácidos com alto valor agregado, como o ácido láctico, cítrico, succínico e itacônico.

Esses avanços viabilizam a integração dos ácidos orgânicos em modelos de biorrefinarias circulares, em que fluxos de carbono são otimizados e resíduos agroindustriais são valorizados como matérias-primas. Dessa forma, os ácidos orgânicos não apenas desempenham um papel central como insumos industriais, mas também se posicionam como elementos fundamentais no desenvolvimento de cadeias produtivas mais sustentáveis, resilientes e alinhadas aos princípios da economia circular e da bioeconomia de baixo carbono.

Portanto, a consolidação da produção biotecnológica de ácidos orgânicos, a partir de fontes de baixo custo e resíduos agroindustriais, representa um vetor promissor para o fortalecimento de uma bioeconomia de baixo carbono, fomentando a inovação tecnológica e promovendo soluções ambientais mais responsáveis em escala industrial.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES – Código de Financiamento 001 e a FAPERGS.

## REFERÊNCIAS

- ABEDI, E.; HASHEMI, S. M. B. Lactic acid production – producing microorganisms and substrates sources-state of art. **Heliyon**, v. 6, n. 10, e04974, 2020.
- AGLER, M. T.; WRENN, B. A.; ZINDER, S. H.; ANGENENT, L. T. Waste to bioproduct conversion with undefined mixed cultures: the carboxylate platform. **Trends in biotechnology**, v. 29, n. 2, p. 70-78, 2011.
- AI, B.; CHI, X.; MENG, J.; SHENG, Z.; ZHENG, L.; ZHENG, X.; LI, J. Consolidated bioprocessing for butyric acid production from rice straw with undefined mixed culture. **Frontiers in microbiology**, v. 7, p. 1648, 2016.
- AJJAM, S. Bioremediation of petrol engine oil contaminated soils with pyoverdine from *Pseudomonas putida*. **Physical Sciences, Life Science and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 10, 2025.
- ALBUQUERQUE, M. G. E.; MARTINO, V.; POLLET, E.; AVÉROUS, L.; REIS, M. A. M. Mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from volatile fatty acid (VFA)-rich streams: effect

of substrate composition and feeding regime on PHA productivity, composition and properties.

**Journal of biotechnology**, v. 151, n. 1, p. 66-76, 2011.

ALVES, A. A. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1126255/1/S-VAZ-Aproveitamento-de-resi769duos-agroindustriais.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

AMENAGHAWON, A. N.; AYERE, J. E.; AMUNE, U. O.; OTUYA, I. C.; ABUGA, E. C.; ANYALEWECHI, C. L.; OKORO, O. V.; OKOLIE, J. A.; OYEFOLU, P. K.; ESHIEMOGIE, S. O.; OSAHON, B. E.; OMEDE, M.; ESHIEMOGIE, S. A.; IGMHOKHAI, S.; OKEDI, M. O.; KUSUMA, H. S.; MUOJAMA, O. E.; SHAVANDI, A.; DARMOKOESOEMO, H. A comprehensive review of recent advances in the applications and biosynthesis of oxalic acid from bio-derived substrates. **Environmental Research**, v. 251, Pt. 2, p. 118703, 2024.

ANIELAK, A. M.; ŚWIDERSKA-DĄBROWSKA, R.; ŁOMIŃSKA-PLĄTEK, D.; DĄBROWSKI, T.; PIASKOWSKI, K. Methods for obtaining humus substances: advantages and disadvantages. **Applied Sciences**, v. 15, n. 5, p. 2463, 2025.

ANGENENT, L. T.; RICHTER, H.; BUCKEL, W.; SPIRITO, C. M.; STEINBUSCH, K. J. J.; PLUGGE, C. M.; STRIK, D. P. B. T. B.; GROOTSCHOLTEN, T. I. M.; BUISMAN, C. J. N.; HAMELERS, H. V. M. Chain elongation with reactor microbiomes: open-culture biotechnology to produce biochemicals. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 6, p. 2796-2810, 2016.

BORYCKA-KICIAK, K.; BANASIEWICZ, T.; RYDZEWSKA, G. Butyric acid—a well-known molecule revisited. **Gastroenterology Review/Przegląd Gastroenterologiczny**, v. 12, n. 2, p. 83-89, 2017.

BULUSHEV, D. A.; ROSS, J. R. H. Towards sustainable production of formic acid. **ChemSusChem**, v. 11, p. 821-836, 2018.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1, p. 3-41, 2014.

CAM, A.; TURAN, M. D. Iron removal from bauxite by oxalic acid and further Al extraction by high-pressure alkali leaching. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 9, p. 710-722, 2023.

CAMARGO, B. R.; BRAGA, S. C.; PACHECO, T. F.; MENDES, T. D.; SALUM, T. F. C.; GONÇALVES, S. B.; DAMASO, M. C. T. **Produção de ácido cítrico por fungos filamentosos a partir de glicerina bruta, coproduto do biodiesel**. In: 7º CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE BIODIESEL, Florianópolis, SC, 2019.

CAO, N.; DU, J.; GONG, C. S.; TSAO, G. T. Simultaneous production and recovery of fumaric acid from immobilized *Rhizopus oryzae* with a rotary biofilm contactor and an adsorption column. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, p. 2926-2931, 1996.

CANELLAS, L. P.; CANELLAS, N. O. A.; DA SILVA, R. M.; SPACCINI, R.; MOTA, G. P.; OLIVARES, F. L. Biostimulants using humic substances and plant-growth-promoting bacteria: effects on cassava (*Manihot esculentus*) and okra (*Abelmoschus esculentus*) yield. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 80, 2022.

CANGANELLA, F.; WIEGEL, J. Continuous cultivation of *Clostridium thermobutyricum* in a rotary fermentor system. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 1, p. 7-13, 2000.

CARDOSO, T. S.; LIMA, L. S.; BANDEIRA, M. S. F.; LEITE, A. B.; BANDEIRA, M. L. S. F. Ácidos húmicos e fúlvicos em perfil sedimentar aquático e sua interação com metais tóxicos: uma revisão da literatura. **Peer Review**, v. 5, n. 17, p. 256-272, 2023.

CARDOSO DE MAGALHÃES, A. P.; SILVA, T. F.; ANDRADE, W. T. B. O uso da Valeriana officinalis no tratamento do transtorno de ansiedade: uma revisão integrativa. **Ciências da Saúde, Psicologia**, v. 27, n. 128, p. 23-11, 2023.

- CARMO, E. G. S.; CAVALHEIRO, D.; SEHN, G. A. R.; MORONI, L. S.; RIGO, E.; AMARAL, A. M. P.; CANOVA, M. T.; SANTOS, J. V. P.; DALAN, P. A.; AMORIM, E. M. **Impacto do ácido cítrico na vida útil de linguiça fresca embalada a vácuo sob refrigeração**. 33<sup>o</sup> SIC UDESC, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2023.
- CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. C. Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. **Série Produtor Rural**, n. 58, p. 48, 2015.
- CASCONE, R. Biobutanol – a replacement for bioethanol? **Journal of Chemical Engineering Progress**, v. 104, 2008.
- CAVALCANTE, W. de A.; LEITÃO, R. C.; GEHRING, T. A.; ANGENENT, L. T.; SANTAELLA, S. T. Anaerobic fermentation for n-caproic acid production: a review. **Process Biochemistry**, v. 54, p. 106-119, 2017.
- CHAUHAN, S.; MITRA, S.; YADAV, M.; KUMAR, A. Microbial production of lactic acid using organic waste as low-cost substrates. **Physical Sciences Reviews**, v. 9, n. 2, p. 875-889, 2024.
- CHEMICALBOOK. Caproic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_en.aspx?kwd=Caproic%20Acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_en.aspx?kwd=Caproic%20Acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Citric acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=Citric%20acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=Citric%20acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Formic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=formic%20acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=formic%20acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Fumaric acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=Fumaric%20Acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=Fumaric%20Acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Lactic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=lactic%20acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=lactic%20acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Oxalic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_en.aspx?kwd=Oxalic%20Acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_en.aspx?kwd=Oxalic%20Acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Propionic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=Propionic%20acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=Propionic%20acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Succinic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=succinic%20acid](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=succinic%20acid). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMICALBOOK. Xylonic acid – Chemical Structure. Disponível em: [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB91481414.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB91481414.htm). Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEMSPIDER. Acetic acid. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <https://www.chemspider.com/Chemical-Structure.171.html>. Acesso em: 26 maio 2025.
- CHEN, T. Y.; SANTOSO, S. P.; LIN, S. P. Using formic acid to promote bacterial cellulose production and analysis of its material properties for food packaging applications. **Fermentation**, v. 8, n. 11, p. 608, 2022.
- CHEN, X.; LIU, Y.; WU, J. Sustainable production of formic acid from biomass and carbon dioxide. **Molecular Catalysis**, v. 483, 2020.
- CHEN, X.; WU, J.; SONG, W.; ZHANG, L.; WANG, H.; LIU, L. Fumaric acid production by *Torulopsis glabrata*: engineering the urea cycle and the purine nucleotide cycle. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 112, p. 156-167, 2015.
- CHEN, X.; ZHU, P.; LIU, L. Modular optimization of multi-gene pathways for fumarate production. **Metabolic Engineering**, v. 33, p. 76–85, 2016.

CHEN, Y.; YANG, Y.; LIU, X.; SHI, X.; WANG, C.; ZHONG, H.; JIN, F. Sustainable production of formic acid and acetic acid from biomass. **Molecular Catalysis** v. 545, p. 113199, 2023.

CHEUNG, H.; TANKE, R. S.; TORRENCE, G. P. **Acetic Acid**. In: ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY; GERHARTZ, W.; SCHULZ, G. (Eds.). VCH: New York, NY, USA, 2012.

CHOI, K.; JEON, B. S.; KIM, B.C.; OH, M.K.; UM, Y.; SANG, B.I. In situ biphasic extractive fermentation for hexanoic acid production from sucrose by *Megasphaera elsdenii* NCIMB 702410. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 171, p. 1094-1107, 2013.

CLAUDINO, T. M. **Aspectos produtivos, morfológicos e tecnológicos de variedades de cana-de-açúcar tratadas com ácido fúlvico isolado**. (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade Estadual Paulista, 2021.

COUTO, S. R.; SANROMÁN, M. A. Application of solid-state fermentation to food industry-a review. **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 291-302, 2006.

CUNHA, M. F.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA, D. F.; GAMBETA, R.; PACHECO, T. F.; MENDES, T. D.; RODRIGUES, D. Síntese enzimática de ácido xilônico utilizando glicose oxidase. **Embrapa Agroenergia**, 2020.

DANIEL, A. M.; E. A. M. Extração de ácido cítrico. **Patente dos EUA** 5.426.220, 1995.

DEMMELMAYER, P.; STEINER, L.; WEBER, H.; KIENBERGER, M. Thymol-menthol-based deep eutectic solvent as a modifier in reactive liquid-liquid extraction of carboxylic acids from pretreated sweet sorghum silage press juice. **Separation and Purification Technology**, v. 310, p. 123060, 2023.

DEYAB, M. A.; MOHSEN, Q. Studies on the effects of avocado extract on carbon steel resistance to corrosion in salty formation water. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 3098, 2025.

DILTZ, R. A.; MAROLLA, T. V.; HENLEY, M. V.; LI, L. Reverse osmosis processing of organic model compounds and fermentation broths. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 686-695, 2007.

DIN, N. A. S.; LIM, S. J.; MASKAT, M. Y.; MUTALIB, S. A.; ZAINI, N. A. M. Lactic acid separation and recovery from fermentation broth by ion-exchange resin: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, v.8, n. 1, p. 31, 2021.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3-14, 2015.

DWIDAR, M.; PARK, J.Y.; MITCHELL, R. J.; SANG, B.I. The future of butyric acid in industry. **The Scientific World Journal**, v. 2012, n. 1, p. 471417, 2012.

EMBRAPA. **Produção de ácido xilônico por leveduras**. Embrapa Agroenergia, 2022.

EUROPEAN BIOSTIMULANTS INDUSTRY COUNCIL - EBIC. **2012**. Disponível em: <http://www.biostimulants.eu/>.

FISHERSCIENTIFIC. Ácido butírico. Fisher Scientific Espanha. Disponível em: <https://www.fishersci.es/es/es/browse/80013710/%C3%A1cido-but%C3%ADrico?page=1>. Acesso em: 26 maio 2025.

FU, H.; YANG, S.-T.; WANG, M.; WANG, J.; TANG, I.-C. Butyric acid production from lignocellulosic biomass hydrolysates by engineered *Clostridium tyrobutyricum* overexpressing xylose catabolism genes for glucose and xylose co-utilization. **Bioresource Technology**, v. 234, p. 389-396, 2017.

FREIBERGER, M. B. **Uso de ácidos orgânicos na conservação de linguiças curadas, cozidas e embaladas a vácuo**. 2016. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

- FREIRE, C. F. M.; FERREIRA, J. B.; MOREIRA, J. G. do V.; NASCIMENTO, L. de O.; ARAÚJO, R. I. S. de. Esterco Avícola Como Alternativa De Adubação De Plantio Na Cultura De Milho. **Engenharias, Ciências Exatas e da Terra: Pesquisas Básicas e Aplicadas**, p. 38-55, 2021.
- GAFFNEY, J. S.; MARLEY, N. A.; CLARK, S. B. **Humic and fulvic acids and organic colloidal materials in the environment**. 1996.
- GARCÍA-DEPRAECT, O.; LEBRERO, R.; RODRIGUEZ-VEGA, S.; BÖRNER, R. A.; BÖRNER, T.; MUÑOZ, R. Production of volatile fatty acids (VFAs) from five commercial bioplastics via acidogenic fermentation. **Bioresource Technology**, v. 360, p. 127655, 2022.
- GBI RESEARCH. **Acetic acid: Global market to 2020. Surge in VAM and PTA sectors in Asia-Pacific to drive global demand**. Disponível em: <http://www.gbiresearch.com/report-store/market-reports/archive/acetic-acidglobal-market-to-2020-surge-in-vam-and-pta-sectors-in-asia-pacific-to-drive-global-demand>. Acesso em: 27 fev.2025.
- GE, S.; USACK, J. G.; SPIRITO, C. M.; ANGENENT, L. T. Long-term n-caproic acid production from yeast-fermentation beer in an anaerobic bioreactor with continuous product extraction. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 13, p. 8012-8021, 2015.
- GERAHDT DE SOUZA, D.; TINOCO DE SIQUEIRA FILHO, A.; CASTRO MANHAES, F.; NERES NORBERG, A.; VILLACORTA JUNIOR, H. Àcido fulvico: um potencial terapeutico em doenças cardiovasculares. **Múltiplos Acessos**, v. 7, n. 1, p. 58-66, 2022.
- GONZALEZ-GARCIA, R.; MCCUBBIN, T.; NAVONE, L.; STOWERS, C.; NIELSEN, L.; MARCELLIN, E. Microbial Propionic Acid Production. **Fermentation**, v. 3, n. 2, p. 21, 2017.
- GOMES, J. G. F.; SILVA, L. W. M. A.; ANDRADE, W. T. B.; GOMES, A. K. M. D.; MAGALHÃES, C. R. S. M.; MESQUITA, R. S. Ácido Valerênico e seu potencial ansiolítico por meio da interação com receptores do tipo GABAA: um estudo in silico. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, 2021.
- GRAZ, M.; RUMINOWICZ-STEFANIUK, M.; JAROSZ-WILKOŁAZKA, A. Oxalic acid degradation in wood-rotting fungi: Searching for a new source of oxalate oxidase. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, p. 1-9, 2023.
- GUIDONI, L.L.C.; BITTENCOURT, G.; MARQUES, R.V.; CORRÊA, L.B.; CORRÊA, E.K. Compostagem domiciliar: implantação e avaliação do processo. **Tecno-Lógica**, v.17, n.1, p. 44-51, 2013.
- HADAVI, E.; GHAZIJAHANI, N. Simple organic acids as plant biostimulants. *In*: Biostimulants: Exploring Sources and Applications. **Singapore: Springer**. p. 71-105, 2022.
- HAZRA, B.; DAS, K.; BANERJEE, T. Pharmacological properties of valeric acid: An anxiolytic, anticonvulsant, and analgesic agent. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 12, n. 6, p. 45-53, 2022.
- HE, G. Q.; KONG, Q.; CHEN, Q. H.; RUAN, H. Batch and fed-batch production of butyric acid by *Clostridium butyricum* ZJUCB. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE B**, v. 6, n. 11, p. 1076-1080, 2005.
- HU, Y.; ZHANG, T.; HU, M.; CHEN, J.; LIU, C.; GU, L.; HE, Q.; LI, L. Effect of capsaicin on anaerobic lactic acid production from food waste. **Chemical Engineering Journal**, v. 507, p. 160638, 2025.
- HUAN, L.; RUIRUI, S.; YUE, L.; TING, Z.; LI, D.; FANG, W.; TIANWEI, T. Genetic manipulation of *Escherichia coli* central carbon metabolism for efficient production of fumaric acid, **Bioresour. Technol.**, 270, 96-102, 2018.

- HÜLBER-BEYER, E.; BÉLAFI-BAKO, K.; NEMESTOTHY, N. Low-waste fermentation-derived organic acid production by bipolar membrane electrodialysis—an overview. **Chemical Papers**, v. 75, p. 5223-5234, 2021.
- HYOHAK, C.; LEE, S. Y. Production of succinic acid by bacterial fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 36, p. 352-361, 2006.
- ILICA, R. A.; KLOETZER, L.; GALACTION, A. I.; CASCAVAL, D. Fumaric acid: production and separation. **Biotechnology Letters**, v. 41, p. 47-57, 2019.
- INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS (IBRC). **Utilização de xilose para a produção de ácido láctico por isolados de *Weizmannia* sp. e abordagem da evolução adaptativa laboratorial**. Unesp, 2023.
- JABALQUINTO, A. M.; GONZÁLEZ-NILO, F. D.; LAIVENIEKS, M.; CABEZAS, M.; ZEIKUS, J. G.; CARDEMIL, E. *Anaerobiospirillum succiniciproducens* phosphoenolpyruvate carboxykinase. Mutagenesis at metal site 1. **Biochimie**, v. 86, n. 1, p. 47-51, 2004.
- JEON, B. S.; KIM, B.C.; UM, Y.; SANG, B.I. Production of hexanoic acid from D-galactitol by a newly isolated *Clostridium* sp. BS-1. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 88, p. 1161-1167, 2010.
- JIANG, J.; WIECKOWSKI, A. Prospective direct formate fuel cell. **Electrochemistry Communications**, v. 18, p. 41-43, 2012.
- JIANG, L. Butyric acid: applications and recent advances in its bioproduction. **Biotechnology advances**, v. 36, n. 8, p. 2101-2117, 2018.
- JIANG, L. Production of butyric acid from glucose and xylose with immobilized cells of *Clostridium tyrobutyricum* in a fibrous-bed bioreactor. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 160, p. 350-359, 2010.
- JIN, D.; MA, J.; LI, Y.; JIAO, G.; LIU, K.; SUN, S.; ZHOU, J.; SUN, R. Development of the synthesis and applications of xylonic acid: A mini-review. **Fuel**, v. 314, p. 122773, 2022.
- KAITWADE, N. Oxalic Acid Market: an Analysis of the Oxalic Market by Grade, Application, End-Use and Region. **Future Market Insights**, 2023.
- KAGLIWAL, L. D.; SURVASE, S. A.; SINGHAL, R. S.; GRANSTROM, T. Wheat flour based propionic acid fermentation: an economic approach. **Bioresource Technology**, v. 129, p. 694-699, 2013.
- KATKAT, A. V.; CELIK, H.; TURAN, M. A.; MURAT, A. Effects of soil and foliar applications of humic substances on dry weight and mineral nutrients uptake of wheat under cal-careous soil conditions. **J. Basic Appl. Sci.** v.3, n.2, p.1266-1273, 2009.
- KUMAR, A.; THAKUR, A.; PANESAR, P. S. Lactic acid and its separation and purification techniques: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 18, n. 4, p. 823-853, 2019.
- LEE, J.-M.; UPARE, P. P.; CHANG, J.-S.; HWANG, Y. K.; LEE, J. H.; HWANG, D. W.; HONG, D.-Y.; LEE, S. H.; JEONG, M.-G.; KIM, Y. D.; KWON, Y.-U. Direct Hydrogenation of Biomass-Derived Butyric Acid to n-Butanol over a Ruthenium–Tin Bimetallic Catalyst. **ChemSusChem**, v. 7, n. 11, p. 2998-3001, 2014.
- LI, N.; ZHANG, B.; WANG, Z.; TANG, Y. J.; CHEN, T.; ZHAO, X. Engineering *Escherichia coli* for fumaric acid production from glycerol. **Bioresource Technology**, v. 174, p. 81-87, 2014.
- LI, P.; LIU, C.; LUO, Y.; SHI, H.; LI, Q.; PINCHU, C.; LI, X.; YANG, J.; FAN, W. Oxalate in plants: metabolism, function, regulation, and application. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, p. 16037-16049, 2022.

- LI, X.; ZHANG, W.; MA, L.; LAI, S.; ZHAO, S.; CHEN, Y.; LIU, Y. Improved production of propionic acid driven by hydrolyzed liquid containing high concentration of l-lactic acid from co-fermentation of food waste and sludge. **Bioresour. Technol.** 220, p. 523-529, 2016.
- LIU, J.; HUANG, L.; XIE, W.; KUO, J.; BUYUKADA, M.; EVRENDILEK, F. Characterizing and optimizing (co-) pyrolysis as a function of different feedstocks, atmospheres, blend ratios, and heating rates. **Bioresource Technology**, v. 277, p. 104-116, 2019.
- LIU, T.; HUANG, J.; LI, J.; WANG, K.; GUO, Z.; WU, H.; YANG, S.; LI, H. Heterogeneous photocatalysis for biomass valorization to organic acids. **Green Chemistry**, v. 25, n. 24, p. 10338-10365, 2023.
- LIU, Y.; CHEN, F.; WANG, Z.; LI, H.; WU, Y. Organic compounds as scale inhibitors. In: Industrial Scale Inhibition. **Wiley**, p. 206-224, 2024.
- LOPEZ-GÓMEZ, J.P.; PÉREZ-RIVERO, C.; VENUS, J. Valorisation of solid biowastes: the lactic acid alternative. **Process Biochem.** 99, p. 222-235, 2020b.
- LOPEZ-PORFIRI, P.; GONZALEZ-MIQUEL, M. Green solvent selection guide for recovery of bio-based organic acids. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, p. 8958-8969, 2020.
- LUO, J.; FENG, L.; CHEN, Y.; SUN, H.; SHEN, Q.; LI, X.; CHEN, H. Alkyl polyglucose enhancing propionic acid enriched short-chain fatty acids production during anaerobic treatment of waste activated sludge and mechanisms. **Water Research**, v. 73, p. 332-341, 2015.
- LUUKKONEN, T.; HEYNINCK, T.; RÄMÖ, J.; LASSI, U. Comparison of organic peracids in wastewater treatment: disinfection, oxidation and corrosion. **Water Research**, v. 85, p. 275-285, 2015.
- LV, B. Y.; XING, M. Y.; YANG, J.; QI, W. S.; LU, Y. S. Chemical and spectroscopic characterization of water extractable organic matter during vermicomposting of cattle dung. **Bioresource Technology**, v. 132, p. 320-326, 2013.
- LV, Y.; YU, Q.; HAN, J.; DING, Z.; ZHANG, X.; XU, Y. An effective method for the direct crystallization of xylonic acid from fermentation broth of agricultural residue hydrolysate. **Industrial Crops and Products**, v. 207, Part 1, 117704, 2024.
- MAGALHÃES, N.; CAVALCANTE, A. V.; ANDRADE, L. S.; WANDERLEY, C. R. P.; MARINHO, G.; PESSOA, K. A. R. Produção de ácido cítrico por *Aspergillus niger* AN 400 a partir de resíduo agroindustrial. **Eng Sanit Ambient**, v.24, p. 101-107, 2019.
- MAITI, S.; GHOSH, S.; DEY, P. Valerian-derived compounds and their therapeutic potential in neurological disorders. **Neurochemical Research**, v. 46, n. 3, p. 589-605, 2021.
- MARIS, A. J. A. V.; KONINGS, W. N.; DIJKEN, J. P. V.; PRONK, J. T. Microbial export of lactic and 3-hydroxypropanoic acid: implications for industrial fermentation processes. **Metabolic Engineering**, v. 6, p. 245-255, 2004.
- MARTÍNEZ-BURGOS, W. J.; ZWIERCHECZEWSKI DE OLIVEIRA, P.; DE OLIVEIRA, J.; BARROS, R.; RODRIGUES, C. Production of Organic Acids from Food Waste. **Sustainable Technologies for Food Waste Management**. p.151-168, 2025.
- MAX, B.; SALGADO, J. M.; RODRÍGUEZ, N.; CORTÉS, S.; CONVERTI, A.; DOMÍNGUEZ, J. M. Biotechnological production of citric acid. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 41, p. 862-875, 2010.
- MONDALA, A. H. Direct fungal fermentation of lignocellulosic biomass into itaconic, fumaric, and malic acids: current and future prospects, **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 42, p. 487-506, 2015.

- MORALES-VERA, R.; CRAWFORD, J.; DOU, C.; BURA, R.; GUSTAFSON, R. Techno-Economic Analysis of Producing Glacial Acetic Acid from Poplar Biomass via Bioconversion. **Molecules**, v. 25, n. 18, p. 4328, 2020.
- MUNIZ, E.D.N.; MONTENEGRO, R.T.D.Q.; DA SILVA, D.N.; D'ALMEIDA, A.P.; GONÇALVES, L.R.B.; DE ALBUQUERQUE, T.L. Advances in Biotechnological Strategies for Sustainable Production of Non-Animal Proteins: Challenges, Innovations, and Applications. **Fermentation**, v. 10, p. 638, 2024.
- MUÑOZ-VILLA, A.; SÁENZ-GALINDO, A.; LÓPEZ-LÓPEZ, L.; CANTÚ-SIFUENTES, L.; BARAJAS-BERMÚDEZ, L. Ácido cítrico: compuesto interesante. **Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila**, v. 12, p. 18, 2014.
- NISAR, N.; FAREED, A.; NAQVI, S. T. A.; ZEB, B. S.; AMIN, B. A. Z.; KHURSHID, G. Z.; HABIBA. Biodegradation study of used engine oil by free and immobilized cells of the *Pseudomonas oleovorans* strain NMA and their growth kinetics. **ACS Omega**, v. 10, n. 1, p. 541-549, 2025.
- OJO, A. O. An Overview of Lignocellulose and Its Biotechnological Importance in High-Value Product Production. **Fermentation**, v. 9, n. 11, p. 990, 2023.
- OSWALD, F.; STOLL, I. K.; ZWICK, M.; HERBIG, S.; SAUER, J.; BOUKIS, N.; NEUMANN, A. Formic acid formation by *Clostridium ljungdahlii* at elevated pressures of carbon dioxide and hydrogen. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 6, p. 6, 2018.
- PAPADAKI, A.; ANDROUTSOPOULOS, N.; PATSALOU, M.; KOUTINAS, M.; KOPSAHELIS, N.; CASTRO, A.; PAPANIKOLAOU, S.; KOUTINAS, A. Biotechnological production of fumaric acid: the effect of morphology of *rhizopus arrhizus* NRRL 2582, **Fermentation**, v. 3, n. 3, p. 33, 2017.
- PAPADOPOULOU, E.; GONZALEZ, M. C.; REIF, D.; AHMED, A.; TSAPEKOS, P.; ANGELIDAKI, I.; HARASEK, M. Separation of lactic acid from fermented residual resources using membrane technology. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 110881, 2023.
- PÉREZ-LABRADA, F.; MENDOZA, A. B.; VALDEZ-AGUILAR, L. A.; ROBLEDO-TORRES, V. Citric acid in the nutrient solution increases the mineral absorption in potted tomato grown in calcareous soil. **Pakistan Journal of Botany**, v. 48, n. 1, p. 67-74, 2016.
- PRATTO, B.; DOS SANTOS-ROCHA, M. S. R.; LONGATI, A. A.; DE SOUSA JUNIOR, R.; CRUZ, A. J. G. Experimental optimization and techno-economic analysis of bioethanol production by simultaneous saccharification and fermentation process using sugarcane straw. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122494, 2020.
- QIAN, X. Y.; SHEN, G. X.; WANG, Z. Q.; GUO, C. X.; LIU, Y. Q.; LEI, Z. F.; ZHANG, Z. Y. Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system. **Waste Management**, v. 34, p. 530-535, 2014.
- RASOOL, G.; IRFAN, M. The role of microbial diversity in lignocellulosic biomass degradation: a biotechnological perspective. **Journal Name**, v. 11, n. 3, p. 613-635, 2024.
- RISCALDATI, E.; MORESI, M.; FEDERICI, F.; PETRUCCIOLI, M. Direct ammonium fumarate production by *Rhizopus arrhizus* under phosphorous limitation. **Biotechnology Letters**, v. 22, p. 1043-1047, 2000.
- ROUQUETTE, L. M. J.; PETRANIKOVA, M.; VIECELI, N. Complete and selective recovery of lithium from EV lithium-ion batteries: modeling and optimization using oxalic acid as a leaching agent. **Separation and Purification Technology**, v. 320, p. 2023.
- SABRA, W.; DIETZ, D.; ZENG, A. P. Substrate-limited co-culture for efficient production of

- propionic acid from flour hydrolysate. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, p. 5771-5777, 2013.
- SCHULER, E.; DEMETRIOU, M.; SHIJU, N. R.; GRUTER, G. J. M. Towards sustainable oxalic acid from CO<sub>2</sub> and biomass. **ChemSusChem**, v. 14, p. 3636-3664, 2021.
- SCOPEL, E.; CONTI, P. P.; DALMASCHIO, C. J.; DA SILVEIRA, V. C. Extração de Ácido Cítrico do Limão e sua Utilização para a Remoção da Dureza da Água: Um Método Alternativo para Aulas de Química. **Rev. Virtual Quím.** v. 9, n. 3, 2017.
- SENESI, N.; LOFFREDO, R. The chemistry of soil organic matter. In: **Soil Physical Chemistry**, p. 239-370. 2. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999.
- SERHAN, M.; MATTAR, J.; DEBS, L. Concentrated yogurt (Labneh) made of a mixture of goats' and cows' milk: Physicochemical, microbiological and sensory analysis. **Small Ruminant Research**, v. 138, p. 46-52, 2016.
- SINDHU, S. S.; SEHRAWAT, A.; GLICK, B. R. The involvement of organic acids in soil fertility, plant health and environmental sustainability. **Archives of Microbiology**, v. 204, p. 720, 2022.
- SON, J.; JOO, J. C.; BARITUGO, K. A.; JEONG, S.; LEE, J. Y.; LIM, H. J.; LIM, S. H.; YOO, J. I.; PARK, S. J. Consolidated microbial production of four-, five-, and six-carbon organic acids from crop residues: current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 351, 127001, 2022.
- SHIKALGAR, T. S.; NAIKWADE, N. S. Cardioprotective effect of fulvic acid on doxorubicin induced cardiac oxidative stress in rats. **Shikalgar and Naikwade, IJPSR**, v. 9, n. 8, p. 3264-3273, 2018a.
- SHOW, P. L.; OLADELE, K. O.; SIEW, Q. Y.; ZAKRY, F. A. A.; LAN, J. C. W.; LING, T. C. Overview of Citric Acid Production from *Aspergillus Niger*. **Frontiers in Life Science**, v. 8, p. 271-283, 2015.
- SOARES, J. D. R.; REZENDE, R. A. L.; REZENDE, R. M.; BOTREL, E. P.; CARVALHO, A. M. Compostagem de resíduos agrícolas: uma fonte de matéria húmica. **Scientia Agraria Paranaensis – Sci. Agrar. Paraná**, v. 4, p. 414-421, 2017.
- SOBUŚ, N.; CZEKAJ, I. Catalytic transformation of biomass-derived hemicellulose sugars by the one-pot method into oxalic, lactic, and levulinic acids using a homogeneous H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> catalyst. **Catalysts**, v. 13, p. 349, 2023.
- SON, J.; JOO, J. C.; BARITUGO, K. A.; JEONG, S.; LEE, J. Y.; LIM, H. J.; LIM, S. H.; YOO, J. I.; PARK, S. J. Consolidated microbial production of four-, five-, and six-carbon organic acids from crop residues: current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 351, 127001, 2022.
- SONG, H.; LEE, S. Y. Production of succinic acid by bacterial fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 39, p. 352-361, 2006.
- SONG, L.; YANG, D.; LIU, R.; LIU, S.; DAI, L.; DAI, X. Microbial production of lactic acid from food waste: Latest advances, limits, and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 345, p. 126052, 2022.
- SPIRITO, C. M.; RICHTER, H.; RABAEY, K.; STAMS, A. J. M.; ANGENENT, L. T. Chain elongation in anaerobic reactor microbiomes to recover resources from waste. **Current opinion in biotechnology**, v. 27, p. 115-122, 2014.
- STAVARACHE, C. E.; KHOSRAVI, A.; MARIN, M. M.; PANDELE-CUSU, J.; LAZAR, S. E.; PAPA, F.; FRUTH, V.; CULITA, D.; CRISTEA, N. I.; KARAKOULIA, S.; TRIANTAFYLIDIS, K.; VERZIU, M. N. Catalytic synthesis of lactic acid from cellulose over easily-prepared niobium-doped titania by solution combustion synthesis. **Biomass and Bioenergy**, v. 194, p. 107687, 2025.

- SUPRONOWICZ, W.; IGNATYEV, IA; LOLLI, G.; WOLF, A.; MLECZKO, L. Formic acid: a future bridge between the power and chemical industries. **Green Chemistry**, v. 17, p. 2904-2911, 2015.
- TAN, S. I.; LIU, Z.; TRAN, V. G.; MARTIN, T. A.; ZHAO, H. Issatchenkia orientalis as a platform organism for cost-effective production of organic acids. **Metabolic Engineering**, v. 89, p. 12-21, 2025.
- TANG, J.; HU, Z.; YANG, H.; PU, Y.; XIONG, Y.; CHEN, J.; LIU, R.; LI, T.; SHAH, F.; ABOMOHR, A. Enhancement of caproate production from food waste using biochar produced from agricultural wastes: a microbial perspective. **Industrial Crops and Products**, v. 221, p. 119401, 2024.
- THAUER, R. K.; JUNGERMANN, K.; HENNINGER, H.; WENNING, J.; DECKER, K. The energy metabolism of *Clostridium kluyveri*. **European Journal of Biochemistry**, v. 4, n. 2, p. 173-180, 1968.
- THAKUR, D.; SHYAM, V.; RAMAWAT, N. Biostimulants and their extraction from food and agro-based industries. **Singapore: Springer**, p. 177-192, 2022.
- THYGESEN, A.; TSAPEKOS, P.; ALVARADO-MORALES, M.; ANGELIDAKI, I. Valorization of municipal organic waste into purified lactic acid. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 125933, 2021.
- URBANCE, S. E.; POMETTO, A. L.; DISPIRITO, A. A.; DENLI, Y. Evaluation of succinic acid continuous and repeat-batch biofilm fermentation by *Actinobacillus succinogenes* using plastic composite support bioreactors. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 65, p. 664-670, 2004.
- VARRIALE, L.; ULBER, R. Biorrefinaria baseada em fungos: de recursos renováveis a ácidos orgânicos. **ChemBioEng Reviews**, v. 10, p. 272-292, 2023.
- WANG, L.; WANG, Q.; LI, Y.; LIN, H. Ultrasound-assisted chemical cleaning of polyvinylidene fluoride membrane fouled by lactic acid fermentation broth. **Desalination**, v. 326, p. 103-108, 2013.
- WANG, Y.; YANG, R.; ZHENG, J.; SHEN, Z.; XU, X. Exogenous foliar application of fulvic acid alleviate cadmium toxicity in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 167, p.10-19, 2019.
- WANG, Z.; JIN, Y.; YANG, S. T. High cell density propionic acid fermentation with an acid-tolerant strain of *Propionibacterium acidipropionici*. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 112, n. 3, p. 502-511, 2011.
- WASEWAR, K. L. Reactive extraction: an intensifying approach for carboxylic acid separation. **International Journal of Chemical Engineering and Applications**, v. 3, n. 4, p. 249, 2012.
- WEIMER, P. J.; NERDAHL, M.; BRANDL, D. J. Production of medium-chain volatile fatty acids by mixed ruminal microorganisms is enhanced by ethanol in co-culture with *Clostridium kluyveri*. **Bioresource technology**, v. 175, p. 97-101, 2015.
- WERSHAW, R. L.; PINCKNEY, D. J.; BOOKER, S. E. Chemical structure of húmico ácidos – parte 1, um modelo estrutural generalizado. **Journal of Research of the US Geological Survey**, v. 5, n. 5, p. 565-569, 1977.
- WIEGEL, J.; KUK, S.; KOHRING, G. W. *Clostridium thermobutyricum* sp. nov., a moderate thermophile isolated from a cellulolytic culture, that produces butyrate as the major product. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 39, n. 2, p. 199-204, 1989.
- WILLKE, T.; VORLOP, K. D. Biotechnological production of itaconic acid. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 56, p. 289-295, 2001.

- WINKLER, J.; GHOSH, S. Therapeutic Potential of Fulvic Acid in Chronic Inflammatory Diseases and Diabetes. **Journal of Diabetes Research**, v. 2018, p. 1-7, 2018.
- YANG, S.T.; ZHU, H.; LI, Y.; HONG, G. Continuous propionate production from whey permeate using a novel fibrous bed bioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 43, p. 1124-1130, 1994.
- YANG, H.; WANG, Z.; LIN, M.; YANG, S. T. Propionic acid production from soy molasses by *Propionibacterium acidipropionici*: fermentation kinetics and economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 1-9, 2018.
- YU, B.Y.; TSAI, C.C. Rigorous simulation and techno-economic analysis of a bio-jet-fuel intermediate production process with various integration strategies. **Chem. Eng. Res. Des.**, v. 159, p. 47-65, 2020..
- YU, S.; HUANG, D.; WEN, J.; LI, S.; CHEN, Y.; JIA, X. Metabolic profiling of a *Rhizopus oryzae* fumaric acid production mutant generated by femtosecond laser irradiation. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 610-615, 2012.
- ZEIKUS, J. G.; JAIN, M. K.; ELANKOVAN, P. Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 51, p. 545-552, 1999.
- ZHANG, B.; LI, J.; LIU, X.; BAO, J. Continuous simultaneous saccharification and co-fermentation (SSCF) for cellulosic L-lactic acid production. **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115527, 2022a.
- ZHANG, B.; LI, H.; WANG, S.; JUNEJO, S. A.; LIU, X.; HUANG, Q. In vitro starch digestion: mechanisms and kinetic models. In: WANG, S. (Ed.). Starch Structure, Functionality and Application in Foods. **Singapore: Springer**, p. 151-167, 2020.
- ZHANG, C.; YANG, H.; YANG, F.; MA, Y. Current progress on butyric acid production by fermentation. **Current microbiology**, v. 59, p. 656-663, 2009.
- ZHANG, C.; YANG, H.; YANG, F.; MA, Y. Medium-chain fatty acid production from thermal hydrolysed sludge without external electron donor supplementation. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128805, 2023.
- ZHANG, M. K.; HE, Z. L. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China. **Geoderma**, v. 118, p. 167-179, 2024.
- ZHAO, M.; WANG, Z.; DU, S.; SUN, L.; BAO, J.; HAO, J.; GE, G. *Lactobacillus plantarum* and propionic acid improve the fermentation quality of high-moisture amaranth silage by altering the microbial community composition. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022.
- ZHOU, S.; DING, N.; HAN, R.; DENG, Y. Metabolic engineering and fermentation optimization strategies for producing organic acids of the tricarboxylic acid cycle by microbial cell factories. **Bioresource Technology**, v. 379, p. 128986, 2023.
- ZHOU, T.; WANG, S.; ZHANG, W.; YIN, F.; CAO, Q.; LIAN, T.; DONG, H. Comparison of different aerobic sludge on enriching polyhydroxyalkanoate mixed microbial culture using lactic acid fermentation broth of agricultural wastes. **Chemical Engineering Journal**, v. 475, p. 146000, 2023a.
- ZHOU, X.; WANG, Y.; ZHANG, W. Biosynthesis and health benefits of valeric acid from *Valeriana officinalis*. **Phytochemistry Reviews**, v. 19, n. 4, p. 933-950, 2020.
- ZHOU, X.; XU, Y. Eco-friendly consolidated process for co-production of xylooligosaccharides and fermentable sugars using self-providing xylonic acid as key pretreatment catalyst. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2019.

ZHONG, Y.; GU, J.; SHANG, C.; DENG, J.; LIU, Y.; CUI, Z.; LU, X.; QI, Q. Sustainable succinic acid production from lignocellulosic hydrolysates by engineered strains of *Yarrowia lipolytica* at low pH. **Bioresource Technology**, v. 408, p. 131166, 2024.

ZIGOVA, J.; ŠTURDÍK, E. Advances in biotechnological production of butyric acid. **Journal of industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. 153-160, 2000.